

П-1556

23

ISSN 0502-823X

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

# УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ  
«ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ РЕГИСТРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ»  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОХИМИИ ИМ. А. Н. ФРУМКИНА

# УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том XXIII

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ  
И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ

Ответственный редактор  
член-корреспондент Академии наук СССР  
К. В. ЧИБИСОВ



МОСКВА  
«НАУКА»  
1985

П-1336 П104807  
Успехи научной  
фотографии. Т.23.  
М., 1985. 3-30.

П104807

В сборнике рассматриваются процессы химико-фотографической регистрации изображения в их взаимосвязи с проблемами оптических систем, создающих изображения. Обсуждаются свойства регистрирующих сред и систем с точки зрения их использования для регистрации определенной информации. Рассматриваются общие принципы построения и пути применения оптико-физических и оптико-электронных комплексов.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой различных регистрирующих систем, использующих светочувствительные материалы.

#### Редакционная коллегия:

члены-корреспонденты АН СССР К. В. ЧИБИСОВ (ответственный редактор),

М. В. АЛФИМОВ (зам. ответственного редактора),

доктора технических наук К. В. ВЕНДРОВСКИЙ, С. Г. ГРЕНИШИН,

М. М. МИРОШНИКОВ, В. И. ШЕБЕРСТОВ,

кандидат физико-математических наук Т. Д. СЛАВНОВА

(ответственный секретарь),

кандидаты технических наук В. Н. СИНЦОВ, Н. П. БЕРЕЗИН,

Е. Н. ПРИБЫЛОВА

Рецензенты: Ю. С. АНДРЕЕВ, А. В. ВАННИКОВ

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый читателю XXIII том сборника «Успехи научной фотографии» составлен по материалам Первой Всесоюзной конференции «Оптическое изображение и регистрирующие среды», проходившей 27—29 апреля 1982 г. в Ленинграде. Конференция была подготовлена и проведена Научными советами АН СССР по проблемам «Фотографические процессы регистрации информации» и «Оптика», Государственным оптическим институтом им. С. И. Вавилова и Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе.

В настоящий сборник включены доклады, представленные на пленарных заседаниях конференции. Эти доклады, в значительной своей части обзорные, охватывают следующие проблемы: формирование оптического изображения и математическое моделирование систем его регистрации и передачи; фотографическая регистрация изображения с помощью галогенсеребряных материалов, бессеребряных фотохимических и фотофизических регистрирующих сред; анализ оптических и оптоэлектронных изображающих систем и определение их предельных возможностей; обработка изображений цифровыми, оптическими и гибридными методами; критерии качества изображения; законы зрительного восприятия и визуальный анализ фотоснимков.

Перечисленные вопросы в совокупности определяют основную проблематику иконоики — науки об изображении. Представленные в данном сборнике материалы наглядно продемонстрировали, что в настоящему моменту эта область науки сформировалась как самостоятельное научное направление, изучающее общие законы формирования, регистрации, передачи, обработки и восприятия информации в виде оптического изображения.

Иконоика выросла из оптики и фотографии на основе общих положений кибернетики и теории информации и выделила в качестве объекта своего исследования наиболее существенные звенья процессов формирования изображений как таковых вне зависимости от того, каким конкретным способом они были получены.

Конференция отметила необходимость внедрения основных достижений и ускорения разработки стандартов в рассмотренной области, а также сосредоточения усилий на наиболее важных направлениях, таких, как разработка новых регистрирующих сред для конкретных областей применения, создание сенситометрических методов и аппаратуры для испытания бессеребряных регистрирующих сред, создание современных систем обработки изображений.

Предлагаемые в настоящем сборнике материалы достаточно полно отражают современный уровень отечественной науки в данной области.

# I. СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.397.612.632.7

М. М. Мирошников

## ИКОНИКА — НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

Под иконикой понимают научное направление, предметом исследований в котором является изображение — специфическая форма передачи и хранения информации.

Различные изображения издавна играли большую роль в повседневной жизни человека, науке и культуре. Неудивительно поэтому, что значительные усилия всегда были направлены на изучение изображений, способов их записи, закономерностей формирования и получения, а также на решение проблемы передачи изображений на большие расстояния. Так родились фотография, кинематография, телевидение и наиболее полная форма регистрации и последующего воспроизведения светового поля и содержащейся в нем информации о картине окружающего мира — голография.

По мере развития науки к исследованию изображений и их материальных носителей подключались представители различных направлений: специалисты, занимающиеся оптикой, фотографией, телевидением, а также физиологи, изучающие зрительный анализатор и психофизиологическое воздействие света. В ходе этих исследований настал момент, когда нужно было начать изучение изображений как таковых, вне зависимости от того, как они получены, а именно проникновение в их структуру и решение задачи извлечения максимальной информации.

Письменность, появившаяся позже изображений, с помощью которых еще первобытный человек обменивался информацией, давно имеет свою теоретическую надстройку — лингвистику. Роль соответствующей надстройки по отношению к изображениям призвано сыграть новое научное направление — иконика. Она зародилась в ходе развития оптики и фотографии и решительно заявила о себе в наше время, когда уже окрепла кибернетика и стал обычным единый подход к различным по характеру процессам с выделением в качестве объекта изучения общего для них существенного звена. В кибернетике таким звеном является управление, в иконике — изображение, понимаемое как форма передачи или хранения заключающейся в нем информации научного, технического и эстетического содержания.

Иконика как научное направление возникла около 15 лет назад на стыке наук, чтобы выработать общую точку зрения на изображение, методы его анализа, преобразования, частично регистрации, объединив усилия ученых разных научных направлений, имеющих дело с изображениями. Иконика не подменяет и не поглощает конкретные дисциплины, изучающие процессы образования оптического, фотографического, телевизионного, рентгеновского и других видов изображений. Для иконики важны само изображение и его свойства. Конечно, занимаясь изображением и используя результаты исследований в различных областях, насыщающих ее конкретными способами получения изображений, иконика может и должна оказывать определенное влияние на эти исследования, тесно взаимодействуя с ними и стимулируя оптимизацию процесса получения изображений.

Становление иконики связано с формированием новых взглядов на содержание, казалось бы, давно определенных понятий и задач. Например, до недавнего времени изображению отводили лишь роль либо объекта исследования, либо окончательного документа, фиксирующего результаты других исследований. В первом случае над изображением, полученным во время съемки,

осуществляют операции (вторичная обработка), которые призваны выявить его свойства или улучшить качество, устранить дефекты и т. п. Многочисленные примеры документирования результатов в форме изображения не нуждаются в дополнительных разъяснениях.

В рамках же иконики изображению придается более широкое толкование. Ему отводится не только пассивная, но и активная роль — роль оператора, совершающего преобразование над другими изображениями. Простейшие преобразования могут осуществлять, например, обыкновенные плоские прозрачные — также изображения, но определенным образом включенные в оптическую схему. Трактовка изображения как оператора позволяет надеяться, что его сущность может быть вскрыта в том числе и через свойства математических операторов, позволяющих рационально описать изображения и предложить методы их оптимального воспроизведения.

Первоначально иконика была определена только как «теория оптимальных систем воспроизведения изображений». Впоследствии под этим направлением понимали «комплекс методов и средств получения изображений, объединенных на единой методологической основе».

В 1976 г. В. Ф. Нестерук предложил определение иконики, наиболее полно отражающее ее специфику, принятое нами во всех дальнейших работах: иконика — это научное направление, изучающее общие свойства изображений, определяющее цели и задачи их преобразований, обработки и воспроизведения на основе всех возможных методов и средств.

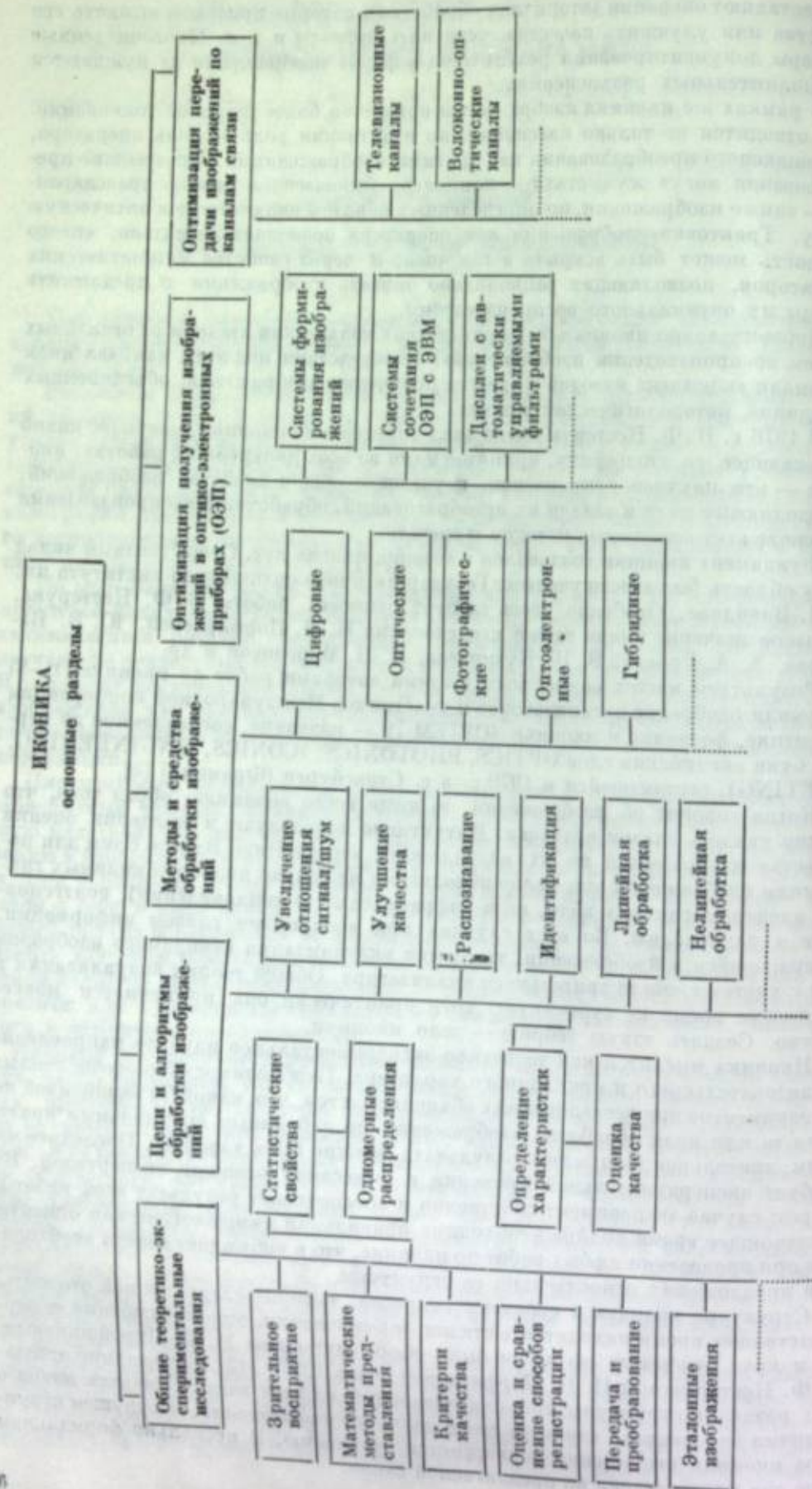
Фундамент иконики создавался в течение многих лет. Существенный вклад в эту область был внесен учеными Государственного оптического института им. С. И. Вавилова. Особенно здесь следует отметить работы В. Ф. Нестерука. Большое значение имели также исследования Н. Н. Порфирьевой, Ю. В. Баталова, А. А. Гурова, В. Н. Кузмичева, Н. П. Морозовой и др.

Результаты наших совместных с этими авторами работ по иконике [1—8] получили одобрение организаторов и участников Международной конференции по оптике, фотонике и иконике (OPIEM-79 — название, составленное из первых букв английских слов OPTICS, PHOTONICS, ICONICS, ENGINEERING, MEETING), состоявшейся в 1979 г. в г. Страсбурге (Франция) [9].

Когда говорят об изображении, то чаще всего возникает образ того, что можно увидеть глазом человека. Интуитивно используют и критерии оценки качества изображений по их визуальному восприятию. Вместе с тем для получения изображений уже давно используют не только диапазон видимых глазом электромагнитных волн, но и инфракрасные (в тепловидении), рентгеновские и радиоволны. Во всех случаях при восприятии глазом информации, содержащейся в изображении, требуется визуализация невидимого изображения с учетом свойств зрительного анализатора. Общей теории визуализации в настоящее время не существует, хотя практически она применяется повсеместно. Создать такую теорию — дело иконики.

Иконика мыслится как теоретико-экспериментальное научное направление исследовательского и прикладного характера. Необходимость многочисленных экспериментов при исследованиях объясняется тем, что, какой бы заманчивой ни была та или иная обработка изображений по избранным оптимальным критериям, зрительное восприятие результата должно быть хорошим. Последнее же требует экспериментальной проверки и вынесения решения экспертизой. Во втором случае эксперимент собственно и обеспечивает результат всей работы. В настоящее время крайне необходима правильная методологическая ориентация при проведении любых работ по иконике, что и побуждает внести необходимые предложения относительно ее структуры.

Структура иконики и перечень вопросов, которые следует к ней относить, в настоящее время находятся в стадии формирования, однако основные ее черты и круг решаемых ею задач были сформулированы М. М. Мирошниковым, В. Ф. Нестеруком и Н. Н. Порфирьевой еще в 1977 г. [2]. Содержание отдельных разделов структуры иконики позволяет, на наш взгляд, сделать вывод о наличии внутреннего единства этого научного направления. В будущем структура иконики несомненно подвергнется уточнению. В несколько формальном виде она представлена на предлагаемой схеме.



## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Многолетний опыт исследования свойств изображений, количественной оценки показателей их качества, преобразования линейными и нелинейными операторами и рассмотрение других задач показывают, что наибольший успех в теории и постановке экспериментов достигается в том случае, если при решении проблемы эффективно используются существенные для нее закономерности зрительного восприятия. Их учет особенно важен, когда оценку и обработку информации в форме изображений осуществляет человек. Чем полнее информация на изображениях согласована с ее зрительным восприятием, тем легче и точнее будет вынесено правильное решение.

Перечислим наиболее существенные для иконоики законы зрительного восприятия.

1. Закон контрастного восприятия света.
2. Закон формирования уровня адаптации.
3. Закон константности зрительного восприятия.
4. Закон зрительного восприятия сюжетного изображения.
5. Закон экстремальности зрительного восприятия информации (света или изображения).

Проявление каждого из перечисленных законов известно из физиологии зрения, психологии восприятия и повседневной практики использования изображения. Однако ранее они не были облечены в математическую форму, и, следовательно, не представлялось возможным установить их общую взаимосвязь и построить на этой основе теорию изучения изображений. Рассмотрим каждый закон в отдельности.

### Закон контрастного восприятия света

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что на всех уровнях зрительной системы человека восприятие света хорошо описывается S-образной зависимостью величины сигнала реакции  $U$  от логарифма внешнего светового воздействия  $L$  (рис. 1). Такой характер зависимости не может удовлетворительно аппроксимироваться известным законом Вебера — Фехнера, что неоднократно отмечалось в исследованиях по физиологии зрения.

В работе [7] предлагается формулировка дифференциального контрастного закона восприятия света, суть которого состоит в следующем. Пусть зрительная система сначала адаптирована к значению яркости  $L_j$ , а затем яркость принимает произвольное значение  $L_i$ . Тогда в зрительной системе возникает сигнал реакции  $U_i$ , пропорциональный обобщенному контрасту  $K_{ij}$ , т. е.

$$U_i = U_j + U^* K_{ij},$$

где  $U^*$  — половина расстояния между асимптотами S-образной кривой на рис. 1;  $U_j$  — ордината центра S-образной кривой.

Определить обобщенный контраст  $K_{ij} = u_{ij} = (U_i - U_j)/U^*$ , являющийся, по существу, нормированным сигналом реакции, можно, исходя из следующих рассуждений.

Если физиологический объект находится в состоянии адаптации под воздействием стимула  $L_j$  и переходит в другое состояние под воздействием стимула  $L_i$ , то в силу принципа причинности новое состояние будет зависеть от предыдущего и, следовательно, производную нормированного сигнала реакции  $u_{ij}$ , т. е.  $du_{ij}/dx$ , где  $x = \ln(L_i/L_j)$ , нужно отыскивать как функцию самой величины  $u_{ij}$ .

В результате анализа природы зрительного восприятия информации можно получить дифференциальное уравнение

$$du_{ij}/dx = \gamma(1 - u_{ij}^2),$$

где  $\gamma$  — параметр, характеризующий физиологический уровень восприятия реакции (на сетчатке, в коре головного мозга, на уровне психофизиологиче-

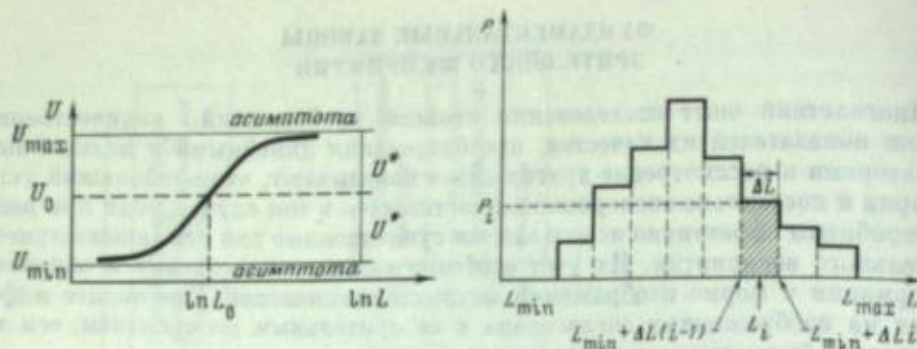


Рис. 1. Экспериментальная зависимость сигнала реакции зрительной системы  $U$  от логарифма внешнего светового воздействия  $L$

Рис. 2. Гистограмма распределения яркости  
Заштрихована ячейка  $i$  гистограммы

ской реакции), который указывает на то, что скорость нарастания нормированного сигнала реакции уменьшается пропорционально его квадрату, т. е. имеет место процесс с квадратичным торможением.

Решение дифференциального уравнения имеет вид

$$u_{ij} = \frac{U_i - U_j}{U^*} = \frac{L_i^{2\gamma} - L_j^{2\gamma}}{L_i^{2\gamma} + L_j^{2\gamma}},$$

в чем легко можно убедиться, вычислив  $du_{ij}/dL_i$  и имея в виду, что  $dx/dL_i = 1/L_i$ .

Таким образом, величина сигнала реакции по отношению к заданному уровню адаптации пропорциональна обобщенному контрасту внешних световых воздействий  $K_{ij} = u_{ij} (L_i^{2\gamma} - L_j^{2\gamma}) / (L_i^{2\gamma} + L_j^{2\gamma})$ , т. е.

$$U_i = U_j + U^* \frac{L_i^{2\gamma} - L_j^{2\gamma}}{L_i^{2\gamma} + L_j^{2\gamma}}.$$

При  $\gamma = 0,5$  формула обобщенного контраста имеет наиболее простой вид:

$$K_{ij} = \frac{L_i - L_j}{L_i + L_j}.$$

Разложение функции  $K_{ij}$  в ряд по степеням  $x = \ln(L_i/L_j)$  показывает, что закон контрастного восприятия света включает в себя закон Вебера—Фехнера в качестве первого приближения:

$$K_{ij} = 1/2 \gamma \ln \frac{L_i}{L_j} - 1/3 \left( \frac{\gamma}{2} \ln \frac{L_i}{L_j} \right)^3 + \dots$$

### Закон формирования уровня адаптации

В процессе восприятия сюжетного изображения (картины) зрительная система человека осуществляет сканирование, благодаря которому на ее центральные и периферические отделы воздействует световой поток от всех элементов изображения, создавая на сетчатке глаза среднюю освещенность, пропорциональную средней яркости изображения  $L_0$ , вычислить которую можно следующим образом.

Абстрагируемся от смыслового содержания изображения и будем рассматривать просто набор яркостей его отдельных элементов (гриделей — элементов сетки или матрицы). Если считать их случайными и независимыми, то исчерпывающей характеристикой изображения является функция распределения или плотность распределения вероятности. В случае дискретных выборок,

получаемых при матричном представлении изображения (МПИ), можно построить гистограмму (рис. 2), отложив по оси абсцисс значения яркости отдельных элементов матрицы  $L$  от  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  с шагом  $\Delta L = (L_{\max} - L_{\min})/m$ , где  $m$  — общее число интервалов округления (разрядов) или общее число ячеек гистограммы на оси абсцисс. По оси ординат отложим относительную частоту («частоту») или выборочную вероятность попадания значений  $L$  в ячейку гистограммы с номером  $i$ , т. е.  $P_i = N_i/N$ , где  $N$  — общее число элементов матрицы;  $N_i$  — абсолютная частота;  $i$  — число элементов матрицы, значения яркости в которых находятся в интервале от  $L_{\min} + \Delta L(i-1)$  до  $L_{\min} + \Delta L i$ , и, следовательно, попадают в ячейку гистограммы с номером  $i$ .

Если по оси ординат при построении гистограммы отложить относительные значения  $P_i = P_i/\Delta L = N_i/N\Delta L$ , то общая площадь гистограммы равна единице, и в этом случае гистограмма является аналогом графика плотности вероятности теоретического распределения  $p(L)$ . Статистическим аналогом функции распределения  $F(L)$  является накопленная частота, которую легко вычислить для вариационного и статистического рядов по обычным правилам.

Среднее значение яркости  $L_0$ , являющееся функцией яркости отдельных элементов матрицы изображения, т. е.  $L(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N)$ , определяется начальным моментом первого порядка или математическим ожиданием, равным  $\sum_{i=1}^m P_i L_i$ , где значение  $L_i$  соответствует середине ячейки гистограммы (разряда) с номером  $i$  и приписывается всем значениям яркости, попавшим в эту ячейку, т. е.

$$L_i = \frac{L_{\min} + \Delta L(i-1) + L_{\min} + \Delta L i}{2} = L_{\min} + \Delta L(i + 0,5).$$

Следовательно,

$$L_0(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N) = \sum_{i=1}^m P_i L_i.$$

Очевидно, что  $L_0$  является однородной функцией первой степени набора значений  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_N$ , т. е. для любого  $\kappa > 0$  имеем тождество

$$L_0(\kappa L_1, \kappa L_2, \kappa L_3, \dots, \kappa L_N) = \kappa L_0(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N).$$

Это означает, что имеет место эффект увеличения (усиления) яркости каждого элемента изображения (яркости изображения объекта, например) в  $\kappa$  раз за счет увеличения средней яркости (освещенности) изображения.

### Закон константности зрительного восприятия

В физиологии зрения под константностью зрительного восприятия понимают тенденцию воспринимать объект наблюдения устойчивым и неизменным, несмотря на разнообразие внешних условий.

Следовательно, константность восприятия яркости и контраста изображения есть тенденция воспринимать их постоянными, несмотря на существенные изменения уровня адаптации — средней яркости или освещенности.

Если  $K(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N, L_0)$  — функция, определяющая контраст сюжетного изображения, подвергнутого дискретизации в виде МПИ, то из закона константности следует, что

$$K(\kappa L_1, \kappa L_2, \kappa L_3, \dots, \kappa L_N, \kappa L_0) = K(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N, L_0),$$

т. е. контраст представляет собой однородную функцию нулевой степени. Для таких функций справедливо выражение

$$K(L_1, L_2, L_3, \dots, L_N, L_0) = K_1(L_1/L_0, L_2/L_0, L_3/L_0, \dots, L_N/L_0).$$

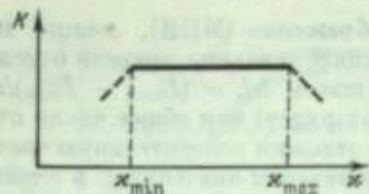


Рис. 3. Неизменность восприятия контраста изображения при изменении условий наблюдения (уровни адаптации)

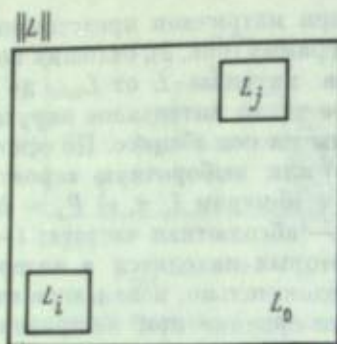


Рис. 4. Зрительное восприятие двухэлементного изображения

Следовательно, при зрительном восприятии изображения производится как бы отсчет значений яркостей отдельных элементов по отношению к  $L_0$  — уровню адаптации.

Любая величина  $\kappa L_i$  по отношению к  $L_i$  является усиленной ( $\kappa > 0$ ) или ослабленной ( $\kappa < 0$ ). При этом контраст в определенных пределах изменения  $\kappa$  не изменяется (рис. 3).

#### Закон зрительного восприятия сюжетного изображения

Найдем закон восприятия контраста элементарного (двухэлементного) изображения при уровне адаптации  $L_0$  (рис. 4).

Уравнение закона константности для этого случая имеет вид

$$K(\kappa L_i, \kappa L_j, \kappa L_0) = K_1 (L_i/L_0, L_j/L_0).$$

Каждая из пар набора значений  $L_i, L_j, L_0$  удовлетворяет закону контрастного восприятия света, т. е. обобщенные контрасты (нормированные сигналы реакции) равны

$$K_{i0} = \frac{L_i^{2\gamma} - L_0^{2\gamma}}{L_i^{2\gamma} + L_0^{2\gamma}}, \quad K_{j0} = \frac{L_j^{2\gamma} - L_0^{2\gamma}}{L_j^{2\gamma} + L_0^{2\gamma}}.$$

Воспринимаемый глазом контраст в процессе осмотра такого двухэлементного изображения можно найти по правилу сложения контрастов:

$$K_{ij0} = \frac{K_{i0} + K_{j0}}{1 + K_{i0}K_{j0}}.$$

Следовательно,

$$K_{ij0} = \frac{(L_i L_j)^{2\gamma} - (L_0^{2\gamma})^2}{(L_i L_j)^{2\gamma} + (L_0^{2\gamma})^2} = \frac{((L_i/L_0)(L_j/L_0))^{2\gamma} - 1}{((L_i/L_0)(L_j/L_0))^{2\gamma} + 1}.$$

Если  $2\gamma = 1$ , то

$$K_{ij0} = \frac{L_i L_j - L_0^2}{L_i L_j + L_0^2} = \frac{(L_i/L_0)(L_j/L_0) - 1}{(L_i/L_0)(L_j/L_0) + 1}.$$

Закон восприятия контраста двухэлементного изображения обладает многими замечательными свойствами. Одно из них сводится к тому, что формула закона симметрична относительно  $i$  и  $j$  —  $K_{ij0} = K_{jio}$ , т. е. знак контраста не изменяется при перестановке в пространстве элементов с яркостями  $L_i$  и  $L_j$ . Следовательно, при восприятии контраста зрительный механизм пространственной ориентации не участвует в процессе восприятия.

Для вычисления контраста сложного сюжетного изображения необходимо рассматривать всю совокупность пар точек  $L_i$  и  $L_j$  или соответствующих конт-

растов  $K_{i0}$  и  $K_{j0}$ . В результате может быть вычислен набор величин  $K_{ij0}$  и построена гистограмма плотности распределения  $p(K_{ij0})$ , определяющая вероятность того, что данное значение контраста  $K_{ij0}$  попадает в некоторый заранее определенный интервал контрастов. Очевидно, что набор величин  $K_{ij0}$  образует матрицу, состоящую из  $N^2$  элементов.

Выбирая в качестве числовой оценки контрастности сюжетного изображения  $K_c$  математическое ожидание, по гистограмме плотности распределения можно найти

$$K_c = \int_{-1}^{+1} |K_{ij0}| p(K_{ij0}) dK_{ij0}.$$

Расчет гистограммы  $p(K_{ij0})$  и контраста  $K_c$  требует значительного объема вычислений, т. е. удержания в памяти ЭЦВМ большого числа данных.

Для упрощения расчета можно в изображении выделить области одинаковой яркости — эквиденситные поля — и вычислить их контрасты по отношению к уровню адаптации  $L_0$ . В этом случае все эквиденситные точки (элементы МПИ) собирают вместе и полагают, что  $L_i = L_j = L_0, K_{i0} = K_{j0}, K_{ij0} = K_{iio}$ , т. е. вычисляют

$$K_{ij0} = K_{iio} = \frac{L^2 - L_0^2}{L^2 + L_0^2},$$

а для расчета контраста сюжетного изображения используют только гистограмму  $p(L_i) = p(L)$ , где  $L$  изменяется от 0 до  $\infty$ .

Этот контраст сюжетного изображения называется эквиденситным и обозначается  $K_{cs}$ . Он равен

$$K_{cs} = \int_0^{\infty} \left| \frac{L^2 - L_0^2}{L^2 + L_0^2} \right| p(L) dL.$$

На языке матричного представления о совокупности контрастов изображения вычисление  $K_{cs}$  означает усреднение лишь по главной диагонали матрицы.

#### Закон экстремальности зрительного восприятия информации (света или изображения)

Зрительное восприятие информации представляет собой случайный процесс, поскольку возбуждение светом активных нейронов происходит с вероятностью  $P(x)$ , где  $x = \ln(L/L_0)$ . Это означает, что число активных нейронов, т. е. находящихся в состоянии возбуждения и участвующих в формировании и передаче сигнала реакции, есть случайная величина, распределение которой можно считать биномиальным, так как нейрон находится лишь в двух состояниях: невозбужденном — статическом и возбужденном — динамическом.

Исходя из этих известных в физиологии положений, В. Ф. Нестерук и Н. Н. Порфирьева пришли к фундаментальному выводу, что закон контрастного восприятия света есть экстремаль вариационной задачи на максимум информации, получаемой зрительной системой о внешнем сигнале [8]. Рассмотрим ход их рассуждений.

Пусть случайное число возбужденных (активных) нейронов есть  $n$ , а его среднее значение  $\bar{n} = P(x)N$ , где  $N$  — общее число нейронов на данном уровне зрительной системы, а  $P(x)$  — вероятность их возбуждения.

Случайный сигнал возбуждения  $V(x)$  линейно зависит от числа активных нейронов

$$V(x) = An + A_0,$$

где  $A$  и  $A_0$  — постоянные коэффициенты.

Математическое ожидание и дисперсия сигнала возбуждения соответственно равны

$$\overline{V}(x) = ANP(x) + A_0,$$

$$\overline{V^2}(x) = A^2NP(x)[1 - P(x)].$$

Величина сигнала реакции равна среднему значению сигнала возбуждения, т. е.

$$U(x) = ANP(x) + A_0.$$

Вычислить постоянные  $A$  и  $A_0$  можно следующим образом.

Пусть  $P(x) = 1$ , тогда  $U(x) = U_{\max} = AN + A_0$ ; если же  $P(x) = 0$ , то  $U(x) = U_{\min} = A_0$ . Сопоставляя эти величины с параметрами S-образной кривой на рис. 1, найдем

$$U_0 = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} = \frac{AN}{2} + A_0, \quad U^* = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} = \frac{AN}{2}.$$

Следовательно, нормированный сигнал реакции

$$u(x) = \frac{U(x) - U_0}{U^*} = \frac{ANP(x) + A_0 - AN/2 - A_0}{(AN/2)} = 2P(x) - 1$$

полностью определяется вероятностью возбуждения нейрона  $P(x)$ .

С другой стороны, вся информация, получаемая зрительной системой о световом сигнале  $x = \ln(L/L_0)$ , содержится в сигнале реакции  $u(x)$ , и световой сигнал  $x$  можно рассматривать как случайную величину, которая с определенной вероятностью вызывает сигнал реакции  $u(x)$ . В этом смысле выражение

$$P(x) = \frac{u(x) + 1}{2}$$

представляет собой функцию распределения  $F(x)$  вероятности случайной величины  $x$ , т. е.

$$P(x) = F(x) = 1/2 [1 + u(x)].$$

Для того чтобы определить, при каком законе распределения  $F(x) = F^*(x)$  информация о световом сигнале  $x$ , содержащаяся в сигнале реакции  $u(x)$ , будет максимальной, нужно решить вариационную задачу на максимум информации, измеряемой энтропией по Шеннону,

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(x) \ln F^*(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

где плотность вероятности составит

$$p(x) = F^*(x) = dF(x)/dx.$$

Если предположить, что суммарная во всем диапазоне внешних воздействий дисперсия сигнала возбуждения равна заданному значению и конечна

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{V^2}(x) dx = \text{const} < \infty,$$

т. е.

$$A^2N \int_{-\infty}^{+\infty} F(x)[1 - F(x)] dx = A^2NQ = \text{const} < \infty,$$

где

$$Q = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x)[1 - F(x)] dx.$$

и потребность нормировки для функции распределения плотности вероятности составляет

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F'(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1,$$

где

$$p(x) = F'(x) = \frac{dP(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{u(x) + 1}{2} \right) = \frac{u'(x)}{2},$$

то вариационную задачу можно сформулировать в виде

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u'(x)}{2} \ln \frac{u'(x)}{2} dx = \text{extr}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u'(x)}{2} dx = 1,$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{u(x) + 1}{2} \right) \left[ 1 - \frac{u(x) + 1}{2} \right] dx = 1/4 \int_{-\infty}^{+\infty} [1 - u^2(x)] dx = Q.$$

Решив эту задачу, получим дифференциальное уравнение Эйлера

$$u'(x) = \frac{1}{2Q} [1 - u^2(x)] = \gamma [1 - u^2(x)],$$

где

$$\gamma = \frac{1}{2Q} = A^2 \frac{N}{2 \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{V^2}(x) dx}.$$

Это уравнение определяет закон зрительного восприятия в дифференциальной форме. При интегрировании уравнения получаем выражение для нормированного сигнала реакции, соответствующего максимуму информации о световом сигнале:

$$u_{\max}(L) = \frac{L^{2\gamma} - L_0^{2\gamma}}{L^{2\gamma} + L_0^{2\gamma}}.$$

Здесь  $\gamma$  — параметр, величина которого обратно пропорциональна суммарной дисперсии случайного сигнала возбуждения.

Совпадение полученного выражения с формулой закона контрастного восприятия света, выведенной на основании анализа экспериментальных данных, означает, что обработка светового сигнала зрительной системой по алгоритму обобщенного контраста обеспечивает максимум получаемой о нем информации.

Иначе говоря, восприятие света и изображения происходит при максимальном количестве информации по Шеннону.

Оптимальное распределение можно найти из соотношения

$$2F^*(L) - 1 = u_{\max}(L) = \frac{L^{2\gamma} - L_0^{2\gamma}}{L^{2\gamma} + L_0^{2\gamma}},$$

откуда

$$F^*(L) = \frac{L^{2\gamma}}{L^{2\gamma} + L_0^{2\gamma}} \text{ при } L > 0.$$

В реальных условиях восприятия излучения объектов и их изображений диапазон яркостей ограничен значениями  $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$  и, следовательно, значения  $x = \ln(L/L_0)$  будут ограничены диапазоном  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ . Более того, в силу ограниченности мгновенных значений яркости автоматически будет ограничена и их дисперсия. Если не требовать, чтобы она была равна заданному значению, то соотношение  $\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{V^2}(x) dx = \text{const} < \infty$  можно исключить из условий решения



вариационной задачи. Тогда остается лишь обязательным условие нормировки, принимающее вид

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u'(x)}{2} dx = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{u'(x)}{2} dx = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} p(x) dx = 1.$$

В этом случае, как было показано Шенноном, максимум энтропии обеспечивается равномерным распределением для  $x = \ln(L/L_0)$ . Производя пересчет на яркость, получаем достаточное экстремальное распределение в виде

$$F^*(L) = \frac{\ln(L/L_{\min})}{\ln(L_{\max}/L_{\min})},$$

или

$$p^*(L) = \frac{dF^*(L)}{dL} = \frac{1}{L \ln(L_{\max}/L_{\min})}.$$

Это распределение можно назвать логарифмически равномерным, или гиперболическим (по виду плотности распределения).

## ИКОНИКА И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

### Общий алгоритм обработки изображений

Понятие обработки оптического изображения в иконике рассматривают с двух взаимно дополняющих друг друга сторон: с одной стороны, изучение свойств изображений и объективная оценка их характеристик (качества), с другой — преобразование изображений в соответствии с поставленными целями обработки.

Обработку осуществляют по следующему общему алгоритму: исходное изображение → получение его характеристик → преобразование изображения → оценка его характеристик → объективное сравнение исходного и преобразованного изображения на основе сравнения их характеристик → визуальное сравнение и оценка качества изображения человеком (рис. 5).

Остановимся сначала на звеньях этого алгоритма, а затем на методах их реализации.

Пусть  $L$  — исходное сюжетное черно-белое квадратное по форме изображение (фотография, термограмма и т. п.), на котором отмечены два элемента с яркостями  $L_i$  и  $L_j$ . Всего элементов  $N = n \times n$ .

Процедура обработки состоит в том, что сначала исходное изображение  $L$  подвергают вычислительной обработке для получения гистограммы, контрастно-частотных и других характеристик, а также числовых параметров качества. Этим оно паспортизируется. Затем осуществляют обработку изображения оператором  $\Phi(L) = L'$  для получения нового, более качественного изображения или подчеркивания тех или иных деталей. Оно паспортизируется тем же порядком.

Схема, представленная на рис. 5, предусматривает объективное и визуальное сравнение качества исходного и обработанного изображений. Логика обработки изображений имеет многоплановый характер, требующий для своей реализации одновременного привлечения результатов ряда разделов иконики. Самое главное состоит в том, что иконика открывает возможности разработать всю процедуру обработки с единых позиций, на основе ее самых общих законов, описывающих зрительное восприятие.

### Оценка качества (паспортизация) изображения

Вопрос о качестве изображений издавна является одним из наиболее дискуссионных. Попытка определить качество оптического изображения аналогично тому, как это делается при оценке качества электрических и акустических сигналов, т. е. по количеству содержащейся в нем информации, не всегда приводит



Рис. 5. Общий алгоритм обработки изображений

к желаемым результатам, по-видимому, главным образом в связи с психофизиологическим характером восприятия изображения.

Наиболее широко распространено определение качества изображения, основанное на его идентичности объекту: изображение тем более качественно, чем оно более подобно объекту. С учетом определения значительное число работ по качеству изображений посвящено изучению различий между объектом и изображением.

Между объектом и изображением, создаваемым линейной оптической системой, существует соотношение свертки, в соответствии с которым распределение освещенности в изображении  $E(x, y)$  связано с распределением яркости в объекте  $L(x, y)$  и функцией рассеяния объектива  $h(x, y)$  известной формулой

$$E(x, y) = \pi T_0 \sin^2 \sigma_A' L(x, y) \otimes h(x, y),$$

или

$$E(x, y) = \pi T_0 \sin^2 \sigma_A' \iint_{-\infty}^{+\infty} L(x_1, y_1) h(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1.$$

По этой формуле можно, казалось бы, всегда найти объект по его изображению, если известна функция рассеяния (аппаратная функция). Однако здесь существуют непреодолимые препятствия, на которые указал Слюсарев [10]. Дело в том, что сложность выражений для функций  $E(x, y)$  и  $h(x, y)$  не позволяет найти простые правила, указывающие, в каких случаях определенному  $E(x, y)$  соответствует одно-единственное распределение  $L(x, y)$ . Кроме того, если  $L(x, y)$  характеризуется спектром пространственных частот, диапазон которых превышает известный предел, его определение становится принципиально невозможным, так как число решений интегрального уравнения в этом случае бесконечно велико.

Это явление, впервые открытое Аббе для периодических когерентно освещенных структур, было затем распространено на случай любого освещения. Известен парадокс бесконечной разрешающей способности системы, реализуемой при восстановлении изображения двух одинаковых точечных некогерентных источников света (звезды Релея). Здесь объект может быть восстановлен единственным образом при любом расстоянии между точками путем соответствующей обработки результатов измерения, поскольку заранее известна его структура (две одинаковые точки), что налагает весьма существенное (и незаконное с точки зрения общей теории) ограничение. Естественный предел разрешения для звезд Релея определяется уровнем шума, а дискретный характер света устанавливает абсолютный минимум информации, заключенной в изображении с заранее неизвестной структурой.

Мы не будем подробно останавливаться на общих вопросах качества изображений. Заметим лишь, что нет сомнения в том, что целеустремленная обработка любого изображения может быть проведена только при условии достаточно полного представления об исходных характеристиках изображения, которые



Рис. 6. Паспортизация и оценка контраста сюжетного изображения

в целом определяют его качество. Получить такое представление, как правило, возможно лишь при проведении над изображением ряда экспериментов, так как обычно анализируемые изображения никак не паспортизируются. При этом нужно иметь соответствующие математические выражения оценок, алгоритмизировать их и реализовать с помощью вычислительной техники, т. е. произвести специфическую обработку изображения.

К настоящему времени полностью завершена разработка количественной оценки контраста сюжетных

изображений, являющегося их важнейшей характеристикой. Она базируется на двух положениях. Первое положение основано на оценке контрастов отдельных элементов изображения, второе — на законе восприятия контраста элементарного двухэлементного изображения. Контрастность является внутренним свойством изображения, для численного определения которого необходимо знание одномерных статистических характеристик — гистограмм контрастов или яркостей.

Действительно, для совокупности всех пар точек  $L_i$  и  $L_j$  (или контрастов  $K_{ij0}$  и  $K_{j0}$ ) может быть вычислен набор величин  $K_{ij0}$ , определяющих восприятие каждого двухэлементного изображения, и, следовательно, может быть построена гистограмма  $p(K_{ij0})$  — выборочное распределение  $K_{ij0}$ . Набор величин  $K_{ij0}$  образует вещественную симметричную матрицу  $n^2 \times n^2$  элементов.

Согласно изложенному выше, в качестве численной оценки контраста выбирают математическое ожидание, а на практике — его оценку по гистограмме  $p(K_{ij0})$ , т. е. величину

$$K_c = \int_{-1}^1 |K_{ij0}| p(K_{ij0}) dK_{ij0}.$$

Как видно, при вычислении  $K_c$  усреднение производят над всем полем чисел матрицы. При этом оказывается, что реализация расчета гистограммы и контраста составляет значительный объем вычислений.

Для сокращения времени и объема вычислений можно использовать методу вычисления среднего эквидиситных полей по отношению к уровню адаптации, расчет контраста  $K_{c0}$  которых дается формулой, приведенной выше. Эта методика состоит в следующем. При расчете контраста сюжетных изображений как среднего не используют одновременное варьирование величин  $i$  и  $j$ , но вычисляют контрасты каждого эквидиситного поля по отношению к  $L_0$ , т. е. полагают  $K_{i0} = K_{j0}$  (эквидиситные точки «собираются» вместе). Такой подход дает заведомо отличное значение контраста, но зато при расчете используется только гистограмма  $p(L)$ . Он оправдан уменьшением числа необходимых вычислительных операций на порядок и относительностью шкалы субъективного восприятия контраста.

Принципиальное различие методов расчета контраста по формулам для  $K_c$  и  $K_{c0}$  в том, что в них используются различные гистограммы. За основу принята формула для  $K_{c0}$ , по ней были рассчитаны значения контраста большого числа различных изображений и их преобразований. В качестве примера можно привести результаты расчета контраста термограмм аэро съемки с различными значениями  $K_{c0}$  (рис. 6).

## Линейные преобразования изображений

Преобразование изображений всегда осуществляется для достижения одной или нескольких определенных целей. Для большинства изображений — это прежде всего улучшение их качества, обеспечивающее максимальное подобие изображения. Могут быть поставлены и другие задачи, особенно в связи с разработкой автоматизированных устройств распознавания аномалий, идентификацией и т. п.

Построение операторов преобразования осуществляется на основе различных принципов: оптимальности зрительного восприятия, получения наперед заданной гистограммы яркостей, представления деталей изображения в полном динамическом диапазоне, выделения эквидиситных полей и т. д.

Общий алгоритм обработки изображений с помощью оператора преобразования  $\Phi(L) = L'$  включает в себя ряд последовательных линейных и нелинейных звеньев (рис. 7). Фактически любой нелинейной операции всегда сопутствует линейная из-за конечности считывающих апертур, дефокусировки и т. п. Поэтому в теоретическом отношении целесообразно изучение линейной обработки отделить от нелинейной. Кроме того, линейная обработка может быть реализована и самостоятельно, без нелинейных элементов, поэтому ее выделение в виде отдельного блока на рис. 7 вполне закономерно.

Собственно линейные преобразования были впервые применены для различных целей обработки изображений, особенно как фильтры нижних частот при наличии шумов. Они оптимальны по критерию минимума среднеквадратичной ошибки, если шумы гауссовские.

Оператор любого конкретного линейного преобразования выражается в виде свертки, преобразующей изображение по алгоритму:

$$L'_i = \sum_{j=1}^N h(i-j) L_j.$$

При этом множество функций рассеяния или импульсных функций  $h$  (ядра оператора) бесконечно. Следовательно, класс линейных преобразований содержит бесконечное число вариантов реализации по виду ядра и по значению его параметров.

Если допустимо пренебречь шумами, действие линейного фильтра на исходное изображение выражается в подавлении или подчеркивании низких или высоких частот и режекции. При наличии шумов основной задачей является фильтрация. Для анализа эффекта действия того или иного линейного фильтра на детали изображения или на подавление шумов, а также для выбора фильтра нужно знать двумерные пространственно-частотные спектры изображений, шумов и фильтров. Такие спектры трудно получать и расшифровывать. Поэтому обычно ограничиваются либо преобразованием стандартных изображений в виде периодических структур (мир), либо фильтрацией «фиксированных» искажений сюжетного изображения, вызванных, например, строчной структурой вследствие сканирования (рис. 8). В каждом из этих случаев параметры деталей мира или строчной структуры могут быть точно известны, что позволяет рассчитать и характеристики соответствующих фильтров.

Эксперименты по использованию линейной пространственной фильтрации для преобразования изображений периодических структур были выполнены еще в 1873 г. Аббе, а в 1906 г. Портером. В. П. Линник (1932), а затем Фрип Цернике (1935) предложили использовать принцип пространственной фильтрации для наблюдения прозрачных объектов (фазово-контрастный метод). В начале 50-х годов сотрудники Оптического института Парижского университета, и прежде всего его директор профессор Андре Марешаль, начали активно заниматься использованием когерентной пространственной фильтрации для улучшения качества фотографий. При когерентной обработке обычная фотография освещается когерентным светом и в плоскости ее фурье-образа осуществляется воздействие на спектр пространственных частот специальными фильтрами — масками, а затем преобразованное изображение вновь восстанавливается.

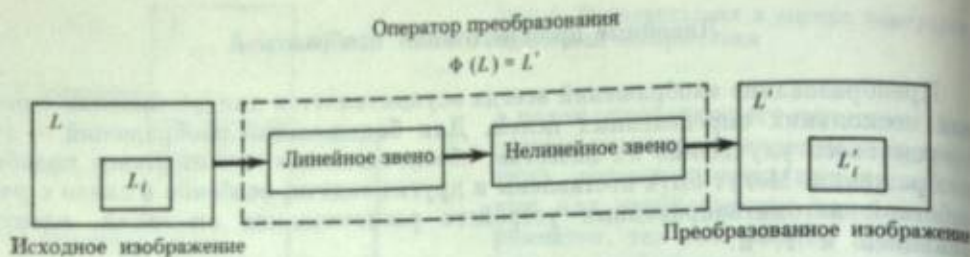


Рис. 7. Структура алгоритма обработки изображения

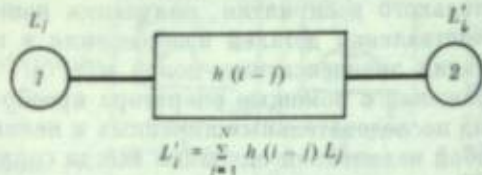


Рис. 8. Линейные преобразования  
1 — исходное изображение; 2 — преобразованное изображение

А. Маршалл и его сотрудники нашли множество различных способов улучшения качества фотографий: улучшение контраста небольших деталей за счет ослабления низкочастотных компонент спектра, устранение размытости с помощью фазовой пластинки, устранение периодической структуры в изображении и т. д. Однако, несмотря на успехи оптической обработки изображений, развитие этих методов длительное время сдерживалось практическими трудностями по созданию пространственных фильтров, способных одновременно изменять и амплитуды, и фазы на нужных частотах спектра.

Только в 1963 г., когда появились фильтры, записанные интерференционными методами (фильтры Ван дер Люгта), состоящие исключительно из поглощающих элементов, но позволяющие регулировать амплитуды и фазу передаточной функции, удалось преодолеть значительную часть ограничений методов оптической обработки. В частности, с помощью фильтра Ван дер Люгта можно осуществлять сложную линейную операцию согласованной фильтрации, обработку данных, полученных от радиолокаторов с синтетической апертурой, и т. д. Не вдаваясь в подробности этого метода, широко освещенного в литературе, отметим, что фильтры Ван дер Люгта, как и любые транспаранты, используемые при оптической обработке, довольно чувствительны к изменению масштаба и поворотам входного изображения. Поиск нужного положения фильтра среди различных масштабов и ориентаций представляет собой весьма трудоемкую операцию, однако для ряда задач по затратам времени и относительно простой аппаратуре методы когерентной обработки не имеют себе равных.

Обработка изображений на ЭВМ отличается немалыми возможностями в отношении универсальности, хотя порой ее ограничивает большой объем информации, содержащийся в изображении, а также значительные затраты времени. Основное принципиальное преимущество обработки изображений на ЭВМ, как уже указывалось, состоит в том, что к алгоритму обработки предъявляются лишь требования математической корректности. В частности, при обработке изображений на ЭВМ могут широко использоваться различные нелинейные преобразования.

### Нелинейные преобразования изображений

В общем случае нелинейные преобразования могут осуществляться на основе теории статистических решений, для чего нужны многомерные функции распределения всех элементов изображения, которые, как правило, неизвестны. Поэтому практически почти все нелинейные алгоритмы, описанные в литературе, введены эмпирически и при оценке их эффективности принималась в расчет лишь субъективная оценка улучшения качества изображений. Между тем, как выяснено в самое последнее время, для определенных классов нелинейных преобразований можно построить оптимальные алгоритмы, опираясь на экстремальные свойства законов зрительного восприятия. Очень важно, что

в классе статистических нелинейных преобразований удалось построить количественную оценку их эффективности по величине контраста.

Рассмотрим общее нелинейное преобразование изображения, заданного в виде матрицы  $\|L\|$ . Матричное описание учитывает дискретизацию при цифровой обработке изображений. Пусть  $\Phi(\cdot)$  — оператор преобразования, тогда в итоге получим новое изображение  $L'$  с матрицей

$$\|L'\| = \Phi(\|L\|).$$

Наиболее простым классом нелинейных преобразований являются стационарные безынерционные преобразования, т. е. такие, для которых любой элемент  $L'_i$  преобразованного изображения формируется по определенному (от индекса  $i$  не зависящему) закону из единственного элемента  $L_i$  изображения  $L$ , т. е.

$$L'_i = \Phi(L_i).$$

Здесь  $\Phi(\cdot)$  — одномерная функция — оператор преобразования.

Как видно, в этом случае осуществляется преобразование яркостей элементов (тоноперераспределение) по принципу «точка в точку».

Заметим, что из безынерционности вытекает неизменность сюжета изображения  $L'$  при изменении порядка нумерации отсчетов. На практике формирование  $L'$  идет в определенном порядке, согласно принятому закону сканирования при считывании и воспроизведении. В теории же это не играет роли и вместо сюжета можно рассматривать эквивалентное по тонораспределению изображение полутонового клина или гистограмму.

Выделим особо самое простое безынерционное преобразование — усиление (ослабление):

$$L'_i = \kappa L_i, \quad \kappa > 0.$$

Как уже отмечалось, при усилении контраст изображения не меняется, но зрительный эффект усиления может быть значительным, так как за счет усиления всегда можно добиться, чтобы основная часть значений яркости элементов оказалась в «рабочем» диапазоне зрительной системы. Операцию усиления можно осуществлять самостоятельно, но часто она сопутствует другим, более сложным преобразованиям. Важно понимать, что усиление влияет на статистические свойства изображений, так как при  $\kappa \neq 1$  изменяются параметры гистограмм.

Действительно, пусть  $p(L)$  — плотность распределения исходного изображения  $L$ , которое подвергается усилению, тогда плотность распределения преобразованного изображения  $L'$  составит

$$p_{L'}(L') = \frac{1}{\kappa} p_L\left(\frac{L'}{\kappa}\right),$$

что означает увеличение масштаба распределения яркости в сторону ее больших значений.

Вернемся к нелинейному стационарному безынерционному преобразованию (рис. 9). В принципе функция  $\Phi(\cdot)$  может совершенно не зависеть от свойств исходного и преобразованного изображений. В этом случае выбор  $\Phi(\cdot)$  должен производиться путем перебора многих функций для достижения какого-либо эффекта. Очевидно, такой путь может быть выбран для обработки одного-двух уникальных снимков, но не пригоден для сколько-нибудь широкого их класса. Преобразование должно отражать свойства изображений  $L$  и  $L'$ . Только тогда можно сознательно добиваться желаемого эффекта.

Прежде всего нужно использовать простые характеристики исходных изображений — их одномерные функции распределения  $F_i(L_i)$  или плотности распределения  $p_i(L_i)$ . Если это единственная характеристика исходного изображения, используемая в задаче, то естественно и преобразованное изображение  $L'$  характеризовать аналогичной функцией  $F_{L'}(L'_i)$  или  $p_{L'}(L'_i)$ .

Потребуем, чтобы оператор  $\Phi(\cdot)$  осуществлял преобразования тонораспределения, заданного функцией распределения  $F_L(L_i)$ , в желаемое распределение

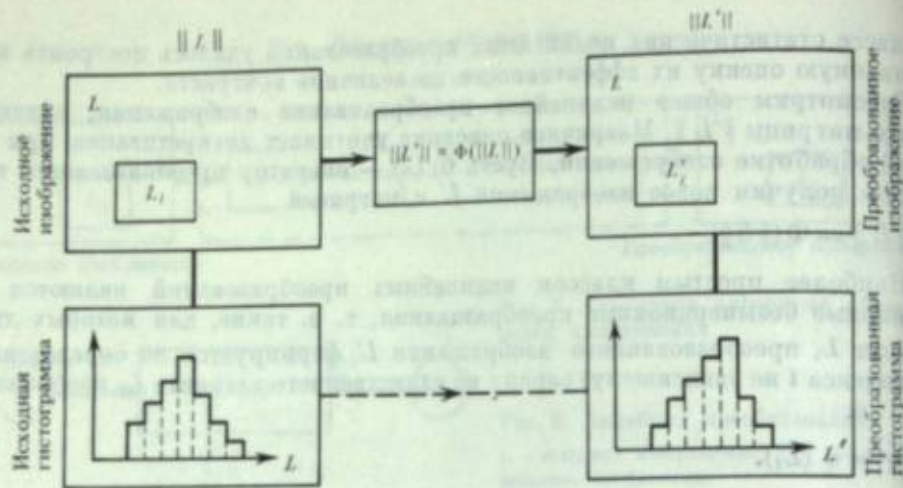


Рис. 9. Нелинейное безинерционное статистическое преобразование изображений  
 $L'_i = F_{L'}^{-1} [F_L(L_i)]$

$F_{L'}(L'_i)$ . Функции  $F_L(L_i)$  и  $F_{L'}(L'_i)$  — монотонные и принимают значения в одном и том же интервале от 0 до 1. Тогда, очевидно, всегда найдется пара таких значений  $L_i$  и  $L'_i$ , что будет выполняться равенство

$$F_{L'}(L'_i) = F_L(L_i).$$

Отсюда находим вид выражения оператора безинерционного преобразования, которое назовем статистическим:

$$L'_i = F_{L'}^{-1} [F_L(L_i)],$$

где  $F_{L'}^{-1}(\cdot)$  — обратная функция.

Ниже будут установлены замечательные свойства статистических преобразований, их роль при зрительном восприятии на основе его законов, вскрытые в ходе исследований. Но уже здесь подчеркнем, что до настоящего времени указанному классу преобразований изображений в целом не придавалось должного значения. Это отчасти объясняется тем, что применение таких преобразований не стимулировалось, так как в подавляющем большинстве классических и даже новейших руководств по теории вероятностей и математической статистике не излагалось соответствующее преобразование случайных величин. Нет о нем упоминания и в широко распространенных книгах по теории связи и статистической радиотехнике. Между тем сама идея лежит в основе теории информации, где одной из основных задач является статистическое согласование источника информации и канала связи путем перекодирования сигналов. В частном случае преобразование в равномерное распределение используется в методах Монте-Карло и было применено при обработке изображений.

#### Структура нелинейного статистического преобразования и его фундаментальное свойство

Рассмотрим структуру преобразования

$$L'_i = F_{L'}^{-1} [F_L(L_i)].$$

Прежде всего заметим, что оно состоит из двух четко выделяемых нелинейных звеньев (рис. 10).

**Первое звено.** Каждому элементу  $L_i$  исходного изображения здесь соответствует величина  $L''_i = F_L(L_i)$ , значение которой лежит в интервале от 0 до 1, т. е. в ограниченном динамическом диапазоне. Заметим, что теоретически значения  $L_i$  принадлежат бесконечному интервалу  $(0, \infty)$ . Таким образом, первое

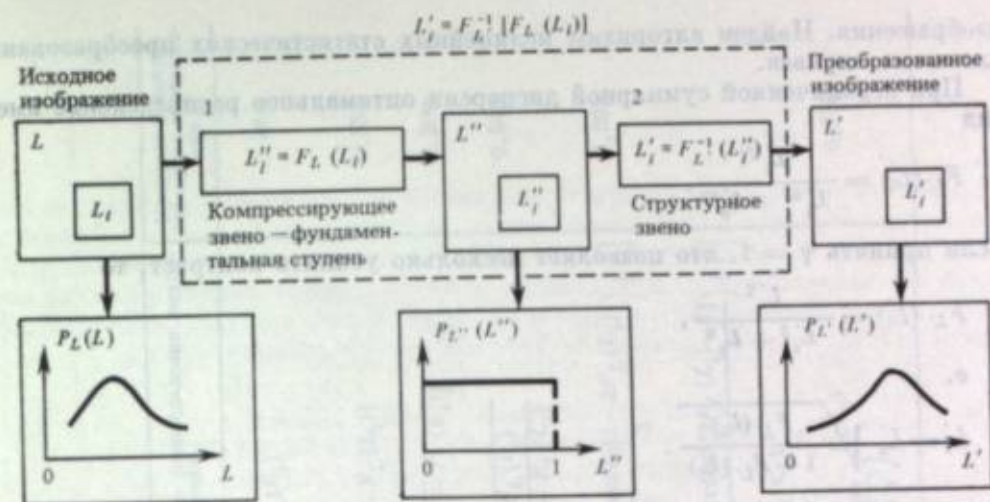


Рис. 10. Структура нелинейного безинерционного статистического преобразования изображений

$P_L(L)$ ,  $P_{L''}(L'')$ ,  $P_{L'}(L')$  — плотности распределения вероятностей

звено является компрессирующим и  $L''_i$  как случайная величина будет распределена равномерно. В этом смысле первое звено неизменно при любом изображении  $L$ .

**Второе звено.** Каждому значению  $L''_i$  здесь ставится в соответствие величина  $L'_i = F_{L'}^{-1}(L''_i)$ , в общем случае принимающая значения в интервале  $(0, \infty)$ . Структура этого звена может изменяться в зависимости от требований, предъявляемых к некоторым свойствам преобразованного изображения. К этим требованиям относятся ограниченный динамический диапазон значений  $L'$ , соответствие законам зрительного восприятия по контрасту или максимуму информации или же все отмеченные требования вместе взятые и т. п. Поэтому второе звено можно называть структурным.

Наличие компрессирующего звена, преобразующего любое исходное распределение в распределение равномерной плотности (равномерное), придает ему самостоятельное значение, а так как оно присутствует в любом статистическом преобразовании, то ему следует придать и фундаментальное значение. Именно в этом смысле первое звено можно выделять среди всех других. Оно становится ненужным только в случае, когда распределение исходного изображения равномерно. По отношению к нему первое звено дает изоморфное преобразование, т. е. сохраняет равномерность распределения.

Отметим далее, что входным сигналом второго звена будут значения функции  $F_L$ , играющей роль аргумента для функции  $F_{L'}^{-1}(\cdot)$ . В принципе можно расширить класс нелинейных статистических преобразований, если описать действие второго звена некоторой однозначной функцией  $\psi(\cdot)$ , заданной в интервале от 0 до 1 и принимающей значения от 0 до  $\infty$ , т. е. формировать преобразованное изображение оператором

$$L'_i = \psi [F_L(L_i)].$$

Преобразования, соответствующие оператору этого вида, называются неполными статистическими преобразованиями.

Построение операторов нелинейных статистических преобразований можно осуществлять, исходя из различных соображений. В этой связи прежде всего необходимо рассмотреть оптимальные преобразования. Из закона экстремальности зрительного восприятия по количеству информации, передаваемой в зрительной системе, ранее были получены оптимальные функции распределения для двух случаев: ограниченной суммарной дисперсии сигнала зрительного возбуждения и ограниченного диапазона изменений яркости исходного

Для всего класса неполных статистических преобразований получим

$$K_{\text{ср}} = \int_0^1 \left| \frac{\psi^2(z) - L_0'^2}{\psi^2(z) + L_0'^2} \right| dz.$$

Таким образом, контраст преобразованного изображения не зависит от контраста, гистограммы и сюжета исходного изображения, но является характеристикой вида нелинейного статистического преобразования и может служить мерой его эффективности. Для каждого данного преобразования значение контраста может быть рассчитано раз и навсегда. В таблице даны значения контраста для всех рассмотренных алгоритмов преобразования.

#### ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

Реализация контрастного закона при зрительном восприятии изображения приводит к мысли о целесообразности его использования при улучшении качества малоконтрастных фотографических изображений. В этом случае можно применить алгоритм вида

$$D = D_0 + D^* \frac{L_1^{2\gamma} - L_2^{2\gamma}}{L_1^{2\gamma} + L_2^{2\gamma}},$$

где  $D$ ,  $D_0$ ,  $D^*$  — значения фотографической плотности изображения;  $\gamma$  — параметр контраста.

Блок-схема установки, созданной В. Ф. Нестеруком и В. Н. Кузмичевым для контрастной обработки фотографического изображения, приведена на рис. 11. Оптические сигналы  $L_1$  и  $L_2$  из двух точек изображения  $L$  поступают по каналам I и II в оптико-электронные преобразователи ОЭ. Расстояние  $\delta$  между точками задается и фиксируется. Сканирующее устройство осуществляет перемещение пары точек по плоскости изображения. Выходные сигналы  $U_1$  и  $U_2$  в блоке К образуют контраст

$$K = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2),$$

т. е. параметр контраста  $\gamma = 0,5$ .

Сигнал, поступающий из блока К, модулируется, усиливается и детектируется в блоках М—Д, а затем после прохождения оптико-электронного преобразователя записывается регистрирующим устройством РУ. Сканирующие устройства СУ-I и СУ-II взаимно синхронизованы.

Обработке были подвергнуты слабоконтрастные снимки планеты Марс, переданные советскими автоматическими станциями «Марс-2» и «Марс-3» в период интенсивной пылевой бури в 1971—1972 гг. Исходные черно-белые снимки, полученные при фотографировании за тремя различными светофильтрами, обрабатывали с помощью описанной аппаратуры, в результате чего достигалось существенное усиление контраста. Примеры обработки приведены в работе ее авторов Ю. В. Баталова, М. М. Мирошникова и Н. Н. Порфирьевой [1]. После этого было синтезировано цветное изображение поверхности Марса, впервые опубликованное в работе [11]. Цветная фотография была получена под руководством и при участии В. И. Мордасова и Г. И. Терегулова. Анализ фотографий показал, что метод контрастной обработки позволяет выделить дополнительные детали рельефа поверхности планеты, не видные или плохо различимые на исходной фотографии при неизвестной мощности помех.

Аналогичная задача, имеющая целью обнаружение малоконтрастных образований на рентгеновских снимках, решалась М. М. Мирошниковым, Е. В. Филиповым, Ю. В. Баталовым, [12] путем преобразования плотности почернения рентгенограмм желчного пузыря в амплитудный рельеф и усиления амплитудного рельефа в изображении. Последующее обратное преобразование амплитудного рельефа в изображение позволило в ряде случаев выделить рисунок

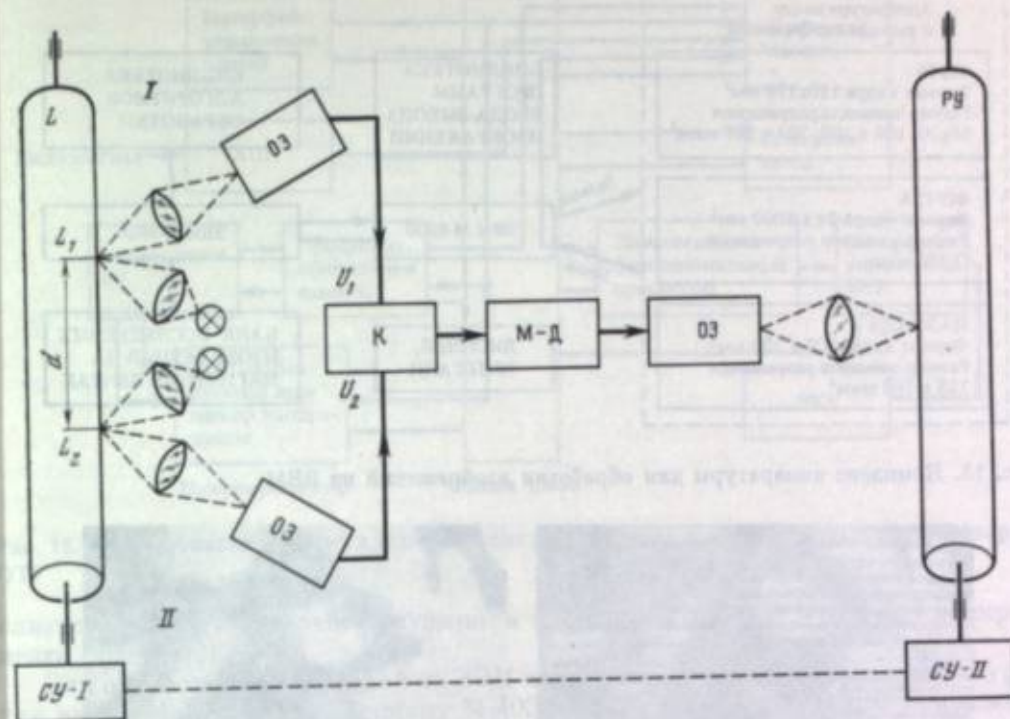


Рис. 11. Принципиальная схема установки для контрастной обработки фотографии

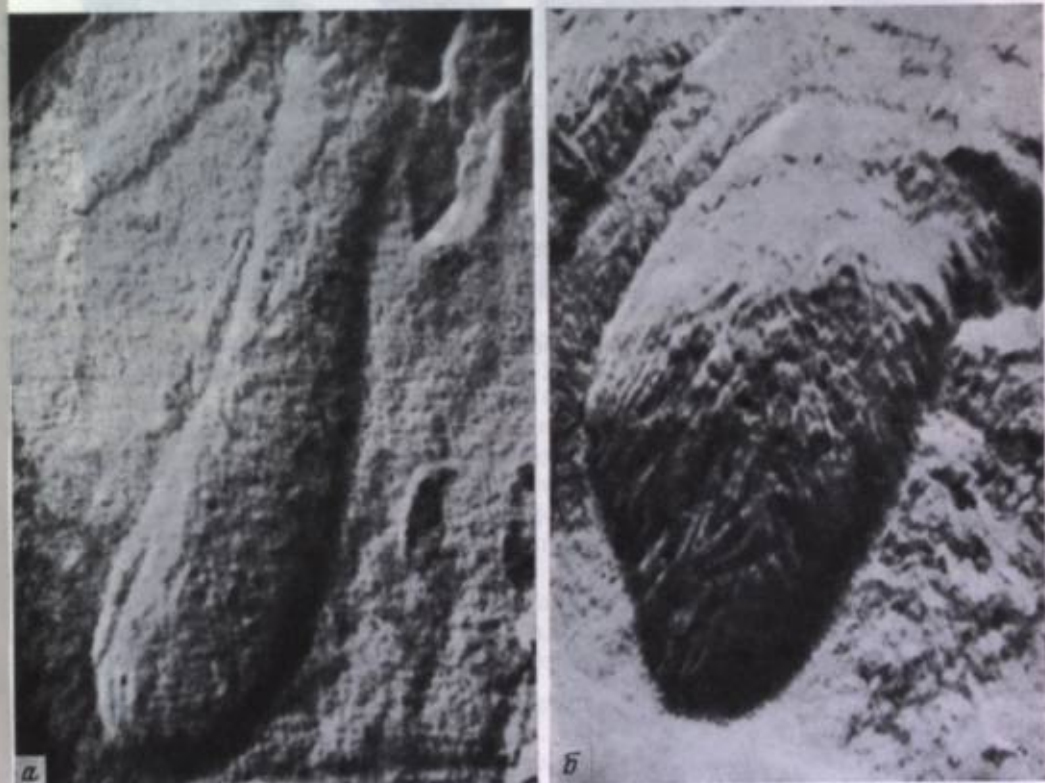


Рис. 12. Результаты обработки рентгенограммы желчного пузыря  
а — выделение желчных конкрементов; б — выделение рисунка слизистой оболочки

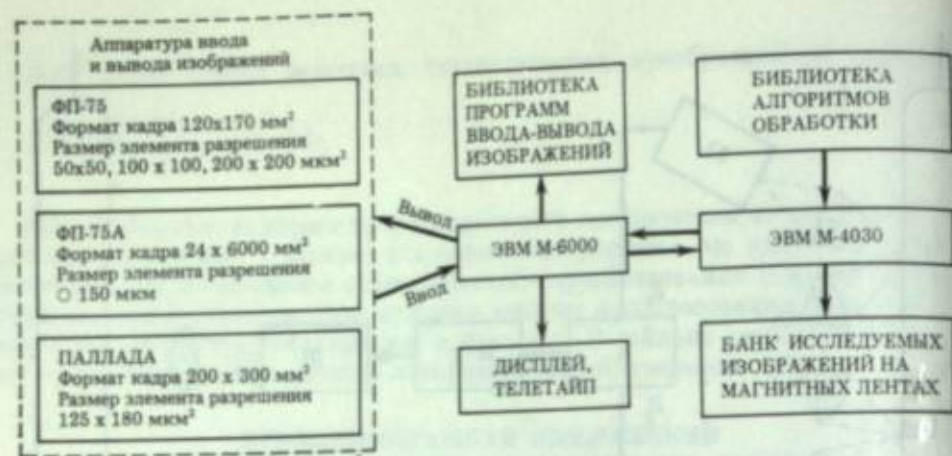


Рис. 13. Комплекс аппаратуры для обработки изображений на ЭВМ

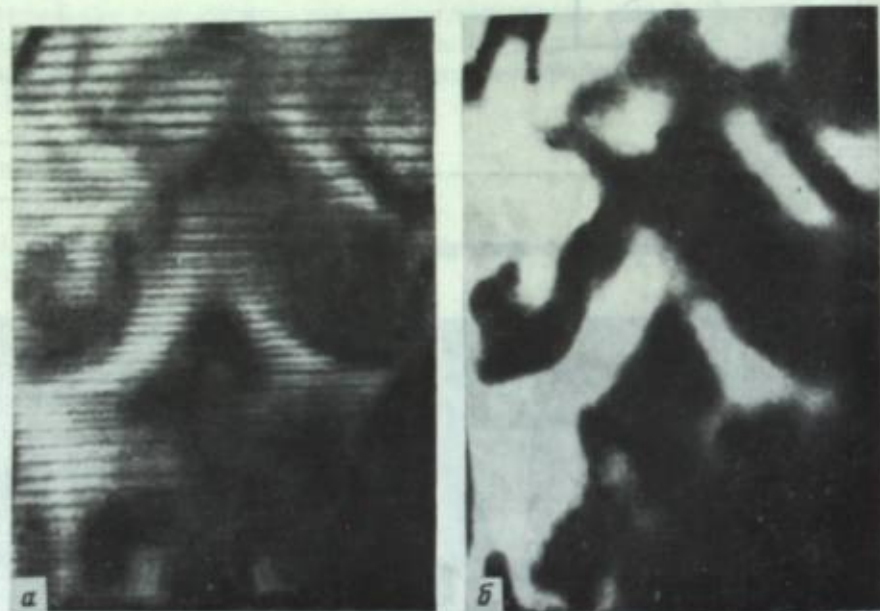


Рис. 14. Линейная вторичная обработка изображений. Ликвидация строчной структуры на термограмме

а — исходное изображение; б — преобразованное изображение



Рис. 15. Усиление контраста термограммы при нелинейном безынерционном статистическом преобразовании изображений

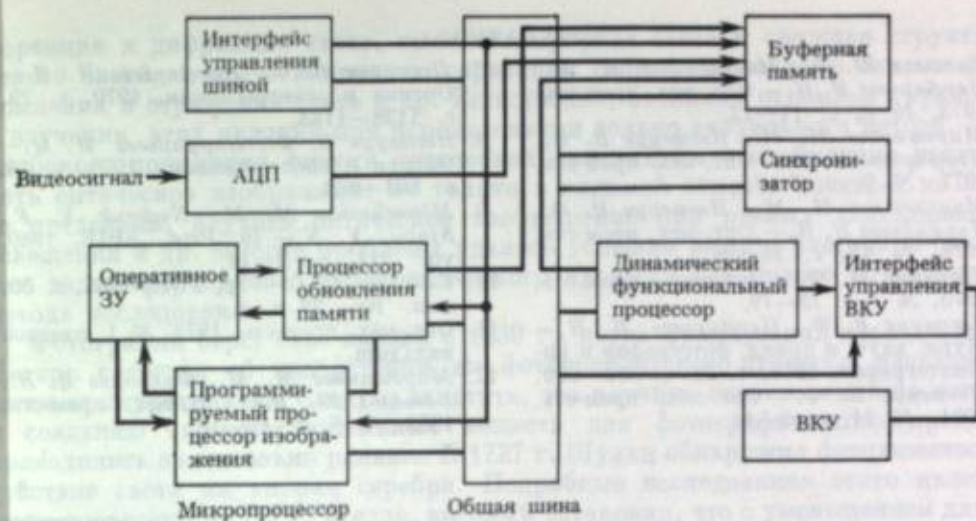


Рис. 16. Функциональная схема включения микропроцессора в оптико-электронную аппаратуру

слизистой оболочки желчного пузыря, а также мелкие (от 0,3 до 1 мм) конкременты (рис. 12).

Для обработки изображений на ЭВМ использовали специальную аппаратуру для ввода изображения в машину М-4030. Блок-схема аппаратуры приведена на рис. 13. Результаты обработки некоторых изображений представлены на рис. 14 и 15.

Обработка изображений в оптико-электронной аппаратуре, работающей в реальном масштабе времени, может осуществляться микропроцессором по следующему алгоритму (рис. 16). Видеосигнал, преобразованный в цифровую форму в аналогово-цифровом преобразователе АЦП, поступает в буферную память, откуда он может быть извлечен как для анализа поступающего изображения, так и для записи уже обработанного изображения. Анализ и обработка осуществляются микропроцессором, в котором записывается алгоритм обработки. На схеме он обозначен как программируемый процессор изображения. Вся цифровая информация циркулирует по высокоскоростной общей шине, а управление шиной, распределение каналов в ней между функциональными блоками осуществляет интерфейс управления шиной. Обработанная информация замещает ранее записанную в буферную память и считывается для передачи на видеоконтрольное устройство (ВКУ). При этом динамический функциональный процессор может осуществлять коррекцию приходящей информации, устраняя погрешности разверток как сканирующего устройства оптико-электронного прибора, так и видеоконтрольного устройства.

Затем видеосигнал проходит интерфейс управления ВКУ для координатной привязки соответствующих элементов изображения. Общая синхронизация обеспечивается системой единого времени. При таком способе обработки возможна реализация наиболее действенных и проверенных на практике алгоритмов.

Относительно простые алгоритмы: алгоритм покадрового накопления и сравнения (межкадровой обработки), алгоритм низкочастотной фильтрации и т. д. — могут без особенных затруднений использоваться в существующих микропроцессорах. Для реализации алгоритма вида  $L_i = L_0 \sqrt{F_L(L_i)/(1-F_L(L_i))}$  необходимо применять микропроцессор, обеспечивающий обработку каждого элемента изображения за время не более 3—10 мкс, чтобы эффективно использовать эту обработку в схемах медицинских тепловизоров и других оптико-электронных приборов, создающих изображение.

Для реализации еще более сложных алгоритмов необходима разработка специальных быстродействующих микропроцессоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баталов Ю. В., Мирошников М. М., Порфирьева Н. Н. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1973, № 9, с. 11—12.
2. Мирошников М. М., Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1977, № 6, с. 3—7.
3. Мирошников М. М., Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1978, № 12, с. 34—36.
4. Нестерук В. Ф. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1970, № 7, с. 78—79.
5. Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. — *Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии*, 1976, т. 21, с. 356—359.
6. Нестерук В. Ф. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1981, № 11, с. 9—11.
7. Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. — *Оптика и спектроскопия*, 1970, т. 2, с. 1138—1143.
8. Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. — *Оптика и спектроскопия*, 1978, т. 4, с. 801—803.
9. Miroshnikov M. M., Nesteruk V. F., Sintsov V. N. — In: *Proc. SPIE*, 1980, vol. 211, p. 2—11.
10. Слюсарев Г. Г. — *Тр. ГОИ*, 1968, т. 30, вып. 166, 23 с.
11. *Опт.-мех. пром-сть*, 1972, № 1, цветной вкладыш.
12. Мирошников М. М., Филиппов Е. В., Баталов Ю. В. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1982, № 6, с. 16—18.

С. Г. Гренишин

РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ В ОПТИКЕ

УДК 77.73

Истоки изучения оптического изображения уходят в глубокую древность. Оптические исследования до нашей эры были широко развиты в древней Греции и Египте. Можно считать, что именно в это время созданы основы современной геометрической оптики, дано объяснение образования изображения в плоских и сферических зеркалах. Крупный шаг в изучении оптического изображения был сделан в начале XI в. арабским физиком Альхазеном. Ему принадлежат опыты по исследованию оптического изображения в камере-обскуре. Альхазен весьма близко подошел к сущности механизма зрения, но этот вопрос был решен лишь через пять столетий Леонардо да Винчи, который провел многочисленные опыты по исследованию оптического изображения в камере-обскуре. Леонардо да Винчи впервые предложил очки для получения оптического изображения луны в увеличенном виде, что легло впоследствии в основу изобретения подзорной трубы и телескопа.

Возвращаясь к камере-обскуре, следует сказать, что начиная с XVI в. она получила свое дальнейшее развитие, была оснащена линзой и применялась в разных областях науки и техники для проецирования оптического изображения с целью его зарисовки, т. е. камера-обскура явилась прообразом современного фотографического аппарата. Однако пришлось пройти длинный путь, пока не были созданы фотографические материалы для регистрации оптического изображения и его анализа [1].

До изобретения фотографии оптическое изображение исследовали только в видимой области спектра визуальным методом, используя человеческий глаз в качестве светочувствительного приемника с  $\lambda_{\text{max}} \sim 550$  нм. Между тем визуальный метод исследования оптического изображения, который на протяжении многих столетий широко применялся для исследования оптического изображения, имеет и принципиальные ограничения.

Во-первых, визуальный метод дает возможность исследовать оптическое изображение только в видимой области спектра, к которой приспособлен человеческий глаз. Во-вторых, с помощью этого метода практически невозможно исследовать оптическое изображение при очень больших или очень малых выдержках. И наконец, визуальный метод вносит определенный субъективизм в исследования оптических явлений, а человеческое зрение и мозг не являются строгой запоминающей системой. Эти ограничения — принципиальные и связаны в основном с природой человеческого зрения.

Бурное развитие науки и техники в XVII—XIX вв. поставило вопрос о создании объективных методов исследования оптического изображения, которые не имели бы недостатков, присущих визуальному методу исследования. В это время в оптике было сделано много крупных открытий: открыта интер-

ференция и дифракция света, выяснена природа света и сложная структура белого света, открыто явление поляризации света, установлены законы преломления и отражения света и др. Естественно, возникли огромные трудности в изучении этих явлений при использовании только визуального метода. Для глубокого понимания физики оптических явлений было необходимо исследовать оптическое изображение не только в видимой области спектра, но и за ее пределами, изучить оптическое изображение при разных длительностях освещения и др. Многие проблемы удалось успешно решить благодаря открытию галогенсеребряного фотографического процесса как нового объективного метода исследования.

Фотография берет свое начало с 1839 г., когда французский исследователь Дагерр сообщил об изобретении им фотографического процесса, названного затем «дагерротипией». Следует заметить, что научные исследования по поиску и созданию светочувствительных веществ для фотографического процесса проводились значительно раньше. В 1727 г. Шульц обнаружил фотохимическое действие света на хлорид серебра. Подробные исследования этого явления были проведены в 1777 г. Шедле, который установил, что с уменьшением длины волны света фотохимическое действие возрастает и достигает максимума в УФ-области спектра (за пределом чувствительности глаза). Дальнейшие исследования спектрального фотохимического действия света на хлорид серебра получили свое развитие в работах Риттера.

Несомненно, что выполненные исследования сыграли немаловажную роль в разработке фотографического процесса с использованием галогенидов серебра, хотя первый фотографический процесс, созданный в 1827 г. Ньепсом с сотрудниками, в число которых входил и Дагерр, был бессеребряным.

Первое фотографическое изображение Ньепс получил на металле (медь, олово). Для изготовления светочувствительного слоя применяли лак из сирийского асфальта, растворенного в лавандовом масле, который под действием света задубливался. Незадубленные места лака вымывали и получали фотографическое изображение в виде рельефа на металле. Этот процесс, получивший название «гелиография», был весьма малочувствительным и в дальнейшем не нашел широкого практического применения. В 1839 г. он уступил место новому фотографическому процессу — дагерротипии. В этом процессе слои изготавливали из иода серебра и тонким слоем наносили на металлическую подложку. Под действием света на слое образовывалось скрытое изображение, которое затем визуализировали с помощью солей ртути. Процесс дагерротипии был также малочувствительным, но обладал весьма высоким разрешением. Последнее способствовало его практическому применению. Этот процесс хотя и существовал недолго (около 20 лет), но подтвердил перспективность фотографических методов исследования. С его помощью в 1840 г. были получены первые фотографии Луны, а в 1842 г. — линии Фраунгофера и фотографии Солнца, представлявшие большой научный интерес [2].

Фотографический метод постепенно начал входить в практику исследования оптического изображения. Для более широкого его применения в науке и технике появилась необходимость в резком повышении светочувствительности фотографического процесса, что было достигнуто сначала внедрением коллодионного процесса, а затем, начиная с 80-х годов, применением сухих галогенсеребряных желатиновых слоев, пришедших на смену коллодионному процессу. С этих пор бурно развивается галогенсеребряная желатиновая фотография, которая стала основным фотографическим процессом и заняла исключительное место в науке, технике, киноискусстве.

Важным этапом в развитии галогенсеребряной фотографии явилось открытие Фогелем в 1873 г. явления спектральной сенсibilизации галогенсеребряных слоев оптическими красителями, позволявшее повысить не только общую светочувствительность слоев, но и значительно расширить спектральную чувствительность, т. е. создать галогенсеребряные слои, обладающие светочувствительностью в широкой спектральной области от УФ- до ИК-области спектра [3].

В результате перехода от дагерротипии к современному галогенсеребряному фотографическому процессу удалось повысить светочувствительность

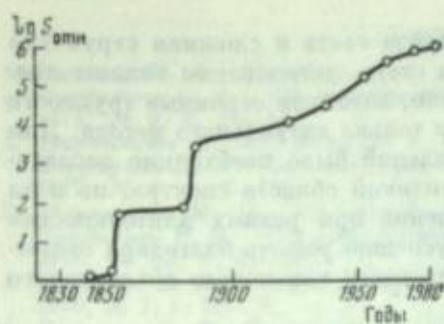
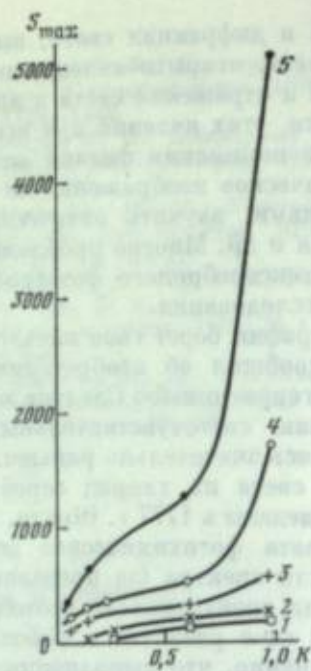


Рис. 1. Рост величины светочувствительности галогенсеребряного процесса за последние 140 лет

Рис. 2. Взаимосвязь светочувствительности  $S$  и контраста  $K$  для галогенсеребряных слоев с различной разрешающей способностью  $R$

$R, \text{мм}^{-1}$ : 1 — 200; 2 — 120; 3 — 60; 4 — 30; 5 — 10



слоев более чем на 5 порядков. На рис. 1 показана зависимость изменения максимальной светочувствительности фотографических слоев с момента изобретения галогенсеребряной фотографии по настоящее время, заимствованная из книги К. В. Чибисова [4] и дополненная нами на основании новейших данных [5]. Из рисунка видно, что увеличение светочувствительности галогенсеребряной фотографии в разные периоды происходило неравномерно, скачкообразно. Первый период — дагерротипия — характеризовался низкой светочувствительностью, но весьма высоким разрешением. С 1851 г. получил развитие мокрый коллодионный процесс с более высокой светочувствительностью, чем дагерротипный, позволяющий также осуществлять размножение фотографических отпечатков. Однако и этот процесс просуществовал лет 30, а затем был заменен галогенсеребряным желатиновым фотографическим процессом, который за последние почти 100 лет достиг такого совершенства, что стал основным фотографическим процессом при регистрации оптического изображения.

Из рис. 1 также следует, что галогенсеребряный фотографический процесс за последние 10—15 лет достиг практически своей предельной светочувствительности (или близкой к ней). При этом следует обратить внимание на одно важное обстоятельство, характерное для галогенсеребряного фотографического процесса, — с увеличением светочувствительности разрешающая способность процесса, как правило, уменьшается. Из рис. 2, любезно предоставленного И. М. Давыдкиным, следует, что при весьма высокой светочувствительности слоя разрешающая способность становится очень низкой. В частности, галогенсеребряные фотографические слои могут достигать светочувствительности  $\sim 5000$  ед. ГОСТ, но при этом имеют весьма низкую разрешающую способность ( $10 \text{мм}^{-1}$ ) при абсолютном контрасте. Такие слои обладают практически предельной квантовой эффективностью (необходимо несколько квантов света на эмульсионный кристалл, чтобы сделать его проявляемым).

Очевидно, что эти слои, несмотря на их высокую светочувствительность, вряд ли можно практически использовать из-за низкого разрешения. Да и в этом нет большой необходимости. Если учесть успехи, достигнутые за последние годы в области оптического объективостроения (разрешение близко к дифракционному, высокая светосила), то, по существу, отпадает необходимость в создании фотографических слоев, обладающих предельно высокой светочувствительностью. Для кинематографии, аэрокосмической фотографии, любительской фотографии, а также для ряда других технических областей фотографический материал должен обладать достаточно высокой разрешающей способностью с тем, чтобы реализовать возможности современных оптических систем.

Для галогенсеребряного фотографического процесса очень важной характеристикой является квантовый выход фотолиза, который представляет собой

отношение числа образовавшихся атомов серебра к числу поглощенных квантов света.

Многочисленные исследования показали, что если эффективность генерации свободных носителей в галогениде серебра близка к единице, то квантовая эффективность фотолиза может колебаться в довольно широких пределах (от 0,01 до 1,0). Это связано с тем, что наряду с образованием под действием света атомов серебра в эмульсионных кристаллах протекают и конкурирующие процессы (рекомбинация, окисление серебра, захват электронов примесями и др.), которые приводят к уменьшению квантового выхода фотолиза [6].

Ниже в качестве примера приводятся величины квантового выхода фотолиза  $\eta$ , измеренные для некоторых типов галогенсеребряных фотографических материалов:

Тип эмульсии	$\eta$	Тип эмульсии	$\eta$
ЛОИ-2	0,08	Репродукционные пластики	0,79
УФ-2Т	0,20	Аэропленка, тип 18	0,81

Видно, что для таких фотографических эмульсий, как ЛОИ-2 (голографическая эмульсия), квантовый выход фотолиза значительно меньше 1. Принципиально мы здесь имеем некоторый резерв в повышении светочувствительности слоев за счет увеличения квантового выхода фотолиза. Однако на практике это реализовать пока не удается.

Для аэропленок и других высокочувствительных материалов квантовый выход приближается к единице. При этом следует заметить, что квантовый выход фотолиза, близкий к 1, наблюдается во многих фотографических эмульсиях и в чистом бромиде серебра, но только при малых экспозициях фотографического слоя или кристалла, т. е. на стадии скрытого изображения. С увеличением экспозиции, т. е. при переходе к прямому почернению, квантовый выход фотолиза резко уменьшается, что связано в основном с рекомбинационными процессами, происходящими в микрокристаллах галогенида серебра. Однако если энергия кванта света превышает 7,5 эВ, т. е. в УФ-области спектра, то квантовый выход может достигать величины 2 и более за счет размножения носителей тока.

Галогенсеребряный фотографический процесс в отличие от многих известных в настоящее время бессеребряных фотографических процессов имеет исключительно большой ( $10^7$ — $10^8$ ) коэффициент усиления первичных продуктов фотолиза (скрытого фотографического изображения). Такое большое усиление скрытого изображения достигается применением химического проявления.

В настоящее время для фотографической регистрации оптического изображения создан весьма большой ассортимент галогенсеребряных фотографических материалов, светочувствительность и разрешающая способность которых варьируются в довольно широких пределах. Это иллюстрирует табл. 1, в которой представлены сенситометрические характеристики наиболее распространенных типов современных черно-белых галогенсеребряных фотографических слоев. Из таблицы видно, что светочувствительность галогенсеребряных фотографических материалов может меняться от 0,005 до 500 ед. ГОСТ, а разреше-

Таблица 1

Сенситометрические характеристики черно-белых галогенсеребряных фотографических материалов

Материалы	Общая светочувствительность, ед. ГОСТа	Разрешающая способность, $\text{мм}^{-1}$	Область спектральной чувствительности, нм	Материалы	Общая светочувствительность, ед. ГОСТа	Разрешающая способность, $\text{мм}^{-1}$	Область спектральной чувствительности, нм
Голографические	0,05—0,10	1000	350—700	Общего назначения	32—250	200—100	350—700
Для микрофильмирования	0,2—20	< 700	350—670	Аэрофотопленки	20—500	600—70	350—700
				Инфрпленки	30—300	100—80	ИК



ние — от 70 до 1000 мм<sup>-1</sup> и более. При этом довольно четко просматривается взаимосвязь между светочувствительностью и разрешающей способностью, т. е. с увеличением последней светочувствительность, как правило, уменьшается. Эту таблицу можно было бы расширить за счет цветофотографических материалов, материалов фотокомплекта «ПолярOID», рентгеновских пленок сухих серебряных фотоматериалов и др., но общие закономерности и взаимосвязь между светочувствительностью и разрешающей способностью при этом не изменятся.

Широкий ассортимент галогенсеребряных фотографических материалов и светочувствительности и разрешающей способности может обеспечить решение большинства задач, связанных с регистрацией, исследованием и обработкой оптического изображения в кинематографии, аэрофотографии, любительской фотографии, рентгенографии, полиграфии, микрофильмировании и др.

Задачи, возникающие при решении новых научно-технических проблем особенно в оптике, выдвигают повышенные требования к фотографическим процессам, которым в достаточной степени не может удовлетворять классический галогенсеребряный фотографический процесс, несмотря на его высокие сенситометрические и резольвометрические характеристики. К этим требованиям относятся в первую очередь необходимость резкого сокращения времени получения фотографической информации, возможность ее получения в виде удобном для ввода в электронно-вычислительные устройства, возможность быстрого ввода в оптико-электронные анализирующие устройства и системы. Эти требования, а также необходимость замены серебра, применяемого для изготовления галогенсеребряных фотографических эмульсий, менее дефицитных материалами, преимущественно бессеребряными, стимулируют широкие научные исследования в области создания новых фотографических процессов.

Успехи, достигнутые в физике полупроводников и диэлектриков, в физике и химии органических соединений, в оптике и электронике, плодотворно сказались на создании и быстром развитии бессеребряных фотографических процессов, многие из которых уже нашли практическое применение при размножении и копировании технической документации, копировании печатного текста, при получении печатных схем в микроэлектронике, регистрации рентгеновского изображения, в микрофильмировании, вводе и выводе оптической информации в ЭВМ и др.

За последнее время предложено несколько десятков бессеребряных фотографических процессов, несомненно представляющих интерес для регистрации оптического изображения, — электрофотографический, фототермопластичный, полупроводниковый, фотохимические, фотохромные процессы, диазотный, везикулярный, электрооптический и магнитооптический процессы, люминесцентный процесс, фотографические процессы на основе гидрида алюминия, висмута, диоксида титана, иодида свинца, на основе ионообменных полимеров и их неорганических комплексов, на основе оксалатов меди или никеля, антраценовых соединений, ферментных материалов, термографические процессы и др. Однако при этом следует отметить, что все бессеребряные фотографические процессы существенно уступают галогенсеребряному по светочувствительности и по возможности передачи полутоновых изображений. Светочувствительность бессеребряных фотографических процессов находится в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>, а разрешающая способность слоев меняется в довольно широких пределах от 10 до нескольких тысяч линий на миллиметр.

Многие из перечисленных процессов нашли уже практическое применение. Между тем трудно дать оценку всем появившимся за последние годы бессеребряным фотографическим процессам с точки зрения их практической реализации. Некоторые из перечисленных процессов вряд ли найдут применение из-за сложности получения и обработки фотографического изображения, низкой светочувствительности, сложной технологии изготовления слоев и др. Поэтому в табл. 2 приведены лишь те бессеребряные фотографические процессы, которые нашли или, как нам представляется, найдут в ближайшие годы практическое применение. Для сравнения в этой таблице даны основные сенситометрические характеристики галогенсеребряного фотографического процесса.

Из таблицы видно, что все бессеребряные фотографические процессы суще-

ственно уступают галогенсеребряному по такой важной характеристике, как максимальная светочувствительность, а также по универсальности применения. В то же время большинство бессеребряных фотографических процессов работает в реальном масштабе времени или близком к нему и при этом исключается трудоемкий процесс химико-фотографической обработки, характерной для галогенсеребряной фотографии. Это преимущество бессеребряной фотографии приобретает исключительно важное значение в таких областях техники, как копирование и размножение технической документации, микрофильмирование, ввод и вывод изображений в ЭВМ и др.

Сравнение светочувствительности представленных в табл. 2 бессеребряных фотографических процессов возможно лишь по порядку величины. Это связано с тем, что в разных работах критерии определения светочувствительности фотографического процесса выбраны произвольно и не всегда поддаются точному сопоставлению. Более того, в ряде бессеребряных фотографических процессов светочувствительность определяется на стадии скрытого фотографического изображения [7].

Среди бессеребряных фотографических процессов, приведенных в табл. 2, ведущее место занимает электрофотография [8, 9], в которой тесным образом сочетаются электрические и фотоэлектрические процессы в высокоомных полупроводниках с электростатическими явлениями, проявляющимися при визуализации изображения. Исследования показали, что электрофотографическая светочувствительностью обладают многие органические и неорганические полупроводники. Однако практическое применение нашли слои, изготовленные из селена с незначительными примесями серы, теллура, мышьяка и др., слои из оксида цинка, спектрально сенсibilизированные красителями, слои из сернистого кадмия, а также из органических полупроводников, таких, как поли-N-винилкарбазол (ПВК) и поли-N-эпоксипропилкарбазол (ПЭПК), сенсibilизированных оптическими сенсibilизаторами или добавками электроакцепторов, образующих с ПВК или ПЭПК комплексы с переносом заряда.

Слой из органических полупроводников представляет значительный интерес для электрофотографии, несмотря на более низкую светочувствительность, чем у слоев из неорганических полупроводников (Se, ZnO и др.). На основе органических полупроводников в принципе можно создать электрофотографические слои с заданными свойствами, особенно слои с весьма высокой разрешающей способностью.

Для визуализации электростатического скрытого изображения в электрофотографии применяют электрически заряженные порошки (толеры). Для электризации проявляющих порошков используют несколько методов — каскадный, метод магнитной кисти, пылевого облака, жидкостный метод. Можно назвать еще один метод визуализации скрытого электростатического изображения — электрический, состоящий в считывании электростатического изображения электронным лучом и визуализации его на экране электронно-лучевой трубки. Электрический метод применяют при регистрации изображения в вакуумной УФ-области спектра. Он обладает довольно высокой светочувствительностью ( $10^{-8}$  Дж/см<sup>2</sup>) и относительно низким разрешением ( $\sim 30$  мм<sup>-1</sup>).

В электрофотографии в отличие от галогенсеребряной фотографии разрешающая способность процесса определяется не только физическими и электрическими характеристиками слоя, но и размерами частиц порошка, применяемого для визуализации скрытого электростатического изображения. Обычно при визуализации изображения каскадным методом или методом магнитной кисти достигаемая величина разрешающей способности не превышает 100 мм<sup>-1</sup>, а при жидкостном методе или методе пылевого облака  $R = 400-500$  мм<sup>-1</sup>. При этом следует иметь в виду, что такое высокое разрешение можно получить лишь в том случае, если будут применяться электрофотографические слои толщиной в несколько микрометров. В то же время в тонких электрофотографических слоях резко уменьшается коэффициент поглощения света, а следовательно, уменьшается и светочувствительность (она не превышает величины  $10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>).

Создание электрофотографического процесса с высокой разрешающей способностью сделало возможным применение электрофотографии в микро-

Таблица 2  
Основные сенситметрические характеристики галогенсеребряных и бессеребряных фотографических процессов

Процессы	Тип процесса	$S$ , Дл/см <sup>2</sup>	$R$ , мм <sup>-1</sup>	$K$	Область спектральной чувствительности, нм	Число циклов переэкспозиции	Способ визуализации	Основные компоненты светочувствительного слоя
Галогенсеребряные негативные позитивные высокоразрешающие голографические	Фотохимический	$10^{-9}$	100	1,8	200—800	Однократно	Химический	AgHal
		$10^{-7}$	200	1,5	300—1000			
Электрофотографические	Фотоэлектрический	$10^{-3}$	$\leq 2000$	0,9	200—700	Однократно	Порошковый (сухой) Электрохимический Порошковый (жидко-костный)	Se, ZnO CdS As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>
		$10^{-4}$	500	1,1	300—600			
Фототермопластический Диазонпроцесс Винкулярный Фоторезисты	Фотохимический	$10^{-3}$	$\leq 1000$	1,5	200—600	Множкратно Однократно	Тепловой Парами аммиака Тепловой Химический и тепловой	ПВК с ТНФ Соли диазония То же Поливинилил-на-маты, олигомеры и др.
		$10^{-4}$	200—400 1000—1500	1,2 1,6 0,9	До 500 До 500 До 500			
Процесс с физическим проявлением		$10^{-9}$ — $10^{-3}$	300—1000	1,5	200—700		Химический	AgHal, TiO <sub>2</sub> , PbI <sub>2</sub> и др.
Фоторомный	Оптический	$10^{-4}$ — $10^{-1}$	$\leq 2000$	1,3	До 500	Множкратно	Без обработки	Спиропираны, диазонаты ртут-ти, стекла с AgHal и др.
Электрооптический	Фотоэлектрический	$10^{-4}$ — $10^{-1}$	50—500	1,5	До 600		Электрический	Bi <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> , PbMg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> O <sub>3</sub>
Магнитооптический		$10^{-3}$	200—300	1,4	До 700		Электрический (эф-фокт Фарадея или Керра)	MnBi, MnGa, Ge, Pt, Co и др.

фильмировании. В настоящее время существуют реальные предпосылки для замены в микрофильмировании галогенсеребряных слоев и слоев из диазосоединений высоко разрешающими электрофотографическими слоями. А это в свою очередь приведет к резкому сокращению времени получения микрофильмов (микрофиш). При этом процесс микрофильмирования будет не только ускорен, но и значительно удешевлен; одновременно увеличится срок хранения микрофиш и микрофильмов. В ближайшие годы следует ожидать внедрения электрофотографии в цветную фотографию с целью замены ожедного цветного галогенсеребряного фотографического процесса электрофотографическим.

Некоторой разновидностью электрофотографии является фототермопластический процесс [10—12], в котором используются электрофотографические принципы получения электростатического изображения, но визуализация изображения осуществляется путем деформации слоя в электрическом поле, созданном электростатическими зарядами термопластического или фототермопластического слоя при его нагревании. Следовательно, если в электрофотографии мы имеем дело с амплитудным изображением, как и в галогенсеребряной фотографии, то в фототермопластической фотографии изображение фазовое, т. е., чтобы его рассмотреть, необходимо применение специальных оптических систем.

Обычно фототермопластические слои представляют собой двухслойную или трехслойную систему, нанесенную на стеклянную или гибкую подложку. В качестве гибкой подложки широко применяют пленки из полиэтилентерефталата (лавсана). Двухслойная фототермопластическая система состоит из проводящего слоя и слоя из органического вещества, обладающего фототермопластическими свойствами и необходимой светочувствительностью, а трехслойная система состоит из проводящего слоя, неорганического фоточувствительного слоя и органического слоя, обладающего термопластическими свойствами.

Большое значение при создании фототермопластических слоев имеет выбор проводящего слоя. Для создания проводящего слоя в фототермопластических системах широко применяют металлы, а также оксидные и другие электропроводящие покрытия — Pt, Cr, Au, Ni, Ag, SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuJ. Требования к проводящим слоям в фототермопластическом процессе более высокие, чем в электрофотографическом, так как они выполняют функцию не только электрода при формировании скрытого электростатического изображения, но и нагревательного элемента при проявлении и стирании изображения в термопластическом слое.

В двухслойной системе в качестве проводящего слоя, обладающего фототермопластическими свойствами, наиболее широко применяют поли-N-винилкарбазол, сенсibilизированный 2,4,7-тринитро-9-флуореном (ТНФ). Для изготовления фототермопластических слоев наряду с ПВК применяют поли-N-эпоксипропилкарбазол, максимум чувствительности которого находится в УФ-области спектра при  $\lambda \sim 340$  нм, температура размягчения  $\sim 70^\circ$  С. ПЭПК хорошо сенсibilизируется красителями. Обычно слои из ПВК обладают светочувствительностью в УФ-области, но применение такого сенсibilизатора, как ТНФ, смещает светочувствительность в видимую область спектра.

Для создания трехслойной фототермопластической системы используют неорганические и органические фотопроводники. Такую систему получают путем последовательного нанесения на стеклянную или лавсановую подложку проводящего слоя, фоточувствительного слоя из неорганического полупроводника и слоя из фототермопластического или термопластического материала. Существует большой выбор неорганических полупроводников, пригодных для изготовления слоев в трехслойной системе, но наиболее широкое применение нашли Se, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Эти полупроводники обладают высокой устойчивостью к воздействию электрического поля, теплового излучения и др. При создании трехслойной фототермопластической системы есть определенное оптимальное соотношение между толщиной фототермопластического слоя и толщиной полупроводникового слоя.

Получение электростатического изображения на фототермопластических слоях в принципе не отличается от получения электростатического изображения на электрофотографическом слое. Отличие фототермопластического процесса от электрофотографии наблюдается на стадии визуализации электроста-

тического изображения. В фототермопластической фотографии визуализация скрытого электростатического изображения происходит в процессе нагревания слоя. При температуре размягчения фототермопластический (термопластический) слой под действием электростатических сил скрытого электростатического изображения деформируется, при этом образуется рельефное изображение. Величина деформации в термопластическом слое пропорциональна интенсивности света, образующего оптическое изображение. После охлаждения фототермопластического слоя рельефное изображение сохраняется. Таким образом получается фазовое изображение, которое затем рассматривают с помощью оптической шпирен-системы. Чтобы стереть записанную в виде рельефа оптическую информацию, слой достаточно нагреть, а после его охлаждения слой готов для записи новой информации.

На современных термопластических и фототермопластических материалах число циклов записи — стирания информации может быть доведено до 100—200, т. е. один и тот же фототермопластический (термопластический) слой может применяться 100—200 раз практически без ухудшения основных сенситометрических характеристик. Такая реверсивность фототермопластического процесса, несомненно, представляет практический интерес.

По своей светочувствительности (предельное значение  $S \sim 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>) фототермопластический процесс существенно уступает галогенсеребряному фотографическому процессу, но зато он может обеспечить довольно высокое разрешение ( $\sim 1000$  мм<sup>-1</sup>). Следует заметить, что в зависимости от структуры слоя светочувствительность фототермопластического материала может меняться на порядок и более. Более высокой светочувствительностью обладают трехслойные фототермопластические системы.

Характерная особенность проявленного фототермопластического материала состоит в том, что структура деформаций, образующих изображение в слое, зависит не только от физико-химических свойств слоя, но и от режимов записи изображения и обработки. Обычно на разных структурах фототермопластических слоев можно получить разные виды деформации — канавочную, луночную, морозную. Для получения полутонных изображений на фототермопластическом материале предпочтение следует отдать морозной деформации, при которой существует пропорциональная зависимость между интенсивностью падающего света и глубиной «мороза». Вообще перечисленные виды деформаций возникают на поверхности слоя случайно и представляют собой источник шума. Однако они используются и в качестве носителя полезной информации. Основные сенситометрические и временные характеристики фототермопластического процесса приведены в табл. 2.

Следующий фотографический процесс, сенситометрические характеристики которого рассматриваются в табл. 2, — диазотипный [13, 14]. Диазоматериалы обладают довольно высокой разрешающей способностью и весьма низкой светочувствительностью. Несмотря на низкую светочувствительность, диазоматериалы нашли широкое практическое применение в микрофильмировании, особенно при получении микрофиш второго и третьего поколений, т. е. для получения фотокопий из микрофильмов (микрофиш) первого поколения. Широкое применение диазоматериалов в микрофильмировании связано в основном с тем, что для получения фотографического изображения на них не требуется сложной химико-фотографической обработки, присущей галогенсеребряному фотографическому процессу. Хотя принципы диазотипного процесса были известны лет 100 назад, практически они были реализованы лишь в 20-х годах нашего столетия.

Светочувствительным соединением в диазоматериалах является диазониевая соль, которая под действием света с  $\lambda = 300 \div 400$  нм разлагается с квантовым выходом, близким к 1. За последние годы синтезирован ряд новых диазосоединений с максимумами спектральной чувствительности 470—630 нм. Однако эти соединения пока не нашли практического применения, что связано в основном с низким квантовым выходом таких диазосоединений.

Диазониевая соль нашла практическое применение и в другом фотографическом процессе — везикулярном [15, 16]. Везикулярный фотографический процесс появился сравнительно недавно (в 1950-х годах) под названием «каль-

вар-процесс». Светочувствительным слоем в этом процессе служит слой термопластического полимера, внутри которого диспергирована диазониевая соль, разлагающаяся под действием света с выделением азота. Если в диазотипном процессе выделившийся азот улетучивается из слоя, то в везикулярном процессе при фиксации азот практически остается в слое. Фиксирование полученного изображения осуществляют термическим методом.

Основные сенситометрические характеристики везикулярного фотографического процесса приведены в табл. 2, из которой видно, что везикулярный процесс относится к числу малочувствительных фотографических процессов. При общей светочувствительности  $\sim 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup> он обладает не очень высокой разрешающей способностью (200—400 мм<sup>-1</sup>), но достаточной для копирования микрофильмов (микрофиш), а также для размножения другой информации. Здесь следует заметить, что на везикулярных фотографических материалах удается получить и полутонные изображения. Что касается спектральной чувствительности, то она обусловлена поглощением диазониевой соли и находится в УФ- и на границе видимой области спектра. Преимуществом процесса является сухой и довольно быстрый способ получения проявленного изображения.

Далее в табл. 2 рассмотрены фотохромные процессы [17—19], основанные на фотохимических реакциях в соединениях с высоким квантовым выходом. Существует много веществ органического и неорганического происхождения, которые под действием света окрашиваются, т. е. в их спектре за полосой собственного поглощения появляется полоса наведенного поглощения, обеспечивающаяся после прекращения действия света. Это явление способствовало созданию фотохромных систем для регистрации и обработки оптической информации. Наибольшее развитие получили фотохромные системы на основе спиропиранов, дитизонатов ртути, а также системы на основе боросиликатных стекол с вкраплениями галогенидов серебра (в основном AgBr). Преимуществом фотохромного процесса является возможность быстрого получения видимого изображения без специального проявления. При этом следует заметить, что для некоторых спиропиранов удается получить плотность оптического почернения  $\sim 1,0$  за  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  с.

Не менее важным преимуществом фотохромных материалов является возможность их многократного использования. На органических фотохромных материалах запись — стирание информации удается осуществить до 20—30 раз, а на неорганических — еще больше. Крупным недостатком фотохромных материалов можно считать отсутствие методов стабилизации полученного изображения (изображение после экспонирования быстро регрессирует). Светочувствительность этих систем весьма низкая, в то же время фотохромные материалы обладают высокой разрешающей способностью — несколько тысяч линий на миллиметр.

Существуют два направления практического использования фотохромных материалов. Первое, фотографическое, связано с получением на них микрофиш и супермикрокарт. Другое направление связано с применением их в качестве оптических элементов для светозащитных устройств, а также в вычислительных машинах с оптической памятью.

Далее в табл. 2 рассмотрены фоторезисты [20, 21], нашедшие широкое практическое применение для создания оптических элементов (микросхем в микроэлектронике). Фоторезисты, как и диазослои, фотохромные материалы и др., относятся к числу малочувствительных фотографических материалов. Для их изготовления применяют светочувствительные органические материалы, на которых во время экспозиции и проявления образуется нерастворимое рельефное изображение. Фоторезисты можно разделить на две группы — позитивные и негативные. В позитивных фоторезистах экспонируемые участки слоя после экспонирования становятся растворимыми и во время проявления удаляются из слоя. В негативных фоторезистах, наоборот, экспонируемые участки при облучении становятся нерастворимыми и во время проявления удаляются из слоя неэкспонированные участки. Почти все известные в настоящее время фоторезисты имеют светочувствительность  $\sim 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup> с длинноволновой  $\lambda_{\text{max}} = 450 \div 500$  нм и  $R \sim 1000$  мм<sup>-1</sup> и более.

Рассмотрим далее процесс с физическим проявлением [22]. За последние годы он получил значительное развитие в фотографии с целью резкого сокращения серебра в проявленном изображении при сохранении сравнительно высокой фотографической светочувствительности и разрешающей способности. Физическое проявление давно известно в галогенсеребряной фотографии. Процессы с физическим проявлением в настоящее время хорошо изучены. Удалось получить фотографические системы с очень низким содержанием серебра со светочувствительностью  $\sim 10^{-8}$  Дж/см<sup>2</sup>.

Среди бессеребряных систем с физическим проявлением большой интерес представляют тонкие пленки, изготовленные из TiO<sub>2</sub>, HgJ<sub>2</sub> и др. Усиление изображения, полученного на таких пленках, осуществляют путем физического проявления, т. е. осаждением на фотолитически образованные центры (центры скрытого изображения) металлов (медь, никель, кобальт и др.). К сожалению, бессеребряные физические проявители в отличие от химических проявителей, применяемых в галогенсеребряной фотографии, обладают низкой стабильностью, что несколько ограничивает их практическое применение. Процессы с физическим проявлением обладают достаточно высокой светочувствительностью и разрешающей способностью.

Остановимся еще на двух системах, представляющих несомненный интерес для решения задач по обработке оптического изображения, — это электрооптические и магнитооптические [23, 24]. Достоинство этих систем заключается в том, что они могут работать в реальном масштабе времени и в динамическом режиме записи — стирания оптической информации. Число таких циклов теоретически неограниченно. Эти процессы несомненно представляют большой интерес для систем ввода оптического изображения в ЭВМ и в анализирующие устройства.

Электрооптические и магнитооптические фотографические процессы относятся к числу процессов с низкой светочувствительностью. Электрооптический процесс, построенный на основе монокристаллов силиката висмута, обладает более высокой светочувствительностью, достигающей  $\sim 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>. Светочувствительность электрооптических и магнитооптических систем на основе других материалов на один-два порядка ниже. Разрешающая способность этих систем в зависимости от выбора материалов может изменяться в довольно широких пределах (от нескольких десятков до нескольких сотен линий на миллиметр).

Следует также отметить, что путем изменения знака приложенного электрического поля в этих системах можно легко конвертировать оптическое изображение, т. е. превращать его из негативного в позитивное, изменять контраст и др., что может играть существенную роль в системах распознавания образов.

Фотографические процессы (регистрирующие системы) сыграли и продолжают играть исключительно важную роль в развитии оптики как науки, а также в разных направлениях ее применения. Без них невозможно существование таких областей науки, техники, искусства, как аэрофотография, космическая фотография, картография, репрография, микроэлектроника и др. Фотографические процессы получили огромное развитие в нашем веке. В ряде областей науки и техники на смену галогенсеребряному фотографическому процессу пришли бессеребряные процессы, которые все большую роль начинают играть в оптике и оптическом приборостроении. Основное достоинство бессеребряных фотографических процессов состоит в том, что они дают возможность получать изображение в реальном масштабе времени, не требуя сложных способов химико-фотографической обработки. При этом следует иметь в виду, что фотографических процессов.

В то же время бессеребряная фотография не может полностью заменить галогенсеребряную, уникальные свойства которой — высокая светочувствительность, возможность передачи полутонковых изображений и цветопередачи — оказались пока недостижимыми в бессеребряной фотографии. Несмотря

на это, бессеребряная фотография получает все большее распространение, происходит ее дальнейшее развитие, совершенствование, создаются новые бессеребряные фотографические процессы и системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Льюиси М. История флики. М.: Мир, 1970. 463 с.
2. Документы по истории изобретения фотографии/Под ред. Т. П. Кравца. М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 510 с.
3. Миэ К. Теория фотографического процесса. М.: Л.: Гостехиздат, 1949. 863 с.
4. Чибисов К. В. Химия фотографических эмульсий. М.: Наука, 1975. 341 с.
5. Kodak data for aerial photography. Kodak Ltd, 1982.
6. Джеймс Т. Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1980. 672 с.
7. Алфимов М. В. О современном состоянии фотографии и путях развития бессеребряной фотографии. Черниговская: ИХФ АН СССР, 1981. Препринт.
8. Гренишин С. Г. Электрофотографический процесс. М.: Наука, 1970. 375 с.
9. Шафферт Р. Электрофотография. М.: Мир, 1968. 448 с.
10. Термопластическая запись. М.: Искусство, 1966. 146 с.
11. Недужий С. А. Запись на фототермопластических материалах с управляемой чувствительностью. М.: НИИТЭХИМ, 1975, с. 3—58.
12. Черкасов Ю. А. — Тр. ГОИ, 1981, т. 50, вып. 184, с. 124—150.
13. Динабург М. С. Светочувствительные диазосоединения и их применение. М.: Л.: Химия, 1964. 256 с.
14. Мхитаров Р. А., Орешин М. М., Гордина Т. А., Платошкин А. М. — Успехи науч. фотографии, 1978, т. 19, с. 5—18.
15. Chamblin J. H. — In: Nat. Microfilm Assoc. Proc. 18th Annu. Meet. and Conf. Boston, 1969, p. 101—120.
16. Назорный В. И., Чибисова Н. П. — Успехи науч. фотографии, 1978, т. 19, с. 32—43.
17. Барачевский В. А., Козенков В. М., Косников Е. Д. — Успехи науч. фотографии, 1978, т. 19, с. 108—119.
18. Bertelson R. C. Photochromism. N. Y.: Wiley and Sons, 1971. 853 p.
19. Барачевский В. А., Лашков Г. И., Цехомский В. А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977. 278 с.
20. Pennington K. S. Handbook of laser. L.: Chemical Rubber Co Press, 1971. 496 p.
21. Гуров С. А. — Успехи науч. фотографии, 1978, т. 19, с. 135—148.
22. Сеиридов В. В., Кондратьев В. А. — Успехи науч. фотографии, 1978, т. 19, с. 43—51.
23. Пространственные модуляторы света/Под ред. С. Б. Гуревича. Л.: Наука, 1977. 141 с.
24. Mezzrich R. S. — Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 2275—2281.

Л. А. Халфин

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИЕЙ

Исследование предельных возможностей оптических методов, т. е. методов получения информации об объектах на основании упруго рассеиваемых на этих объектах электромагнитных волн (фотонов), имеет давнюю историю. Более 300 лет тому назад Ньютон, открыв зависимость показателя преломления от частоты (длины волны), высказал утверждение о предельных возможностях оптики за счет хроматических аберраций, которые казались ему принципиально непреодолимыми. В частности, это ограничение он сформулировал в виде теоремы [1]: «Теорема XI: Усовершенствованию телескопов препятствует различная преломляемость лучей света». Однако позднее удалось найти способы преодоления (компенсации) хроматических аберраций и тем самым преодолеть предельные возможности, провозглашенные Ньютоном. В дальнейшем предельные возможности оптических методов, в частности предельная разрешающая способность, считались обусловленными волновой природой оптических полей — явлением дифракции. В наиболее четкой и категоричной форме эти предельные возможности были сформулированы Гельмгольцем, Релеем, Аббе (см. блестящее изложение в лекциях Мандельштама [2]). Однако сейчас известно, что получение разрешающей способности возможно и за классическим дифракционным пределом [3—11].

УДК 535.81

Приведенные выше утверждения о предельных возможностях на самом деле точно должны быть сформулированы как непреодолимость предельных возможностей данным классом способов. Так, действительно нельзя преодолеть хроматические aberrации, если использовать вещества с одностепенной зависимостью показателя преломления от частоты. Однако открытие и использование веществ с различными типами зависимости показателя преломления от частоты позволили преодолеть (скомпенсировать) хроматические aberrации. Действительно нельзя преодолеть классический дифракционный предел разрешающей способности, если пытаться для «улучшения» изображения преобразовывать его с помощью другого оптического же прибора (дифракционные кружки складываются и дифракционная разрешающая способность разве лишь уменьшится). Однако из этого не следует, что нельзя найти такие методы преобразования (обработки) изображения, которые позволили бы преодолеть классический дифракционный предел. Такие методы были найдены, в результате чего реализовано увеличение разрешающей способности за классическим дифракционным пределом.

В настоящей статье исследуется проблема истинных предельных возможностей, которые нельзя преодолеть никакими известными способами обработки изображений. Эти истинные предельные возможности оптических методов обусловлены квантовой теорией, в частности квантовой природой оптических полей.

В классической постановке основная задача оптики может быть рассмотрена как задача решения интегрального уравнения первого рода (см., например, вывод этих уравнений в работе [12])

$$\psi(x) = \int K(x, y) \varphi(y) dy, \quad (1)$$

где  $\varphi(y)$ ,  $\psi(x)$ ,  $K(x, y)$  — функции объекта, изображения, рассеяния (передаточная функция оптического прибора) соответственно.

Мы ограничимся некогерентным случаем, для которого  $\varphi(y)$ ,  $y \in \mathbb{R}^2$  — интенсивность электромагнитного поля в плоскости объекта,  $\psi(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}^2$  — в плоскости изображения. Так что  $\varphi(y) \geq 0$ ,  $\psi(x) \geq 0$ ,  $K(x, y) > 0$  и  $\varphi(y)$ ,  $\psi(x)$ ,  $K(x, y) \in L_1$ . С соответствующими изменениями исследуется и когерентный случай.

Уравнение (1) описывает частный случай косвенных физических экспериментов, а именно по измеренным значениям одной физической величины ( $\psi$ ) получают информацию о другой физической величине ( $\varphi$ ) при заданном операторе  $A$ , который связывает эти величины  $\psi = A\varphi$ . Вопрос о предельных возможностях (предельной разрешающей способности) в классической постановке есть вопрос о единственности решения уравнения (1). Если имеет место единственность  $\varphi \rightleftharpoons \psi$ , то возможности оптических методов беспредельны (беспредельна разрешающая способность). Если единственности нет, то разрешающая способность конечна. Известное рассуждение о конечности классической дифракционной разрешающей способности интерпретируется как утверждение о неединственности решения уравнения (1) в том случае, когда ядро  $K(x, y)$  определяется дифракцией. В случае дифракции  $K(x, y) = K(x - y)$  и ради упрощения изложения рассмотрим одномерный случай  $x, y \in \mathbb{R}^1$ .

Утверждение о неединственности решения уравнения (1) связано со следующим. В случае дифракции на щели шириной (апертурой)  $d$  дифракционное ядро  $K(x - y)$  с хорошим приближением (фраунгоферова дифракция) есть

$$K(z) = \sin zd/zd. \quad (2)$$

На основании теоремы о свертках имеем

$$\Phi(\omega) = K^{-1}(\omega) \Psi(\omega), \quad (3)$$

где  $\Phi(\omega)$ ,  $K(\omega)$ ,  $\Psi(\omega)$  — фурье-преобразования  $\varphi(y)$ ,  $K(z)$ ,  $\psi(x)$  соответственно. Но  $K(\omega)$  для  $K(z)$  есть финитная функция  $\omega$ :

$$K(\omega) = 0, \quad \omega > d, \quad (4)$$

что на основании выражения (3) и означает неединственность решения уравнения (1) с ядром  $K(z)$  (2). Однако финитность  $K(\omega)$  (4) и неединственность решения (1) при дифракционном ядре  $K(z)$  есть следствие поведения  $K(z)$  при  $z \rightarrow \infty$ . На самом же деле выражение (2), будучи очень хорошим приближением для  $K(z)$  при конечных  $z$ , неверно, как показывает точное исследование [3—11], при  $z \rightarrow \infty$ .

На основании точного исследования асимптотики дифракционного ядра при  $z \rightarrow \infty$  можно доказать, что у  $K(\omega)$  нет интервалов «сплошных» нулей ( $K(\omega) = 0$  при  $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$ ). Тогда на основании выражения (3) можно, наоборот, доказать единственность решения уравнения (1) для дифракционного ядра. Таким образом, в классической постановке задачи дифракция не накладывает принципиальных ограничений на предельные возможности оптических методов, т. е. приводит к беспредельной разрешающей способности. Реализация этой бесконечной разрешающей способности состоит в нахождении обратного оператора  $A^{-1}$  и явного решения уравнения (1). Для разностного ядра это можно сделать, используя фурье-преобразование

$$\varphi(y) = A^{-1} \psi(x) = \int \exp(i(\omega, y)) (\Psi(\omega)/K(\omega)) d\omega. \quad (5)$$

Решение (5) нельзя реализовать с помощью оптического прибора, т. е. нельзя представить в виде

$$\varphi(y) = \int K(y-x) \psi(x) dx, \quad (6)$$

поскольку  $K(z) > 0$ ,  $K(z) \in L_1$ . Однако его можно реализовать [3—11] с помощью аналоговых методов когерентной оптики, а также современных ЭВМ.

Бесконечная разрешающая способность классического детерминированного описания основной задачи оптики. На самом деле в силу квантовой природы оптических (электромагнитных) полей  $\varphi(y)$ ,  $\psi(x)$ ,  $K(x, y)$  — случайные поля (процессы), а из-за квантовой природы регистрирующих сред измеренная величина  $\psi(x)$  отлична от вычисленной по уравнению (1) за счет неизбежных помех, обусловленных регистрирующими средами. С математической точки зрения решение основной задачи оптики в классической постановке как решение интегрального уравнения первого рода (1) есть некорректная задача (по Адамару [13]). Учет квантовой природы оптических полей и регистрирующих сред приводит к отличию основной задачи оптики от решения уравнения (1) и не приводит к некорректным математическим задачам.

Рассмотрим кратко два крайних варианта задач оптики при учете квантовых эффектов. В первом варианте мы учитываем лишь аддитивные статистически независимые помехи при измерении функции изображения, так что вместо уравнения (1) получаем

$$\psi(x) = \int K(x-y) \varphi(y) dy + n(x). \quad (1a)$$

В силу вероятностного характера  $n(x)$  —  $\psi(x)$  есть случайное поле (процесс) и бессмысленна задача однозначного восстановления  $\varphi(y)$  по  $\psi(x)$ , к которой сводится основная задача оптики в классической постановке. Случайное поле (процесс)  $\psi(x)$  параметризуется известным ядром  $K(z)$  и неизвестной функцией объекта  $\varphi(y)$ . В этом случае основная задача оптики есть задача математической статистики случайных полей (процессов) — по реализации случайного поля  $\psi(x)$  получить информацию о его распределениях, которые параметризуются  $\varphi(y)$ , и тем самым получить информацию о  $\varphi(y)$  — искомой функции объекта. Такая постановка использует предложенный автором и В. Н. Судаковым статистический подход к некорректным задачам [14—16].

Второй крайний случай соответствует учету квантового характера функции объекта, т. е. когда  $\varphi(y)$  есть случайное поле (процесс). Тогда мы учитываем, как говорят, внутренние флюктуационные помехи в  $\varphi(y)$ . Причем в этом случае помехи нельзя представить как аддитивные и независимые от  $\varphi(y)$ . В этом случае снова возникает соответствующая задача математической статистики.

Итак, вернемся к задаче (1а). Она подробно исследовалась в работах [3—11, 14—16]. Здесь мы рассмотрим только некоторые результаты. В реальных физических задачах можно считать  $\varphi(y)$  параметрической функцией  $\varphi(y) = \varphi(y; \alpha)$ ,  $\alpha \in A$ . Таким образом, статистическая задача, связанная с уравнением (1а), состоит в нахождении наилучших возможных оценок  $\alpha$  по измеренным значениям  $\varphi(x)$ . Обозначим оценки  $\alpha$  через  $\alpha^*$ . Ради простоты изложения предположим, что измеренное поле известно в конечном числе точек  $x_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ). Помехи  $n(x_n)$  в этих точках будем считать независимыми нормальными величинами со средним значением, равным нулю, и дисперсией  $\sigma^2$ .

На основании исследования неравенства Рао—Крамера [17] была показана выделенность однопараметрического случая и получено следующее неравенство для дисперсии  $D\alpha^*$  несмещенных регулярных оценок  $\alpha^*$ :

$$D\alpha^* > \frac{\sigma^2(x_N - x_1)}{(N-1)S \int_{-\infty}^{\infty} |K(\omega)|^2 |R(\omega; \alpha)|^2 d\omega} \quad (7)$$

где  $S$  — светосила оптического прибора;  $K(\omega)$  — фурье-преобразование ядра  $K(z)$ ;  $R(\omega, \alpha)$  — фурье-преобразование  $\partial\varphi(y, \alpha)/\partial\alpha$ .

Неравенство (7) определяет истинные предельные возможности оптических методов в постановке задачи (1а), т. е. при учете аддитивных независимых помех при измерении (регистрации) функции изображения  $\varphi(x)$ . В неравенстве (7) выделена явная зависимость этих предельных возможностей от всех условий задачи, в частности от свойств прибора, причем это зависимость не от  $K(\omega)$ , а лишь от  $|K(\omega)|$ . Существенно, что предельные возможности зависят явно от того, какие параметры функции объекта нас на самом деле интересуют. Действительно, именно  $R(\omega, \alpha)$  определяет здесь соответствующий функционал от  $|K(\omega)|^2$ . Из выражения (7) следует, что при достаточно малых помехах (малых  $\sigma^2$ ) предельные возможности достижимы существенно за классическим дифракционным пределом («обменный» характер неравенства (7) позволяет перевести малость  $\sigma^2$  в другие характеристики оптической задачи).

Из различных исследованных конкретных задач [3—11, 14—16] мы приведем здесь результаты задачи о разрешающей способности. В этом случае

$$\varphi(y, \alpha) = 1/2 \bar{\varphi}(y - \alpha/2) + 1/2 \bar{\varphi}(y + \alpha/2) \quad (8)$$

и для  $\bar{\varphi}(y \pm \alpha/2) = \delta(y \pm \alpha/2)$  и  $K(z) = 1/(\sqrt{2\pi}\Gamma) \exp(-z^2/2\Gamma^2)$  из неравенства (7) получим

$$D(\alpha^*) > \frac{8\sqrt{2\pi}(x_N - x_1)\sigma^2\Gamma^2}{S(N-1)[1 - e^{-\alpha^2/(2\Gamma^2)}]}, \quad \alpha = \left(\frac{\alpha}{2\Gamma}\right)^2 \quad (9)$$

Из неравенства (9) непосредственно следует возможность существенного (при определенных условиях) улучшения разрешающей способности за классическим дифракционным пределом, который определяется через параметр  $\Gamma$ . Такая возможность была реализована [7—10] обработкой изображений с помощью методов когерентной оптики. Этот аналоговый способ, учитывая некорректность исходной задачи (1), имеет существенные преимущества перед реализацией его с помощью ЭВМ. Мы не останавливаемся здесь на важных проблемах предельных возможностей в случае конечномерных (многомерных) и бесконечномерных параметров  $\alpha$ , соответствующих соотношениям неопределенности на основании многомерных аналогов неравенства Рао—Крамера, учете коррелируемости помех в связи с переходом к непрерывным измерениям  $\varphi(x)$ , отсылая за подробностями к работам [3—11, 14—16].

Рассмотрим также кратко второй предельный случай, когда учитываются лишь внутренние флюктуационные помехи, обусловленные квантовой природой функции объекта. В этом случае  $\varphi(y)$  при заданном  $y$  надо считать пуассоновской случайной величиной с параметром пуассоновского распределения, равным  $\varphi_0(y)$ , а не квантовой  $\varphi(y)$ , т. е. классической функцией объекта. На основании соответствующего неравенства Рао—Крамера для простейшего

однопараметрического случая и независимости  $\varphi(y_n)$  при разных  $y_n$  можно получить

$$D\alpha^* > \frac{y_N - y_1}{(N-1) \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial\varphi_{el}(y, \alpha)}{\partial\alpha} \right)^2 \varphi_{el}^{-1}(y, \alpha) dy} \quad (10)$$

Не приводя здесь детальных исследований, заметим лишь, что предельные возможности тем больше, чем больше интенсивность функции объекта, при прочих равных условиях. Предельные возможности, определяемые выражениями типа (10), есть истинные предельные возможности, обусловленные квантовой природой оптического поля (объекта), и они, как и следующие из выражения (7), не могут быть преодолены никакой обработкой.

Классический дифракционный предел разрешающей способности может быть при определенных условиях превзойден, как следует из неравенств (9) и (10). Однако при прочих равных условиях, чем меньше длина волны, тем больше как классический дифракционный предел, так и предельная разрешающая способность, обусловленная квантовой природой оптических полей. С другой стороны, при уменьшении длины волны, т. е. при увеличении частоты, открываются неупругие процессы при рассеивании фотонов, соответствующие разрушению объектов. Казалось бы, те частоты, при которых начинаются неупругие процессы разрушения объектов, и определяют в конце концов абсолютную предельную возможность оптических методов. Однако на самом деле это не так, и все зависит от очень глубоких (и до конца не понятных к настоящему времени) свойств упругих сечений при бесконечном увеличении энергии (частоты) фотонов.

Дело в том, что хорошо известна в квантовой теории «оптическая» теорема [18], которая утверждает, что сечение упругого рассеяния не равно нулю при энергии, превышающей пороги неупругих процессов, и определяется этими неупругими процессами. Более точно мнимая часть амплитуды  $f(E, 0)$  упругого рассеяния на угол 0 (рассеяние вперед) при энергии  $E$  равна

$$\text{Im} f(E, 0) = \frac{E}{4\pi} \sigma_{tot}(E) = \frac{E}{4\pi} \sigma_{el}(E) + \frac{E}{4\pi} \sigma_{inel}(E) \quad (11)$$

В выражении (11)  $\sigma_{el}$  — полное сечение упругого рассеяния (в него вносит вклад и упругое рассеяние вперед), а  $\sigma_{inel}$  — полное сечение неупругих процессов, в частности, соответствующих разрушению объекта. Из этого следует, что если  $\sigma_{inel} \neq 0$ , то  $\sigma_{el} \neq 0$ . Таким образом, даже при тех энергиях, при которых открываются неупругие процессы разрушения объектов, имеется ненулевое упругое рассеяние.

Поведение истинных предельных возможностей оптических методов при повышении частоты (энергии) фотонов зависит от того, какова асимптотика  $\sigma_{el}(E)$  и  $\sigma_{inel}(E)$  при бесконечно больших энергиях  $E \rightarrow \infty$ . Исследование этой асимптотики — одна из основных проблем физики высоких энергий. В настоящее время нет однозначного ответа на этот вопрос. Если  $\sigma_{inel} \rightarrow 0$  и  $\sigma_{el} \rightarrow 0$  при  $E \rightarrow \infty$  (такая возможность рассматривалась в физике высоких энергий), то абсолютная предельная возможность оптических методов будет определяться невозможностью использовать увеличение энергии фотонов для увеличения предельных возможностей. Если же  $\sigma_{inel} \neq 0$  и  $\sigma_{el} \neq 0$  (такая возможность обсуждалась в работе [19]), то абсолютная предельная возможность оптических методов в квантовой теории при беспредельном увеличении энергии фотонов не имеет границ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ньютон И. Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибах и цветах света (1721)/Пер. под ред. С. И. Вавилова. М.: Гостехиздат, 1954. 368 с.
2. Мандельштам Л. И. Собрание сочинений. М.: Наука, 1954, т. 3, с. 354.
3. Халфин Л. А. — В кн.: VIII Всесоюз. совещ. по ядерной спектроскопии: Тез. докл. Л.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 10.
4. Халфин Л. А. — В кн.: Тр. Всесоюз. совещ. по теории вероятностей и математической статистике (Ереван, 1960). М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 110.

5. Уалфин Л. А. — Информационно-статистическая теория оптических и спектральных приборов: Курс лекций на факультете ЛГУ, 1960—1961 гг.

6. Уалфин Л. А. — В кн.: Тр. VI Всесоюз. совещ. по теории вероятностей и математической статистике (Вильнюс, 1962). Вильнюс: Изд-во АН ЛССР, 1962, с. 33.

7. Уалфин Л. А. — Об увеличении разрешающей способности оптических приборов: Доклад на сессии Отделения общей физики и астрономии. М.: ФИАН, 1968.

8. Уалфин Л. А. — Оптика и спектроскопия, 1969, т. 26, с. 1065—1067.

9. Уалфин Л. А. — О разрешающей способности в оптике: Лекция на VI школе по физике и голографии. М.: МФТИ, 1972.

10. Уалфин Л. А., Писарчук Г. А., Шрыман М. Е. — Оптика и спектроскопия, 1973, т. 33, с. 766—780.

11. Уалфин Л. А. — Информационно-статистическая теория оптических приборов и методы обработки изображений: Курс лекций ГОИ, 1974—1975 гг.

12. Малдыштам Л. И. — Журн. эксперим. и теорет. физики, 1946, т. 16, с. 302—305.

13. Carleman T. Les fonctions quasi analytiques. P., 1926.

14. Судяков В. Н., Уалфин Л. А. — Докл. АН СССР, 1964, т. 157, с. 1058—1060.

15. Уалфин Л. А. — Зап. науч. семинара ЛОМИ, 1978, т. 79, с. 67.

16. Уалфин Л. А. — Докл. АН СССР, 1969, т. 122, с. 1007—1010.

17. Крамер Г. Математические методы статистики/Пер. под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Изд-во иностр. лит., 1946, с. 632.

18. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. М.: Л.: Гостехиздат, 1948, 567 с.

19. Уалфин Л. А. — Журн. эксперим. и теорет. физики, 1963, т. 45, с. 631—636.

С. А. Родимов

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Проектирование, исследование и оценка качества оптических изображающих систем и приборов основываются на математических моделях, описывающих различные аспекты функционирования таких систем. К математическим моделям предъявляются определенные требования — точность, т. е. адекватность описываемому объекту, универсальность, т. е. применимость к достаточно широкому классу объектов, однозначность при математической обработке, простота и ясность при использовании. Единственность описываемых всех перечисленных свойств в единой модели приводит к необходимости рассмотрения системы связанных между собой моделей, описывающих объект с различных точек зрения.

Представление системы моделируется на блочно-иерархической модели и описание сложных систем [1], при которой представляется в системе рассматривается на несколько связанных между собой иерархических уровней, причем на любом уровне рассматривается структура, состоящая из небольшого обобщенного количества элементов, представляющих в свою очередь как структуру на следующем, низшем, уровне.

На любом уровне исследуемая система описывается тремя основными математическими моделями — внешней и внутренней функциональными и структурной. Внешняя модель описывает систему как элемент в структуре высшего уровня, т. е. внешнюю сторону функционирования системы, ее взаимодействия с другими элементами высшего уровня. При этом система рассматривается как черная ящик, ее внутреннее устройство и физические принципы работы не отражаются во внешней функциональной модели. Внутренняя функциональная модель, напротив, описывает процессы, происходящие при взаимодействии элементов, составляющих систему на данном уровне. Структурная модель описывает структуру системы данного уровня, т. е. в вид, в количестве элементов, образующих структуру, и связи между ними.

При анализе оптических изображающих систем и оценке качества изображения необходимо рассмотреть уровни функциональных устройств, блоков и узлов. На верхнем уровне изображающая система представляется как совокупность функциональных устройств, основными из которых являются изображающее функциональное устройство (ИФУ) и анализатор изображения (АИ) (рис. 1). Внутренняя функциональная модель на этом уровне описывает взаимодействие этих устройств в терминах преобразований обобщенных сигналов. От объекта поступает сигнал, несущий информацию об исследуемых его свойствах. Изображающее функциональное устройство предназначено для передачи сигнала на анализатор изображения и осуществления необходимых преобразований, рассмотренных далее. Анализатор изображения выделяет из полученного сигнала информацию об исследуемых свойствах объекта.

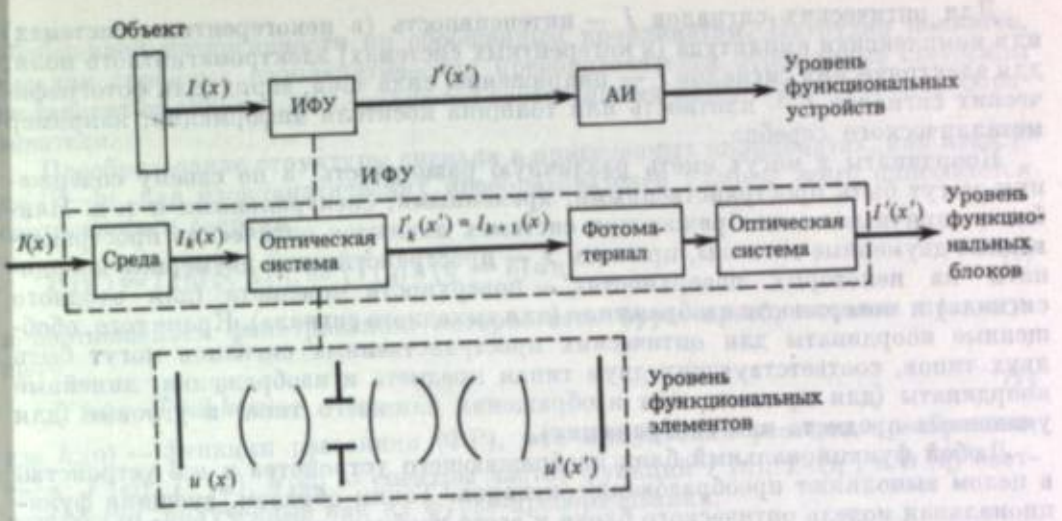


Рис. 1. Блочно-иерархическая структура изображающих систем

ражающее функциональное устройство (ИФУ) и анализатор изображения (АИ) (рис. 1). Внутренняя функциональная модель на этом уровне описывает взаимодействие этих устройств в терминах преобразований обобщенных сигналов. От объекта поступает сигнал, несущий информацию об исследуемых его свойствах. Изображающее функциональное устройство предназначено для передачи сигнала на анализатор изображения и осуществления необходимых преобразований, рассмотренных далее. Анализатор изображения выделяет из полученного сигнала информацию об исследуемых свойствах объекта.

На следующем уровне функциональные устройства рассматриваются как структуры, состоящие из функциональных блоков. Внутренняя функциональная модель изображающего устройства описывает последовательное преобразование сигнала различными функциональными блоками, входящими в его структуру. Сюда могут входить следующие преобразователи: оптические среды, оптические рассеивающие и турбулентные среды, сканирующие блоки, регистрирующие блоки (на основе фотографической эмульсии или других регистрирующих сред), электронно-оптические преобразователи, телевизионные блоки, оптические фильтры-модуляторы, приемники оптического излучения, телевизионные блоки, многоэлементные приемники изображения, электронные блоки и т. д.

На следующем уровне каждый функциональный блок рассматривается как структура, состоящая из функциональных узлов и элементов; внутренняя функциональная модель описывает физические принципы преобразования сигналов внутри блока. В частности, оптическая система на этом уровне представляется в виде совокупности таких элементов, как оптические среды, оптические поверхности и диафрагмы, а преобразование сигналов — как распространение электромагнитного поля через среды, преломление его на поверхностях и дифракцию на диафрагмах.

Таким образом, наибольший интерес для анализа работы изображающих систем представляют их функциональные модели на уровне функциональных блоков.

Внешняя модель любого функционального блока изображающего устройства отражает точку зрения потребителя, описывает соотношения между входом и выходом и основана на рассмотрении преобразования сигналов в изображающих устройствах. Функциональная модель всего изображающего устройства легко составляется из внешних моделей входящих в него функциональных блоков.

Под обобщенным сигналом будем понимать физический процесс, описываемый некоторой функцией  $I(x)$  обобщенной интенсивности от обобщенных координат  $x$ . В изображающих системах физическое содержание и математические свойства обобщенной интенсивности, физическое содержание и размерность обобщенных координат могут быть самыми различными.

Для оптических сигналов  $I$  — интенсивность (в некогерентных системах) или комплексная амплитуда (в когерентных системах) электромагнитного поля; для акустических сигналов  $I$  — давление, сила тона, заряд; для фототрафаретных сигналов  $I$  — плотность или толщина носителя информации, например металлического серебра.

Координаты  $x$  могут иметь различную размерность, а по своему содержанию могут быть пространственными, временными, спектральными и т. д. Наиболее типичными являются пространственные системы, являющиеся пространственными двумерными сигналами, при этом  $x$  — пространственные двумерные координаты на некоторой поверхности — поверхности предмета (для входного сигнала) и поверхности изображения (для выходного сигнала). Кроме того, обобщенные координаты для оптических пространственных сигналов могут быть двух типов, соответствующих двум типам предмета и изображения: линейные координаты (для предмета или изображения блиндого типа) и угловые (для удаленных предметов или изображений).

Любой функциональный блок изображающего устройства и все устройства в целом выкладывают преобразование сигналов. Таким образом, внешняя функциональная модель оптического блока и всего изображающего устройства математически может быть представлена некоторым оператором  $H$ :

$$I(x) \xrightarrow{H} I'(x') \quad \text{или} \quad I'(x') = H\{I(x)\}. \quad (1)$$

Для построения внешней модели, удовлетворяющей основным требованиям необходимо выделить из оператора (1) преобразования различных свойств сигнала: вида и типа сигнала, места его локализации и самой функции  $I(x)$ .

Преобразование вида и типа сигнала определяет также и вид, и тип преобразователя. Оптические системы не меняют вида сигнала, он остается оптически пространственным двумерным, может изменяться лишь тип сигнала и место его локализации.

При рассмотрении преобразования функции сигнала обычно выделяют линейные изопланатические преобразования [2–5]. Поскольку реальные преобразователи не вполне удовлетворяют этим условиям, будем называть их квазилинейными или квазиизопланатическими. Для таких преобразователей можно разбить общее преобразование функции сигнала (1) на ряд элементарных, описывающих отдельные свойства сигнала: преобразование масштабов по координате  $x$ , преобразование энергии и преобразование структуры.

Масштабное преобразование описывается некоторым оператором

$$x' = V|x|, \quad (2)$$

который для небольшой области (изопланатической зоны) может считаться линейным, т. е.

$$x' = Vx. \quad (3)$$

Для оптических пространственных сигналов масштабный оператор есть матрица обобщенных увеличений [6].

Чтобы исключить масштабные преобразования из дальнейшего рассмотрения, полезно ввести приведенные координаты  $\eta$  и  $\eta'$ , удовлетворяющие следующим условиям:

$$\eta' = \eta; \quad \eta = Ax; \quad \eta' = A'x'; \quad (A')^{-1}A = E, \quad (4)$$

где  $(A')^{-1}$  — оператор, обратный оператору  $A'$ .

Преобразование энергии сигнала в общем случае может описываться при помощи таких понятий, как обобщенные светосилы, показывающие отношение энергии входного и выходного сигналов [7]:

$$H = \frac{\int I(x') dx'}{\int I(x) dx}; \quad H' = \frac{\int I(\eta') d\eta'}{\int I(\eta) d\eta} = \frac{H}{\det V}, \quad (5)$$

причем  $H$  показывает передачу энергии в реальных координатах, а  $H'$  — в приведенных. Обобщенная энергия сигнала здесь определяется как интеграл от

обобщенной интенсивности по обобщенным координатам. Нетрудно показать, что для линейных изопланатических преобразователей обобщенные светосилы не зависят от сигнала, т. е. являются собственными характеристиками преобразователя.

Преобразование структуры сигнала в приведенных координатах, как известно [2–5], для изопланатических преобразователей удобнее всего описывается соотношением свертки

$$I'(\eta') = I(\eta) \otimes h(\eta) = \int I(\eta) h(\eta' - \eta) d\eta \quad (6)$$

и соотношением фильтрования, которое есть фурье-преобразование предыдущего

$$I'(\omega) = I(\omega) \bar{h}(\omega), \quad (7)$$

где  $h(\eta)$  — функция рассеяния (ФР), или импульсная реакция преобразователя;  $I(\omega)$ ,  $I'(\omega)$ ,  $\bar{h}(\omega)$  — спектры частот функций  $I(\eta)$ ,  $I'(\eta')$  и  $h(\eta)$  соответственно, полученные как их фурье-преобразования.

В случае неизопланатических преобразователей соотношение фильтрования (7) неприменимо, но можно получить более общую формулу, учитывающую отступления от изопланатизма [8]:

$$I'(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2\pi i)^n n!} \frac{\partial^n I(\omega)}{\partial \omega^n} \frac{\partial^n D(\omega)}{\partial \eta^n}, \quad (8)$$

где  $\partial^n I(\omega)/\partial \omega^n$ ;  $\partial^n D(\omega)/\partial \eta^n$  — производные от спектра входного сигнала по частоте и от оптической передаточной функции (ОПФ) преобразователя по координате входного сигнала. Под производной нулевого порядка понимают саму функцию.

Так как изображающее устройство представляет собой каскад последовательно соединенных функциональных блоков, то внешняя функциональная модель изображающего устройства как преобразователя сигнала также описывается оператором (1), а передаточные характеристики всего устройства находятся как произведение соответствующих характеристик отдельных блоков

$$H = H_1 \cdot \dots \cdot H_k; \quad V = V_1 \cdot \dots \cdot V_k; \quad \bar{h}(\omega) = \bar{h}_1(\omega) \cdot \dots \cdot \bar{h}_k(\omega). \quad (9)$$

Соотношения (9) справедливы при условии линейности, изопланатичности всех блоков, а также, что обычно не учитывается, при независимости их характеристик.

Рассмотрим внутренние функциональные модели таких функциональных блоков, как оптические системы. Основным назначением оптических систем как функциональных блоков в изображающем устройстве является преобразование места локализации, типа сигнала и масштаба, остальные преобразования — энергии и структуры — являются побочными. Внутренняя функциональная модель оптической системы описывает ее как преобразователь электромагнитного поля. В подавляющем большинстве случаев применима скалярная теория поля, в которой электромагнитное поле описывается функцией комплексной амплитуды  $u(x)$  [9] от координат точек пространства.

Наиболее адекватная и универсальная модель основана на дифракции на реальной апертурной диафрагме [10, 11] и описывает преобразование электромагнитного поля в оптической системе в соответствии со схемой, показанной на рис. 2. На этой схеме  $u(x)$  — поле на поверхности изображения;  $u(p)$  — поле на некоторой условной поверхности «входного зрачка» в обобщенных зрачковых координатах  $p$ ;  $u'(p')$  — поле на поверхности «выходного зрачка» в обобщенных выходных зрачковых координатах;  $f(p)$  — так называемая зрачковая функция;  $F, F^{-1}$  — операторы прямого и обратного фурье-преобразований;  $\lambda$  — длина волны.

Обобщенные зрачковые координаты и зрачковая функция определяются при помощи ломаного луча  $A_0DA'_0$ , показанного на рис. 3. Этот луч выходит



из центра предмета  $A_0$ , делает в общем случае излом в точке  $D$  пересечения с поверхностью апертурной диафрагмы  $AD$  и попадает в центр изображения  $A_0'$ . Зрачковые координаты для близкого предмета или изображения есть умноженные на показатели преломления  $n$  и  $n'$  проекции ортов  $\mathbf{q}$  и  $\mathbf{q}'$  этого луча на плоскости предмета и изображения соответственно:

$$\mathbf{p} = n\mathbf{q}; \quad \mathbf{p}' = n'\mathbf{q}' \quad (10)$$

Для удаленных предмета и изображения это — проекции радиус-векторов точек  $P$  и  $P'$  пересечения указанного луча со сферами  $S_P$  и  $S_{P'}$ :

$$\mathbf{p} = n\mathbf{a}_P; \quad \mathbf{p}' = n'\mathbf{a}_{P'} \quad (11)$$

Зрачковая функция определяется выражением

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} \tau^{1/2}(\mathbf{p}) \exp\left\{-\frac{2\pi i}{\lambda} [A_0 D A_0']\right\} & \text{внутри } \Omega; \\ 0 & \text{вне } \Omega, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\Omega$  — область существования лучей в обобщенных зрачковых координатах;  $\tau(\mathbf{p})$  — коэффициент пропускания энергии вдоль луча  $A_0 D A_0'$ ;  $[A_0 D A_0']$  — оптическая длина луча;  $\lambda$  — длина волны.

Аберрационная функция  $w(\mathbf{p}) = (1/\lambda) [A_0 D A_0']$  показывает отклонение оптической системы от идеальной, в частном случае она с точностью до постоянной равна функции волновой аберрации [9].

При соблюдении условия изопланатизма входные и выходные зрачковые координаты удовлетворяют следующему соотношению:

$$V^* \mathbf{p}' = \mathbf{p} \quad (13)$$

а отступление от этого условия определяет изменение аберрационной функции при смещении предмета, т. е. неизопланатизм:

$$dw/d\mathbf{x} = V^* \mathbf{p}' - \mathbf{p} \quad (14)$$

Для построения адекватной и простой внутренней модели удобно перейти к приведенным (каноническим) координатам. Для этого нормируем зрачковые координаты к размерам области зрачка  $\Omega$  или  $\Omega'$

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} A_x & 0 \\ 0 & A_y \end{pmatrix}^{-1} \mathbf{p}; \quad \mathbf{p}' = \begin{pmatrix} A'_x & 0 \\ 0 & A'_y \end{pmatrix} \mathbf{p}' \quad (15)$$

где  $A_x, A_y, A'_x, A'_y$  — обобщенные апертуры — величины, определяющие размеры областей зрачков, т. е. областей существования лучей в обобщенных входных и выходных зрачковых координатах.

Координаты на предмете и изображении нормируем следующим образом:

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} A_x & 0 \\ 0 & A_y \end{pmatrix} \mathbf{x}; \quad \boldsymbol{\eta}' = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} A'_x & 0 \\ 0 & A'_y \end{pmatrix} \mathbf{x}' \quad (16)$$

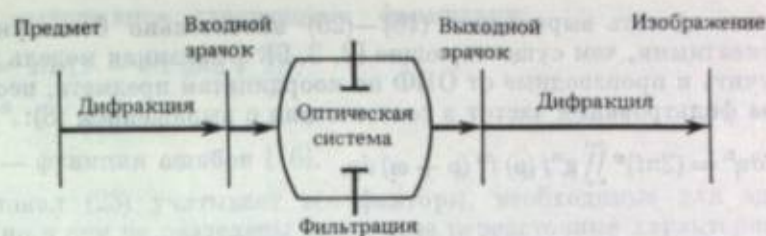
причем из соотношения (13) следует, что  $\boldsymbol{\eta}' = \boldsymbol{\eta}$  т. е. приведенные (канонические) координаты удовлетворяют условиям (4).

Зрачковая функция (12) в канонических зрачковых координатах имеет следующий вид:

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} \tau^{1/2}(\mathbf{p}) \exp[2\pi i w(\mathbf{p})] & \text{внутри } \Omega_0; \\ 0 & \text{вне } \Omega_0, \end{cases} \quad (17)$$

где  $\Omega_0$  — область зрачка в канонических координатах. В большинстве практических случаев  $\Omega_0$  — круг единичного радиуса.

Зрачковая функция (17) совместно с обобщенными апертурами и составляет внутреннюю функциональную модель оптической системы для данной зоны предмета и длины волны  $\lambda$ . Простые выражения, приведенные ниже, связывают



$$u(x/\lambda) \xrightarrow{F} u(\mathbf{p}) \cdot f(\mathbf{p}) = u'(\mathbf{p}') \xrightarrow{F^{-1}} u'(x'/\lambda)$$

Рис. 2. Схема преобразования электромагнитного поля в оптической системе

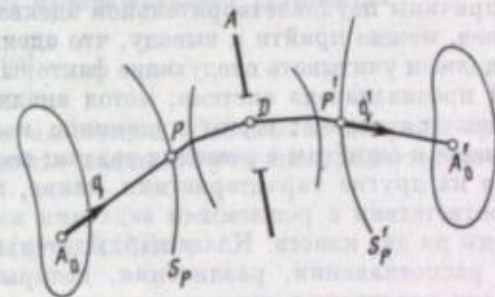


Рис. 3. Определение зрачковых координат и зрачковой функции

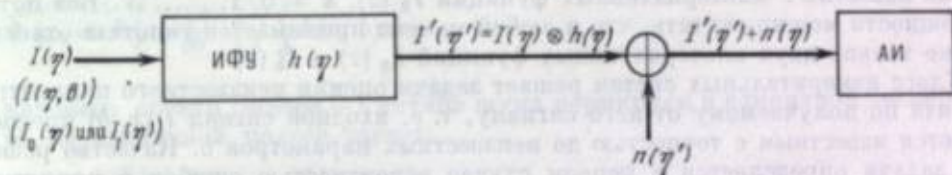


Рис. 4. Схема преобразования сигналов в модели с оптимальным анализатором

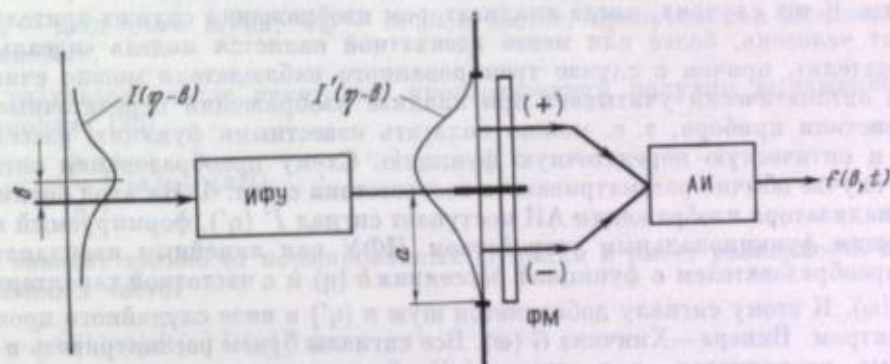


Рис. 5. Схема преобразования сигналов в координатных измерительных приборах

эти параметры с внешними характеристиками: обобщенные светосилы

$$H = A_x A_y \iint_{\Omega_0} \tau(\mathbf{p}) d\mathbf{p}; \quad H' = A'_x A'_y \iint_{\Omega_0} \tau(\mathbf{p}) d\mathbf{p}; \quad (18)$$

$$\text{функция рассеяния точки в приведенных координатах} \quad h(\boldsymbol{\eta}) = |F[f(\mathbf{p})]|^2; \quad (19)$$

оптическая передаточная функция в приведенных пространственных частотах (для некогерентного освещения)

$$\bar{h}(\boldsymbol{\omega}) = f(\mathbf{p}) \cdot f^*(\mathbf{p}) = \iint f(\mathbf{p}) f^*(\mathbf{p} + \boldsymbol{\omega}) d\mathbf{p}. \quad (20)$$

Введение в модель обобщенных координат, аберрационной и зрачковой функ-

ций позволило сделать выражения (18)–(20) значительно более универсальными и адекватными, чем существующие [2, 3, 9]. Описанная модель позволяет также получить и производные от ОПФ по координатам предмета, необходимые для анализа фильтрования частот в соответствии с выражением (8):

$$\partial^n D(\omega) / \partial \eta^n = (2\pi i)^n \iint g^n f(\rho) f^*(\rho + \omega) d\rho, \quad (21)$$

где

$$g = \partial w(\rho) / \partial \eta - \partial w(\rho + \omega) / \partial \eta, \quad \partial w / \partial \eta = \rho' - \rho. \quad (22)$$

Рассмотрим теперь задачу оценки качества изображающих систем. Анализируя причины неудовлетворительной адекватности широко распространенных критериев, можно прийти к выводу, что адекватный критерий качества изображения должен учитывать следующие факторы: конкретную задачу, для решения которой предназначена система; метод анализа изображения, на основе которого решается задача; шумы приемника изображения и других источников, приводящие к ошибкам в решении задачи; возможность «обмена» качества изображения на другие характеристики, такие, как светосила, увеличение и т. п.

В соответствии с решаемыми задачами изображающие системы могут быть разделены на два класса. Класс наблюдательных систем решает задачи обнаружения, распознавания, различения, которые математически формулируются как задачи различения гипотез о соответствии объекта (входного сигнала) одной из известных альтернативных функций  $I_k(x)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N$ . Без потери общности можно считать, что в любой момент принимается гипотеза относительно только двух альтернативных функций  $I_0(x)$  и  $I_1(x)$ .

Класс измерительных систем решает задачи оценки неизвестного параметра объекта по получаемому от него сигналу, т. е. входной сигнал  $I(x, b)$  предполагается известным с точностью до неизвестных параметров  $b$ . Качество решения задачи определяется в первом случае вероятностью ошибок в принятии гипотезы, а во втором — дисперсией оценки измеряемого параметра.

Что касается метода анализа изображения, то здесь возможны различные подходы. В тех случаях, когда анализатором изображения служит зрительный аппарат человека, более или менее адекватной является модель «идеального наблюдателя», причем в случае тренированного наблюдателя можно считать, что он автоматически учитывает при анализе изображения передаточные характеристики прибора, т. е. можно полагать известными функцию рассеяния точки и оптическую передаточную функцию. Схему преобразования сигнала в этом случае обычно рассматривают в соответствии с рис. 4. На вход оптимального анализатора изображения АИ поступает сигнал  $I'(\eta')$ , формируемый изображающим функциональным устройством ИФУ как линейным изопланатическим преобразованием с функцией рассеяния  $h(\eta)$  и с частотной характеристикой  $\tilde{h}(\omega)$ . К этому сигналу добавляется шум  $n(\eta')$  в виде случайного процесса со спектром Винера—Хинчина  $G(\omega)$ . Все сигналы будем рассматривать в приведенных координатах, а в шуме  $n(\eta')$  объединять шумы всевозможных источников.

Как показано в работах [12–15], качество изображающей системы с анализатором изображения, работающим по принципу максимума правдоподобия, оценивается функционалом

$$d^2 = \int G^{-1}(\omega) |\Phi(\omega)|^2 [\tilde{h}(\omega)]^2 d\omega, \quad (23)$$

где  $\Phi(\omega)$  — функция, определяющая задачу, решаемую с помощью системы («функция задачи»)

$$\left. \begin{aligned} \Phi_0(\omega) &= F [I_0(\eta) - I_1(\eta)] \quad \text{для наблюдательных систем;} \\ \Phi_1(\omega) &= F [\partial I(\eta) / \partial b] \quad \text{для измерительных систем} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

( $F$  обозначает оператор фурье-преобразования).

При этом вероятности  $\alpha$  и  $\beta$  ошибок первого и второго родов в различении гипотез для наблюдательных систем и дисперсия оценки измеряемого

параметра выражаются следующими формулами:

$$\alpha = \beta = 1/2 [1 - \operatorname{erf}(d/2\sqrt{2})]; \quad (25)$$

$$\sigma_b^2 = d^{-2}, \quad (26)$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  — функция ошибок [16].

Функционал (23) учитывает все факторы, необходимые для адекватного критерия, но в нем не разделены различные передаточные характеристики, поскольку функции  $G(\omega)$ ,  $\Phi(\omega)$  и  $\tilde{h}(\omega)$  не нормированы. Нормируем частотную характеристику  $\tilde{h}(\omega)$  к единичной светосиле, тогда получим нормированную оптическую передаточную функцию изображающего устройства

$$D(\omega) = \frac{\tilde{h}(\omega)}{\tilde{h}(0)} = \frac{\tilde{h}(\omega)}{\int \tilde{h}(\eta) d\eta} = \frac{1}{H} \tilde{h}(\omega). \quad (27)$$

Функцию задачи (24) нормируем к единичной обобщенной энергии предмета (входного сигнала) в пределах «сюжетно важного» участка предмета, имеющего размеры  $a$ :

$$\bar{\Phi}(\omega) = F [I_0(\eta) - I_1(\eta)] / \int_a^{1/2} [I_0(\eta) + I_1(\eta)] d\eta,$$

или

$$\bar{\Phi}(\omega) = F \left[ \frac{\partial I(\eta)}{\partial b} \right] / \int_a I(\eta, b) d\eta. \quad (28)$$

И наконец, спектр Винера—Хинчина шума нормируем к единичной дисперсии шума на единичной полосе частот:

$$\bar{G}(\omega) = \frac{G(\omega) 2\omega_M}{\sigma_n^2}, \quad (29)$$

где  $\sigma_n^2$  — дисперсия шума;  $\omega_M$  — полоса частот, пропускаемая анализатором изображения.

В результате после некоторых преобразований получим выражение для функционала (23)

$$d^2 = \left( \frac{I'}{\sigma_n} \right)^2 (a 2\omega_M) (aR), \quad (30)$$

где  $R$  зависит только от нормированных функций и имеет размерность пространственных частот

$$R = \int \bar{G}^{-1}(\omega) |\bar{\Phi}(\omega) D(\omega)|^2 d\omega; \quad (31)$$

$I' = 1/a \int_a I'(\eta) d\eta$  — средняя интенсивность сигнала на входе анализатора изображения; величина  $I'/\sigma_n$ , входящая в выражение (30), есть одна из форм отношения сигнал/шум, приведенного ко входу анализатора;  $(I'/\sigma_n) (a 2\omega_M)$  — величина, связанная с полной информационной емкостью сюжетно важного участка объекта;  $(I'/\sigma_n) (aR)$  — величина, связанная с информационной емкостью этого участка с данным изображающим устройством. Выражения (30), (31) позволяют анализировать отдельно влияние на качество изображающей системы различных передаточных характеристик входящих в нее блоков, используя также формулы (4), (9).

Заметим, что функционал (23) или (30) определяет также качество изображающей системы с точки зрения теории информации, а именно при малых  $d^2$  информационная пропускная способность системы пропорциональна  $d^2$  [17].

Рассмотренный подход к оценке качества системы, основанный на концепции оптимального анализатора («идеального наблюдателя»), неприменим к измерительным приборам с невизуальным анализатором или с визуальным, но

работающим не по принципу максимума правдоподобия. Рассмотрим другой подход к оценке качества изображающих измерительных систем, основанный на конкретных схемах анализа изображения применительно к координатным измерительным приборам. При этом мы не делаем никаких предположений о том, что при анализе изображения известны свойства предмета, изображающей системы или шумов.

Схема преобразования сигналов в такой системе показана на рис. 5. Изображающее функциональное устройство формирует изображение предмета, смещение  $b$  которого относительно номинального положения измеряется. Таким образом, на вход анализатора изображения поступает сигнал, выражаемый формулой

$$I'(\eta' - b) = I(\eta - b) \otimes h(\eta), \quad (32)$$

где  $h(\eta)$  — функция рассеяния изображающего устройства.

Анализатор изображения вырабатывает сигнал рассогласования  $f(b)$ , зависящий от изменения измеряемого смещения  $b$ . Основным актом процесса измерения является наведение на предмет. Таким образом, погрешность наведения (чувствительность наводки), зависящая от качества изображения, в значительной степени определяет и погрешность измерения. Вследствие неизбежных шумов сигнал рассогласования может считаться случайной величиной с дисперсией  $\sigma_b^2$ , величина которой определяется как сумма дисперсий шумов различного происхождения, приведенных к одному масштабу. Наличие шумов приводит к среднеквадратичной погрешности в оценке измеряемого параметра  $b$ , определяемой формулой

$$\sigma_b = \sigma_f / |f_b|. \quad (33)$$

Рассмотрим схему анализатора изображения в соответствии с рис. 5. Входная плоскость анализатора, на которой формируется изображение, описываемое формулой (32), разделяется на две половины. Сигнал проходит через в общем случае движущийся оптический фильтр-модулятор ФМ, затем интегрируется на каждой из половин, и полученные изменяющиеся во времени потоки сравниваются по амплитуде. Сигнал рассогласования равен разности амплитуд потоков, прошедших через правую и левую половины анализатора. Такой обобщенной схемой описывается большинство визуальных и оптико-электронных анализаторов перемещений [4]. Сигнал рассогласования как функция времени в такой схеме может быть представлен в виде следующей свертки:

$$f(b, t) = I'(-\eta_1, -\eta_2) \otimes [\gamma(\eta_1) \tau(\eta_2)], \quad (34)$$

где  $\gamma(\eta_1) = \text{rect}((\eta_1 - a/2)/a) - \text{rect}(\eta_1 - a/2/a)$  — функция, описывающая вычитание сигналов, прошедших через правую и левую половины анализатора;  $\tau(\eta_2)$  — функция пропускания фильтра-модулятора.

Пользуясь свойствами фурье-преобразования [2—4], можно представить производную от сигнала рассогласования, входящую в формулу (33), следующим образом:

$$f_b = 4 \iint_{-\infty}^{\infty} I'(\omega_1, \omega_2) \sin^2(\pi\omega_1 a) \bar{\tau}(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2. \quad (35)$$

Пользуясь соотношением фильтрации (7) и нормируя функцию предмета к единичной энергии, запишем окончательное выражение для среднеквадратичной погрешности наведения

$$\sigma_b = d^{-1} = \left[ (E'/\sigma_f) \left| \iint_{-\infty}^{\infty} I_0(\omega) g(\omega) D(\omega) d\omega \right|^2 \right]^{-1}, \quad (36)$$

где  $I_0(\omega)$  — нормированный спектр предмета;  $g(\omega) = 2\pi i \omega_1 \bar{\gamma}(\omega_1) \bar{\tau}(\omega_2)$  — «функция анализатора».

Качество изображающей системы в этом случае оценивается функционалом  $d = (E'/\sigma_f) \left| \iint_{-\infty}^{\infty} I_0(\omega) g(\omega) D(\omega) d\omega \right|$ . Величина  $E'/\sigma_f$ , входящая в него, есть отношение сигнал/шум, приведенное ко входу анализатора.

Формула (36), так же как и (30), объединяет в одном критерии все передаточные характеристики с наглядным разделением их функций, что позволяет решать задачи оптимального проектирования. С другой стороны, мы видим, что учет конкретной схемы анализа изображения дает другое выражение для критерия качества изображения, чем схема с идеальным анализатором, приводящая к формуле (30).

К аналогичным результатам приводит рассмотрение задачи оценки качества изображения в устройствах, предназначенных для воспроизведения бинарных объектов на бинарных регистрирующих слоях. Типичным примером таких устройств являются установки для фотолитографии, где бинарные объекты изображаются на слое фоторезиста. Другим примером могут служить установки для электрофотографии, фотонабора и т. п.

Применение таких понятий, как оптическая передаточная функция, для оценки качества изображения в рассматриваемых задачах наталкивается на серьезные трудности ввиду сугубой нелинейности процессов регистрации изображения. Рассмотрим схему формирования окончательного изображения в таких системах.

Любой бинарный объект состоит из чередующихся черных и белых полей различной формы, разделенных резкими границами, которые в пределах рассматриваемого малого участка предмета можно считать прямолинейными. Таким образом, структурное содержание объекта определяется расположением указанных границ. Рассмотрим изображение границы, расположенной в начале координат и описываемой известной единичной функцией Хевисайда [5] (при рассмотрении используем приведенные координаты, удовлетворяющие соотношениям (4)):

$$I(\eta) = E(\eta_1) \begin{cases} 0 & \text{при } \eta_1 \leq 0; \\ 1 & \text{при } \eta_1 > 0. \end{cases} \quad (37)$$

Некоторая линейная изопланатическая изображающая система (например, оптическая) формирует изображение этой границы на бинарном регистрирующем слое. Это изображение описывается при помощи применения оператора (6) к функции (37) и является ничем иным, как пограничной кривой

$$I'(\eta') = \int_{-\infty}^{\eta_1} \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta_1, \eta_2) d\eta_1 d\eta_2. \quad (38)$$

Работа любого бинарного регистрирующего слоя (без учета рассеяния в слое и при постоянном времени экспозиции) может быть описана следующим оператором:

$$I''(\eta') = \begin{cases} 1 & \text{при } I'(\eta') \geq c; \\ 0 & \text{при } I'(\eta') < c, \end{cases} \quad (39)$$

где  $I'(\eta')$  — изображение, формируемое на слое изображающей системой;  $I''(\eta')$  — окончательное изображение, формируемое слоем после проявления;  $c$  — пороговый уровень, определяемый свойствами слоя и временем выдержки.

Таким образом, изображение, полученное с помощью бинарного регистрирующего слоя, всегда имеет единичный контраст и представляет собой резкую границу, описываемую функцией Хевисайда, т. е.

$$I''(\eta') = E(\eta_1 - b). \quad (40)$$

Величина  $b$  определяет положение полученной границы относительно начала координат и зависит от функции рассеяния изображающей системы  $h(\eta)$  и порогового уровня  $c$ .

Очевидно, что такие понятия, как контраст, передача контраста, резкость и т. п., неприменимы для оценки качества бинарного изображения, поскольку оно всегда имеет абсолютный контраст и абсолютную резкость.

В силу наличия неконтролируемых случайных факторов (неоднородности свойств слоя, неравномерность освещенности объекта, колебания времени выдержки и т. п.) порог срабатывания  $s$  есть случайная величина с дисперсией  $\sigma_s^2$ . Это приводит к тому, что положение границы (40), полученной на слое, есть случайная величина с дисперсией  $\sigma_b^2$ . Качество бинарного изображения определяется именно величиной этой дисперсии  $\sigma_b^2$ , которая при фотолитографии характеризуется разбросом в размерах полученных элементов интегральной схемы при электрофотографии и фотонаборе — разбросом в толщине получаемых линий и т. д.

Из формул (37)–(40) легко получить, что

$$\sigma_b = \frac{\sigma_s}{|dI'(\eta')/d\eta'_x|}, \quad (41)$$

где  $I'(\eta')$  — изображение границы, пограничная кривая, определяемая соотношением (38).

Как известно, производная от пограничной кривой есть функция рассеяния линии. Таким образом, качество изображающих систем в рассматриваемых задачах определяется величиной интенсивности в максимуме функции рассеяния линии. Пользуясь свойствами фурье-преобразования [2–5], можно также записать, что

$$\sigma_b = \left[ \frac{1}{\sigma_s} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega_2) D(\omega) d\omega \right| \right]^{-1}. \quad (42)$$

Мы получили выражение, аналогичное формуле (36), если заменить произведение спектра объекта и функции анализатора  $I_0(\omega)g(\omega)$  на дельта-функцию Дирака  $\delta(\omega_2)$ . Следовательно, и в рассматриваемой задаче качество изображения определяется интегральным функционалом от ОПФ  $D(\omega)$ , а не от квадрата модуля ОПФ, как в схеме с идеальным анализатором по формуле (31).

Мы рассматривали случай, когда границы полей в бинарном объекте ориентированы вдоль оси  $\eta_2$ . При произвольной ориентации границ под  $\sigma_b^2$  необходимо понимать среднюю дисперсию координаты во всех направлениях:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_s}{|h(0)|} = \left[ \frac{1}{\sigma_s} \left| \int_{-\infty}^{\infty} D(\omega) d\omega \right| \right]^{-1}, \quad (43)$$

где  $h(\eta)$  — функция рассеяния точки. Заметим, что в соответствии с предыдущей формулой адекватным и теоретически хорошо обоснованным критерием качества изображающих систем в рассматриваемых задачах является известное число Штреля [3, 9], равное интенсивности в максимуме нормированной функции рассеяния точки  $h(0)$ .

В заключение отметим, что все рассмотренные выше критерии являются абсолютными, т. е. применимы для оценки всего тракта преобразования сигнала в данной задаче и дают абсолютную оценку погрешности решения задачи с помощью прибора. Эти критерии необходимы при проектировании изображающих систем на высших иерархических уровнях — функциональных устройств. При проектировании отдельных функциональных блоков изображающего устройства, например оптической системы, необходимы относительные критерии, позволяющие оценить качество данного блока по отношению к некоторому гипотетическому идеальному блоку. Такой относительный критерий может быть легко построен на базе абсолютных критериев в следующем виде:

$$q = \frac{\int \int |\Phi(\omega) D(\omega)|^2 d\omega}{\int \int |\Phi(\omega) D_0(\omega)|^2 d\omega}, \quad (44)$$

или

$$q = \left| \frac{\int \int \Phi(\omega) D(\omega) d\omega}{\int \int \Phi(\omega) D_0(\omega) d\omega} \right|^2, \quad (45)$$

где  $\Phi(\omega)$  — функция задачи, объединяющая в себе описание объекта анализатора изображения и шумов;  $D(\omega)$  — ОПФ изображающего устройства с оцениваемым блоком;  $D_0(\omega)$  — ОПФ того же устройства, в котором оцениваемый блок заменен некоторым эталонным. В качестве последнего можно взять идеальный преобразователь, у которого оптическая передаточная функция равна единице, или, например, безабберационную оптическую систему. Значения критериев (44) или (45) заключены в интервале (0,1), они позволяют в процессе проектирования количественно оценивать эффект улучшения или ухудшения качества всего прибора при изменении конструкции какого-либо функционального блока изображающей системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высш. шк., 1980. 256 с.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
3. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику/Пер. под ред. П. Ф. Паршина. М.: Мир, 1966. 255 с.
4. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику/Пер. под ред. Г. И. Косоурова. М.: Мир, 1970. 364 с.
5. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике/Пер. под ред. В. И. Алексеева. М.: Мир, 1971. 496 с.
6. Родионов С. А. — Изв. вузов. Приборостроение, 1977, т. 20, № 10, с. 117–121.
7. Родионов С. А. — Изв. вузов. Приборостроение, 1979, т. 22, № 1, с. 81–84.
8. Родионов С. А. — Оптика и спектроскопия, 1981, т. 50, с. 1178–1184.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики/Пер. под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1970. 856 с.
10. Родионов С. А. — Оптика и спектроскопия, 1979, т. 46, с. 566–573.
11. Родионов С. А. — Оптика и спектроскопия, 1979, т. 46, с. 776–784.
12. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967. 348 с.
13. Березин Н. П., Сивяков И. Н. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1980, т. 25, с. 348–355.
14. Халфин Л. А. — В кн.: Качество аэрофотоизображения: Материалы семинара Межведомственной комиссии по аэрофото съемке при АН СССР. Л., 1969, с. 26–30.
15. Рамм А. Г., Родионов С. А. — Оптика и спектроскопия, 1977, т. 42, с. 540–545.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров/Пер. под ред. И. Г. Арамоновича. М.: Наука, 1974. 832 с.
17. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображения. Киев: Техника, 1981. 134 с.

М. Г. Шлякин

#### ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Регистрация на фотоматериале быстро движущегося изображения, что имеет место при аэрофотографировании, отличается от фотографирования неподвижных объектов и требует правильного выбора и сопряжения параметров оптики и фотослоя с учетом реальных эксплуатационных условий съемки. Особенно остро этот вопрос встает при разработке систем с экстремальным разрешением.

Известно, что минимальный угловой размер элемента, передаваемого идеальной (безабберационной) оптической системой с определенным контрастом, зависит от диаметра зрачка системы. Так, угловой размер  $\gamma$  объекта, передаваемого с контрастом 0,1 и 0,6, связан с диаметром зрачка системы  $D$  (мм)

следующими выражениями:

$$\gamma_{0,1} = 85/D \quad (\text{съемка контрастных объектов});$$

$$\gamma_{0,2} = 215/D \quad (\text{съемка малоконтрастных объектов}).$$

При этом предполагается, что рабочая длина волны  $\lambda_{\text{раб}} = 0,7$  мкм.

Для реальных объективов в зависимости от величины их остаточных рачетных и технологических aberrаций в формулы (1) и (2) должен быть введен коэффициент  $k > 1$ . Для высококорригированных современных объективов коэффициент  $k$  не превышает 1,25. Выражения (1), (2) характеризуют потенциальную разрешающую способность оптики, но не учитывают энергетику системы. Они справедливы в предположении, что количество энергии в фокальной плоскости достаточно для оптимальных условий экспонирования фотопленки, т. е. величина расчетной экспозиции соответствует максимуму ее резольвометрической кривой.

При фотографировании за оранжевым фильтром определенной экспозиции в зависимости от чувствительности пленки соответствуют плотность фотонов и энергетическая экспозиция, указанные ниже:

Если принять в расчет уровни разрешения, примерно отвечающие приведенным значениям чувствительности, можно оценить приблизительно число фотонов, приходящееся на площадь штриха миры на пороге разрешения; в случае миры контрастом  $K = 1 : 3$  эти величины составляют 20—35 тыс. фотонов.

Приемник «разрешает» миру, если он чувствителен к перепаду в экспозиции  $\Delta H$  между ее светлыми и темными штрихами. Величина сигнала — разность в количестве фотонов (энергии), падающих на светлый и темный штрихи миры, равна  $\Delta H_{ab}$ , где  $a$  и  $b$  — размеры штриха миры.

Фотонный шум — следствие флюктуации падающих фотонов — равен, как известно,  $\sqrt{H_{ab}}$ . Полагая  $a : b = 1 : 5$ , имеем для отношения сигнал/шум

$$\text{ОСШ} = aK\sqrt{5H}, \quad (3)$$

где  $K = \Delta H/H$ . С использованием выражения (3) получаем известное соотношение Роуза [1], которое определяет для идеальных приемников плотность фотонов, обеспечивающую обнаружение с определенным отношением сигнал/шум линейного протяженного элемента размером  $a \times b$  с наложенным контрастом  $K = \Delta H/H$ .

Если задать  $a = 5$  мкм (соответствует  $R = 100$  мм<sup>-1</sup>), ОСШ = 5 (соответствует критерию Роуза) и  $K = 1 : 3$ , то получим  $H_{\text{вл}} = 1,8$  фотон/мкм<sup>2</sup>. На площадь штриха  $5 \times 25$  мкм<sup>2</sup> при этом приходится 225 фотонов. Как видно, данная величина значительно меньше соответствующей оценки для фотографического материала, которая была получена выше. Объясняется этот факт тем, что пленка далеко не идеальный приемник, т. е. обладает весьма малой величиной квантовой эффективности детектирования. Для многих пленок, особенно высококонтрастных, эта величина составляет менее 1%.

Для реальных фотоматериалов имеем

$$\text{ОСШ} = \eta aK\sqrt{5H}, \quad (4)$$

где  $\eta = 0,43g/G\sqrt{H} \ll 1$ ;  $G$  — гранулярность пленки,  $g$  — градиент характеристической кривой [2].

Образование фотографического изображения можно рассматривать как статистический процесс, но на первый план здесь выходит статистика (шум) зерен, а не флюктуация падающих фотонов в прямом виде. В отличие от многих типов оптико-электронных приемников пленка является счетчиком проявленных зерен, а не падающих фотонов.

В случае малых контрастов выражение (4) можно представить в следующем виде:

$$\text{ОСШ}(N) \approx \frac{K_0 T_1(N) T_2(N) g}{2GN} \cdot 10^3, \quad (5)$$

где  $K_0$  — контраст объекта;  $T_1$  и  $T_2$  — частотно-контрастные характеристики оптики и пленки соответственно при частоте  $N$  (мм<sup>-1</sup>) =  $10^3/2a$  (мкм).

Если принять, что разрешение определяется уровнем ОСШ = 1, то точка пересечения этой прямой с графиком функции ОСШ( $N$ ) определяет разрешающую способность  $R$  системы.

Отношение сигнал/шум, равное 1, означает, что на пределе разрешения между темными и светлыми штрихами миры могут быть перемишки, вызванные флюктуациями плотности, но благодаря протяженному (5 : 1) штриху миры глаз даже при наличии перемишек фиксирует разрешение.

Приняв ОСШ = 1, можно найти кривую порогового контраста пленки в терминах действующей экспозиции:

$$H(N) = \frac{G}{g} \frac{N}{1000}. \quad (6)$$

Как следует из выражения (6), кривая порогового контраста зависит от экспозиции, поскольку  $G/g = f(H)$ . Экспозиция, соответствующая максимуму резольвометрической кривой, дает минимальную кривую порогового контраста.

В случае оптико-электронных линейных приемников типа ПЗС-структур выражение для отношения сигнал/шум приблизительно может быть записано в том же виде:

$$\text{ОСШ} \approx \eta aK \sqrt{5H}.$$

Однако в данном случае в пределах рабочей области дифракционная эффективность практически не зависит от экспозиции, поэтому отношение сигнал/шум, а значит, и разрешение здесь во многих случаях могут быть увеличены за счет перехода к большей экспозиции. Для фотоматериалов зависимость ОСШ от экспозиции, определяемая зависимостью  $(G/g)(H)$ , существенно более слабая и добиться значительного увеличения разрешения за счет увеличения экспозиции не представляется возможным.

Рассмотрим пути повышения ОСШ, а значит, и разрешения в случае оптико-фотографических систем.

Съемка в статике (неподвижные объект и фотоаппарат). Запишем выражение для отношения сигнал/шум

$$\text{ОСШ} = (g/G)\gamma' K_0 T_1 T_2 \cdot 10^3, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — угловой размер объекта;  $f'$  — фокусное расстояние объектива.

Из выражения (7) следует, что при фиксированном диаметре оптики и выбранном типе материала всегда более выгодны длиннофокусные системы, так как при независимости от  $f'$  множителей  $(g/G)$  и  $T_1$  (последний рассматривается как функция углового размера  $\gamma$  и без учета aberrаций) ОСШ растет не только пропорционально  $f'$ , но и за счет увеличения  $T_2$  (в плоскости изображения уменьшается пространственная частота, соответствующая тому же угловому размеру объекта). При неподвижном изображении выбором соответствующей экспозиции можно достичь максимальной величины  $g/G$  и тем самым компенсировать уменьшение освещенности изображения с ростом  $f'$ .

Таким образом, при съемке в статике увеличение фокусного расстояния (масштаба съемки) является надежным путем повышения углового разрешения оптико-фотографической системы, хотя при этом пропорционально  $f'$  растут, конечно, продольные размеры прибора. Другие очевидные пути — переход на более мелкозернистые материалы (уменьшение  $G$  и увеличение  $T_2$ ) или увеличение диаметра оптики (увеличение  $T_1$ ).

Съемка в динамике. При съемке с движущихся аппаратов (аэросъемка) в сквозную частотно-контрастную характеристику системы входят ее составляющие, обусловленные остаточными сдвигами изображения  $T_2$  и остаточной

$S_{0,2}^{\text{ОСМ}}$	Плотность фотонов, фотон/мкм <sup>2</sup>	Энергетическая экспозиция, Дж/см <sup>2</sup>
25	160	$0,5 \cdot 10^{-3}$
12	340	$1 \cdot 10^{-3}$
3	1730	$5 \cdot 10^{-3}$



действующей памяти при угрозе ее переполнения в память ЭВМ, наращиваемую до весьма значительных размеров.

Перейдем теперь к задаче повышения разрешающей способности — другого фактора, определяющего информационную емкость телевизионной системы. Изображение, присутствующее на входе преобразователя свет-сигнал, подвергается в процессе формирования видеосигнала ряду преобразований. В конечном приближении преобразованное изображение представляет собой, как известно, свертку исходного изображения  $B(x, y)$  с некоторой весовой функцией  $a(x, y)$  фильтра пространственных частот, характеризующей данное преобразование:

$$\bar{B}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x - \xi, y - \eta) a(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

В области пространственных частот происходит преобразование спектра исходного изображения  $C(\omega_x, \omega_y)$ . Частотно-контрастная характеристика преобразования есть  $A(\omega_x, \omega_y)$  — фурье-преобразование весовой функции. Спектр пространственных частот после преобразования есть

$$\bar{C}(\omega_x, \omega_y) = A(\omega_x, \omega_y) C(\omega_x, \omega_y).$$

Как правило, весовые функции преобразования далеки от двумерной дельта-функции, при которой обеспечивалось бы стигматическое отображение. Сответствующие фильтры представляют собой двумерные фильтры нижних пространственных частот. Именно так (если только позволено пользоваться линейным приближением) действуют электронно-оптические aberrации, растекающие заряды на мишени, рассеяние света на слое люминофора и т. п. Не меняют деления электронов в суперорбитоне, напоминающего латеральное торможение в ретивных полях сетчатки глаза, что способствует некоторому обострению перепадов и выделению мелких деталей: в целом электронно-оптические приборы телевидения действуют как фильтры нижних частот [5].

То, что при этом происходит, можно проиллюстрировать на примере фильтра с весовой функцией типа двумерного нормального распределения: это хорошая аппроксимация для многих практически реализуемых пространственных фильтров. На рис. 1 показан характер сглаживания при регистрации в телевизионной системе, имеющей подобную весовую функцию, двух точек, стоящих друг от друга на некотором расстоянии  $b$ . Не снижая общности рассмотрения, используем сечение нормированной весовой функции  $\exp(-x^2)$ . Весовая функция — уже на накопительной мишени передающей трубки — эти две точки будут представлены распределением  $\exp(-x^2) + \exp[-(x-b)^2]$ .

Пока безразмерный параметр  $b$  не превышает  $\sqrt{2}$ , суммарное распределение остается «одногорбым». Нужно заметить, сравнимое с полушириной весовой функции расстояние между точками, чтобы возникло «двугорбое» распределение (например, как на рис. 2), допускающее при реальном уровне помех преобразователя свет-сигнал надежное разделение точек.

Основная тенденция увеличения разрешающей способности в телевидении недавнего времени сводилась к стремлению максимально приблизить весовую функцию каждого из фильтров в многозвенной цепи преобразования изображений к дельта-функции. Значительно уменьшены электронно-оптические aberrации, особенно осевой астigmatизм, вызванный несовершенством технологии сборки, и т. п.; уменьшено растекание благодаря улучшению технологии накопительных мишеней. Особенно заметны достижения в области выравнивания разрешающей способности по полю изображения. Этому служат в частности, коррекция астigmatизма и кривизны поля отклоняющей системы с помощью цифроаналоговых преобразований при возбуждении четырехполюсных линз, являющихся динамическими корректирующими элементами. В безвакуумных преобразователях свет-сигнал однородность разрешающей способности по полю определена периодической структурой.

Но все эти меры еще недостаточны — эффективные поперечные размеры весовой функции существенно ограничивают разрешающую способность. В связи с развитием методов цифровой обработки изображения возникло еще одно направление при решении задачи повышения разрешающей способности. Зная весовую функцию фильтра нижних частот, уменьшающего разрешение, находят (иногда, впрочем, и экспериментально) обратное преобразование, подобно тому как в одномерном случае подавление нижних частот в сигнале компенсируют при апертурной коррекции подъемом верхних частот. К сожалению, и на этом пути возникают принципиальные трудности. Прежде всего, как и при родственной рассматриваемой задаче некоторых некорректных задач математической физики, решение неустойчиво, малые возмущения в преобразуемом изображении, например из-за неизбежных помех, приводят к значительным

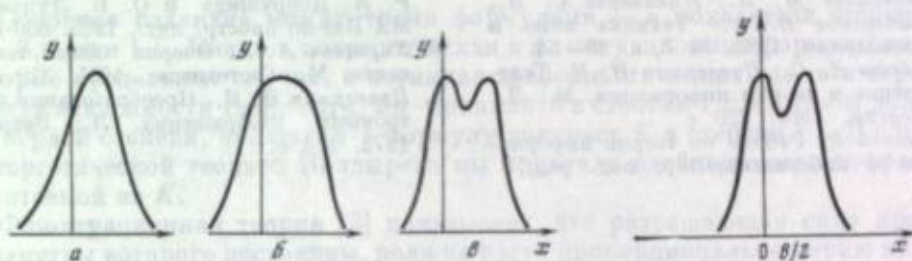


Рис. 1. Сглаживание при регистрации двух близко расположенных точек  $y = \exp(-x^2) + \exp[-(x-b)^2]$ ;  $b = 1$  (а), 1,5 (б), 2 (в)

Рис. 2. Сглаживание при регистрации двух более удаленных друг от друга точек

искажениям изображения при восстановлении. Сам исходный оператор, которому нужно подобрать обратный (т. е. весовая функция телевизионного прибора), известен весьма неточно. Но особенно ограничивает возможности такой коррекции искажения то, что в действительности о линейной фильтрации можно говорить лишь в некотором приближении.

Наверное, наиболее эффективным подходом к повышению разрешающей способности явилось бы устранение фильтров нижних частот в телевизионном преобразователе. Оказывается, это можно сделать, если регистрировать каждую точку, не дожидаясь, пока ее изображение подвергнется действию фильтра вместе с другими соседними изображениями точек, иными словами, перейти к регистрации одноэлектронных событий. Снова, как и для расширения динамического диапазона, придется прибегнуть к накоплению не на мишени, производящей труднообратимую или даже необратимую пространственную фильтрацию, а в цифровой памяти, емкость которой и в измерении числа независимых отсчетов может быть сделана значительно большей, нежели емкость накопительной мишени. В эту память одноэлектронные события заносят по адресам, соответствующим координатам центра события. Поскольку центр события (например, центр тяжести изображения, вызванного одним электроном, многократно усиленным перед регистрацией) определяется по видеосигналу, ограничивающими факторами здесь становятся флюктуационные помехи в телевизионном канале и нестабильность сканирования.

Опыт показывает, что по крайней мере в направлении сканирования число независимых отсчетов может быть увеличено на порядок. Накопителем становится цифровая память, где строится распределение числа событий по плоскости. Теперь в накопителе точка исходного изображения отображается не весовой функцией, «размытой» по плоскости, а снова точкой (в одномерном случае это была бы середина импульса, т. е. опять-таки точка, а не импульсная протяженная функция). Если бы не было указанных выше дестабилизирующих факторов, можно было бы говорить о приближении к дельта-функции, ограниченном лишь числом дискретных накопительных ячеек цифровой памяти на единицу площади. Но и при указанных факторах разрешающая способность может быть значительно увеличена. Однако очевидна и цена этого улучшения: при заданной емкости накопителя повышение пространственного разрешения

оплачивается снижением разрешения временно́го, приходится резко ослабить входные квантовые потоки.

Но если временно́е разрешение не существенно (например, как это часто бывает при исследованиях спектров, астрономических исследованиях и т. п.), то важно обеспечить лишь ту часть информационной емкости, которая относится к динамическому диапазону и числу независимых отсчетов на плоскости эффективный путь повышения информационной емкости в телевидении состоит в переходе от накопления на мишени к накоплению в цифровой памяти.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кришнев М. И., Никаноров С. И., Хлебников В. А. — Техника кино и телевидения, 1982, № 3, с. 49—54.
2. Лебедев Д. С., Цуккерман И. И. Телевидение и теория информации. М.: Л.: Энергия, 1965. 220 с.
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике/Пер. под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лунца. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 830 с.
4. Харкевич А. А. Очерки общей теории связи. М.: Гостехиздат, 1955. 320 с.
5. Цуккерман И. И. Преобразования телевизионных изображений. Л.: Энергия, 1972. 184 с.

А. В. Луизов

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

В отличие от фотоснимка зрительное изображение расшифровывается практически одновременно с его получением. Зрение работает всегда в масштабе реального времени.

Качество изображения определяется разрешающей силой системы, а информационная емкость — разрешающей способностью системы и площадью изображения. Разрешающую способность обычно характеризуют обратной величиной — предельным углом разрешения  $\delta$ . Такая характеристика удобна для расчетов, так как можно считать, что в наблюдаемой картине разрешаются элементы площадью  $\delta^2$ .

В процессе эволюции глаз настолько усовершенствовался, что пределы возможностей зрения ограничиваются только основными законами природы: первым и вторым началами термодинамики, волновыми и корпускулярными свойствами света.

Волновая природа света приводит к тому, что предел разрешению ставится дифракция, которая дается дифракционной формулой [1]

$$\delta = 0,233' / d,$$

где  $d$  — диаметр зрачка, см.

Однако в дифракционную формулу не входят ни контраст  $K$  объекта с фоном, ни яркость  $L$  фона, от которых несомненно зависит  $\delta$ .

На основе закона сохранения энергии И. Г. Болдырев построил теорию зрения [2], которую он назвал энергетической. Основное ее положение заключается в том, что для того, чтобы сигнал был воспринят, он должен обладать в некотором минимуме энергии. При постоянной яркости энергетическая теория дает следующее соотношение между угловым размером объекта и его контрастом с фоном  $K$ :

$$(K - \epsilon) \delta^2 = C_s,$$

где  $\epsilon$  — пороговый контраст для большого объекта (т. е. при  $\delta \rightarrow \infty$ );  $C_s$  — постоянная величина.

Корпускулярная теория учитывает флюктуационные колебания числа квантов, участвующих в элементарном зрительном акте [3], что, по существу, связано со вторым началом термодинамики. В результате получается формула, которую мы назвали флюктуационной:

$$K\delta = C_\phi,$$

где  $C_\phi$  — величина, также постоянная при данной яркости.

Вейнберг [4] на основе обработки своих и литературных экспериментальных данных пришел к зависимости, которую можно представить в виде

$$K\delta^{1,5} = C_e,$$

где  $C_e$  — постоянная величина.

Основное различие между тремя формулами — в показателе степени при  $\delta$  — 2, 1 или 1,5. Видимо, энергетическая и флюктуационные формулы дают некоторые предельные случаи, а истинная зависимость лежит где-то в середине. Следуя зависимости Вейнберга, мы приняли  $\delta$  в степени 1,5 и, чтобы получить  $\delta$  в первой степени, включили в формулу контраст  $K$  в степени  $2/3$ . В согласии с энергетической теорией Болдырева мы признали необходимость поправки  $\epsilon$ , вычитаемой из  $K$ .

Флюктуационная теория [3] показывает, что разрешающая сила прибора, параметры которого постоянны, должна расти пропорционально корню квадратному из яркости. Иначе говоря,  $\delta$  должна быть пропорциональна  $L^{-0,5}$ . Однако параметры глаза при пониженной яркости перестраиваются так, чтобы хотя бы частично компенсировать это понижение, уменьшить зависимость  $\delta$  от  $L$ . Поэтому фактически  $\delta$  должна быть пропорциональна  $L^{-\gamma}$ , где  $\gamma < 0,5$ . Кроме того, с увеличением яркости разрешающая сила глаза не может расти безгранично, т. е.  $\delta$  не может стать меньше некоторой величины  $\delta_0$ , зависящей от дискретного строения сетчатки. Таким образом, зависимость  $\delta$  от  $K$  и  $L$  должна иметь вид

$$\delta = \frac{\delta_0 + L^{-\gamma}}{(K - \epsilon)^{1/3}}.$$

Проанализировав литературные данные, мы нашли следующие значения входных параметров [5]:  $\delta_0 = 0,44'$ ;  $a = 0,63'$ ;  $\epsilon = 0,019$ ;  $\gamma = 0,42$ . Итак,

$$\delta = \frac{0,44' + 0,63'L^{-0,42}}{(K - 0,019)^{1/3}}. \quad (2)$$

При  $K = 1$  формулы (1) и (2) согласуются, т. е. дают одно и то же значение  $\delta$  только при одном значении яркости  $L$ . Но чтобы найти три величины ( $L$ ,  $\delta$  и  $d$ ), не хватает одного уравнения. Однако диаметр зрачка ( $d$ , см) зависит от яркости [6]

$$d = (0,5 - 0,3 \operatorname{th} (0,4 \lg L)), \quad (3)$$

где  $\operatorname{th}$  — гиперболический тангенс.

Считая формулы (1), (2) и (3) уравнениями и решая их совместно при  $K = 1$ , получаем

$$L = 17 \text{ нит}, \quad d = 0,36 \text{ см}, \quad \delta = 0,63'.$$

При  $L < 17$  нит зрачок расширяется, а разрешающая сила падает. При  $L > 17$  нит зрачок сужается, а разрешающая сила растет и приближается к дифракционной. Объяснение этому следует искать, видимо, в произвольных движениях глаз, которые как бы ощупывают объект, переводя пространственные изменения во временно́е [6]. Однако такой процесс требует времени, и при его дефиците разрешающая способность падает. Если объект появляется только на короткое время  $\tau$ , мы воспринимаем не полный его контраст  $K$ , а меньшую величину, эффективный контраст  $W$ , который и будет определять разрешающую силу глаза. Связь между  $W$  и  $K$  выражается формулой [3]

$$W = K (1 - \exp(-\tau/\theta)).$$



Согласно формуле (4), для яркости фона  $17 \text{ нит}^{\circ} = 0,05 \text{ с}$ ,  $C_0 = 44 \cdot 10^6 \text{ бит/с}$ .  $C_0$  — максимальное количество информации, которое за секунду может воспринять сетчатка глаза. Однако мозг может принять и осмыслить за это время гораздо меньшее количество информации  $C_r$ . Этим символом ( $C_r$ ) мы обозначаем пропускную способность зрительной системы в целом от сетчатки до мозговых центров включительно.

Обзор работ по определению  $C_r$  можно найти в книге [9]. Разброс полученных результатов довольно велик: от 20 до 70 бит/с. Наиболее вероятным можно принять значение  $C_r = 60 \text{ бит/с}$ .

Пропускная способность сетчатки почти в миллион раз больше пропускной способности зрения в целом: сетчатка способна подготовить огромный поток информации и только ничтожная ее доля используется сознанием. По-видимому, такой избыток информации на сетчатке полезен. Полезно иметь на полке энциклопедический словарь в 90 томов, хотя обращаться к нему приходится быть может несколько раз в год, чтобы прочесть в общей сложности десяток страниц. На сетчатке подготавливается колоссальное количество информации, из которой в каждый момент используется только ничтожная доля, но именно та информация, которая в этот момент нужна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Луизов А. В., Федорова Н. С. — Опт.-мех. пром-сть, 1971, № 6, с. 9—13.
2. Болдырев Н. И. — Проблемы физиологической оптики, 1948, т. 6, с. 130—135.
3. Луизов А. В. Инерция зрения. М., 1961. 248 с.
4. Вейнберг В. Б. — Пробл. физиологической оптики, 1946, т. 3, с. 50—57.
5. Луизов А. В., Федорова Н. С. — Докл. АН СССР, 1973, т. 240, с. 247—248.
6. Луизов А. В. Физика зрения. М.: Знание, 1976. 64 с.
7. Травникова Н. П. — Тр. ГОИ, 1960, т. 28, вып. 157, с. 252—257.
8. Луизов А. В., Федорова Н. С. — В кн.: Специальные вопросы светотехники в охране труда. М., 1975, с. 57—69.
9. Глазер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 184 с.

А. Ф. Симоенко

#### СРАВНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ФОТОРЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД

Сравнение различных фоторегистрирующих сред между собой является распространенной задачей, с которой мы сталкиваемся при их выборе или при поиске путей повышения информационных характеристик систем регистрации изображений. Существующие способы оценки параметров таких систем, зачастую формально заимствованные из традиционной фотографии, не позволяют исчерпывающе полно их сопоставить. Проблемы комплексной оценки и сравнения эффективности фоторегистрирующих устройств все чаще обсуждаются в научной литературе [1—3]. В настоящей работе рассматриваются некоторые из этих вопросов применительно к регистрирующим системам, имеющим промежуточное звено с носителем изображения.

Под системой регистрации изображения понимают устройство, схематически изображенное на рис. 1, входным сигналом для которого служит пространственное распределение экспозиции  $H$  в плоскости носителя (входное изображение), а на выходе сигнал выделяется в виде, пригодном либо для непосредственного визуального восприятия, либо для последующей количественной обработки информации. В связи с этим система в целом включает в себя стадии усиления и считывания изображения. Система определяется оператором преобразования входного сигнала и характеристикой шума на выходе. Практи-

Сравним на основании развитых представлений четыре типа систем регистрации изображений на фотографическом, фотохромном, люминесцентном и фототермопластическом материалах. Каждую из систем разобьем на четыре стадии (как это показано на рис. 1): фотохимическую, или фотоэлектрическую, стадию, стадию усиления изображения, стадию считывания (или визуализации) и стадию регистрации. Чтобы необоснованно не усложнять задачу, оценим по-стадийно величины  $\Delta_i$  в приблизительно одинаковых и достаточно типичных условиях регистрации. Примем коэффициент поглощения света слоем, равным 0,5, квантовый выход первичного процесса  $\xi = 0,5$ , экспозицию  $H_0 = 10^{11}$  квант/см<sup>2</sup>, освещенность в плоскости слоя, создаваемую от визуализирующего источника,  $E_0 = 10^{14}$  квант/см<sup>2</sup>·с, время накопления регистрирующего устройства  $t = 1$  с, его порог чувствительности к изменению оптической плотности  $D_{\min} = 10^{-3}$ , площадь считываемого элемента изображения  $\Omega = 100$  мкм<sup>2</sup>.

Для фотографического материала (ФМ) на первой стадии зашумление сигнала происходит за счет неполного поглощения света и частичного преобразования поглощенных квантов в атомы фотолитического серебра. Выходным сигналом  $x_1^{\text{ФМ}}$  для этой стадии можно считать поверхностное содержание серебра в эмульсионном слое  $x_1^{\text{ФМ}} = A \xi H$ , где  $H$  — экспозиция;  $A$  — доля поглощенного света. Эффективность этой стадии, очевидно,  $\Delta_1^{\text{ФМ}} = \xi A$  и для принятых значений  $\xi$  и  $A \Delta_1^{\text{ФМ}} = 0,25$ .

На второй стадии происходит процесс химического усиления сигнала, заключающийся в образовании из  $x_1^{\text{ФМ}}$  атомов серебра  $x_2^{\text{ФМ}}$  зерен проявленного изображения. Тогда по закону больших чисел  $\Delta_2^{\text{ФМ}} = x_2^{\text{ФМ}}/x_1^{\text{ФМ}}$ . С другой стороны, величину  $\Delta_2^{\text{ФМ}}$  можно оценить через спектр мощности  $N(\nu)$  пропускания  $\tau$  фотографического почернения [4] и с учетом формулы (4) представить в виде

$$\Delta_2^{\text{ФМ}} = \frac{\tau^2 \gamma^2}{N(0) H_0 A \xi},$$

где  $\gamma$  коэффициент контрастности в точке градационной характеристики  $\varphi(\lg H)$  с экспозицией  $H_0$ . Для фотографических материалов типичными величинами можно считать  $N(0) = 10^{-9}$  см<sup>2</sup>,  $\gamma = 1$ ,  $\tau = 0,8$ . Отсюда вероятное значение  $\Delta_2^{\text{ФМ}} = 2,6 \cdot 10^{-2}$ .

На третьей стадии процесса сигнал пропускания преобразуется с помощью просвечивающего источника в световой сигнал. Если считать, что элемент считывающего устройства имеет площадь  $\Omega$ , то  $x_3^{\text{ФМ}} = E_0 \tau \Omega t$ . Дополнительное зашумление этого сигнала может происходить за счет дробового шума просвечивающего источника, но так как шум зернистости значительно превышает дробовой шум при данных условиях, то эффективность этой стадии, так же как и эффективность последующей (четвертой) стадии регистрации, можно считать равной единице, т. е.  $\Delta_3^{\text{ФМ}} = \Delta_4^{\text{ФМ}} = 1$ . С другой стороны, нужно иметь в виду, что это условие не соблюдается, если, например, резко уменьшить  $E_0$ ,  $\Omega$  или  $t$ .

Перемножая найденные значения  $\Delta_i$ , мы получим оценку максимальной эффективности фотографической системы регистрации  $\Delta^{\text{ФМ}} = 6,5 \cdot 10^{-3}$ , хорошо согласующуюся с известными литературными данными [3, 4]. В качестве примера на рис. 2 приведены наши экспериментальные данные по изучению зависимости величины  $\Delta$  от экспозиции для пленок МЗ-3 и Микрат-200 [4].

Фотохромный (ФХ) процесс регистрации характеризуется отсутствием стадии химического усиления. На первой стадии под действием фотоактивной экспозиции  $H$  в носителе с квантовым выходом  $\xi$  образуется новое химическое соединение, имеющее заметное поглощение в видимой области спектра. Будем полагать в дальнейшем, что сечение поглощения молекул окрашенной формы фотохромного соединения  $\sigma$  равно  $10^{-14}$  см<sup>2</sup>.

Как и для фотографического материала,  $\Delta_1^{\text{ФХ}}$ , очевидно, будет равно  $A \xi = 0,25$ . На второй стадии изменений в слое не происходит, поэтому  $\Delta_2^{\text{ФХ}} = 1$ . Оптическая плотность изображения при получении слоем экспозиции  $H_0$  будет настолько мала ( $D \approx 10^{-4}$ ), что дробовой шум визуализирующего источника све-

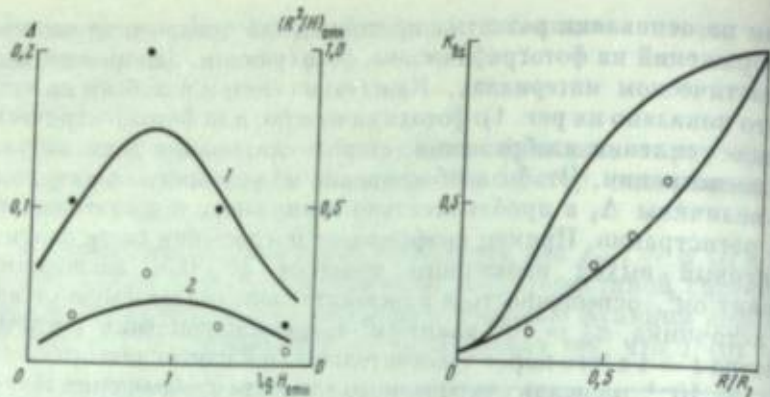


Рис. 2. Зависимость величины  $\Delta$  (линии) и  $R^2/H$  (точки) от величины экспозиции  $H$  для фотграфических материалов МЗ-3 (1) и Микрат-200 (2)

Рис. 3. Взаимозависимость относительной величины разрешения  $R/R_{K=1}$  и контраста нового изображения  $K_{вх}$

Сплошная кривая — расчет по соотношению (5); точки — эксперимент

та уже заметно зашумляет сигнал  $x_3^{\Phi X}$ . С учетом возможного времени накопления  $t$ , сигнала  $x_3^{\Phi X}$  и квантового выхода  $\xi_\phi$  воспринимающего свет фотоприемника нетрудно получить при  $x_2^{\Phi X} \ll 1$

$$x_2^{\Phi X} = H_0 A \xi_\phi; \quad x_3^{\Phi X} = E_0 \xi_\phi t x_2; \quad \sigma^2(x_3^{\Phi X}) = E_0 \xi_\phi t \Omega; \quad \sigma^2(x_2^{\Phi X}) = s^2 H A \xi_\phi^2; \\ \Delta_3^{\Phi X} = E_0 \xi_\phi A \xi_\phi H s^2 t.$$

При  $\xi_\phi = 0,1$  имеем  $\Delta_3^{\Phi X} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ . Но даже при столь малой эффективности отношения сигнал/шум в сигнале настолько велико ( $\varphi > 10^3$ ), что поступающая система регистрации, как правило, не в состоянии передать его без изменений из-за собственных шумов усилительных устройств.

Будем характеризовать четвертую стадию процесса некоторым порогом чувствительности  $D_{\min}$  к изменению оптической плотности носителя. Считая что  $x_4^{\Phi X} = x_3^{\Phi X}$ ,  $\sigma^2(x_4) = (2,41 x_3 D_{\min})^2 + \sigma^2(x_3)$ , получим

$$\Delta_4^{\Phi X} = \frac{\sigma^2(x_3)}{\sigma^2(x_4)} = [1 + D_{\min}^2 E_0 \xi_\phi t \Omega (2,41)^2]^{-1} \approx [(2,41)^2 D_{\min}^2 E_0 \xi_\phi t \Omega]^{-1},$$

и при  $D_{\min} = 10^{-3}$ ,  $\xi_\phi = 0,1$  и  $\Omega = 10^{-6} \text{ см}^2$  величина  $\Delta_4^{\Phi X}$  составит  $1,7 \cdot 10^{-4}$ . Эффективность системы в целом при  $H_0 = 10^{11} \text{ квант/см}^2$  составит  $\Delta^{\Phi X} = 10^{-3}$ . При более детальном рассмотрении третьей стадии можно показать, что она имеет максимум эффективности при  $A \xi_\phi H s = 1$  ( $H \approx 4 \cdot 10^{14} \text{ квант/см}^2$ ), тогда  $\max \Delta^{\Phi X} = 1,7 \cdot 10^{-4}$ .

Аналогичная ситуация возникает при фотолюминесцентном (ФЛ) способе считывания изображения [5]. И в этом случае  $\Delta_1^{\Phi X} = A \xi$  и  $\Delta_2^{\Phi Л} = 1$ . Особенностью процесса является нулевой метод считывания, позволяющий снять ограничение по порогу чувствительности устройства  $D_{\min}$  к относительному изменению сигнала на входе последнего звена регистрации ( $\Delta_1^{\Phi Л} = 1$ ). Однако зашумление сигнала дробовым шумом на стадии визуализации больше, чем в случае фотохромного носителя, из-за значительной потери света в системе при изотропном люминесцентном переизлучении возбуждающих квантов света визуализирующего источника. В силу этих причин

$$\Delta_3^{\Phi Л} = E_0 \xi_\phi \frac{\omega^2}{4\pi} s_{\text{возб}}^2 A \xi H,$$

где  $s_{\text{возб}}$  — сечение возбуждения люминесцирующей формы светочувствительного материала;  $s_{\text{возб}} = 10^{-14} \text{ см}^2$ ;  $\omega^2$  — телесный угол захвата света фотоприемным устройством. Фоном люминесценции примесей мы пренебрегаем.

Принимая  $\omega^2/4\pi = 10^{-2}$ , при  $H_0 = 10^{11} \text{ квант/см}^2$  получим  $\Delta_3^{\Phi Л} = 0,25 \cdot 10^{-6}$ . Как и в случае фотохромного материала,  $\Delta_3^{\Phi Л}$  имеет максимум при  $H = 4 \cdot 10^{14} \text{ квант/см}^2$  ( $\max \Delta^{\Phi Л} = 10^{-3}$ ).

Наконец рассмотрим фототермопластический (ФТП) процесс. На первой стадии процесса происходит фотоэлектрическая разрядка поверхностного заряда ФТП-слоя. Поле изображения уже исходно зашумлено дискретным характером распределения электронов или ионов на поверхности материала. С учетом этой особенности

$$\Delta_1^{\Phi ТП} = A^2 \xi^2 H \exp(-A \xi H / q_0),$$

где  $q_0$  — начальная поверхностная плотность заряда, выражаемая числом электронов на единицу площади. При  $A \xi H = q_0$   $\max \Delta_1^{\Phi ТП}$  составит  $A \xi \cdot 0,37$ .

На второй стадии термического проявления поверхностная плотность заряда преобразуется в рельефное изображение  $x_2 = c(q_0 - q) = c x_1$ . Если дополнительного зашумления сигнала не происходит, то  $\Delta_2^{\Phi ТП} = 1$ . На третьей стадии визуализации рельеф преобразует направленный световой поток в рассеянное излучение с модуляционной эффективностью  $\eta \approx x_2^2$ . Основной причиной зашумления сигнала на этой стадии являются дефекты подложки и фоточувствительного слоя. Уровень этого шума не зависит от  $H$ , а его спектр  $N(\nu)$  подобен спектру зернистости фотографических материалов и простирается в достаточно широкой области частот [7]. Выражая величину шума через  $N(0)$ , получим

$$\Delta_3^{\Phi ТП} = 4\eta^2 q / N(0) (q_0 - q)^2; \quad \max \Delta_3^{\Phi ТП} = 4\eta_0^2 / N(0) H_0 A \xi \cdot 1,7,$$

где  $\eta_0$  — дифракционная эффективность участка изображения с оптимальной экспозицией  $H_0$ .

При  $\eta_0 = 0,1$ ,  $H_0 = 10^{11} \text{ квант/см}^2$  и  $N(0) = 10^{-9} \text{ см}^2$  получим  $\max \Delta_3^{\Phi ТП} = 10^{-3}$ . Однако нужно иметь в виду, что реально наблюдаемое значение  $N(0)$  для ФТП-материалов без специальных мер защиты от пыли и царапин в десятки раз больше, чем принятая величина  $N(0)$ .

Найденные значения эффективности при выбранных условиях экспонирования сведены в таблицу.

Эффективность детектирования систем с различными регистрирующими средами

Условия	ФМ	ФХ	ФЛ	ФТП
$H_0 = 10^{11} \text{ квант/см}^2$ , $E_0 = 10^{14} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-3}$
$H_0 = 4 \cdot 10^{14} \text{ квант/см}^2$ , $E_0 = 10^{14} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$	—	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	—

Приведенные оценки показывают, что повышение эффективности детектирования всех систем, за исключением фотографической, может быть достигнуто только путем совершенствования вспомогательных звеньев считывания и регистрации. Так, для фотохромных или диазотипных материалов эффективно было бы повышение чувствительности системы регистрации, для люминесцентных — резкое повышение интенсивности возбуждающего излучения, для фототермопластических — улучшение качества и оптической однородности подложки и светочувствительного слоя. Однако эти пути несомненно сопряжены со значительными техническими трудностями. Полученные количественные оценки, по нашему мнению, отражают те причины, которые в настоящее время сдерживают практическое использование новых процессов и материалов для регистрации изображений в условиях дефицита света. Если же количество световой энергии не лимитировано, то, например, на фотохромных или диазотипных материалах может быть получено изображение, по качеству не уступающее фотографическому.

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что рассмотренные характеристики эффективности  $\Delta$  и разрешающей способности  $R$  достаточно полно отражают возможности систем в отношении регистрации изображений в условиях ограниченных световых экспозиций. Эти параметры удобны для объективного сопоставления различных по принципу действия систем между собой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение/Пер. под ред. В. С. Вавилова. М.: Мир, 1977. 215 с.
2. Фок М. В.—Тр. ФИАН СССР. Методы визуализации изображений, 1981, т. 129, с. 3—12.
3. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации/Пер. под ред. К. В. Вендровского. М.: Мир, 1978, с. 449—452.
4. Гренишин С. Г., Долгих Ю. К., Анохин Ю. А., Симоненко А. Ф.—Успехи науч. фотографии, 1981, т. 21, с. 207—215.
5. Пылюгина О. М., Назаров В. Б., Алфилов М. В.—Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1981, т. 26, с. 455—457.
6. Черкасов Ю. А., Прыгин Ю. А.—В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л.: Наука, 1979, с. 119—143.
7. Левин Е. В., Кислюковский И. Л.—В кн.: Конференция. Оптическое изображение и регистрирующие среды (Ленинград, 1982): Тез. докл. Л.: ГОИ, 1982, с. 284.
8. Баранова В. П., Давидкин И. М., Ломаченкова Т. А.—В кн.: Конференция. Оптическое изображение и регистрирующие среды (Ленинград, 1982): Тез. докл. Л.: ГОИ, 1982, с. 223.
9. Симоненко А. Ф., Ломаченкова Т. А., Булавина В. В.—Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1981, т. 26, с. 91—96.

А. Я. Смирнов, Н. П. Березин

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА  
ОПТИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ключевой целью прикладных наук, связанных с расчетом и конструированием оптико-фотографических систем (ОФС), является разработка рекомендаций по совершенствованию таких систем. Наиболее четкие из них являются для мустаровых и оптических рекомендаций представляют собой решения задачи оптимизации системы. Общую постановку оптимизационной задачи рассмотрим ниже [1].

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА И ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ  
ОПТИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исходные данные. Известны векторы совокупности параметров (структурных свойств) системы, обозначаемых символом  $SS$ ; задана некоторая зависимость системы, обозначаемая символом  $Q$ ; известна зависимость качества свойств системы  $Q(SS)$ .

Условие задачи. Необходимо найти совокупности свойств системы  $(SS)$ ; добиться свойств оптимальную совокупность  $SS_{opt}$ , обеспечивающую максимум функционала  $Q(SS)$ :

$$Q(SS_{opt}) = \max_{(SS)} Q(SS).$$

Решение задачи. Необходимо решить ряд проблем: во-первых, необходимо оптимальное описание свойств системы  $SS$ ; во-вторых, необходимо выбрать меру качества  $Q$  (и установить зависимость  $Q(SS)$ ); в-третьих, необходимо решить задачу поиска максимум функционала.

Описание свойств системы входит в компетенцию разработчиков аппаратуры; оптимизационную задачу занимается математик-механик. При этом необходимо меру качества  $Q$  (и зависимости  $Q(SS)$ ) в некоторой области, в которой более или менее точно работают оптико-фотографические и другие системы, переводя изображения в изображения, параметры, фотографы-профессионалы, фотографы-любители, другие потребители аппаратуры, заинтересованные в том, чтобы правильно оценить качество аппаратуры, при этом, как правило, в процессе разработки аппаратуры, при этом, как правило, в процессе разработки аппаратуры, при этом, как правило, в процессе разработки аппаратуры.

Цель данной работы — показать систематизацию возможных подходов к решению задачи качества ОФС, обзор основных результатов и анализ тех же подходов.

Известно, что, выданы два уровня рассмотрения проблемы: иконичный и квалиметрический (схема 1). На уровне иконичности ОФС представляется как устройство, которое ставит в соответствие заданному объекту  $O$  фотографическое изображение  $I$  (схема 2).

Наиболее общей математической моделью ОФС может служить оператор  $\mathcal{P}$ , переводящий объект  $O$  в изображение  $I$ :

$$I = \mathcal{P}O.$$

Поскольку разработчики имеют возможность изменить технические характеристики ОФС, задача оптимизации получает следующее уточнение. В множестве возможных операторов  $\{\mathcal{P}\}$  требуется найти оптимальный оператор  $\mathcal{P}_{opt}$ , обеспечивающий максимальное значение  $Q(\mathcal{P})$ :

$$Q(\mathcal{P}_{opt}) = \max_{\{\mathcal{P}\}} Q(\mathcal{P}).$$

Схема 1

Редукция понятия о качестве оптико-фотографических систем

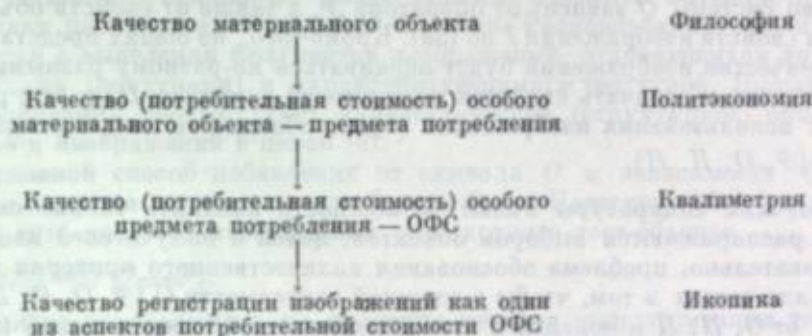
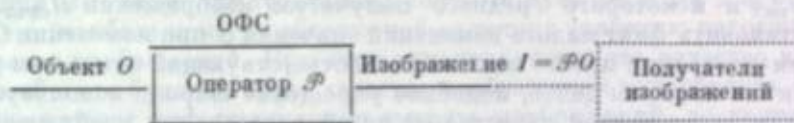


Схема 2

Иконическая модель оптико-фотографических систем



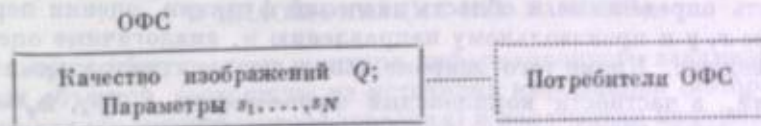
На уровне квалиметрии ОФС рассматривают как предмет потребления (товар), характеризующийся качеством регистрации изображений и целым рядом тактико-технических, эксплуатационно-технических и технико-экономических показателей. В множество таких показателей  $s_1, s_2, \dots, s_N$  входят вес, габариты, прочность, надежность аппаратуры, границы диапазона регулировок и др. (схема 3). Нередко разработчики вынуждены искать компромисс между качеством изображений и другими показателями аппаратуры. Речь идет об оптимизации системы по так называемому комплексному критерию, учитывающему и качество изображений, и параметры  $s_1, s_2, \dots, s_N$ :

$$Q(\{\mathcal{P}, s_1, s_2, \dots, s_N\}_{opt}) = \max_{\{\mathcal{P}, s_1, \dots, s_N\}} Q(\mathcal{P}, s_1, \dots, s_N). \quad (16)$$

Большая часть данной работы соответствует уровню иконичности; лишь в двух заключительных разделах мы поднимемся на более высокий уровень и рассмотрим общие принципы обоснования квалиметрических критериев.

Схема 3

Квалиметрическая модель оптико-фотографических систем



ПРОБЛЕМАТИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОФС  
НА УРОВНЕ ИКОНИКИ

Качество фотографического изображения определяется соотношением между объектом  $O$  и изображением  $I$ :

$$Q = Q(O, I). \quad (3)$$

Учитывая зависимость  $I = \mathcal{P}O$ , формулу (3) можно переписать в двух вариантах:

$$Q(O, I) = Q(\mathcal{P}, I) \quad (3a)$$

$$Q(O, \mathcal{F}) = Q(O, \mathcal{F})$$

Качество системы  $Q$  зависит от оператора  $\mathcal{F}$ , а также от свойства объекта  $O$  (36) или свойства изображения  $I$  по (3a). Кроме того, из общих представлений, что качество изображений будет оцениваться по-разному разными наблюдателями (будем обозначать свойства получателей символом  $\Pi$ ) и при разных целях использования изображений (будем обозначать цели символом  $\mathcal{C}$ ),

$$Q = Q(\mathcal{C}, O, \Pi, \mathcal{F}).$$

Разработчики аппаратуры имеют возможность изменить только свойство ОФС, а не расширить набор объектов, целей и получателей изображений. Следовательно, проблема обоснования количественного критерия качества ОФС заключается в том, чтобы в сложной зависимости  $Q(\mathcal{C}, O, \Pi, \mathcal{F})$  выделиться от  $O, \Pi, \mathcal{C}$  и перейти к простой элементной зависимости  $Q(\mathcal{F})$ , выделенной в качестве оптимальности систем по формуле (3a).

Известно несколько практических способов такого перехода. Избежать от символов  $O, \Pi, \mathcal{C}$ , как правило, удается в стандартизации некоторого объекта  $O_{\text{тест}}$  и некоторого средства получения изображений  $\Pi_{\text{тест}}$ . Им удается установить фиксированное значение  $Q$  при изменении  $O, \Pi, \mathcal{C}$  и на этом основании просто исключать соответствующий символ из рассмотрения. Как на практике чаще, подобное упрощение широко используется исследователями зависимостей качества от целей регистрации изображений. Иначе, можно предположить, что с достаточной точностью функционалы  $Q(\mathcal{C}, O, \Pi, \mathcal{F})$  представляются в виде произведения четырех функционалов  $Q(\mathcal{C}), Q(O), Q(\Pi), Q(\mathcal{F})$ . Именно такое предположение является основой выделенных самостоятельных разделов наук, посвященных различным системам свойств объектов, свойств получателей и целей регистрации изображений.

### УЧЕТ СВОЙСТВ ФОТОГРАФИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Свойства объекта  $O$  или соответствующих им изображений  $I$  могут оцениваться на различных уровнях.

На физическом уровне объекты представляются как материальные тела, отражающие, поглощающие и пропускающие свет из различных источников или самостоятельно излучающие свет.

Следующие уровни описания связаны с двумерными проекциями объектов определенными функциями двух пространственных (например, прямоугольных) координат  $i(x, y)$ , где  $i$  — интенсивность изображения в данной точке  $x, y$ . Применительно к фотографическим изображениям интенсивность  $i$  измеряется в единицах плотности почернения, коэффициента пропускания света, коэффициента отражения света и т. п. [2]. В простейшем случае функция  $i(x, y)$  описывается в терминах классического математического анализа: задана область определения и область значений функции, оценка первых и высших порядков  $i(x, y)$  по произвольному направлению  $\vec{n}$ , аналогичные оценки спектров производных. Кроме того, широко используются спектральные оценки изображений, в частности комплексный фурье-спектр  $S_i(\omega_x, \omega_y) = F\{i(x, y)\}$  пространственных частот  $\omega_x, \omega_y$  по осям  $x, y$ , где  $F$  — оператор двумерного фурье-преобразования.

Альтернативный подход к описанию свойств функции  $i(x, y)$  связан с представлением изображения как случайного двумерного поля: интенсивность тогда в рассматриваемой области постепенно усложняющиеся статистические характеристики случайных полей, заимствованные в теории вероятностей. Теория вероятностей используется для описания свойств шумов, затрудняющих восприятие информации в изображениях информации. Несколько другое понимание теории вероятностей связано с понятием о множестве (ансамбле) случайных объектов и соответствующим ему множестве случайных изображений. Элементарные элементы множества являются отдельными функциями [3].

Более высокие уровни соответствуют представлениям изображений как совокупности отдельных элементов, воспринимаемых получателем изображений.

Простейшие элементы имеют размер, определяющийся пространственной разрешающей способностью ОФС с учетом пространственной разрешающей способности зрения среднего получателя, и характеризуются своими координатами и значением интенсивности. Более сложные элементы интерпретируются как признаки распознавания образов объектов. Распознавание, как правило, начинается с выделения фрагментов изображений, отделяющихся друг от друга границами (контурами) и характеризующимися текстурой. Высшим уровням распознавания соответствует лингвистическое (структурное) описание фрагментов и изображений в целом [4].

Основной способ избавления от символа  $O$  в зависимости  $Q(O, \mathcal{F})$  — стандартизация тест-объекта  $O_{\text{тест}}$ . Качество ОФС (на уровне иконы) есть качество изображения стандартного тест-объекта

$$Q(\mathcal{F}) = Q(O_{\text{тест}}, \mathcal{F}). \tag{4a}$$

Анализ используемых на практике методов стандартизации тест-объектов показывает, что в этой области имеется широкая свобода выбора и могут даже применяться диаметрально противоположные способы рассуждений. Например, если мерой качества изображений служит одна из норм погрешности регистрации (см. ниже), то тест-объект соответствует **наихудшему случаю**, т.е. наибольшему по абсолютной величине значению погрешности в данном классе изображений. При этом гарантируется, что качество изображения любого объекта будет не ниже качества изображения тест-объекта. Если мерой качества служит информационная емкость изображений, то подразумеваются тест-объекты, соответствующие **наилучшему случаю**, поскольку информационная емкость есть наибольшее количество бит информации, содержащейся в регистрируемых изображениях. Широко используются также тест-объекты, соответствующие **типичным или средним случаям** или промежуточным вариантам между **наихудшим и типичным случаями**.

В истории развития прикладной оптики и фотографии известны периоды горячих споров о преимуществах и недостатках различных тест-объектов для оценки пространственной разрешающей способности. В первых критериях разрешения, связанных с именем Релея, в качестве тест-объектов использовали яркие точки на темном фоне. Затем появились миры, состоящие из двух, трех, пяти и другого количества штрихов с максимальным контрастом и распределением интенсивности по прямоугольному или синусоидальному закону. Возражение против таких тест-объектов состоит в том, что они приблизительно соответствуют наилучшему случаю и дают завышенную оценку качества системы. Поэтому предложены многочисленные тест-объекты, приблизительно соответствующие типичным случаям, в виде совокупностей различного количества штрихов, прямоугольников, треугольников, трапеций, колец, полуколец и других геометрических фигур различных размеров и разного контраста.

### УЧЕТ ЦЕЛЕЙ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕР КАЧЕСТВА

Рассмотрим общую схему контура информационного взаимодействия материальных объектов, состоящую из источника информации (который мы до сих пор называли объектом фотографирования) и получателя информации (который до сих пор назывался получателем изображений) (рис. 1, а). Получатель воспринимает информацию, обрабатывает ее и реализует управление в смысле изменения свойств объектов, своего внутреннего состояния или своего поведения [5]. Оптико-фотографическая система участвует в процессе передачи информации от источника к получателю (рис. 1, б). Следовательно, цели регистрации изображений определяются общими целями использования информации получателями. Формулировка целей зависит от уровня восприятия информации и в свою очередь порождает меру качества изображений.

Самый нижний уровень обычно отводится актам обнаружения (установления факта существования) некоторых объектов. Более высокий уровень соответствует оценке параметров обнаруженных объектов. Затем идут уровни распознавания отдельных объектов, распознавания сцен (совокупностей связанных

объектов) и ситуаций, связанных с данными сценами [6]. Меры качества изображений на каждом уровне основываются на оценках вероятностей правильных решений, модели которых заимствуют в теориях обнаружения, оценки параметров, распознавания образов и других разделах современной кибернетики. Высший уровень мер качества изображений в рамках контура информационного взаимодействия по рис. 1 соответствует оценке эффективности управления на основе содержащейся в изображениях информации.

Говоря о целях регистрации изображений, мы вынуждены снова вернуться к проблеме упрощения сложных моделей рассматриваемых явлений. Строго говоря, всегда имеется длинная иерархическая лестница целей. Изображения рассматриваются для получения некоторой информации об объектах, информация

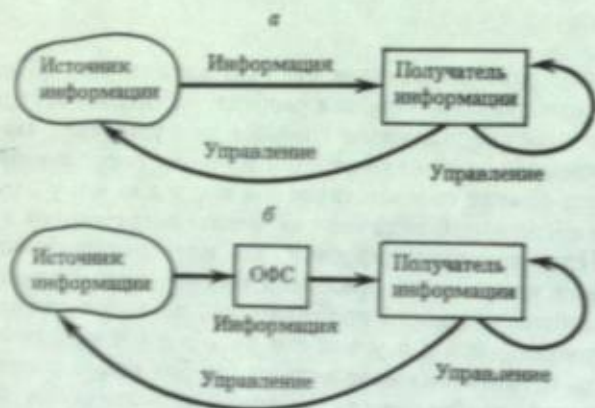


Рис. 1. Контур информационного взаимодействия

нужна для осуществления процесса управления. До сих пор все ясно, но все же возникает вопрос, для чего нужно управление. Если имеется в виду управление техническим устройством, то можно договориться, что целью управления является повышение эффективности народного хозяйства или укрепление власти Человека над силами Природы. Но тогда возникает следующий вопрос: зачем нужно повышать эффективность народного хозяйства или укреплять власть над природой? В конце концов мы подходим к последней ступеньке упомянутой иерархической лестницы, на которой находится вопрос о целях существования человечества, до сих пор не имеющий ответа: «Зачем мы здесь?»

Договариваясь о том, что целью регистрации изображений будет считаться, например, решение задач обнаружения или распознавания объектов, мы притом надеемся одно звено из сложной последовательности причин и следствий. Такое надергивание является необходимой предпосылкой для разработки перечисленных выше разделов кибернетики, но не обязательно при обосновании мер качества изображений. Как показывает практика, в большинстве используемых мер качества цели регистрации просто не учитываются или, что не менее важно, считается, что цели регистрации могут быть какими угодно. Ниже рассматриваются четыре класса мер такого типа.

### МЕРЫ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ, НЕ УЧИТЫВАЮЩИЕ ЦЕЛИ РЕГИСТРАЦИИ

#### Меры пространственной разрешающей способности оптико-фотографических систем

Критерии пространственной разрешающей способности сыграли большую роль в развитии прикладной оптики и фотографии, до сих пор не потеряли своего практического значения и занимают важное место в системе понятий разработчиков аппаратуры [7]. Основной недостаток мер разрешающей способности — нечеткость определения истинного понятия о разрешении. Ссылка на проект международного стандарта «Определение разрешающей способности фотографических материалов», подготовленный ведущими специалистами в различных странах [8]. Цитируем:

«... В общем разрешающая способность является мерой способности фотографического материала тождественно воспроизводить в проявленном изображении отдельные параллельные линии при малом расстоянии между ними. В настоящем стандарте разрешающая способность определяется как пространственная частота наименьшего изображения, которое разрешается по критерию...»

Описанию этого критерия посвящен специальный раздел. Основная часть формулировки такова: «Для того, чтобы наблюдатель мог судить, что изображение элемента мира разрешено, изображение линий должно быть воспринято таким образом, чтобы число линий можно было сосчитать с обоснованной уверенностью, даже если не известно, что оно равно трем ( $Z$  — истинное число линий в элементе мира. — Курсив наш). Ключевым понятием в критерии разрешения является обоснованная уверенность. Оно рассчитано на указание уровня уверенности, среднего между полной уверенностью и полным отсутствием уверенности».

На основе такого критерия трудно сформулировать математическую задачу оптимизации ОФС. С другой стороны, именно отсутствие строгого определения обеспечивает гибкость критериев разрешения, позволяя использовать их в таких ситуациях, где более формализованные критерии могут оказаться неадекватными.

### Меры информационной емкости

Меры информационной емкости можно рассматривать как естественное развитие мер пространственного разрешения. В большинстве практических случаев при прочих равных условиях качество фотографического изображения оценивается получателями тем выше, чем больше количество разрешаемых элементов  $N$  ( $N = XYR^2$ , где  $X, Y$  размеры изображения;  $R$  — упоминавшаяся в цитированном международном стандарте разрешающая способность) и количество различных градаций интенсивности  $M$ . Следовательно разумной мерой качества может служить любая функция  $Q(N, M)$ , монотонно возрастающая при увеличении положительных аргументов  $N, M$ . Например, можно предложить такие варианты:

$$Q^*(N, M) = \alpha_1 N + \alpha_2 M, \text{ где } \alpha_1 \alpha_2 \text{ — положительные константы,}$$

$$Q^{**}(N, M) = N^p M^{1-p}, \text{ где } 0 < p < 1,$$

$$Q^J(N, M) = N \lg_2(M).$$

Последняя функция  $Q^J$ , именуемая информационной емкостью изображений, в настоящее время пользуется наибольшей популярностью среди разработчиков аппаратуры. Причины такой популярности нетрудно установить: в теории информации доказывается, что величина  $Q^J$  является инвариантной операцией статистического кодирования сигнала, состоящего из  $N$  отсчетов, принимающих  $M$  дискретных значений интенсивности. Однако, обсуждая проблему оценки качества изображений, мы должны признать, что нам не известны механизмы кодирования сигналов в зрительной системе человека, и сравнение различных мер качества должно проводиться на более прагматической основе. Можно ли считать, что функция  $Q^J$  в каком-то смысле лучше других монотонно возрастающих функций  $Q^*, Q^{**}, \dots$ ?

Ответ на этот вопрос может дать эксперимент, в ходе которого получатели изображений высказывают свое мнение о качестве изображений при различных значениях  $N, M$ . К сожалению, трудно провести такой эксперимент с высокой точностью, необходимой для правильной оценки мало различающихся результатов. Проведенные эксперименты небольшого объема на грубо дискретизированных и квантовых изображениях пока не дают оснований для кого-либо заключения [9].

### Нормы погрешности регистрации

Меры точности регистрации основываются на понятии об идеальной оптико-фотографической системе, которая может определяться как система, обеспечивающая геометрическое и фотометрическое подобие объектов и изображений.

Качество данного изображения  $(x, y)$  считается тем более высоким, чем оно ближе к единичности от идеального изображения  $i_{max}(x, y)$ , регистрируемого идеальной ОФС. Погрешность регистрации можно определить как разность между объектом и изображением:

$$\Delta(x, y) = i(x, y) - i_{max}(x, y).$$

Наиболее удобной мерой погрешности  $\Delta(x, y)$  является ее модуль  $|\Delta(x, y)|$ , а точности  $M$  или  $E$  — формула (11):

$$|\Delta(x, y)| = \max\{|i(x, y) - i_{max}(x, y)|\}.$$

$$M_{E_{xy}} = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_{S_{xy}} (i(x, y) - i_{max}(x, y))^2 dx dy}.$$

Достоинства меры погрешности регистрации как мер качества изображений — универсальность, точное аналитическое определение и простота построения. Как основное критерия качества аппаратуры, как правило, она является самым простым по сравнению с другими критериями и позволяет известить о практическом результате даже решения задач оптимизации сложной системы. Обычно указываемое отрицательное свойство норм погрешности — недостаточный учет закономерностей восприятия изображений получателем. С этим, по-видимому, следует согласиться, одновременно отметить, что имеет принципиальная возможность устранения такого недостатка.

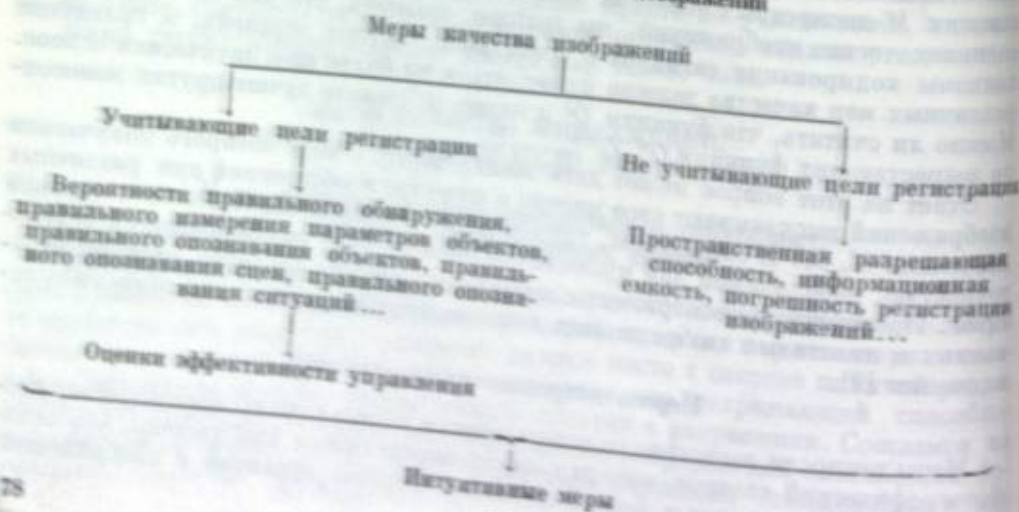
С точки зрения математики имеются две возможности усовершенствования меры погрешности. Во-первых, можно задать более сложные правила вычисления меры (более сложную методику пространства изображений), учитывая свойства зрения. Во-вторых, оставив без изменения правила вычисления меры, можно перейти в другое пространство, рассматривая не сами изображения, а зрительные ощущения, впечатления и представления, возникающие у получателей изображений. Интересно отметить, что второй вариант на уровне зрительных ощущений используется в задачах оптимизации систем передачи цветных изображений. В таких системах обеспечивается не физическая, а психологическая (колориметрическая) точность передачи.

### Интуитивные меры качества

Интуитивные меры используются в квалиметрических экспериментах, позволяя получателям изображений выразить свое мнение о качестве каждого предъявляемого изображения (схема 4). В эксперименте используются тест-объекты

Схема 4

#### Классификация мер качества изображений



объекты  $O_1, O_2, \dots, O_k$  и исследуемая система, параметры которой принимают значения  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . Участникам эксперимента  $P_1, P_2, \dots, P_n$  предъявляются изображения  $I_{kj}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, L$ ). Каждый участник дает оценку качества каждого изображения  $q_{ijk}$  ( $k = 1, \dots, M$ ). Результатом эксперимента является зависимость  $Q(\mathcal{F})$ , где значение  $Q$  определяется усреднением оценок  $q_{ijk}$  по всем участникам и всем используемым тест-объектам.

Как правило, в экспериментах рассматриваются типичные тест-объекты, типичные условия рассматривания изображений, типичные значения параметров аппаратуры и типичные представления потребителей этой аппаратуры. Наиболее спорный вопрос методики эксперимента — шкала качества изображений. Первоначально в основном использовались двухградационные пороговые шкалы, на основе которых определялись пороги допустимости и пороги заметности искажений изображений по данному параметру систем. В дальнейшем появились многоградационные шкалы, в частности шкала, градации которой суть отличное, хорошее, удовлетворительное, плохое и очень плохое качество, или баллы 5, 4, 3, 2 и 1. В последние годы вновь повышается интерес к двухградационным шкалам с градациями «лучше» (более высокое качество) и «хуже» (более низкое качество) [10].

Заметим, что в большинстве проводившихся до сих пор экспериментов подбирались так называемые эмоционально нейтральные сюжетные изображения, не вызывающие у испытуемых каких-либо ассоциаций. Однако те же интуитивные меры качества могут применяться для оценки более сложных изображений, при рассматривании которых участники эксперимента учитывают цели регистрации и способы использования содержащейся в изображениях информации. В этом смысле интуитивные меры можно рассматривать как обобщение всех других классов мер качества изображений (см. схему 4).

### УЧЕТ СВОЙСТВ ПОЛУЧАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Известно, что различные люди по-разному воспринимают изображения и тем более по-разному оценивают качество одних и тех же изображений. Один из источников расхождения мнений получателей изображений — вариации характеристик зрения. Более важные различия могут быть связаны с тем, что акты восприятия на высших уровнях зрительной системы определяются всем жизненным опытом получателя и конкретным опытом работы с изображением данного класса.

Свойства получателей могут описываться на различных уровнях, низшему уровню соответствуют оценки пространственной, временной, градационной и цветовой разрешающих способностей зрения, оценки соответствующих порогов и зависимости этих параметров от условий адаптации и других деталей процесса восприятия изображений. На более высоких уровнях можно выделить прикладные исследования некоторых характеристик зрения при решении некоторых конкретных задач распознавания объектов, сцен или ситуаций (см. выше) и фундаментальные (познавательные) исследования закономерностей зрительного восприятия [11].

Практически способы избавления от символа получателя  $P$  в сложной зависимости  $Q(\mathcal{F}, P)$  в большинстве случаев аналогичны рассмотренным выше способам избавления от символа объекта  $O$ . Как правило, используются оценки качества изображений с точки зрения среднего получателя  $P_{ср}$ :

$$Q(\mathcal{F}) = Q(\mathcal{F}, P_{ср}). \quad (46)$$

### ДЕТАЛИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ КАЧЕСТВА ОПТИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

После того как тем или иным способом обоснована зависимость качества ОФС от оператора  $Q(\mathcal{F})$ , возникает задача детализации этой зависимости. Первый шаг такой детализации заключается в представлении оператора  $\mathcal{F}$  суперпозицией более простых операторов, например представлении ОФС в виде ли-



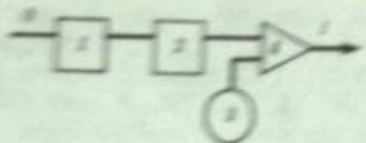


Рис. 2. Представление ОФС в виде совокупности линейного однородного пространственного фильтра (1), линейного элемента (2), генератора шума (3) и сумматора (4)

нейного однородного пространственного фильтра, линейного элемента генератора шума и сумматора (рис. 2):

$$i(x, y) = \varphi \left( \iint_{\xi, \eta} k_{\text{ф}}(x, y) k(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 \right) + n(x, y)$$

где  $k(x, y)$  — импульсная характеристика фильтра (функция рассеяния точки);  $\varphi$  — характеристика линейного элемента (характеристическая кривая фотоматериала);  $n(x, y)$  — шум.

Характеристики  $k(x, y)$ ,  $\varphi$  и статистические характеристики шумов могут связываться с характеристиками физических свойств оптического устройства и фотоматериала, при этом разработчики аппаратуры могут вводить в рассмотрение более сложные модели информационных преобразований изображений. Так или иначе ОФС описывается некоторым набором технических характеристик  $k_1, k_2, \dots, k_T$  и задача оптимизации приобретает следующую уточненную формулировку. В множестве возможных характеристик требуется найти такой оптимальный набор характеристик  $\{k_1, \dots, k_T\}_{\text{opt}}$ , который обеспечивает максимум функционала  $Q(k_1, \dots, k_T)$ :

$$Q(\{k_1, \dots, k_T\}_{\text{opt}}) = \max_{k_1, \dots, k_T} Q(k_1, \dots, k_T) \quad (1a)$$

Численные методы решения задачи (1a) связаны с аппроксимацией характеристик некоторыми параметрами. Рассмотрим три способа задания параметров на примере частотно-контрастной характеристики линейного однородного фильтра  $H(\omega)$  [2], измеренной в интервале пространственных частот  $[\omega_0, \omega_{\text{max}}]$  (рис. 3, 4).

Самый простой способ — замена функции  $H(\omega)$  совокупностью  $M$  — 1

квания фильтра  $p_0 = \omega_{\text{гран}}$ . Параметры  $p_0$  на практике определяются различными способами, например пересечением кривой  $H(\omega)$  с некоторой горизонтальной прямой (рис. 3, з), из уравнения

$$\int_0^{\omega_{\text{max}}} H(\omega) d\omega = H(0) p_0$$

или пересечением  $H(\omega)$  с так называемой пороговой характеристикой, учитывающей свойства шумов аппаратуры [2]. Другой информативный параметр — неравномерность характеристики  $H(\omega)$  в пределах полосы пропускания  $p_1 = \max H(\omega) - H(0)$ . Можно ввести в рассмотрение параметры  $p_2 = \omega^{**}$ ,  $p_3 = \omega^{**}$ ,  $p_4 = H(\omega^{**})$  (см. рис. 3, з).

Предположим, что ОФС описывается  $T + 1$  параметрами, изменяющимися в диапазоне  $\min p_0 \leq p_0 \leq \max p_0, \dots, \min p_T \leq p_T \leq \max p_T$ . Тогда задача оптимизации ОФС формулируется как задача математического программирования. В множестве возможных значений параметров требуется найти оптимальный набор значений  $\{p_0, \dots, p_T\}_{\text{opt}}$ , доставляющий максимум целевой функции  $Q(p_0, \dots, p_T)$ :

$$Q(\{p_0, \dots, p_T\}_{\text{opt}}) = \max_{p_0, \dots, p_T} Q(p_0, \dots, p_T) \quad (1г)$$

Поскольку при большом числе параметров  $T + 1$  поиск максимума становится затруднительным, возникает специальная задача выбора самых важных параметров, в наибольшей степени влияющих на оценку качества ОФС. Эта задача имеет простое апостериорное решение. Функцию  $Q(p_0, \dots, p_T)$  следует продифференцировать по всем аргументам. Наиболее важным параметрам соответствуют наибольшие по модулю значения производных. Если же  $|\partial Q / \partial p_i| \approx 0$ , то параметр  $p_i$  практически не влияет на качество ОФС и может быть исключен из критерия  $Q(p_0, \dots, p_i, \dots, p_T)$ . Корректное априорное решение задачи выбора наиболее важных параметров не существует. Если функция  $Q(p_0, \dots, p_T)$  неизвестна, то можно лишь высказывать некоторые предположения о роли отдельных параметров, основываясь на опыте расчета и эксплуатации реальных ОФС.

### КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА СИМВОЛИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

До сих пор предполагалось, что контур информационного взаимодействия (см. рис. 1) состоит из объекта (источника информации), оптико-фотографической системы, регистрирующей изображение объекта, и получателя информации, реализующего процесс управления. На практике очень часто возникают более сложные ситуации, когда между объектами и ОФС имеется промежуточный получатель — отправитель информации (рис. 4), создающий символические изображения, каковыми являются рисунки, схемы, карты, чертежи, рукописные и печатные тексты. Например, можно представить, что один человек рассматривает какую-то местность, составляет план местности и передает это символическое (кодированное) изображение местности другому человеку, знающему правила кодирования. В еще более сложном случае человек описывает рассматриваемую местность на обычном разговорном языке и передает другому человеку (знающему данный язык) символическое изображение в виде текста описания. Другой человек осуществляет операции декодирования символических изображений и получает адекватное представление о местности.

Важным для практики расчета и эксплуатации ОФС частным случаем кодированных изображений является произведение изобразительного искусства. Не вступая в дискуссию с искусствоведами, заметим, что любая картина, гравюра или художественная фотография есть символическое изображение, содержащее кодированную информацию как об изображаемых объектах, так и о художнике — создателе изображения. Особенность этого класса символических изображений заключается в том, что правила кодирования нечетко сформулированы и не полностью известны художникам и получателям изображений.

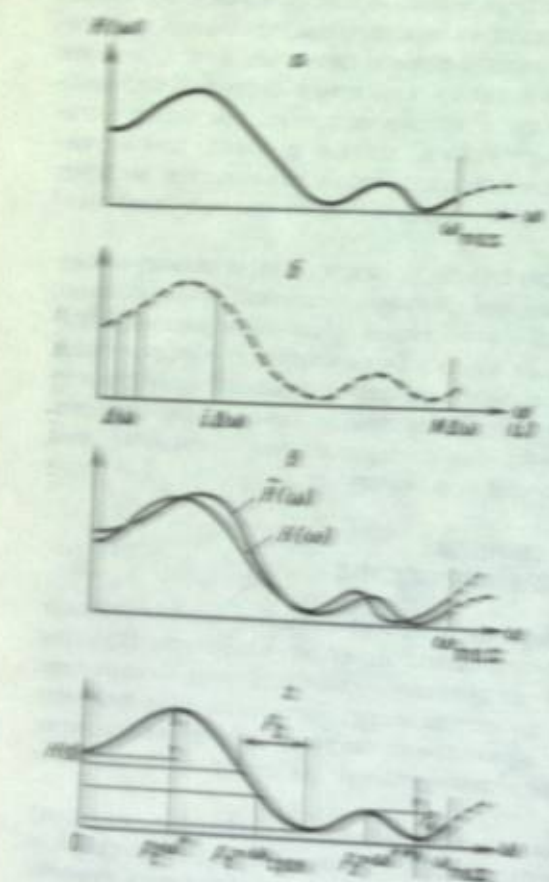


Рис. 3. Возможные способы приближенного представления характеристики ОФС в задачах оптимизации:

- а — замена частотно-контрастной характеристикой;
- б — аппроксимация совокупностью дискретных элементов;
- в — аппроксимация совокупностью значений функции; шумов и характеристик;
- г — замена характеристическим параметром характеристик.

дискретных элементов с шагом  $\Delta\omega = \omega_{\text{max}} / M$ .  
 Второй способ — аппроксимация измеренной характеристики аналитическим выражением  $M$  — 1 параметрами  $p_0, p_1, \dots, p_{M-1}$ , например по формуле  $H(\omega) = \sum_{k=0}^{M-1} p_k \cos^k(\omega / \omega_{\text{max}})$ .

Третий способ — замена функции заданными параметрами. Например,  $H(\omega) = \sum_{k=0}^{M-1} p_k \cos^k(\omega / \omega_{\text{max}})$ .





в которых  $E_{ij}^{(0)}(\lambda)$  — монохроматическая освещенность геометрического изображения в точке кадра с координатами  $i, j$ ;  $E_p(\lambda)$  — монохроматическая освещенность в фокальной плоскости, обусловленная рассеиванием света в фотоаппарате;  $E_{ij}^{(1)}(\lambda)$  — полная монохроматическая освещенность неразмытого изображения в точке  $(i, j)$ ;  $K, b_x, w$  — диафрагменное число, спектральная плотность яркости воздушной дымки, угол поля изображения соответственно;  $k_x, k_y$  — коэффициенты виньетирования объектива и светорассеивания фотоаппарата;  $\tau_a, \tau_{\phi}, \tau_{oc}$  — пропускания атмосферы, светофильтра и оптической системы. Функция (1) служит функцией объекта при расчете размытого изображения.

При учете размытия математической моделью  $q$ -го звена фотосистемы служит его функция рассеивания  $(h_{kl}^{(q)}(p_q), k = 1(1)k_q, l = 1(1)l_q$ , где  $p_q$  — вектор параметров  $q$ -го звена. Например, у фотообъектива компонентами вектора  $p_{oc} = \langle u', \lambda, \Delta', l_1, l_2 \rangle$  служат задний апертурный угол, длина волны, дефокусировка, параметры, определяющие вид функции волновой aberrации соответственно. Размытие изображения звеньями АФС учитываем, пользуясь формулой свертки

$$E_{ij} = E_{ij}^{(0)} \otimes h_{kl} = \sum_{i_1}^{k_h} \sum_{j_1}^{l_h} E_{i_1 j_1}^{(0)} h_{i-i_1, j-j_1}, \quad i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E, \quad (5)$$

если система инвариантна, или суперпозиции

$$E_{ij} = \sum_{i_1}^{k_h} \sum_{j_1}^{l_h} E_{i_1 j_1}^{(0)} h_{i-i_1, j-j_1}^{(2)}, \quad i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E, \quad (6)$$

если она неинвариантна.

В формулах (5) и (6)  $h_{kl}, h_{kl}^{(2)}$  — элементы матриц функций рассеивания. Если объект полихроматичен, а функции рассеивания звеньев АФС зависят от длины волны излучения, то по формулам (5) и (6) вычисляем монохроматическое изображение, например

$$E_{ij}(\lambda) = E_{ij}^{(0)}(\lambda) \otimes h_{kl}(\lambda), \quad i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E, \quad \lambda = \lambda_n(\Delta\lambda)\lambda_n, \quad (7)$$

а интегральное изображение при неселективном регистраторе находим как сумму

$$E_{ij}(\lambda_n, \lambda_n) = \sum_{\lambda_n} E_{ij}(\lambda), \quad i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E. \quad (8)$$

Пересчет действующих экспозиций в оптические плотности черно-белого изображения (другими словами, моделирование процесса проявления) в случае полихроматического объекта производим в следующем порядке. Сначала пересчитываем монохроматическое изображение (7) в распределение фотоактивных экспозиций [2]:

$$H_{ij}(\lambda) = E_{ij}(\lambda) S_\lambda(\lambda) t_0 / S_{\Delta\lambda}, \quad (9)$$

где

$$t_0 = 1 / \sum_{\lambda_n} S_\lambda(\lambda) E(\lambda); \quad (10)$$

$$E(\lambda) = \sum_{i=1}^{i_E} \sum_{j=1}^{j_E} E_{ij}^{(0)}(\lambda) / i_E j_E; \quad (11)$$

$$S_{\Delta\lambda} = \sum_{\lambda_n} e_\lambda(\lambda) S_\lambda(\lambda) / \sum_{\lambda_n} e_\lambda(\lambda), \quad (12)$$

здесь  $e_\lambda$  — спектральная плотность освещенности сенситометрического источника излучения;  $S_\lambda$  — спектральная чувствительность фотопленки.

Затем находим интегральное фотоактивное изображение

$$H_{ij}(\lambda_n, \lambda_n) = \sum_{\lambda_n} H_{ij}(\lambda), \quad i = 1(1)i_n, \quad j = 1(1)j_n \quad (13)$$

и, применив модель характеристической кривой, измеренной при световом потоке сенситометра, соответствующем интервалу  $(\lambda_n, \lambda_n)$ , пересчитываем изображение (13) в распределение оптических плотностей  $D_{ij}, i = 1(1)i_D, j = 1(1)j_D$ . На заключительном этапе, суммируя это изображение со специально сформированной матрицей шума гранулярности  $[\Delta D_{mij}]$ , находим результирующую модель фотографического изображения:

$$D_{ij}^{(p)} = D_{ij} + \Delta D_{mij}, \quad i = 1(1)i_D, \quad j = 1(1)j_D. \quad (14)$$

Структура модели АФС как формирователя изображения приведена на рис. 1. В схеме предусмотрен только один цикл — по длине волны  $\lambda$ . Предполагается, что циклы по координатам  $k, l$  функций рассеивания выполняются в блоках 11, 13, 15 и 23. Расчет начинается с того, что в блоке 2 задаем начальное значение длины волны. В блоках 3—6 по формулам (2), (4), (3) и (1) соответственно находим монохроматическое геометрическое изображение  $E_{ij}^{(0)}(\lambda)$ . В блоке 7 по формуле

$$E_{aij}(\lambda) = S_\lambda(\lambda) E_{ij}(\lambda), \quad i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E$$

рассчитываем фотоактивное геометрическое изображение, а в блоках 8 и 9 — средние по полю кадра фотоактивные монохроматическую и интегральную освещенности:

$$E_a(\lambda) = S_\lambda(\lambda) \sum_{i=1}^{i_E} \sum_{j=1}^{j_E} E_{ij}(\lambda) / i_E j_E, \quad E_a(\lambda_n, \lambda_n) = \sum_{\lambda_n} E_a(\lambda).$$

В блоках 11, 13, 15 производим учет размытия монохроматических фотоактивных изображений (15) атмосферой, фотообъективом и фотопленкой. Расчет в этих блоках ведем по формуле (7); матрицы функций рассеивания указанных звеньев

$$[h_{kl}^{(a)}(\lambda; p_a)], [h_{kl}^{(oc)}(\lambda; p_{oc})], [h_{kl}^{(\phi)}(\lambda; p_\phi)], \quad \lambda = \lambda_n(\Delta\lambda)\lambda_n$$

формируем в блоках 10, 12, 14. В блоке 16 получаем текущее интегральное изображение

$$E_{aij}^{(3)}(\lambda_n, \lambda) = \sum_{\lambda_n} [E_{aij}(\lambda) \otimes h_{kl}^{(a)}(\lambda; p_a) \otimes h_{kl}^{(oc)}(\lambda; p_{oc}) \otimes h_{kl}^{(\phi)}(\lambda; p_\phi)], \quad (15)$$

$$i = 1(1)i_E, \quad j = 1(1)j_E.$$

В блоке 17 по формуле (12) находим величину  $S_{\Delta\lambda}$ . Блок 18 проверки условия  $\lambda = \lambda_n$  и обратная связь на блок 2 при исходе «нет» обеспечивают проведение описанных операций для всех предусмотренных длин волн. При  $\lambda = \lambda_n$  в блоке 9 получаем среднюю освещенность  $E_a(\lambda_n, \lambda_n)$ , а в блоке 16 — интегральное изображение  $E_{aij}^{(3)}(\lambda_n, \lambda_n), i = 1(1)i_E, j = 1(1)j_E$ .

При исходе в блоке 18 «да» в блоке 19 по формуле  $t_0 = 1/\bar{E}_a(\lambda_n, \lambda_n)$  рассчитываем требуемую эффективную выдержку. В блоках 20 и 21 по известным формулам [3] рассчитываем частные и результирующие составляющие сдвига изображения по осям —  $\delta_x$  и  $\delta_y$  для всех точек поля изображения или для избранного числа локальных зон. В блоке 22 формируем матрицы функций рассеивания сдвига изображения  $[h_{kl}^{(s)}], i = 1(1)i_E, j = 1(1)j_E$  для выбранных вариантов. Учет размывающего действия сдвига производим в блоке 23 по формуле (6), в которую вместо освещенности  $E_{ij}^{(3)}$  подставляем значения  $E_{aij}^{(3)}(\lambda_n, \lambda_n)$ . Получаем результирующее интегральное фотоактивное изображение  $E_{aij}^{(4)}(\lambda_n, \lambda_n), i = 1(1)i_E, j = 1(1)j_E$ . В блоке 24 это изображение



Рис. 1. Структурная схема АФС для формирования изображения по обратному каналу. 1 — ввод базовых данных. Показатели качества изображения:  $\lambda_n$  и  $\lambda_k$ .

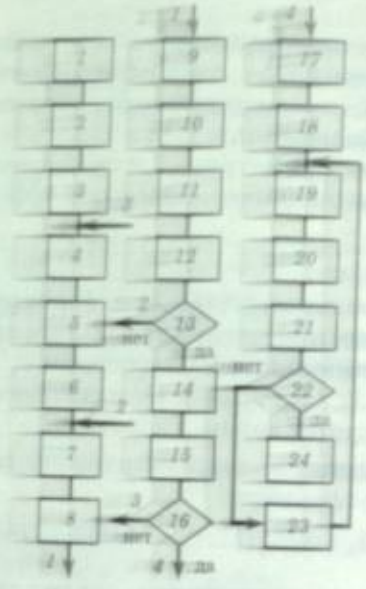


Рис. 2. Структурная схема алгоритма анализа АФС по показателю качества изображения — разрешающей способности

1 — ввод базовых данных; 2 — расчет  $i_0$ ; 3 —  $\lambda = \lambda_n$ ; 4, 5 — расчет  $H_1^{(r)}(\lambda)$ ,  $H_2^{(r)}(\lambda)$ ; 6 —  $v = v_n$ ; 7 — расчет ЧХХ  $T_{\alpha}(\nu, \lambda, P_{\alpha})$ ,  $T_{\beta}(\nu, \lambda, P_{\beta})$ ,  $T_{\gamma}(\nu, \lambda, P_{\gamma})$ ; 20, 21 — расчет  $H_1(\nu, \lambda)$ ,  $H_2(\nu, \lambda, \lambda_n)$ ; 22 —  $v = v + \Delta v$ ; 23 — проверка  $v > v_n$ ; 24 — расчет  $H_0^{(r)}(\lambda_n, \lambda)$ ; 25 —  $\lambda = \lambda + \Delta \lambda$ ; 26 — проверка  $\lambda > \lambda_n$ ; 27 — расчет  $\delta$ ; 28 —  $v = v_n$ ; 29 — расчет  $T^*(\nu, \delta)$ ; 30 — расчет  $C_n(\nu, \lambda_n, \lambda_k)$ ; 21 — расчет  $T^*(\nu)$ ; 22 — проверка  $C_n(\nu) < T^*(\nu)$ ; 23 —  $v = v + \Delta v$ ; 24 — вывод параметров АФС и  $R_c$ .

пересчитываем в распределение фотоактивных экспозиций по формуле

$$H_{ij}(\lambda_n, \lambda_k) = E_{\alpha ij}^{(0)}(\lambda_n, \lambda_k) i_{\alpha} S_{\Delta \lambda}, \quad i = 1(1) i_E, \quad j = 1(1) j_E,$$

а в блоке 26 переводим его в распределение оптических плотностей  $D_{ij}$ ,  $i = 1(1) i_D$ ,  $j = 1(1) j_D$ , используя для этого модель характеристической кривой, сформированную в блоке 26 [4]. В блоке 27 формируем матрицу шума  $[\Delta D_{\alpha ij}]$  и в блоке 28 по формуле (14) находим результирующую модель фотографического изображения. Это изображение выводим в блоке 29 в виде числовых значений. При наличии устройства вывода изображения оно может быть представлено в виде «картинки».

При анализе АФС моделирование проводится с целью получения оценок показателей качества изображения. В связи с этим в математическую модель АФС должна быть введена математическая модель дешифровщика, под которой будем понимать совокупность алгоритмов, позволяющую на основе анализа математической модели изображения предсказывать результат дешифрования реального изображения реальным дешифровщиком; результат дешифрования обычно выражают в значениях показателя качества изображения, в роли которого выступают вероятности обнаружения или опознавания объектов заданного множества; в частном случае это разрешающая способность. Обобщенная структурная схема анализа АФС включает последовательно соединенные блочные модели объекта, атмосферы, аэрофотоаппарата, сдвига изображения и дешифровщика. Промежуточным выходом модели является модель изображения, итоговым — значение показателя качества изображения.

Наибольшую принципиальную сложность при анализе (и синтезе) АФС представляет математическая модель дешифровщика. В настоящее время имеют только первые приближения таких моделей, которые тем не менее позволяют решать ряд практических задач. Психологическое обоснование модели дешиф-

ровщика дает структурно-эвристическая теория Рубакина [5], согласно которой решающую роль в опознании объекта играют его смысловые признаки; их определяют экспериментально. Математические основы модели дешифровщика составляют методы теории обнаружения [6].

Один из подходов к математическому моделированию дешифровщика основан на применении теории оптимального (в частности, когерентного) приема сигналов и известных критериев наблюдателя, например идеального наблюдателя. Обращение к теории когерентного приема основано на учете способности зрительного анализатора человека к перестройке рецептивных полей в зависимости от формы стимулов [7]. При таком подходе зрительный анализатор можно сопоставить с приведенной «аппаратной» функцией  $\hat{h}_z(x, y) = r(x, y)$ , где  $r(x, y)$  — функция изображения на негативе (позитиве). Физическим аналогом функции  $r(x, y)$  в фотографии служит распределение приращений оптической плотности по отношению к некоторому начальному уровню, т. е.  $r(x, y) \equiv \Delta D_c(x, y)$ . Функция  $\Delta D_c(x, y)$  имеет разный смысл в зависимости от решаемой задачи. Так, при обнаружении объекта

$$\Delta D_c(x, y) = D_o(x, y) - D_{\phi} > 0, \quad (16)$$

при выявлении его структуры

$$\Delta D_c(x, y) = D_o(x, y) - \bar{D}_o, \quad (17)$$

при обнаружении признаков объекта

$$\Delta D_c(x, y) = D_o(x, y) - D_{oc}(x, y). \quad (18)$$

В этих формулах  $D_o(x, y)$  — распределение оптической плотности в изображении объекта (без шума);  $D_{\phi}$  — оптическая плотность фона;  $\bar{D}_o$  — средняя оптическая плотность в изображении объекта;  $D_{oc}(x, y)$  — распределение оптической плотности в изображении объекта сравнения, т. е. условного объекта, отличие которого от опознаваемого заключается в отсутствии части или всех смысловых элементов.

При когерентном приеме отношение сигнал/шум, определяющее вероятность ошибки, рассчитывается по формуле [6]

$$\rho^2 = b^2/D[\xi], \quad (19)$$

где

$$b = \sum_1^{i_D} \sum_1^{j_D} \Delta D_{cij}^2 \Delta x \Delta y, \quad (20)$$

$$D[\xi] = D[\xi_0] + 4 \sum_{\nu_x \nu_y} G_{\Gamma \Gamma}(\nu_x, \nu_y; \bar{D}_0) |S_c(\nu_x, \nu_y)| \Delta \nu_x \Delta \nu_y; \quad (21)$$

$$S_c(\nu_x, \nu_y) = F[\Delta D_c(x, y)]; \quad (22)$$

$D[\xi_0]$  — дисперсия шума зрительного анализатора человека;  $G_{\Gamma \Gamma}(\nu_x, \nu_y; \bar{D}_0)$  — энергетический спектр шума гранулярности при средней плотности  $\bar{D}_0$ .

Вероятность ошибки обнаружения сигнала  $\Delta D_{cij}$ ,  $i = 1(1) i_D$ ,  $j = 1(1) j_D$ , рассчитываем по формулам [6]

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_n &= P_0/P_1, & x_0 &= b(\ln \Lambda_n/\rho^2 + 0,5), & \psi &= (x_0 - b)/(D[\xi])^{0,5}, \\ \eta &= x_0/(D[\xi])^{0,5}, & P_{\text{ош}} &= P_1(0,5 - \Phi(\psi)) + P_0(0,5 - \Phi(\eta)), \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

в которых  $\Phi(z)$  — интеграл вероятности;  $P_1$  и  $P_0$  — априорные вероятности наличия и отсутствия сигнала.

Детальная структурная схема модели зависит от выбранного показателя качества изображения. Для конкретности рассмотрим модель АФС в задаче ее анализа по показателю разрешающей способности. В этом случае в роли модели дешифровщика выступает пороговая характеристика визуального восприятия зашумленного фотографического изображения мира  $T^*(\nu)$  [8]. Сущность моделирования состоит в составлении и решении относительно частоты  $\nu$  уравнения фотосистемы [9]

$$C_n(\nu; \lambda_n, \lambda_k) = T^*(\nu), \quad (24)$$

где  $C_{ij}(x, \lambda_0, \lambda_1)$  — зависимость контраста интегральной изображения от первоначального координатного объекта от частоты.

В структурной схеме модели (рис. 2) можно выделить три цикла — два цикла по частоте  $\nu$  (блоки 6—11 и 16—21) и цикл по длине волны  $\lambda$  (блоки 22—25). Объект задан совокупностью некоординатических одномерных распределений:

$$h_{ij}(x, \nu) = h_{ij}(x) + h_{ij}(x) \sin(2\pi \nu (1 - \alpha_j) x), \quad (2)$$

$$h_{ij}(x) = \sum_{k=1}^n h_{ijk}(x), \quad j = 1(1)N, \quad i = 1(1)M, \quad h_{ijk} > 0.$$

По формулам (1) — (4), (9) — (11) в блоках 6 и 7 рассчитываем амплитуды  $E_{ij}^0(x)$  и средние значения  $E_{ij}^0(x)$ ,  $\bar{E}_{ij}^0(x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{ij}^0(x) dx$ , некоординатических элементов функции изображения в геометрии изображения распределений (2). Амплитуды некоординатических  $E_{ij}^0(x, \lambda)$  и интегралы  $E_{ij}^0(x, \lambda)$  изображений одномерных составляющих в виде действующих элементов (т. е. с учетом размытия) рассчитываем в блоках 7—11 по формулам:

$$E_{ij}(x, \lambda) = E_{ij}^0(x, \lambda) \prod_{k=1}^n T_{ijk}(x, \lambda), \quad i = 1(1)M, \quad j = 1(1)N, \quad (3)$$

$$E_{ij}(x, \lambda) = \sum_{k=1}^n E_{ijk}(x, \lambda), \quad i = 1(1)M, \quad j = 1(1)N, \quad (4)$$

где  $T_{ijk}(x, \lambda)$  — некоординатические частотно-контрастные характеристики линзы фотосистемы (объектива, фотопленки, атмосферы).

Эффективную ширину  $\Delta$  линзы в блоке 2 принимаем известной, рассчитываем по формулам (10), (11). Контраст  $C_{ij}(x, \lambda_0, \lambda_1)$  вычисляем в блоке 3 по формуле:

$$C_{ij}(x, \lambda_0, \lambda_1) = \frac{E_{ij}(x, \lambda_1) - E_{ij}(x, \lambda_0)}{\sum_{k=1}^n E_{ijk}(x, \lambda_0)} - \frac{E_{ij}(x, \lambda_0)}{E_{ij}^0(x, \lambda_0)}$$

В блоках 4, 5 вычисляем в блоках 4, 5 в блоках 6 и 7 рассчитываем распределение светового изображения в координатном пространстве  $E_{ij}(x, \lambda)$ . Вычисляем способность фотосистемы при фотографировании некоординатического объекта (2) вычисляем в блоках 8—11. Вычисляем границы (2) светового изображения  $\nu = \nu_0$ , при котором в блоках 12 проверяем выполнение условия  $C_{ij}(x, \lambda_0, \lambda_1) < C^*(x)$ .

Система фотосистемы, т. е. обоснование требований к ее параметрам, является центральной проблемой теории и практики аэрофотографии. Обширные исследования ведутся в следующем [10]: необходимо найти метод выбора оптимальных параметров АФС, при котором целевая функция  $\varphi(p_j)$ ,  $j = 1(1)n$  в области заданных ограничений:

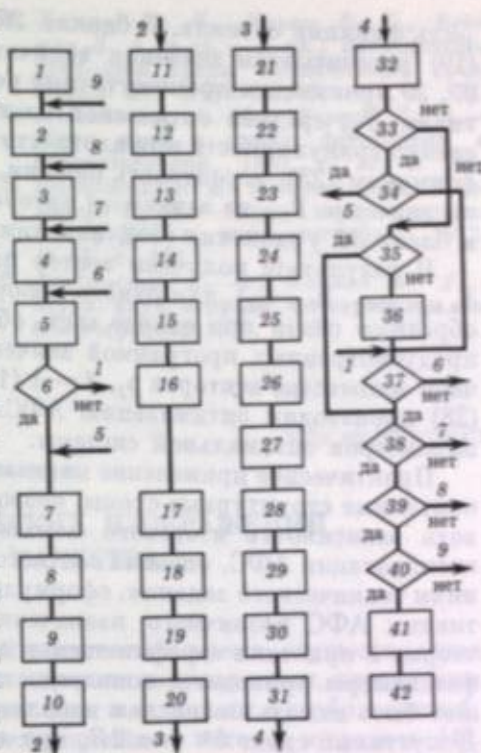
$$(p_j - p_j^0) > 0 \text{ или } -(p_j - p_j^0) > 0, \quad j = 1(1)n, \quad j = 1(1)n,$$

принимает экстремальные значения в АФС в заданных условиях функционирования обеспечивает решение поставленной задачи. Компонентами вектора  $p_j$  являются фокусное расстояние и относительное отверстие объектива, разрешающая способность АФС, светочувствительность фотопленки, остаточная деформация сдвига изображения, выдержка и др.; каждый из компонентов может попадать в некоторую область, ограниченную значениями  $p_j^0$ ,  $i = 1(1)n$ . Оптимизируемыми показателями качества  $\varphi$  могут быть стоимость, габариты АФС и др.

Задача фотографирования обычно состоит в получении материалов, по которым можно описать объекты заданного множества с требуемой вероятностью. По условиям фотографирования относятся высота и скорость полета, освещенность земной поверхности, состояние атмосферы и др. Ввиду ограни-

Рис. 3. Структурная схема алгоритма синтеза АФС по показателю качества изображения — вероятности обнаружения известного сигнала

1 — ввод базовых данных. Назначение остальных блоков указано в тексте



ченного множества векторов  $p_j$ ,  $j = 1(1)n$ , на котором задана функция  $\varphi(p_j)$ , решение сформулированной задачи можно разбить на два этапа. На первом этапе находим множество всех векторов  $p_j$ , при которых АФС решает поставленную задачу, на втором — осуществляем оптимизацию АФС [11], т. е. проводим поиск вектора  $p_{opt}$ , при котором выполняется условие

$$\varphi(p_{opt}) = \min \varphi(p_j), \quad j = 1(1)n. \quad (28)$$

Независимо от используемого показателя качества изображения всем моделям АФС в задаче синтеза присущ ряд особенностей, а именно они должны включать в себя процедуры поиска функции рассеивания фотосистемы, ее декомпозиции и оптимизации. Декомпозиция неоднозначна [12]. Поэтому для сокращения пространства решений и исключения физически нереализуемых систем вводятся дополнительные ограничения. Ими служат [9, 10] классы функций, к которым принадлежат функции рассеивания фотосистемы и ее звеньев, характеристики шумов, взаимосвязь параметров, характеризующих энергетические, передаточные и шумовые свойства звеньев АФС.

Обобщая опубликованные методы [9, 10, 13], рассмотрим детальную структурную схему синтеза фотосистемы по показателю вероятности обнаружения известного сигнала. Будем считать, что в используемой зоне спектра объект нейтрален, функции рассеивания звеньев и все коэффициенты не зависят от длины волны излучения, а спектральный состав освещающего потока соответствует сенситометрическому источнику излучения. В структурной схеме (рис. 3) предусмотрены пять циклов: по постоянной Селвина  $k_S$  (блоки 7—33), по диафрагменному числу  $K$  (блоки 5—37), по фокусному расстоянию  $f'$  (блоки 4—38), по значению параметра — переменной (блоки 3—39) и по набору параметров (блоки 2—40).

Расчет начинается с задания в блоках 2—5 переменной, ее значения, начальных значений  $K$  и  $f'$ . В блоке 6 осуществляется проверка  $D_{gr} = f'_0 K_r < D_{max}$ , где  $D_{gr}$  — значение диаметра входного зрачка при текущих значениях  $f'_0$  и  $K_r$ . При исходе «да» в блоке 7 задаем начальное значение постоянной  $k_S$  и в блоках 8—11 по формулам, указанным в работах [3, 10, 14—16], рассчитываем постоянную Фризера  $r_{0f}$ , светочувствительность  $S_{0,0}$ , выдержку  $t_0$  и результирующий сдвиг изображения  $\delta$ . В блоках 12—16, используя необходимые исходные данные, формируем матрицы функций рассеивания атмосферы  $[h_{at}^{(2)}]$ , объектива  $[h_{ob}^{(6)}]$ , фотопленки  $[h_{fp}^{(0)}]$ , сдвига  $[h_{sh}^{(20)}]$  и фотосистемы в целом  $[h_{fs}^{(2)}]$ . В блоках 16, 18, используя формулы (1) — (4), рассчитываем геометрическое изображение объекта  $E_{obj}^{(2)}$  и фона  $E_{bg}^{(2)}$ ,  $i = 1(1)i_K$ ,  $j = 1(1)j_K$ ; в блоках 19, 20 по формулам (5) или (6) с использованием формулы (9) — размытое изображение объекта  $H_{obj}$  и фона  $H_{bg}$  в виде действующих фотоактивных экспозиций. В блоках 23 и 24, используя модель характеристической кривой, сформированную в блоке 22, находим фотографическое изображение объекта и фона в виде распределения оптических плотностей  $D_{obj}$ ,  $D_{bg}$ . В блоке 25 находим разность  $\Delta D_{cij} = D_{obj} - D_{bg}$ ,  $i = 1(1)i_D$ ,  $j = 1(1)j_D$ , играющую

... формулы сигнала. В блоках 25, 26, 27, 28 по формулам (20), (21), (22), (19) рассчитываем значения величин  $S_i(x_1, x_2)$ ,  $D(x_1, x_2)$ . В блоках 29, 30, 31 производим промежуточные расчеты и находим значения средней яркости  $H_0$ , средней оптической плотности  $D_0(H_0)$  в изображении объекта и спектр гранулярности при плотности  $D_0$ . В блоке 32 рассчитываем, например по формулам (23), вероятность ошибки. В блоках 33 и 35 проверяем, не лишился ли значение  $P_{\text{ош}}$  за заданного интервала значений, и при исходе «нет», решив в блоке 36 уравнение (24), находим разрешающую способность фотосистемы.

В результате получаем вектор параметров фотосистемы  $p_1 = (f_0, K_0, D_0, S_{\text{ош}}, S_{\text{ош}1}, S_{\text{ош}2}, S_{\text{ош}3}, S_{\text{ош}4})$  для одного набора переменных. Блоки проверки 37-40 обратны: если при исходе «нет» обеспечивает проведение расчета для заданных предустановленных программой значений переменных, в результате чего получаем множество векторов  $p_j, j=1(1)M$ . В блоке 41 с использованием условия (28) производим оптимизацию АФС. Заключивается синтез выходов векторы параметров оптимальной системы.

Практическое применение математических моделей, в основе которых лежит описание структурных схем, позволило решить ряд задач: изменить зависимость интересующего показателя качества изображения от условий эксплуатации АФС, оценить соответствие материалов проектирования требованиям технического задания, сформулировать требования к параметрам структурных АФС различного назначения. При этом установлены основные тенденции и критерии дифференциальной закономерности. Так, диффузия процесса дифференциальной плотности по классам и частотам на графике  $H_0, (K_0, D_0)$  свидетельствует об оптимизации как по разрешающей способности АФС, так и по отсутствию в зоне  $0^{\circ} < \alpha < 2\pi$  при коэффициенте  $\text{коэф} = 1,00$  (т.е. для  $0^{\circ} < \alpha < 2\pi$  отсутствуют) в значимых оптических узлах, как увеличение гламу уменьшение дифференциальной плотности, так и увеличение разрешения при проектировании АФС. При синтезе АФС маломасштабных изображений необходимо учитывать возможность их использования в качестве исходных данных для построения интервала  $(K_0, D_0)$ , многоинтервал, где минимальная контрастность симметричного изображения. Выявлено также, что для расширения возможности области применения математического изображения АФС необходима дальнейшая разработка некоторых вопросов теории аэрофотографии. Например, для структурной чувствительности фотопленки следует учитывать не только критерии  $(D_{\text{кв}} = D_0 + 0,10; D_{\text{кв}} = D_0 + 0,08)$ , которые применяются в интегральной сенситометрии.

Необходимо также более полно использовать данные монохроматических функций рассеяния фотопленки и их зависимости от структурных свойств имульсионного слоя, обобщенные данные о зависимости вида и параметров функции волевой aberrации объективов от уровня их совершенства и заднего апертурного угла.

Математическое моделирование АФС формируется в самостоятельное направление науки аэрофотографии. Уровень его развития уже в настоящее время позволяет решать важные практические задачи. Дальнейшее развитие математического моделирования АФС требует совершенствования математических моделей дешифроника, системы ограничений и целевых функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фриер Х. Фотографическая регистрация информации / Пер. под ред. К. В. Вендровского М.: Мир, 1978. 670 с.
2. Зерни В. А. Фотографическая сенситометрия. М.: Искусство, 1980. 351 с.
3. Фисенский Ю. И. Методы повышения качества аэрокосмических фотоснимков. М.: Изд-во МГУ, 1977. 158 с.
4. Гаерик В. В., Давидкин И. М. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1970, т. 15, с. 353.
5. Рубахин В. Ф. Психологические основы обработки первичной информации. Д.: Наука, 1974. 296 с.
6. Харитонюк А. А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. 275 с.
7. Подгел Ч., Сондерс Дж. Восприятие света и цвета. М.: Мир, 1978. 256 с.
8. Мельманович А. Ф., Розов А. М., Якуши Д. А. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1977, т. 22, с. 21.

9. Якуши Д. А., Мельманович А. Ф. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1979, т. 24, с. 61.
10. Мельманович А. Ф. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1982, т. 27, с. 10.
11. Моисеев Н. Н., Иванюков Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 351 с.
12. Первомайский А. А., Гайдарова В. Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. М.: Наука, 1979, 342 с.
13. Ходарев Ю. К., Дунаев Б. С., Ведешин Л. А. и др. — В кн.: Исследование природной среды космическими средствами. М.: Наука, 1975, т. 4, с. 121.
14. Мельманович А. Ф., Якуши Д. А. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1980, т. 25, с. 265.
15. Вендровский К. В., Вейцман А. Н., Платишечук В. М. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1972, № 17, с. 426.
16. Вендровский К. В., Кацман В. Д. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1978, т. 23, с. 302.

УДК 621.372.01.001.7

В. Ф. Нестерук

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ КАЧЕСТВА

Общий подход к обработке изображений в настоящее время осуществляется на основе принципов кибернетики, являющейся научным направлением, изучающим общие свойства изображений, определяющим цели и задачи их преобразования, обработки и воспроизведения на основе всех возможных методов и средств [1]. Характерным признаком кибернетического подхода к изучению изображений является комплексность, которая заключается в использовании методов и результатов ряда дисциплин, так или иначе относящихся к изображениям, а также выявление общих черт и закономерностей.

В настоящее время на основе ряда детерминированных и статистических характеристик изображений и эффективного использования закона вынужденного восприятия света удалось построить основы теории изучения изображений [2-6].

ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Необходимость оценки качества как отдельной целевой установки в кибернетике объясняется, по существу, тремя главными причинами.

Во-первых, задача оценки качества того или иного изображения, полученного при различных внешних условиях, может быть поставлена как основная, т. е. как конечная цель обработки. Во-вторых, часто изображение, поступившее на обработку, например с целью распознавания объектов, может не сопровождаться необходимыми данными по качественным показателям, которые могут потребоваться для решения основной задачи. В этом случае должна осуществляться предварительная оценка качества. В-третьих, пусть целью обработки является исправление изображений, что, другими словами, означает требование улучшения качества. Тогда, даже если исходное изображение имеет исчерпывающие характеристики качества, после проведенной обработки качество должно быть оценено вновь. Это также дает возможность оценить эффективность алгоритма обработки по улучшению качества.

Количественная оценка контрастности сюжетных изображений, являющаяся важнейшей их характеристикой, основывается на необходимости учета контрастности каждого элемента  $B_i$  изображения по отношению к средней яркости  $B_0$  всего изображения. В результате образуется набор контрастов

$$K_{i0} = \frac{B_i - B_0}{B_i + B_0}, \quad i \in \{1, N\}, \quad (1)$$

где  $N$  — число элементов изображения.

Оценка контрастности снимочных изображений включает также закон контрастности восприятия элементарного двухэлементного изображения с яркостями  $B_1$  и  $B_2$  при адаптации  $B_0$ . Этот закон, обоснование которого дано в работе [4, 6, 7], выражается формулой

$$K_{\text{в}} = \frac{K_{\text{д}} + K_{\text{в}}}{1 + K_{\text{д}} K_{\text{в}}} = \frac{B_1 B_2 - B_0^2}{B_1 B_2 + B_0^2} \quad (2)$$

Все это определяет контрастность как внутреннее свойство изображений, а для ее численной оценки оказывается достаточным знание одномерной статистической характеристики — гистограммы контрастов  $f(K_{1,2})$  или же двумерной гистограммы яркостей элементов  $f(B_1, B_2)$ .

Согласно теории подобия, а также для численной оценки контрастности следует выбрать математическое описание величины  $K$ , а на практике — ее оценку по одной из следующих гистограмм:

$$K_c = \int_{-\infty}^{\infty} |K_{1,2}| f(K_{1,2}) dK_{1,2} \quad (3)$$

$$K_c = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|B_1 B_2 - B_0^2|}{B_1 B_2 + B_0^2} f(B_1, B_2) dB_1 dB_2 \quad (4)$$

Эти выражения дают полный интегральный контраст. Следует отметить, что вычисление гистограмм обеих ядер весьма трудоемко: даже для изображений малых форматов. С целью упрощения расчетов определялись контрасты каждого элементарного поля по отношению к  $B_0$ . Тогда для расчета численного значения контраста достаточно одномерной гистограммы яркостей элементов изображения  $f(B_1)$ .

Указанное поле характеризуется тем, что все его элементы имеют одинаковую яркость. Это сразу задает вид двумерной гистограммы

$$f(B_1, B_2) = f(B_1) \delta(B_1 - B_2) \quad (5)$$

где  $\delta(x)$  — дельта-функция Дирака.

Формула (4) при этом преобразуется

$$K_c = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B^2 - B_0^2}{B^2 + B_0^2} f(B) dB \quad (6)$$

(полный интегральный контраст).

По формуле (6) проводилась численная оценка контраста различных снимочных изображений (4—8). Последовательность численных оценок для каждого из них не совпала, но с разной контрастностью хорошо согласуется с критерием восприимчивости.

Функция распределения (6) по сути одномерна, однако ее формула вычисления имеет сложную структуру. Однако существуют более точные приближенные методы. При этом можно использовать одномерные статистические характеристики  $B_1$  и  $B_2$ , представляющие собой независимые

$$f(B_1, B_2) = f(B_1) f(B_2)$$

Эти две независимые функции распределения, представляющие собой статистические характеристики элементов изображения, можно считать независимыми, если их значения не зависят друг от друга. В этом случае можно использовать одномерные статистические характеристики  $B_1$  и  $B_2$ , представляющие собой независимые функции распределения. При этом можно использовать одномерные статистические характеристики  $B_1$  и  $B_2$ , представляющие собой независимые функции распределения.

0,41280; 0,52119; 0,30274; 0,19295. Сами изображения и их гистограммы здесь не приводятся.

Представляет интерес сравнить полученные результаты с расчетами значений неполного интегрального контраста по формуле (6), по которой были получены (в порядке убывания) следующие результаты:  $K_c = 0,69728, 0,58069, 0,39374, 0,24719$ . Поскольку вычисления по формуле (4) следует считать более точными, то, следовательно, значения  $K_c$  по формуле (6) завышены.

Подчеркнем общее свойство контраста — независимость его значений от усиления изображений в целом. Действительно, из выражений (2), (4), (6) следует, что если яркость каждого элемента увеличить (уменьшить) в  $\alpha$  раз, то численное значение контраста не изменится.

### ПОДГОТОВКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Перейдем теперь к обработке изображений, обеспечивающей их преобразование некоторым оператором  $\Phi(B) = \beta$ .

Как известно, оператор любого конкретного линейного преобразования выражается единообразно в виде свертки, преобразующей изображение по алгоритму

$$\beta_k = \sum_{l=1}^N h(l-k) B_l \quad (8)$$

При этом множество импульсных функций  $h$  (ядер оператора) бесконечно. Следовательно, несмотря на то что класс линейных преобразований является лишь подклассом общих нелинейных, он содержит бесконечное число вариантов реализации по виду ядра и по значениям его параметров.

Обратимся к нелинейным преобразованиям. Иконика выдвигает ряд программных задач изучения и обработки изображений, одна из которых сформулирована в работе [1]: «...достроить теорию преобразования изображений различными операторами, особенно нелинейными, и дать количественную оценку эффективности таких преобразований для различных классов изображений...»

Пусть матрица  $[B]$  описывает нелинейное преобразование изображения  $B$ . Такое описание дает возможность учитывать дискретизацию при цифровой обработке. Пусть  $\Phi$  — оператор преобразования. В результате этого преобразования получим новое изображение с матрицей

$$[\beta] = \Phi[B] \quad (9)$$

Выражение (9) — наиболее общая форма преобразования, а на практике можно выделить конкретные подклассы преобразований, более детализированные:

Если любой элемент преобразованного изображения  $\beta_i$  формируется как линейная комбинация элементов  $B_j$  изображения  $B$ , т. е.

$$\beta_i = \sum_j a_{ij} B_j, \quad i = \overline{1, N} \quad (10)$$

тогда преобразование является линейным. Если же элемент  $\beta_i$  формируется как нелинейная комбинация элементов  $B_j$  изображения  $B$ , т. е.

Преобразование является нелинейным. Если же элемент  $\beta_i$  формируется как нелинейная комбинация элементов  $B_j$  изображения  $B$ , т. е.

Преобразование является нелинейным. Если же элемент  $\beta_i$  формируется как нелинейная комбинация элементов  $B_j$  изображения  $B$ , т. е.

Если это единственно характерное свойство преобразования, то можно считать, что преобразование является нелинейным. Если же элемент  $\beta_i$  формируется как нелинейная комбинация элементов  $B_j$  изображения  $B$ , т. е.



Потребуем, чтобы оператор (10) осуществлял преобразование тоновой шкалы, заданной функцией  $F_B(B_i)$ , в желаемое распределение  $F_B(\beta_i)$ . Функции  $F_B$  и  $F_\beta$  — монотонны и принимают значения в одном и том же интервале (0, 1). Тогда, очевидно, найдется такая пара значений  $B_i$  и  $\beta_i$ , что будет выполняться равенство

$$F_\beta(\beta_i) = F_B(B_i).$$

Отсюда находим вид выражения оператора безыперционного преобразования, которое являем статистическим:

$$\beta_i = F_\beta^{-1}[F_B(B_i)].$$

где  $F_\beta^{-1}$  — обратная функция.

В принципе можно расширить класс статистических преобразований, если описать действие второго звена некоторой однозначной функцией  $\Psi(\cdot)$ , заданной в интервале (0, 1) и принимающей значения в интервале (0,  $\infty$ ), т. е. для превращения изображения оператором:

$$\beta_i = \Psi[F_\beta^{-1}(F_B(B_i))].$$

Операторы вида (13) будем называть нелинейными статистическими преобразованиями. Практически построение операторов статистических преобразований может осуществляться на основе ряда принципов.

Первый, главный, реализуется оптимальными преобразованиями. На данном этапе сделано на основе закона избыточности зрительного восприятия в человеческом количестве информации в зрительной системе. В двух частях статьи получены оптимальные распределения. Первое из них вида

$$F_\beta(\beta) = \frac{P}{P - \beta_0} \quad \beta \in [0, \beta_{\max}],$$

где  $\beta_0$  — параметр, являясь контрастным. Оно получено в предположении о линейной зависимости значений яркости изображения [1] при малом количестве информации:

$$I \approx \int_0^{\beta_{\max}} \sqrt{2 \ln 2} \beta^{-1} d\beta.$$

где  $\beta_{\max}$  — яркость.

Свойства распределения (14) подробно изложены в работе [8]. При помощи комбинирования формул (12) и (14) получим оптимальное контрастное преобразование изображения  $B$  в изображение  $\beta$ :

$$\beta(B_i) = F_\beta^{-1}[F_B(B_i)] = \beta_0 \sqrt{\frac{F_B(B_i)}{1 - F_B(B_i)}}.$$

Практически реализация распределений в преобразованиях типа (14) и (15) (и других, подобных им) ввиду неограниченной протяженности «слабых» функций плотности, требует определенного внимания. Дело в том, что при реализации достаточно большие значения их яркости, что приводит к «слабым» значениям изображения. Поэтому во избежание искажений преобразования лучше строить на основе усеченных распределений в диапазоне от  $\beta_{\min}$  до  $\beta_{\max}$ , причем  $\beta_{\min}$  может быть равно нулю.

При использовании усеченных распределений встает вопрос о принципе выбора рабочего диапазона или границы усечения. Здесь предлагается принцип выбора, чтобы обеспечить попадание значений яркости изображения в рабочий диапазон с заданной вероятностью. На практике эта величина должна быть достаточно близкой к единице. Из выражения (14) при  $F_B(\beta_{\max}) = P$  можно найти отношение  $\beta_{\max} / \beta_0$ , выраженное через  $P$ . Тогда, произведя пере-

нормировку, получим усеченное контрастное распределение

$$F_\beta(\beta) = \frac{1}{P} \frac{\beta^2}{\beta^2 + \beta_0^2}; \quad \beta \in [0, \beta_{\max}]. \quad (17)$$

Соответствующий ему алгоритм преобразования изображений имеет вид

$$\beta_i = \beta_0 \sqrt{\frac{PF_B(B_i)}{1 - PF_B(B_i)}}. \quad (18)$$

Из последнего выражения легко прослеживается ограниченность значений  $\beta_i$ . Действительно, даже при  $F_B(B_i) = 1$  получаем конечные значения  $\beta_i = \beta_{\max}$ . Заметим, что если для данного  $P$  выбрана величина  $\beta_{\max}$ , то автоматически находится и  $\beta_0$  — свободный параметр преобразования (18). В единицах квантования  $\beta_{\max} = 256$ . Тогда при  $P = 0,9$  из формулы (18) получим

$$\beta = \left[ \beta_{\max} \sqrt{\frac{1-P}{P}} \right] = 85.$$

Здесь скобками обозначена целая часть числа. Эксперименты показали, что именно такое значение  $\beta_0$  соответствует хорошему зрительному восприятию изображений. Аналогично могут быть найдены свободные параметры и при других распределениях и алгоритмах.

Второй принцип построения операторов статистических преобразований состоит в выделении класса преобразований, который с самого начала строится по функциям распределения, плотность вероятности которых отлична от нуля только в ограниченном диапазоне изменения переменной. Причем ограниченность вводится искусственно за счет усечения распределений или же она имеет место по своей природе. Самым простым примером последнего является равномерное распределение.

Выделение класса распределений ограниченного динамического диапазона обусловлено требованием сохранения взаимной однозначности яркостей сопряженных точек исходного и преобразованного изображений при практической реализации операторов. Дело в том, что из-за реально существующей верхней границы динамического диапазона цифроаналоговых преобразователей (при обработке изображения на ЭВМ) для неограниченных по диапазону яркостей распределений всем яркостям, превышающим эту границу, автоматически приписывается ее значение. Здесь происходит не усечение распределения в математическом смысле с соответствующей перенормировкой, а просто концентрация вероятности в точке наибольшего значения яркости (забеливание изображения). Взаимная однозначность теряется, возникает некорректируемое в дальнейшем искажение изображения с потерей информации. При ограниченном динамическом диапазоне потерь информации нет, и в этом состоит их практическая ценность.

Примерами распределений с ограниченным по природе диапазоном являются «бета-распределения» [9], специальное сферическое распределение

$$F_\beta(z) = \frac{2\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi} \Gamma(\frac{n-1}{2}) \beta_{\max}^{n-2}} \int_0^z [\beta_{\max} - (2t - \beta_{\max})^2]^{\frac{n-3}{2}} dt; \quad z \in [0, \beta_{\max}] \quad (19)$$

и др.

Из них могут быть получены многие известные в частных случаях распределения: равномерное ( $n = 3$ ), распределение арксинуса ( $n = 2$ ), параболическое ( $n = 5$ ), предельное нормальное при  $n > n_0$  и др. В теоретическом отношении особенно важны те из них, для которых можно получить в явном виде обратную функцию, необходимую для построения оператора (12).

В классе распределений с ограниченным динамическим диапазоном имеется оптимальное по принципу максимума количества информации (15). Поскольку динамический диапазон величин ограничен, то автоматически ограничена и дисперсия значений яркости элементов изображения. Тогда, если не требовать,

чтобы дисперсия была равна заданной величине, получаем оптимальное рас-  
деление

$$F_{\beta}(\beta) = \frac{\ln(\beta/\beta_{\min})}{\ln(\beta_{\max}/\beta_{\min})}$$

с плотностью

$$f_{\beta}(\beta) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{\ln(\beta_{\max}/\beta_{\min})}$$

Оно может быть названо простым гиперболическим распределением. Весь класс гиперболических распределений более широк (см., например, [10]).

Используя совместно формулы (12) и (20), легко находим оператор оптимального по максимуму количества информации преобразования изображений в ограниченном динамическом диапазоне

$$\beta_i = \beta_{\min} (\beta_{\max}/\beta_{\min})^{F_B(B_i)}$$

Третий принцип построения операторов статистических преобразований основывается на следующих соображениях. Как известно, количественная мера информации Шеннона, на основе которой получены экстремальные распределения (14) и (20) и соответствующие оптимальные операторы (18) (22), не отражает семантического аспекта информации вообще и на изображениях в частности. Поэтому не исключено, что для некоторых специфических сюжетов (особенно знакомых наблюдателю) могут оказаться более приемлемыми другие преобразования. Сводка распределений и соответствующих операторов преобразования дана в работе [6].

Здесь вводится ранее не рассматривавшийся алгоритм, связанный с односторонним распределением Коши с плотностью

$$f_{\beta}(\beta) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{q} \frac{1}{1 + (\beta/q)^2}; \quad \beta \in [0, \infty]$$

и функцией распределения

$$F_{\beta}(\beta) = \frac{2}{\pi} \arctg(\beta/q),$$

где  $q > 0$  — параметр.

Очевидно, алгоритм преобразования Коши будет иметь вид

$$\beta_i = q \operatorname{tg}[(\pi/2)F_B(B_i)].$$

Целесообразно сразу построить усеченное распределение и соответствующее ему преобразование. Для этого произведем перенормировку

$$F_{\beta}^{yc}(\beta) = AF_{\beta}(\beta).$$

Подставляя сюда  $F_{\beta}(\beta)$  из формулы (24) и полагая  $F_{\beta}^{yc}(\beta) = 1$  при  $\beta = \beta_{\max}$  найдем нормировочный множитель

$$A = \frac{\pi}{2} [\arctg(\beta_{\max}/q)]^{-2}.$$

Следовательно, усеченное распределение Коши имеет вид

$$F_{\beta}^{yc}(\beta) = \frac{\arctg(\beta/q)}{\arctg(\beta_{\max}/q)}; \quad \beta \in [0, \beta_{\max}]. \quad (25)$$

Введем вероятность  $P = P(\beta < \beta_{\max}) = F_{\beta}(\beta_{\max}) = (2/\pi) \arctg(\beta_{\max}/q)$ . Тогда окончательно

$$F_{\beta}^{yc}(\beta) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{P} \arctg(\beta/q). \quad (26)$$

Первый момент распределения (26) равен

$$M[\beta] = \frac{\beta_{\max}}{\pi P \operatorname{tg}(\frac{\pi}{2}P)} \ln(1 + \operatorname{tg}^2(\frac{\pi}{2}P)). \quad (27)$$

Из формул (12) и (26) находим алгоритм преобразования элементов изображения типа Коши

$$\beta_i = q \operatorname{tg}\left[\frac{\pi}{2} P F_B(B_i)\right] = \beta_{\max} \frac{\operatorname{tg}\left[\frac{\pi}{2} P F_B(B_i)\right]}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} P\right)}. \quad (28)$$

Выведем теперь основное фундаментальное свойство всего класса неполных статистических преобразований. Для этого вернемся к классам статистических и неполных статистических преобразований в целом, т. е. к выражениям (12) и (13). Пусть в результате таких преобразований получено изображение  $\beta$ . Как и любое сюжетное изображение, оно может быть охарактеризовано на основе закона зрительного восприятия эквидисцитных полей

$$K_c = \int_0^{\infty} \left| \frac{\beta_i^2 - M^2[\beta_i]}{\beta_i^2 + M^2[\beta_i]} \right| f_B(B_i) dB_i = \int_0^{\infty} \left| \frac{\varphi^2(B_i) - M^2[\varphi]}{\varphi^2(B_i) + M^2[\varphi]} \right| f_B(B_i) dB_i. \quad (29)$$

Если рассмотреть выражение (29) для класса статистических безынерционных преобразований (19) и заметить, что  $f_B(B_i) dB_i = dF_B$ , то оно может быть записано в виде интеграла Стильтьеса

$$K_c = \int_0^1 \frac{|(F_B^{-1}[F_B])^2 - M^2[\beta_i]|}{(F_B^{-1}[F_B])^2 + M^2[\beta_i]} dF_B. \quad (30)$$

Структура выражения (30) такова, что  $F_B$  играет роль независимой переменной в определенном интеграле и, следовательно, он от нее не зависит.

Можно просто записать

$$K_c = \int_0^1 \frac{|[F_B^{-1}(x)]^2 - M^2[\beta_i]|}{[F_B^{-1}(x)]^2 + M^2[\beta_i]} dx. \quad (31)$$

Это все означает, что величина  $K_c$  не зависит от контраста гистограммы и сюжета исходного изображения, но является характеристикой конкретного статистического преобразования, определяемого функцией  $F_{\beta}$  и может служить мерой его эффективности!

Точно так же для всего класса неполных статистических преобразований получаем

$$K_c = \int_0^1 \frac{|\psi^2(x) - M^2[\beta_i]|}{\psi^2(x) + M^2[\beta_i]} dx. \quad (32)$$

Для каждого конкретного структурного преобразования значения контраста могут быть рассчитаны раз и навсегда! В качестве примера приведем выражение (31) для случая преобразования Коши

$$K = \int_0^1 \frac{\left| \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} P F_B\right) - \left\{ \frac{1}{\pi P} \ln \left[ 1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} P\right) \right] \right\}^2 \right|}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} P F_B\right) + \left\{ \frac{1}{\pi P} \ln \left[ 1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} P\right) \right] \right\}^2} dF_B. \quad (33)$$

При  $P = 0,9$  расчет дает значение контраста  $K = 0,593$ .

#### ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ПАРАМЕТРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Выше отмечалось свойство контраста — независимость его значения от усиления изображения в целом в  $\alpha$  раз. Между тем само по себе усиление влияет на восприятие изображения. Действительно, если исходное изображение настолько слабое, что практически не воспринимается глазом, то после усиления значения яркостей элементов могут быть введены в «рабочий» диапазон

зрительной системы и будут восприниматься. Это обстоятельство было продемонстрировано теоретически и экспериментально в работе [8] на видеоснимках при их обработке на ЭВМ. Показатели же контрастности любого вида (4), (6), (29) никак не отражают этот факт. Следовательно, нужны и другие характеристики качества изображений, которые зависели бы от  $\alpha$  явно. В качестве таковой предлагается использовать меру количества информации Шеннона. Прежде чем это осуществить, сделаем одно замечание.

Структура функций плотности распределений, рассматриваемых в наших задачах, имеет следующий вид:

$$f(\beta) = (1/\mu) f(\beta/\mu), \quad (34)$$

где  $\mu > 0$  — параметр. Для экспоненциального закона  $\mu = \lambda$ , для контрастного  $\mu = \beta_0$  и т. д.

Если изображение подвергается усилению в  $\alpha$  раз, то функция плотности преобразуется и будет равна

$$f_\alpha(\beta) = (1/\alpha\mu) f(\mu/\alpha\mu). \quad (35)$$

Отсюда видно, что усиление сводится к увеличению значения параметра распределения. Следовательно, можно просто изучать зависимость той или иной характеристики от соответствующих параметров. Это автоматически включает в себя и эффекты усиления.

Поставленная задача имеет особое значение для распределений преобразованных изображений со значениями яркостей, превышающими границу  $\beta_{max}$ , когда по тем или иным причинам не применяется усеченное распределение. При усеченных распределениях, а также при распределениях в ограниченном динамическом диапазоне по своей природе параметр распределения при заданной точности (вероятности  $P$ ) определен однозначно. В этом случае можно лишь рассчитать количество информации при разных распределениях и сравнить их между собой. Никакая характеристика изображения при заданной точности для данного распределения не может изучаться как функция параметра.

Учитывая, что преобразования с забеливанием использованы в исследованиях, например в работе [8] и др., рассмотрим поставленные вопросы на примере экспоненциального распределения и соответствующего преобразования [6]. Распределение плотности вероятности значений яркостей преобразованного изображения с забеливанием имеет вид

$$f'_\beta(\beta) = f_\beta(\beta) + \int_{\beta_{max}}^{\infty} f_\beta(\beta) d\beta \delta(\beta - \beta_{max}); \quad \beta \in [0, \beta_{max}]. \quad (36)$$

Здесь второе слагаемое задает значения сконцентрированной в точке  $\beta = \beta_{max}$  вероятности  $P_m$ :

$$P_m = \int_{\beta_{max}}^{\infty} f_\beta(\beta) d\beta. \quad (37)$$

Для экспоненциального распределения получаем

$$f_\beta(\beta) = (1/\lambda) \exp(-\beta/\lambda) + \exp(-\beta_{max}/\lambda) \delta(\beta - \beta_{max}). \quad (38)$$

Распределение (36) и его частный случай (38) являются смешанными, определяющими смешанную случайную величину, принимающую непрерывные и дискретные значения. Энтропия таких распределений также имеет «смешанный» характер и может быть определена таким же приемом, как и при определении дифференциальной энтропии Шеннона для «чистых» непрерывных распределений. Исходим из дискретного распределения

$$H = -I = -\sum_{k=1}^m P_k \ln P_k,$$

где  $k$  — номер дискретной ячейки.

Пусть индекс  $m$  соответствует вероятности значений яркости элементов изображения, отнесенных к точке  $\beta = \beta_{max}$ . Выделим это слагаемое

$$H = -I = -\sum_{k=1}^{m-1} P_k \ln P_k - P_m \ln P_m.$$

Переходя к пределу, получим непрерывное распределение с плотностью, определенной всюду, кроме точки  $\beta = \beta_{max}$ , причем при больших  $n$   $P_k \approx f_{\beta_k}(\beta_k) \Delta\beta$ , тогда имеем

$$H = I = -\int_0^{\beta_{max}} f_\beta(\beta) \ln f_\beta(\beta) d\beta - P_m \ln P_m - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \ln \Delta x.$$

Первые два слагаемых в соответствии с указанным выше приемом определяют дифференциальную энтропию смешанного распределения при забеливании изображения

$$I^2 = -\int_0^{\beta_{max}} f_\beta(\beta) \ln f_\beta(\beta) d\beta - P_m \ln P_m, \quad (39)$$

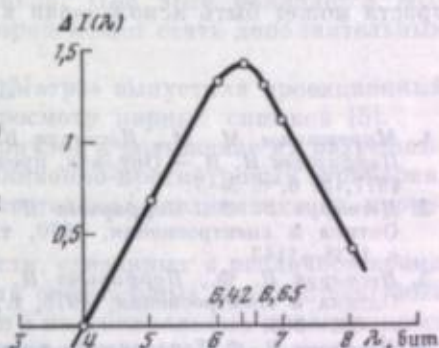
где  $P_m$  определяется по формуле (37).

Для экспоненциального распределения расчет по формуле (39) дает выражение

$$I^2(\lambda) = [1 - \exp(-\beta_{max}/\lambda)] (1 + \ln \lambda). \quad (40)$$

Как видно, информационная оценка зависит от параметра  $\lambda$ , причем сложным образом. При квантованных значениях яркостей элементов изображения естественно и  $\lambda$  выражать в единицах квантования. В связи с этим  $\min \lambda = 1$ . Видимость изображения связана с количеством содержащейся в нем информации.

Нужно исследовать выражение  $I^2$  на максимум по параметру  $\lambda$ . Необходимое условие экстремума дает трансцендентное уравнение, поэтому зададим функцию в ряде точек следующим образом:



Зависимость информационной емкости изображения с экспоненциальным распределением от значений параметра  $\lambda$ .

$\beta_{max} = 256$

$\lambda$ , ед. квантования	$\lambda$ , бит	$I(\lambda)$ , нат. ед.	$\frac{\Delta I(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{I(16) - I(\lambda)}{I(\lambda)}$	$\lambda$ , ед. квантования	$\lambda$ , бит	$I(\lambda)$ , нат. ед.	$\frac{\Delta I(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{I(16) - I(\lambda)}{I(\lambda)}$
1	0	1,00	—	85	6,42	5,16	1,39
e	1,45	2,00	—	96	6,65	5,01	1,24
16	4	3,77	0	128	7	4,90	1,13
32	5	4,47	0,7	256	8	4,14	0,37
64	6	5,06	1,29				

На рисунке приведен график функции (40), на котором для лучшего восприятия масштаб по оси абсцисс выбран логарифмическим с основанием 2, т. е. в битах, а по оси ординат произведено смещение на величину значения  $I$  при  $\lambda = 16$ .

Видно, что координата максимума  $I^2(\lambda)$  находится вблизи значения  $\lambda = 85$ . Интересно отметить, что изучение зрительного восприятия видовых снимков одного и того же сюжета, подвергнутых экспоненциальному преобразованию при различных  $\lambda$  (с забеливанием), показало, что наилучшее субъективное восприятие соответствует значению  $\lambda$ , близкому к только что найденному по критерию максимума количества информации. Это обстоятельство лишний раз подчеркивает необходимость учета информационных аспектов во всех задачах преобразования изображений. Аналогичным образом могут быть полу-

...параметры и для... (text is partially obscured)

В заключение заметим, что в статье рассмотрены лишь некоторые аспекты преобразования изображений, которые приводят к аналитическим результатам. Разумеется, на этом этапе задач преобразования не исчерпывается и в дальнейшем стоит задача разработки методов, главнейших преобразований, учитывающих связь элементов изображений между собой. Безмерционные преобразования являются первым этапом на этом пути, с тем, однако, интерпретируемые результаты.

В отношении оценки качества изображений по контрасту принципиальная проблема является представляется исчерпывающим и практическая реализация оценок обусловлена лишь большим или меньшим объемом численных расчетов. В дальнейшем предстоит, основываясь на законах зрительного восприятия изображений, построить и другие показатели качества, при этом, в первую очередь, с тем, что называют реакцией. Опыт иконописного подхода в отношении контраста может быть использован в полной мере для решения и этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошников М. М., Нестерук В. Ф., Порфирьев Н. Н. — Опт.-мех. пром-сть, 1977, № 6, с. 3-7.
2. Нестерук В. Ф., Порфирьев Н. Н. — Оптика и спектроскопия, 1970, т. 29, с. 1138-1143.
3. Нестерук В. Ф., Порфирьев Н. Н. — Оптика и спектроскопия, 1978, т. 44, с. 801-803.
4. Нестерук В. Ф. Теплоизлучение в медицине. Л., 1980, с. 44-48.
5. Miroshnikov M. M., Nesteruk V. Ph., Sintov V. N. — In: Optik, Photonics, and Iconics Engineering Meeting (OPIEM). Strasburg, 1979, vol. 212, p. 2-10.
6. Мирошников М. М., Нестерук В. Ф. В кн.: Дана. II Сов.-фр. симпозиум по приборостроению (Москва, 1981). 1982, с. 130-168.
7. Нестерук В. Ф., Соколова В. А. — Опт.-мех. пром-сть, 1980, № 5, с. 11-5.
8. Нестерук В. Ф. — Опт.-мех. пром-сть, 1981, № 11, с. 9-11.
9. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1975, т. 2, с. 70.
10. Петров В. М., Яблонский А. И. Математика и социальные процессы. Знание, 1980, с. 18.

К. М. Виноградов

УДК 78

ВИЗУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОТОСНИМКОВ

В XX столетии возникли и развиваются средства изучения земной поверхности с воздуха, а в последние 20 лет и из космоса. При этом используются фотографические съемочные средства, телевизионные и радиолокационные системы [1]. Получаемые изображения обрабатываются с целью извлечения информации применительно к решениям задач определения природных ресурсов, лесотаксации, геологии, топографии и т. д.

За последние 10-15 лет появился целый ряд работ, посвященных визуальному анализу аэрофотоснимков [1-3]. Данному вопросу посвящено много оригинальных статей. Внимание к проблеме визуального анализа фотоснимков не случайно. С одной стороны, этому способствует актуальность задачи, с другой — недостаточная изученность вопроса.

Человеческое зрение хранит в себе еще много загадок. Вспомним хотя бы исследования эффекта Бэнхема, показавшие, что видимый цвет далеко не всегда определяется окраской и подсветкой. Зрение является инструментом ввода фотографической информации в человеческий мозг, который производит ее обработку. Алгоритмы обработки фотографической информации весьма сложны. Поиск объектов по косвенным признакам требует высокого уровня профессиональной подготовки [3].

В связи с непрерывным ростом объема обрабатываемой информации во всех развитых странах ведется поиск технических решений, разрабатывается аппара-

тура, проводятся исследования, направленные на механизацию и автоматизацию процесса обработки фотографической информации, а также на углубление и уточнение наших знаний о процессе зрительного восприятия фотографического изображения, психофизиологических процессах обработки информации.

Процесс зрительного восприятия фотографического изображения осуществляется с помощью оптико-механической и оптико-телевизионной техники, структура которой зависит от средств и методов наблюдения и типов получаемых изображений. Возникновение новых средств наблюдения требует создания новой аппаратуры для дешифрирования фотографических изображений.

Традиционными простейшими приборами для дешифрирования являются просмотрные столы, которые в зависимости от комплектации позволяют решать задачу обработки практически любых изображений. Введение цветных фильтров помогает регулировать цветность подсветки при просмотре цветных изображений [4]. Применение луп позволяет вести дешифрирование изображений с высокой разрешающей способностью. Стереоскопы позволяют приводить стереоскопическое рассматривание аэроснимков. При этом появляется возможность измерения высоты предметов, которая может стать дополнительным дешифровочным признаком [3].

В конце 70-х годов французская фирма «Матра» выпустила проекционный прибор, облегчающий стереоскопический просмотр парных снимков [5].

Увеличение объема обрабатываемых материалов и повышение их разрешающей способности вызвали появление проекционно-просмотровых приборов, облегчающих труд дешифровщиков и, следовательно, увеличивающих производительность труда [6].

Наличие снимков одной и той же местности, сделанных в различное время и разной аппаратурой, потребовало создания специальных многодорожечных просмотрных столов с большой поверхностью и многоканальных проекционных систем, позволяющих производить совместные (комплексные) изучения изображений [6, 7].

Многозональные съемки оказались весьма мощным инструментом для получения сведений о растительном покрове нашей планеты. С этой целью создан целый ряд систем, состоящих из съемочных многозональных камер и приборов анализа. Среди них имеются французские и японские приборы с встроенными телевизионными системами. Есть и чисто оптико-механические системы. Одной из самых совершенных систем является разработанная специалистами народного предприятия «Карл Цейс» система, состоящая из многозональной съемочной камеры МКФ-6 и прибора синтеза МСП-4 [8]. Синтез многозональных изображений при этом осуществляется, как правило, проецированием на один экран позитивных контактных копий на прозрачной основе. Иногда синтез производят по негативным изображениям.

Нетрудно убедиться, что синтез позитивных изображений даст более качественную цветопередачу при воспроизведении в естественных цветах.

Представим, что мы фотографируем объекты красного (К), синего (С), зеленого (З), голубого (Г), желтого (Ж) и пурпурного (П) цветов. Положим для простоты, что составные цвета состоят из равных частей компонентов:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{2}C + \frac{1}{2}З, & \Pi &= \frac{1}{2}C + \frac{1}{2}К, & Ж &= \frac{1}{2}З + \frac{1}{2}К, \\ Б &= \frac{1}{3}C + \frac{1}{3}З + \frac{1}{3}К. \end{aligned}$$

Тогда при съемке объектов разного цвета величины пропускания зональных негативов на изображениях цветных негативов составят:

Зона	Объект						Зона	Объект					
	К	С	З	Г	П	Ж		К	С	З	Г	П	Ж
Красная	0	1	1	1	0,5	0,5	Красная	1	0	0	0	0,5	0,5
Синяя	1	0	1	0,5	0,5	1	Синяя	0	1	0	0,5	0,5	0
Зеленая	1	1	0	0,5	1	0,5	Зеленая	0	0	1	0,5	0	0,5

В результате синтеза получим:

Синтез	Объект						Синтез	Объект					
	К	С	З	Г	П	Ж		К	С	З	Г	П	Ж
Негативы при рассматривании на экране	Г	Ж	П	К + Б	З + Б	С + Б	Позитивы на экране	К	С	З	Г	П	Ж
Негативы при фотопечати	К	С	З	Г + Б	П + Б	Ж + Б	Позитивы при печати	Г	Ж	П	К	З	С

Видно, что в случае синтеза негативных изображений цвета получаются насыщенными. Поэтому синтез позитивных изображений предпочтительнее.

В настоящее время методика обработки материалов многозональной съемки и результатов синтеза пока находится в начальной стадии своего развития. Поэтому трудно судить, какой способ синтеза будет иметь преимущественное распространение: телевизионный [3, 9, 10], оптико-механический [8] или химико-фотографический (последовательная печать многозональных изображений на бумагу без предварительного визуального анализа синтезированного изображения на экране) [11, 12]. Видимо, каждый из них найдет свое место.

Специфического подхода к проблеме дешифрирования требует также название результатов обработки (геологические, лесотаксационные, метеорологические, сельскохозяйственные, топографические, гидрологические исследования). В каждом из направлений существуют свои методы дешифрирования и свои признаки, которые требуют зачастую создания своей аппаратуры. Если при дешифрировании искусственных сооружений основными дешифровочными признаками являются (в порядке значимости) форма, тень, тон, косвенные признаки, то при дешифрировании естественных объектов это тон, структура изображения, косвенные признаки, форма [1]. Во втором случае целесообразна разработка и применение специальных структурометрических устройств позволяющих анализировать спектр пространственных частот объекта с целью использования его в качестве дешифровочного признака [13—15].

Достигнутый уровень вычислительной техники позволяет приступить к применению количественных тоновых характеристик черно-белого и цветного изображений в качестве дешифровочного признака. Это производится или фотометрированием изображения, или нахождением соотношения действующих экспозиций в разных областях спектра, которое используется в качестве дешифровочного признака [13, 16, 17]. При этом технологический процесс дешифрирования представляется следующим.

Входные данные: спектральные коэффициенты яркости объектов ( $\rho_\lambda$ ), распределение энергии в солнечном свете ( $\gamma_\lambda$ ) с учетом местных факторов (время суток, поглощение и рассеяние атмосферы), спектральные коэффициенты пропускания оптики фотоаппарата ( $\tau_\lambda$ ), кривая спектральной чувствительности фотоматериала ( $S_\lambda$ ) и его характеристическая кривая.

Эти данные позволяют вычислить соотношения актиничных потоков для любых объектов ландшафта. Денситометрические измерения с переходом к актиничным потокам по характеристической кривой позволяют получить эмпирические соотношения для актиничных потоков. Аналогичным образом может быть найдено соотношение актиничных потоков для элемента ландшафта в разных областях спектра в случае цветной, спектральнозональной или многозональной съемки.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов позволяет правильно классифицировать объект. Основным затруднением при этом является необходимость выполнения большого количества расчетов, учитывающих входные данные метода. Поэтому применение этого метода возможно только при широком использовании вычислительной техники. Начатые в этом направлении исследования [18] развиваются дальше [16, 17].

В последние 10—15 лет для целей визуального дешифрирования начинают применяться аппаратура, имеющая замкнутые телевизионные системы. Приме-

нение таких систем, вероятно, позволит расширить возможности за счет увеличения контраста, нанесения контура и т. д. [3, 9, 10].

Сильная зависимость вероятности опознавания от контраста анализируемого изображения требует углубленного поиска путей повышения видимого контраста всеми доступными способами: оптическими, с помощью маскирования различных видов и др.

Все известные приборы и методы облегчают процесс дешифрирования, позволяют использовать те или другие дешифровочные признаки, увеличивают способность человеческого зрения различать и классифицировать предметы. Однако не все свойства зрительного рецептора человека пока еще используются при дешифрировании.

Разрешающая способность используется уже давно, и наиболее полное извлечение информации из изображения достигается применением различного рода увеличительных систем. Бинокулярное стереоскопическое зрение дает определенную дополнительную информацию об объекте изучения.

Очень редко используется цветоразличительная способность человеческого зрения, хотя в последнее время в связи с развитием многозональной съемки

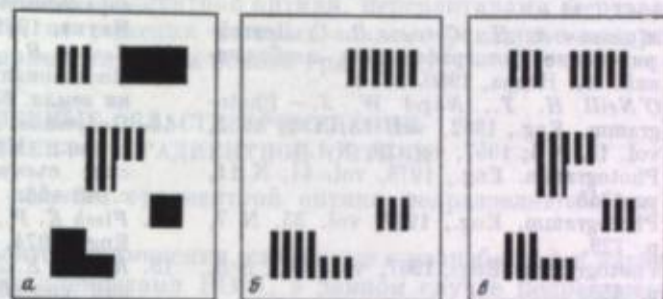


Схема совмещения (а) растрированных изображений (б и в)

степень ее использования существенно повышается. Появились приборы и разработки, направленные на представление черно-белой информации в условных цветах. Сущность метода заключается в замене черно-белой шкалы на цветную. В результате перевода тоновых контрастов в цветовые облегчается выделение малоконтрастных деталей. Особенно это заметно на рентгеновских снимках с плавными переходами полутонов [19—21].

Практически не используется в процессе дешифрирования эффект мелькания.

Очень большое влияние на полноту и достоверность результатов анализа фотоизображения оказывает процесс передачи информации от зрительного рецептора в мозг человека. Она может вестись со скоростью до 50—70 бит/с. При повышении скорости наблюдается пропуск, искажение, задержка в реакции и даже прекращение деятельности [22]. Поэтому в связи с возрастанием объема обрабатываемых фотоснимков особое значение приобретают работы, нацеленные на сокращение предъявляемой человеку информации (путем фильтрации, автоматического дешифрирования и т. д.). Например, в работе [23] предлагается для выявления различий между изображениями производить растровое кодирование путем контактной печати подлежащих сравнению негативов через линейный растр. Затем отпечатки на прозрачной подложке складываются так, чтобы прозрачные промежутки одного отпечатка налагались на промежутки с изображением другого отпечатка (см. рисунок). Поскольку объекты, расположенные на одном негативе, будут иметь полосатую структуру, их легко выделить методом оптической фильтрации.

Очень важным в процессе дешифрирования является объем оперативной памяти, используемой человеком. Это влияет на способность сравнительного (комплексного) дешифрирования и на процесс сравнения анализируемого изображения с эталонным. При этом оператор кодирует изображение, и с течением времени объект оперативной памяти за счет этого увеличивается (телеграфист сначала запоминает точки и тире, а затем постепенно переходит к словам). В этом, видимо, и заключается отличие опытного дешифровщика от начинающего. Однако вопрос о механизмах перекодирования пока остается открытым [1, 22]. Необходимо углубить и расширить исследование процесса зрительного

восприятия фотонизображений, психологических процессов передачи и обработки информации.

В недостаточном объеме ведутся исследования общих оптических характеристик аппаратуры, применяемой для визуального анализа фотонизображений. Нет разработанных методик исследования их частотно-контрастных характеристик и связи последних с эксплуатационными параметрами приборов. Слабо исследованы процесс визуального поиска объекта на фотонизображении и факторы, влияющие на него. Глубокие исследования данного вопроса позволят улучшить параметры аппаратуры, применяемой для анализа фотонизображений, сформулировать научно-обоснованные требования к ней.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рубакин В. Ф. Психологические основы обработки перичной информации. Л.: Наука, 1974. 296 с.
2. Смирнов Л. Е. Теоретические основы и методы географического дешифрирования фотоснимков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. 214 с.
3. Живилкин А. Н., Соколов В. С. Дешифрирование фотографических изображений. М.: Недра, 1980. 253 с.
4. O'Neill H. T., Nagel W. J. — Photogramm. Eng., 1952, vol. 18, N 1; 1952, vol. 18, N 4; 1957, vol. 23, N 1.
5. Photogramm. Eng., 1978, vol. 44, N 11, p. 1348.
6. Photogramm. Eng., 1967, vol. 33, N 7, p. 729.
7. Photogramm. Eng., 1967, vol. 42, N 3, p. 453.
8. Зыкин Я. Л., Чесноев Ю. М., Ахмедов В. В. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки земли. М.: Наука, 1981, с. 5—13.
9. Roberts L. H. — Photogramm. Eng., 1973, vol. 39, N 2, p. 155—161.
10. Биков Р. Е., Измайлов Н. В., Малицкий Н. А. и др. — Техника кино и телевидения, 1979, № 5, с. 50—53.
11. Гулякин В. И., Решетов Е. А. — Геодезия и картография, 1981, № 1, с. 29—32.
12. Ермаков Ю. Г. — В кн.: Применение дистанционных методов при создании те-
13. Гольдман Л. М. — В кн.: Теория и практика дешифрирования снимков. Л.: Наука, 1966, с. 61—66.
14. Крауш К. А. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки земли. М.: Наука, 1981, с. 224—234.
15. Егоров В. В., Арумов Г. П. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки земли. М.: Наука, 1981, с. 235—240.
16. Лабутина Н. А., Фивенский Ю. И. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки земли. М.: Наука, 1981, с. 43—56.
17. Plech K. P., Walker J. E. — Photogramm. Eng., 1974, vol. 40, N 1, p. 87.
18. Кранов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.
19. Skaley J. E., Fisher J. R., Hardy E. L. — Photogramm. Eng., 1977, vol. 43, N 1, p. 45.
20. Весселов В. И., Виноградова К. М., Зыкин Е. В. и др. — Опт.-мех. пром-сть, 1977, № 6, с. 13.
21. Наука и жизнь, 1973, № 11, с. 96.
22. Толмое Б. Ф. Человек и техника. М.: Сов. радио, 1966. 464 с.
23. Pennington K. S., Will A. C., Shelton H. — Opt. Commun., 1970, vol. 1, N 3, p. 113—118.

В. Г. Ильин, Г. О. Баранская, И. В. Рожиков,  
Г. Т. Петровский, М. Н. Полянский

#### ОПТИКА ГРАДАНОВ

Возможность формирования изображения средой с радиально-симметричным распределением показателя преломления была продемонстрирована Р. Вудом в 1899 г. [1]. В дальнейшем Лундбург [2] и Миназали [3—5] теоретически исследовали поведение электромагнитной волны в среде с неоднородным распределением показателя преломления, а в 60-х годах были изготовлены первые цилиндрические элементы из стекла с радиальным параболическим распределением показателя преломления. Эти элементы, способные фокусировать лучи света, и передавать изображение, получили торговое название SELF-FOCUS (Self-focusing) [6]. В отечественной литературе для этих элементов установилось название «граданов» [7].

С введением в оптику нового параметра — градиента показателя преломления — у конструкторов и разработчиков оптических приборов открылись

совершенно новые возможности по созданию приборов, изготовление которых на базе традиционных оптических элементов по тем или иным причинам было невозможно. К настоящему моменту так называемая градиентная оптика, т. е. оптика сред с неоднородным распределением показателя преломления, превратилась в самостоятельный раздел оптики. Без элементов с заданным распределением показателя преломления, способных самостоятельно формировать и транслировать изображение без привлечения дополнительных средств, сегодня уже трудно представить себе линии волоконно-оптической связи (ВОЛС), малогабаритные эндоскопические системы разных типов или настольные копирующие аппараты. Оптические системы последних, состоящие из 1000 и более идентичных по своим параметрам граданов, передают прямое составное изображение в масштабе 1:1.

Жесткость требований к оптическим характеристикам граданов, используемых для передачи изображения, стимулирует решение ряда новых задач в оптическом приборостроении, начиная от технологии изготовления специальных оптических стекол и кончая сборкой готовых изделий.

Целью настоящего обзора является ознакомление широкого круга специалистов в области оптического приборостроения и технологии оптического материаловедения с достижениями градиентной оптики, перспективами ее развития и основными проблемами, от решения которых зависит успешное внедрение в практику систем различных типов на основе граданов.

#### ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИКИ

Области применения изделий градиентной оптики подразделяются на две большие группы.

К первой группе относятся применения, связанные с разработкой и изучением элементов ВОЛС. Под элементами ВОЛС в данном случае подразумевают и градиентные волокна, и согласующие элементы, позволяющие вводить и трансформировать излучение в волокне или обеспечивать необходимое согласование волокон разных типов [8, 9]. Градиентные волокна — это волокна с распределением показателя преломления, близким к параболическому

$$n^2(r) = n_0^2(1 - gr^2), \quad (1)$$

где  $n_0$  — показатель преломления на оси волокна;  $g$  — положительная константа распространения.

Длина используемого отрезка волокна доходит до нескольких километров, а диаметр световедущей жилы составляет 20—100 мкм. В таком волокне свет распространяется практически по синусоидальным траекториям, не достигая стенок волокна. В отличие от волокон со ступенчатым профилем распределения показателя преломления по поперечному сечению в градиентных волокнах скорости распространения всех возбужденных мод практически одинаковы [9]. Изучение закономерностей распространения излучения в градиентном волокне ведется как на языке геометрической и волновой оптики, так и с использованием формализма квантовой механики [10—12].

Второе, не менее важное практическое применение градиентной оптики — использование граданов или систем на их основе для передачи изображения. Выделение этого направления в отдельную группу связано с более жесткими требованиями, которые предъявляются к оптическим характеристикам таких элементов, особенностям метрологии этих характеристик и технологии изготовления самих элементов. В отличие от волокон диаметры таких элементов сравнимы с их длиной. Следуя Муру [13], можно выделить четыре отдельных направления исследований градиентных элементов для передачи изображения.

1. Разработка и анализ качества градиентных систем при передаче изображения. Под этим подразумевают определение абберрационных характеристик передающих изображение граданов и измерение их частотно-контрастных характеристик. Вычисление абберраций ведется как на основании абберрационной теории [14, 15], так и с использованием методики так называемого ray-tracing [16]. Этот подход основан на итерационном расчете траекторий лучей, связанном

с решением неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных [2, с. 26]. Более эффективным метод ray-tracing оказывается при изучении оптических параметров согласующих элементов ВОЛС.

2. Разработка и изучение свойств материалов, из которых изготавливаются передающие изображения граданы. Сегодня к таким материалам относятся оптические стекла и полимеры. Свойства материала должны быть изучены настолько, чтобы при изготовлении градиентных элементов можно было на основании этих данных управлять процессом получения заданного профиля показателя преломления.

3. Метрология градиентных сред. Необходимость решения и сложность этой проблемы очевидны особенно при массовом производстве граданов и использовании одновременно нескольких сот граданов в одном блоке.

4. Проблемы, возникающие в процессе окончательного изготовления конкретных изделий. При этом качество механической обработки должно быть таким, чтобы не возникли дополнительные aberrации.

### ТИПЫ ГРАДИЕНТОВ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

В градиентной оптической среде уравнение эйконала, решение которого позволяет определить симметричные волновые поверхности  $\Phi(x, y, z)$  и ортогональные к этим поверхностям лучи  $r(x, y, z)$ , имеет вид

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2 = n^2(x, y, z)$$

Из этого уравнения выводится соотношение для траекторий световых лучей

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \text{grad} n(x, y, z)$$

Рассмотрим отдельные случаи, анализ которых даст представление о траекториях лучей в среде с отличным от нуля градиентом показателя преломления.

**Сферический градиент.** Наличие сферического градиента означает, что показатель с одинаковыми значениями показателя преломления представляет собой концентрические сферы. Существует два, уже упомянутых выше типа Максвелла. Если среда обладает таким распределением показателя преломления [17]

$$n(r) = \frac{n_0}{1 - (r/a)^2}$$

то все лучи, выходящие из одной точки, движутся по окружностям. Основное свойство «работы глаза» среды состоит в том, что точка отображается в точный перефокусированный инверсия, т. е. точка предмета  $P$  и сопряженная с ней точка  $P'$  движется одной прямой, а для отрезков прямых, проведенных из центра инверсии  $O$  до сопряженных точек, выполняется соотношение

$$OP \cdot OP' = a^2$$

Другой пример — линза Лунбурга [2, 18] с распределением

$$n(r) = n_0 \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$$

Ометим, что в оптическом диапазоне реализация линзы Максвелла и Лунбурга затруднительна, так как необходимо, чтобы значение показателя преломления в центре среды было бы больше двух, а перепад показателя преломления составил величину, близкую к единице. Практическое значение сферического градиента состоит в возможности коррекции aberrаций линз [19].

**Аксиальный градиент.** Более простым с точки зрения экспериментального получения и теоретического рассмотрения является аксиальный (осевой) градиент. В этом случае поверхности с одинаковыми значениями показателя преломления представляют собой плоскости, перпендикулярные к оптической оси системы. Наиболее полно системы с таким градиентом исследованы в работе

Микаэляна [4, 5]. Предложен способ получения аксиального градиента линз с целью исправления aberrаций [19]. Установлено, что существует взаимно однозначное соответствие между величиной градиента и формой сферической поверхности, которая по aberrациям эквивалентна асферической поверхности [13, 16]. При такой замене не возникает дополнительных aberrаций, а остаются только те, которые не были исправлены введением асферической поверхности.

**Радиальный градиент.** При наличии радиального градиента поверхности с одинаковыми значениями показателя преломления представляют собой поверхности коаксиальных цилиндров. Этот тип градиента изучен больше других, так как практически все имеющиеся элементы градиентной оптики обладают именно таким типом градиента. Как уже указывалось, радиальным градиентом обладают цилиндрические волокна, нашедшие применение в линиях дальней оптической связи, согласующие элементы ВОЛС, элементы блоков граданов копировальных аппаратов, оптические элементы жестких эндоскопов и оптические наконечники волоконно-оптических фиброгастрокопов.

Наиболее общий подход к изучению связи распределения показателя преломления и траектории лучей, распространяющихся в среде с заданным распределением показателя преломления, был развит в работах Микаэляна [4, 5]. В более поздних многочисленных работах, посвященных использованию граданов для передачи изображения, специально исследуются вопросы передачи и формирования изображения цилиндрическим граданом с радиальным профилем распределения показателя преломления.

Известно, что для меридиональных лучей, распространяющихся в градиентном цилиндрическом образце, фокусировку и передачу изображения обеспечивает распределение показателя преломления вида

$$n^2(r) = n_0^2 \operatorname{sech}^2 gr \quad (7)$$

Для одного класса косых лучей, а именно винтовых, условие фокусировки в точку выполняется в том случае, если распределение показателя преломления отвечает условию

$$n^2(r) = \frac{n_0^2}{1 + g^2 r^2} \quad (8)$$

В этих выражениях  $n_0$  — показатель преломления на оси градана;  $g$  — положительная константа распространения.

Если представить выражения (7) и (8) в виде бесконечных рядов

$$n^2(r) = n_0^2 (1 - g^2 r^2 + \frac{2}{3} g^4 r^4 - \dots), \quad (9)$$

$$n^2(r) = n_0^2 (1 - g^2 r^2 + g^4 r^4 - \dots), \quad (10)$$

то при  $g \ll 1$  оба распределения могут быть аппроксимированы параболическим приближением (это приближение является параксиальным) для распределения показателя преломления

$$n^2(r) = n_0^2 (1 - g^2 r^2). \quad (11)$$

В этом случае траектория параксиального луча в градане описывается уравнениями Когельника [24]

$$r = r_0 \cos gz + \frac{r'_0}{g} \sin gz, \quad (12)$$

$$r' = -r_0 g \sin gz + r'_0 \cos gz, \quad (13)$$

где  $r_0$  — высота точки входа луча относительно оси градана;  $r'_0$  — тангенс угла наклона луча к оси градана после преломления на входном торце градана.

Тогда постоянная распространения в выражении (11) дается соотношением

$$g = \frac{1}{R} \sqrt{2 \frac{\Delta n}{n_0}},$$

где  $R$  — радиус градана;  $\Delta n = n_0 - n(R)$  — перепад показателя преломления.

На рис. 1 дано изображение в граде — плоской линзе [21].

На рис. 2 дано изображение в граде — плоской линзе [21].

$$S_1 = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (2)$$

На рис. 3 дано изображение в граде — плоской линзе [21].

$$V = \frac{n_2 - 1}{n_2} \left( \cos gd + \frac{n_0 \delta z}{n_1} \sin gd \right)^{-1} \quad (3)$$

$$Q = \frac{n_2 - 1}{n_2} \left( \cos gd + \frac{n_0 \delta z}{n_1} \sin gd \right)^{-2} \quad (4)$$

$$W = \frac{(z - z_0) \cos gd - \frac{n_0 \delta z}{n_1} \sin gd}{(z - z_0) \cos gd - \frac{n_0 \delta z}{n_1} \sin gd} \quad (5)$$

Переднее и заднее фокусные расстояния (передний и задний вершинные фокальные отрезки):

$$S_F = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (6)$$

$$S_{F'} = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (7)$$

Переднее и заднее фокусные расстояния, отсчитываемые от соответствующих главных плоскостей, находятся соответственно из следующих соотношений:

$$f = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (8)$$

$$f' = \frac{n_2 - 1}{n_2} \frac{d}{2g} \quad (9)$$

На рис. 2 представлена зависимость оптической силы линзы и вершинных фокальных отрезков от длины града  $d$ . На рис. 3 показано положение изображения, передаваемого плоскими линзами различной длины, при фиксированном положении предмета.

Наложенное выше приближение для параболического распределения показателя преломления в реальных образцах справедливо лишь в небольшой области вблизи центра образца. Все параксиального приближения получение аналитических выражений, описывающих распространение луча в градиентной среде достаточно сложно, так как связано с вычислением эллиптических интегралов. Существуют методы приближенного вычисления положения луча в пространстве изображений.

Один из методов — уже упоминавшийся нами ray-tracing, основанный на численном итерационном расчете траектории луча в градиентной среде с заданным распределением  $n(r)$ . Расчет траектории ведется последовательно для большого числа плоскостей, расположенных на расстоянии  $\Delta z$  друг от друга. Для каждой плоскости находят расстояние луча от оси, измеренное в данной плоскости, и наклон луча относительно оси в точке с данным  $n(r)$ . Каждый следующий расчет координаты и наклона луча основывается на найденных значениях для предыдущей плоскости.

Более наглядным является подход, основанный на введении понятия постоянной распространения, зависящей от начальных условий входа луча

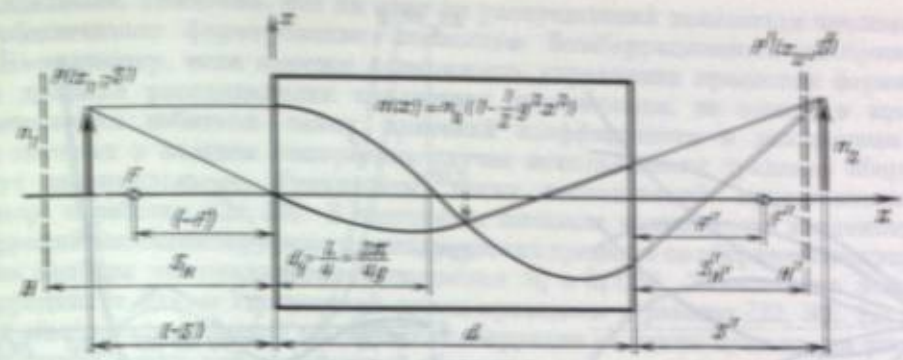


Рис. 1. Построение изображения в граде — плоской линзе [21].  
 $P(x, S)$  — точка объекта;  $P'(x', S')$  — изображение точки  $P$ ;  $n_0$  — показатель преломления в пространстве предметов;  $n_1$  — в пространстве изображений;  $F, F'$  — передний и задний фокусы;  $H, H'$  — главные плоскости

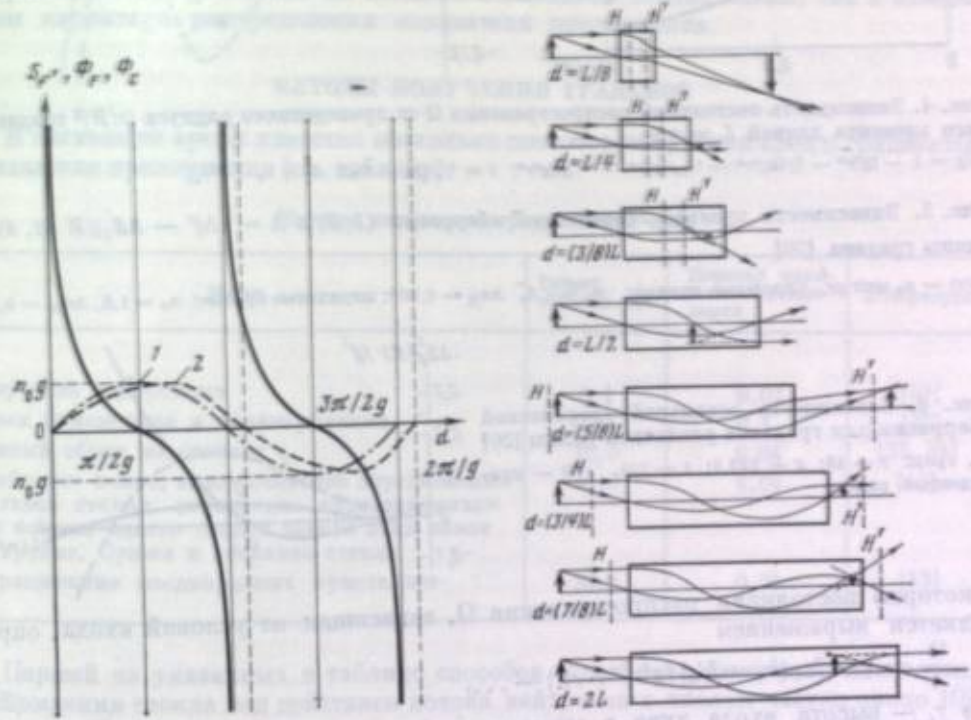


Рис. 2. Зависимость оптической силы линзы  $\Phi_F^{(1)}$  и  $\Phi_C^{(2)}$  для дли вол  $\lambda_F, \lambda_C$  и вершинного фокального отрезка  $S_F'$  от длины града  $d$  [23]

Рис. 3. Положение изображения, передаваемого плоскими линзами различной длины, при фиксированном положении предмета [21]

в граде. Эта постоянная определяется из решения машинным способом неоднородного дифференциального уравнения для траектории луча [2, с. 26] с использованием методов теории возмущений [25, 26]. При этом предполагается, что в реальном граде распределение показателя преломления представлено в виде

$$n^2(r) = n_0^2 (1 - g^2 r^2 + h_4 g^4 r^4 + h_6 g^6 r^6 + \dots) \quad (23)$$

Решение уравнения, определяющего траекторию меридионального луча, записывается в виде

$$r(z) = r_1 \cos \Omega z + \frac{r_1'}{\Omega} \sin \Omega z, \quad (24)$$



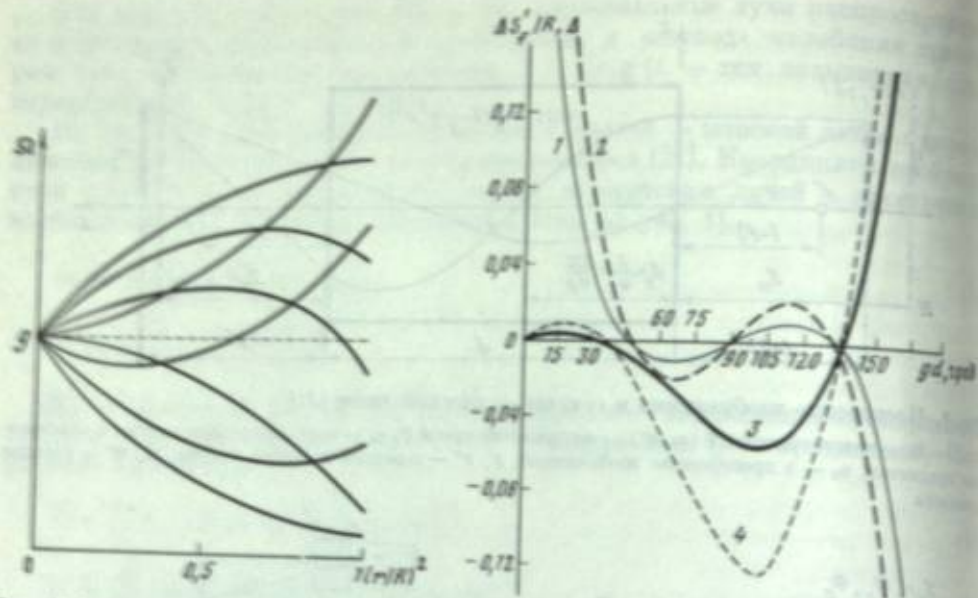


Рис. 4. Зависимость постоянной распространения  $\Omega$  от приведенного радиуса  $(r/R)^2$  градиентного элемента длиной  $L = \pi/g$

$$\Omega/g = 1 - \frac{1}{2}g^2 - \frac{1}{4!}g^4 - \frac{1}{6!}g^6 - \frac{1}{8!}g^8 - \dots; \quad \tau = \frac{1}{2}(h_4 - \frac{1}{2}g); \quad \varphi = h_4 + \frac{1}{2}g$$

Рис. 5. Зависимость краевой сферической aberrации (1, 2) и  $\Delta = (\Delta f' - \Delta S'_p)/R$  (3, 4) от длины градиента [30]

в (1) —  $n_0 \text{ sec } g$ . Сплошные кривые:  $n_0 = 1,6$ ,  $\Delta n_D = 0,006$ ; штриховые кривые:  $n_0 = 1,6$ ,  $\Delta n_D = 0,02$

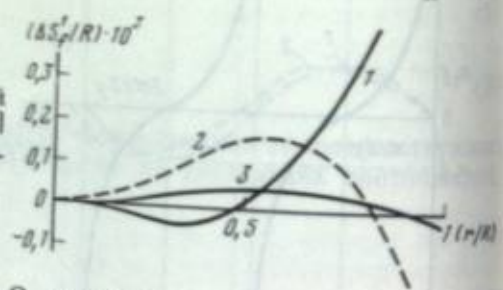


Рис. 6. Зависимость зональной сферической aberrации для градиентов различной длины [30]  $g$ , град: 1 — 46; 2 — 133,9; 3 — 134.  $r/R$  — приведенный радиус

в котором постоянная распространения  $\Omega$ , зависящая от условий входа, определяется выражением

$$\frac{\Omega}{g} = 1 - \frac{1}{4}(h_4 - \frac{1}{2}g)(g^2 r_1^2 + r_1^2) - \dots \quad (25)$$

где  $r_1$  — высота входа луча в градиент;  $r_1'$  — наклон луча после преломления на входном торце градиента [26].

Длина периодичности для непараксиального меридионального луча с данными  $r_1$  и  $r_1'$  определяется из соотношения  $L_p = 2\pi/\Omega$ . Возможные зависимости  $\Omega$  от  $(r/R)^2$  (приведенного радиуса) показаны на рис. 4. Как видно из рисунка, в идеальном градиенте  $\Omega = g$  и постоянна по всему радиусу градиента. Зная начальные условия входа луча в градиент и коэффициенты в разложении (23), можно найти положение сопряженной точки в пространстве изображений [27]. Таким образом, постоянная распространения  $\Omega$  может служить характеристикой качества образца при оценке aberrаций в градиентах.

Как установлено, aberrации градиентных цилиндрических линз полностью определяются коэффициентами  $g$ ,  $h_4$ ,  $h_6$  и т. д. в разложении (23). На основании работ [14, 15] установлено, что aberrации порядка  $m$  градиентной линзы пропорциональны  $(NA)^2 r^m$ , где  $NA$  — числовая апертура,  $r$  — удаление от оси градиента и  $k + j = m$ . При этом aberrации третьего порядка пропорциональны  $h_4$  и не зависят от коэффициентов при более высоких степенях в выражении (23). Aberrации пятого порядка пропорциональны  $h_4^2$  и  $h_6$  и т. д. В работе [28] показана связь aberrаций третьего порядка со значением  $h_4$  в градиенте с длиной, равной половине длины периодичности для разных распределений показателя

преломления. Показано, что ни одно из распределений показателя преломления не обеспечивает формирование полностью безaberrационного изображения.

По-видимому, если имеется возможность управления процессом формирования профиля распределения показателя преломления, то можно в процессе изготовления добиться таких значений коэффициентов в разложении (23), при которых в каждом конкретном случае использования градиентов aberrации будут минимальными. Результаты таких исследований представлены, например, в работах [27, 29]. В частности, показана возможность корректировки aberrаций высоконапертурных цилиндрических градиентов со сферическими торцами путем подбора оптимального соотношения  $h_4$  и  $h_6$  [29]. Зависимости величины aberrаций от длины градиентной линзы приведены в работах [22, 30]. На рис. 5 дана зависимость краевой сферической aberrации от длины градиента, на рис. 6 — зависимость зональной сферической aberrации от длины градиентной линзы [30]. В обоих случаях распределение отвечает идеально фокусирующему и aberrации вызваны лишь преломлением лучей на неоднородном по показателю преломления торце линзы. Эти aberrации можно исправить как созданием сферических поверхностей на входном и выходном торцах линзы, так и изменением характера распределения показателя преломления.

### МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТОВ

В настоящее время известно несколько способов получения сред с градиентом показателя преломления (см. таблицу).

#### Методы получения градиентных сред

Метод	Размер образца, мм	Перепад показателя преломления	Литература
Облучение нейтронами	0,1	0,02	[31]
Обмен мономерами и полимеризация	100	0,1	[32]
Ионный обмен на стеклах	10,0	0,04	[33, 34]
«Набивка» ионов, выщелачивание определенных составов стекол, заполнение образовавшихся пор ионами одного типа и замена этих ионов на другие. Сушка и спекание стекла	50,0	0,04	[13]
Выращивание неоднородных кристаллов	20,0	0,05	[13]

Первый из указанных в таблице способов основан на изменении показателя преломления стекла под действием потока нейтронов с числом частиц около  $10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup>. Метод облучения нейтронами был использован для коррекции линз [31]. Недостатком способа является необходимость использования масок сложной конфигурации и остаточная радиация.

Второй способ основан на обмене мономерами в частично заподимеризованной полимерной матрице и позволяет сравнительно быстро получать градиенты большого диаметра. Указанным способом удалось получить максимальный перепад показателя преломления  $\sim 0,1$  при диаметре образца 5—6 мм [32]. Однако полимерные градиенты имеют заметные хроматические aberrации и двулучепреломление. Разрешающая способность полимерных градиентов составляет около  $100 \text{ мм}^{-1}$ . Кроме того, недостаточно изучен вопрос о влиянии процесса старения полимера на ухудшение и воспроизводимость оптических характеристик.

Перспективным, но достаточно сложным является способ получения градиентных образцов по методу «набивки ионов». В качестве заготовок градиентов используют пористое стекло с размерами пор в несколько сот ангстрем. Пóry заполняют раствором соли и стекло высушивают. При погружении стекла в раствор другой соли в порах происходит обмен катионов. После сушки стекло спекают под вакуумом. В результате такого процесса можно получить стеклянные градиентные элементы, сравнимые по габаритам с компонентами традиционной оптики. Однако в силу заметных технологических трудностей, связанных

как с ограниченностью набора составных стенок, в которых можно получить однородные пары, так и с необходимостью тщательной очистки пар на каждом этапе, метод еще не получил такого широкого распространения, как ионообменная модификация структуры стекла.

Первые и наилучшие качества стеклянные элементы с градиентом показателя преломления были получены методом диэлектрической модификации стекла при ионном обмене между стеклом и расплавом соли. Исходное стекло, содержащее в своем составе катионы (например, одновалентные катионы лития [46]), помещают в расплав соли, содержащий другие катионы (например, одновалентные катионы натрия). На границе раздела стекло—расплав происходит обмен катионов. В результате диффузии возникает градиент концентрации и связанные с ним градиенты физико-диэлектрических свойств, в том числе и градиент показателя преломления. Данный метод обладает высокой воспроизводимостью результатов и позволяет получать стеклянные оптические элементы с разрешающей способностью около  $500 \text{ км}^{-2}$  [29]. Важным преимуществом метода ионообменной модификации стекла для получения градиентов является то, что процесс идет в условиях, близких к термодинамическому равновесию. Это дает возможность описывать его на языке классической термодинамики.

По способу ионного обмена в непрерывном технологическом процессе получают градиентные оптические волокна с практически нулевой дисперсией мод [34], оптические элементы микроскопов и градиентные с идентичными параметрами для блочных градиентных копировальных аппаратов. Однако метод имеет некоторые ограничения. Например, вследствие большого времени диффузии затруднено получение диффузионным зон большой глубины.

Выбор состава стекла, обеспечивающего возможность ионного обмена и одновременно с этим достаточный перепад показателя преломления, возможность получения заданного профиля показателя преломления и отсутствие внутренних напряжений, приводящих к заметному двулучепреломлению, и т. д., представляет достаточно сложную проблему [22, 35, 36]. При этом возникает необходимость учитывать связь распределения показателя преломления с градиентом других свойств. Например, в большинстве случаев считается, что изменение показателя преломления пропорционально изменению концентрации обменивающихся ионов [37], т. е. остается постоянным инкремент показателя преломления. При этом допущении уравнение диффузии Фика решается относительно показателя преломления  $n(r)$  [38]. Коэффициенты в разложении найденного решения по четным степеням  $r$  зависят от приведенного времени диффузии  $A = Dt/R^2$ , где  $D$  — коэффициент взаимодиффузии обменивающихся катионов;  $t$  — время диффузионной обработки;  $R$  — радиус образца. Величину  $A$  выбирают такой, чтобы коэффициенты указанного разложения и соответствующие коэффициенты для распределения типа  $n^2(r) = n_0^2 \text{sech}^2 gr$  были максимальны. Однако измерения коэффициентов  $h_4$  и  $h_6$  показали некорректность такого допущения. Это установлено, кроме того, в ряде других работ [39—41]. Указанные работы подтверждают точку зрения, согласно которой при изготовлении градиентных методами ионообменной модификации структуры стекла [42—44] необходимо учитывать релаксацию структуры стекла.

Несмотря на указанные трудности, метод ионообменной модификации стекла в настоящее время является единственно пригодным методом получения в промышленном масштабе надежно работающих элементов градиентной оптики с высоким разрешением и качеством передачи изображения.

## МЕТРОЛОГИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕД

Для конструирования оптических систем с использованием градиентов очевидно, необходимо знать их основные параметры. В первую очередь это распределение показателя преломления, при измерении которого, как показывает опыт, часто бывает достаточно знать распределение показателя преломления с точностью до коэффициентов  $h_4$  и  $h_6$ . Существует несколько методов измерения этого параметра. Их можно разделить на интерференционные и неинтерференционные. Наибольшей точностью, наглядностью и воспроизводимостью обладают интерференционные методы. Методика измерения относительных распределений

показателя преломления по методу тонкого среза с использованием двухлучевого интерферометра Маха—Цендера описана в работе [22].

Однако при исследовании процесса формирования градиента показателя преломления и при практических расчетах необходимо знание абсолютных значений показателя преломления по радиусу градиента. Для абсолютных измерений распределения показателя преломления описанную методику модифицируют следующим образом [45, 46]. В кювету с иммерсионной жидкостью вместе с образцом помещают эталон в виде плоскопараллельной стеклянной пластинки, показатель преломления которой известен с точностью до  $10^{-5}$ . Один из краев и образца и эталона сошлифован на нет, и этими краями эталон и образец обращены в кювете друг к другу. На рис. 7 показан ход интерференционных полос, наблюдаемый на выходе интерферометра. По сдвигу полосы на границах эталон—иммерсия и образец—эталон находят разницу между показателями преломления выбранной точки образца и эталона, а затем и значение показателя преломления в любой точке образца.

Описанные методы достаточно удобны и обеспечивают точность измерения относительных и абсолютных распределений показателя преломления в передающих изображения градиентах порядка  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Точность измерения распределений показателя преломления по методу интерферометрии тонких срезов может быть повышена при фотоэлектрической регистрации интерферограмм полированных плоскопараллельных срезов и их обработке с помощью ЭВМ [47].

При увеличении толщины образца из-за искривления лучей в нем возрастает ошибка в определении места локализации полос. Относительная погрешность определения  $\Delta n(r)$  из-за искривления лучей зависит от толщины среза и определяется из соотношения [22]

$$\delta(\Delta n)/\Delta n = \text{sinc } 2gd - 1. \quad (26)$$

При допустимой погрешности в 1% наибольшая толщина образца составит  $d = (0,25 R/2) \sqrt{n_0/2\Delta n}$ , где  $n_0$  — показатель преломления на оси образца;  $R$  — радиус образца.

Существуют более точные методы, позволяющие измерять распределение показателя преломления с точностью до  $h_4$  и  $h_6$  [48] и оценивать искажения волнового фронта на выходе градиента. Схема одного из экспериментов [48] показана на рис. 8. Используют образец, длина которого в точности равна половине длины периодичности параксиального луча. При наличии отклонений распределения показателя преломления от выражения (7) вокруг равномерно освещенного пятна в центре интерференционной картины наблюдается система концентрических колец. Расчет на ЭВМ изменения фазы луча при прохождении его через градиент с распределением показателя преломления типа (23) позволил авторам работы [48] определить значение коэффициента  $h_4$  и  $h_6$ .

Следует заметить, что этот метод требует точного равенства длины образца половине длины периодичности, а также необходимо знать, как влияет непараллельность торцов градиента на точность измерений.

Нами используется метод, в котором образец с длиной, кратной примерно половине длины периодичности, помещают в кювету с иммерсионной жидкостью, находящуюся в одном плече интерферометра Маха—Цендера. Идея метода основана на следующих соображениях. Рассмотрим картину распространения плоского волнового фронта через идеальный градиент и сравним ее с аналогичной картиной для реального градиента (рис. 9, а). Если длина идеального градиента в точности равна половине длины периодичности, то плоский фронт пройдет градиент, не искажившись (см. рис. 9, а, 2). При большей длине градиента фронт будет сходящимся (рис. 9, а, 1), при меньшей — расходящимся (см. рис. 9, а, 3).

В реальном градиенте картина будет выглядеть сложнее. Для анализа используют понятие постоянной распространения волновые фронты. При образовании реальных градиентом плоские фронты и плоским опорным фронтом интерференционной картины между таким фронтом и плоским опорным фронтом в местах, соответствующих окрестностям участков плоских фронтов на выходе градиента (рис. 9, б, 2), на интерферограмме (рис. 10) будут возникать характерные точки (I) изгиба полос. Изменение длины градиента на небольшую

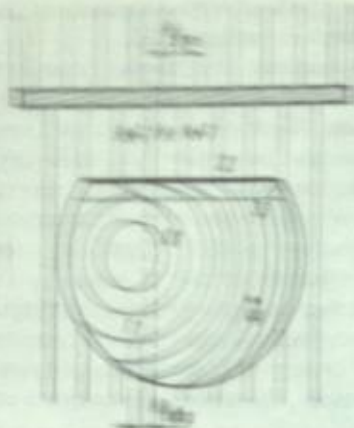


Рис. 7. Вид интерференционных линий в методе абсолютного измерения показателя преломления [46, 47]

1 — исследуемый тонкий образец;  
2 — граница образца и измеритель;  
3, 4 — точки одинаковых значений показателя преломления образца и измерителя

Рис. 8. Схема измерений распределения показателя преломления по методу Рубина и Миллера [48]

Рис. 9. Распространение плоского волнового фронта через идеальный градиан с длиной, близкой к  $\pi/g$  (а), и реальный градиан с длиной, близкой к  $\pi/g$  (б)

а — окрестность точек выхода, параллельных оси градиан лучей

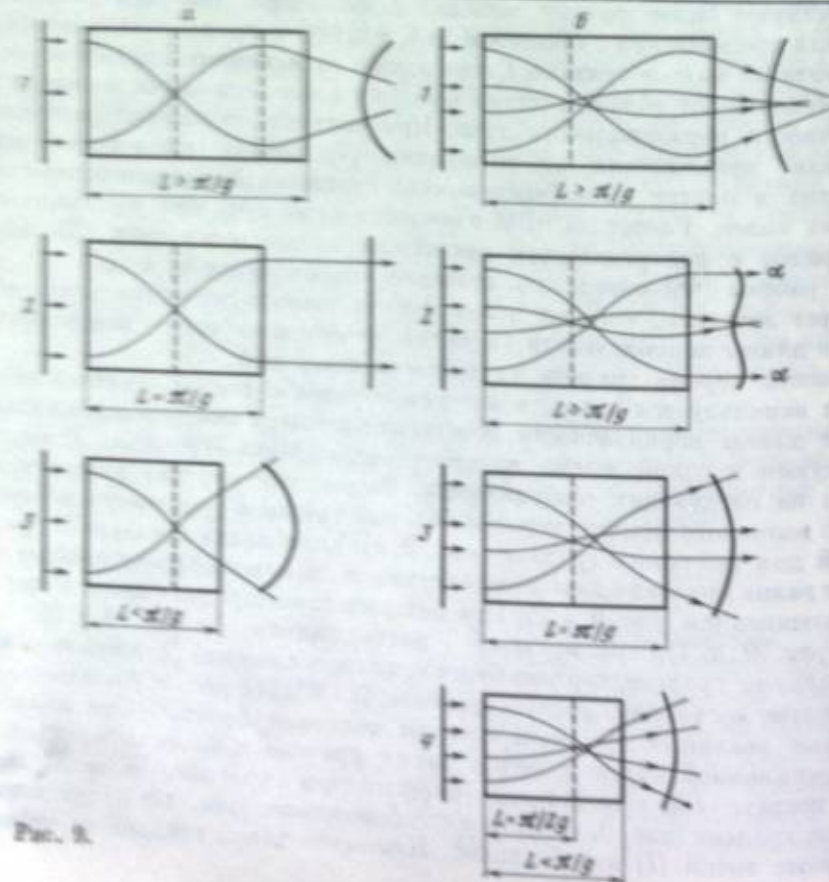
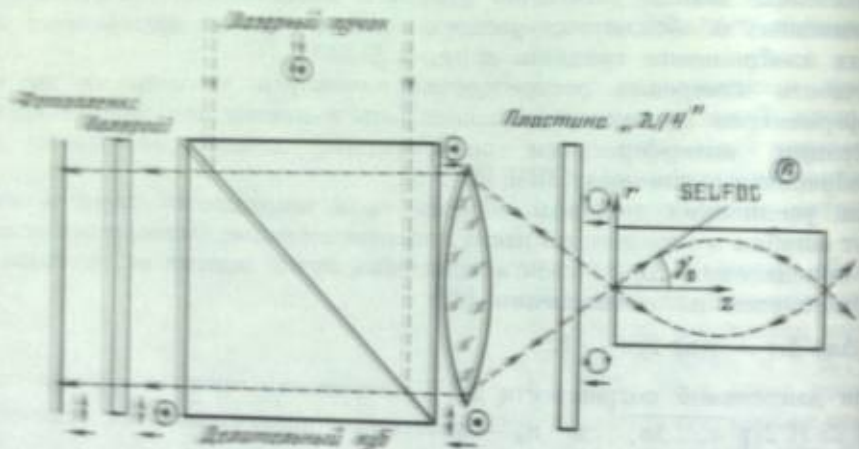
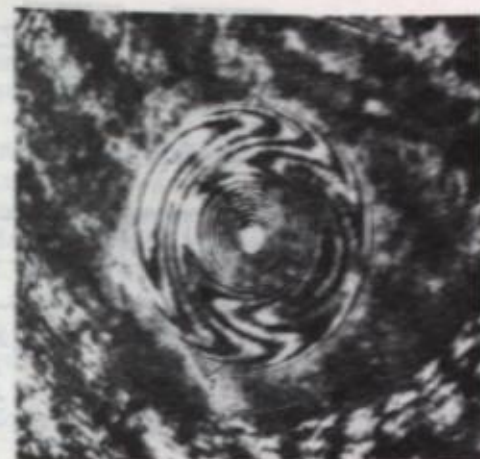


Рис. 9.

Рис. 10. Интерферограмма реального градиана с длиной, близкой к  $\pi/g$

1 — характерные точки метода анализа [волновых aberrаций]



величину (50—150 мкм) приводит к изменению расположения характерных точек. Используя выражение для постоянной распространения  $\Omega$  [26] и ее взаимосвязь с длиной градиана при наличии лучей, входящих и выходящих из градиана параллельно оптической оси, можно получить следующие соотношения между координатами характерных точек и коэффициентами  $g$ ,  $h_4$  и  $h_6$  в распределении показателя преломления (23):

$$\xi = \frac{r_1^2 (r_2^2 - r_1^2) (\Omega_2 r_2^4 - \Omega_1 r_1^4) - r_2^2 (r_2^2 - r_1^2) (\Omega_1 r_1^4 - \Omega_2 r_2^4)}{r_2^2 (r_2^2 - r_1^2) (r_2^2 - r_1^2) (r_2^2 - r_1^2)}, \quad (27)$$

$$t = \frac{1}{\varepsilon^2 r_1^2 r_2^2} \left[ \frac{\Omega_2 r_2^4 - \Omega_1 r_1^4}{(r_2^2 - r_1^2) \varepsilon} \right] + \frac{r_1^2 + r_2^2}{\varepsilon^2 r_1^2 r_2^2}, \quad (28)$$

$$\varphi = \frac{16}{15 \varepsilon^4 r_1^4} \left[ 1 - \frac{\Omega_1}{\varepsilon} - t g^2 r_1^2 - \frac{7}{4} t g^4 r_1^4 - \frac{7}{12} t^2 g^4 r_1^4 \right], \quad (29)$$

где  $t = 3/4 (h_4 - 3/2g)$ ;  $\varphi = h_6 + 17/4g$ .

Предложенная методика позволила выявить зависимость постоянной распространения  $\Omega$  и коэффициентов  $g$ ,  $h_4$  и  $h_6$  от времени диффузии.

К интерференционным методам измерения распределения показателя преломления относятся также методы интерферометрии образца в направлении, перпендикулярном его оптической оси [49, 50].

Ряд методов основан на характерных оптических свойствах градианов: метод «насыщения» луча [51], метод, использующий «срыв» в распределении интенсивности излучения в дальнем поле [52]. Эти методы довольно трудоемки и требуют большого объема вычислений с использованием ЭВМ. Кроме того, они не позволили авторам измерить значение коэффициента  $h_6$  в распределении показателя преломления (23).

В данном разделе мы остановились на измерении только одной характеристики градиентных элементов. Однако понятно, что необходимы также измерения градиентов или распределений других параметров передающих изображение градианов. Особенно актуальным становятся вопросы метрологии градиентов всех свойств градианов при их массовом производстве.

### ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИКИ

В настоящее время градиентные элементы уже нашли применение в ряде областей техники и медицины. Уже упоминалось об использовании градианов в линиях волоконно-оптической связи [8] (рис. 11). Остановимся на нескольких примерах серийных и перспективных изделий.

На рис. 12 показан оптический элемент тонкого жесткого эндоскопа «Mini-boroscope» фирмы «Olympus». Оптический элемент эндоскопа и прямого зрения с боковым зрением состоит из двух частей: длинного градиана и короткофокусного элемента с высокой апертурой. Короткофокусный элемент с большой глубиной резкости формирует вблизи входного торца длинного градиана изображение просматриваемой зоны. Диаметр этого элемента составляет 1,5 мм, числовая апертура — более 0,3, длина не более 5 мм. Длинный градиан, транслирующий это изображение, имеет диаметр ~1 мм, длину 170 мм. На длине транслирующей это изображение, имеет диаметр ~1 мм, длину 170 мм. На длине транслирующего градиана укладывается примерно 4—6 внутренних изображающих элементов. На выходе эндоскопа расположен окуляр, позволяющий вести визуальный.

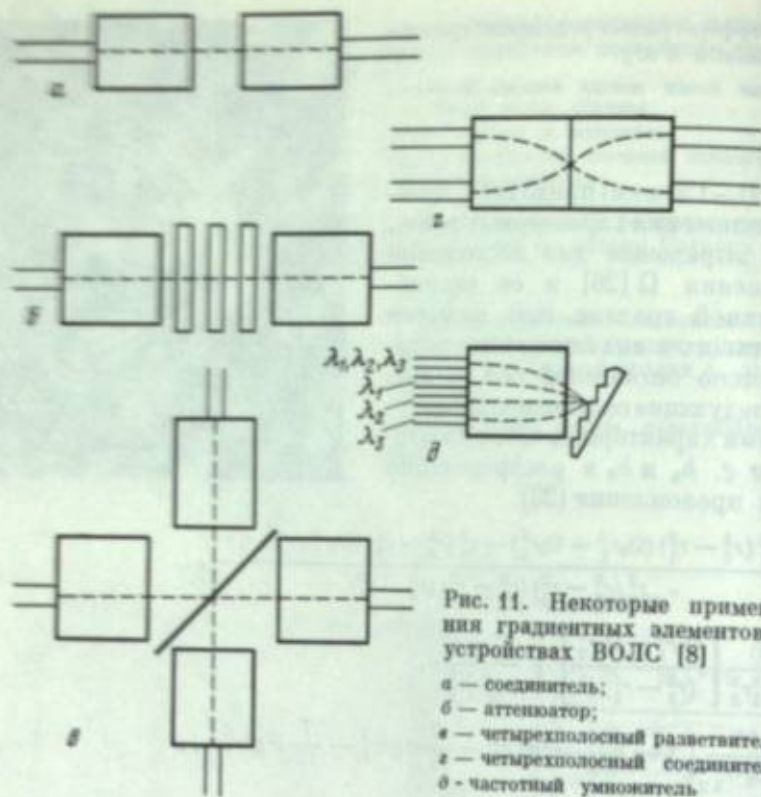


Рис. 11. Некоторые применения градиентных элементов в устройствах ВОЛС [8]

- а — соединитель;
- б — аттенуатор;
- в — четырехполосный разветвитель;
- г — четырехполосный соединитель;
- д — частотный умножитель.

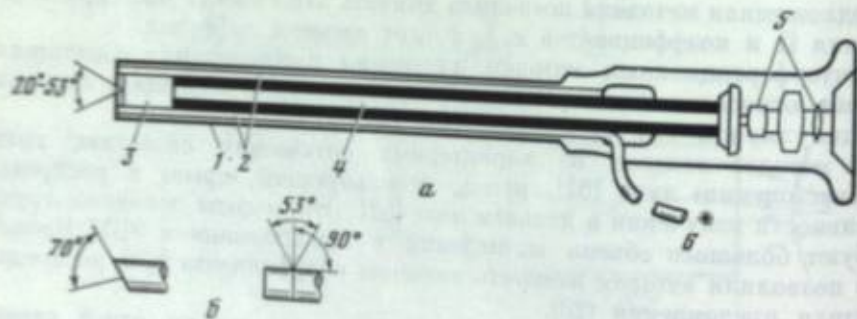
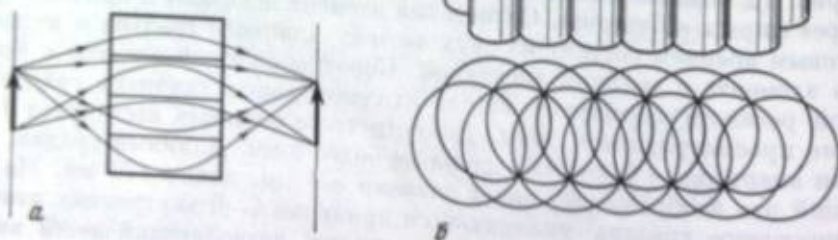


Рис. 12. Оптический элемент жесткого эндоскопа фирмы «Olympus»  
 а — эндоскоп прямого зрения; б — наконечник элементов бокового зрения. 1 — металлический корпус; 2 — волновоподсветка; 3 — высокоапертурный градиент; 4 — длинный градиент; 5 — окуляр; 6 — источник света для подсветки зоны просмотра

Рис. 13. Схема передачи изображения блоком градианов  
 а — получение составного изображения однородным блоком;  
 б — зоны перекрытия двухрядного блока



ное наблюдение или фотографирование. Общая длина жесткого эндоскопа не более 250 мм, диаметр вместе со жгутом подсветки 1,7 мм. Разрешающая способность не хуже  $60 \text{ мм}^{-1}$ . Эндоскоп предназначен для дефектоскопии изделий сквозь узкие каналы.

Граданы все более широко используются в малогабаритных копирующих аппаратах [53, 54]. Блок гексагонально уложенных градианов (рис. 13) определенной длины обладает уникальным свойством, не отмеченным ни в одной традиционной оптической системе: блок передает действительное прямое составное изображение в масштабе 1 : 1.

Жесткость требований к оптическим параметрам отдельных градианов, составляющих блок, значительно возрастает. Как видно из рисунка, поля единичных изображений существенно перекрываются, что необходимо для получения однородной освещенности составного изображения. И если в обычных оптических системах иногда можно пренебречь aberrациями, не приводящими

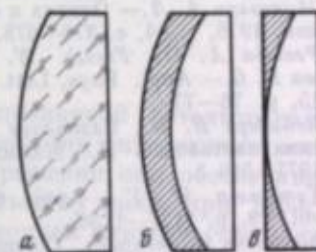


Рис. 14. Макроскопические оптические элементы со сферическим градиентом показателя преломления [19]

- а — исходная линза;
- б — линза с градиентом, заштрихована зона с измененным показателем преломления;
- в — окончательное изделие

к ухудшению резкости изображения, например дисторсией, то в блоке это совершенно неприемлемо из-за наложения изображений. Основными преимуществами, отличающими работу блока как объектива, являются одинаковая разрешающая способность по всему полю изображения, постоянный контраст по всему полю, малое рабочее расстояние, небольшие габариты. Длина элементов блока 30 мм, в блок входит 600 гексагонально уложенных градианов диаметром 1 мм с рабочим расстоянием 17 мм. На частоте  $10 \text{ мм}^{-1}$  контраст составляет 0,4 [53].

Наконец, граданы используются в качестве фокусирующих элементов лазерных систем видеозаписи [29]. При применении градана с высоким разрешением пятно, формируемое и считываемое граданом, составляет 0,6 мкм.

Большой практический интерес представляет использование градиента показателя преломления в традиционных оптических системах. Уже упоминавшийся патент Хамблена [19] дает пример такого использования. На рис. 14 показана последовательность получения линзы со сферическим градиентом показателя преломления. Обычная линза (см. рис. 14, а) подвергается обработке, например так, что градиент показателя преломления в диффузионной зоне (см. рис. 14, б). При этом значение показателя преломления в исходной зоне может быть как меньше, так и больше показателя преломления исходного материала линзы. Сферическая поверхность может быть сошлифована, как показано на рис. 14, в.

Развитие этих идей можно найти, например, в работах [55, 56], где рассмотрены градиентные плоскопараллельные пластины, предназначенные для коррекции aberrаций, аналогичные пластинам Шмидта.

Перечисленные примеры показывают возможности градиентной оптики при использовании только градиента показателя преломления. Совершенно не исследованы вопросы практического использования градиентов других свойств, например дисперсии и двулучепреломления. В работе [57] приводятся данные о спектральной зависимости фокусного расстояния градана, полученного методом ионного обмена  $\text{Ti}_{\text{ст}}^+ \rightleftharpoons \text{K}_{\text{расп}}^+$ . Наличие градиента дисперсии отмечается как недостаток. Однако специальное создание градиента дисперсии, по большей, чем указано в работе [57], величины может, вероятно, найти полезное практическое применение в оптическом приборостроении. Это же в полной мере относится и к градиенту двулучепреломления.



позиции на отдельной пластине. Если первый приводит просто к удорожанию фотолитографии, так как усложняется подбор экспозиции, то второй непосредственно определяет достижимые точности. К сожалению, эта важнейшая характеристика фотолитографического процесса в настоящее время не измеряется. Косвенные оценки величины  $\Delta H/H$  дают на одной пластине значение  $\sim 10-30\%$ .

Вторым параметром в фотолитографии является распределение интенсивности в изображении передаваемых элементов. Рис. 2, а иллюстрирует сказанное. Величина  $\Delta I$  — возможный уход размеров за счет нестабильности пороговой экспозиции при заданном распределении интенсивности в изображении, который определяется крутизной распределения интенсивности в изображении передаваемого элемента. Измерения уходов размеров элементов тестового рисунка позволяют оценить суммарное качество фотолитографического процесса. Эти измерения проводят на специальных измерительных микроскопах с точностью  $\sim 0,05-0,1$  мкм.

Такое простое описание фотолитографического процесса, определяемого двумя основными параметрами — разбросом пороговой экспозиции и распределением интенсивности в изображении, позволяет сделать несколько интересных выводов.

1. Для фотолитографии допускаются оптические системы, формирующие изображение элемента в виде «элемент на пьедестале» (рис. 2, б), т. е. допустим сравнительно сильный фон в изображении, и чем выше уровень технологии, тем больший фон допускается. Этот факт хорошо известен; так называемая «фотолитография с зазором» как раз характеризуется очень сложным распределением интенсивности и наличием «пьедестала».

2. Фотолитографический процесс позволяет получать элементы с размерами порядка дифракционного предела для используемой оптики, причем допустимы даже остаточные aberrации (рис. 2, в). Главным условием работы такой системы на практике является ее изопланатизм и высокий уровень фотолитографической технологии, определяющий минимальное значение  $\Delta H_0$ .

3. Крутизна распределения интенсивности в изображении элемента является фактором, позволяющим нивелировать многие погрешности оборудования и технологии (неравномерность освещенности, неравномерность свойств фоторезиста и т. п.).

Рассмотрим подробнее распределение интенсивности в изображении.

Как упоминалось, объективы для фотолитографии должны обеспечивать качество изображения, близкое к дифракционно ограниченному. Обычно их характеризуют значением максимальной волновой aberrации ( $0,1-0,2 \lambda$ ) для всех точек поля. Кроме того, для некоторых точек поля вычисляют частотно-контрастную характеристику (ЧКХ). До определенного уровня фотолитография такой подход оказался достаточным. Системы обеспечивали передачу элементов с размерами  $(2-3) \delta$  при точностях до 1 мкм. Однако при повышении требований к точности фотолитографии подобных критериев качества объектива, на наш взгляд, недостаточно.

ЧКХ не является информативной величиной, поскольку соответствует практически ЧКХ идеальной системы. Отклонения в несколько процентов для отдельных пространственных частот не позволяют эффективно различать системы. Гораздо показательнее характеризовать объективы при расчетах зависимостью какого-либо точечного критерия качества (критерий Штреля, Маршалла, средний кружок рассеяния и т. п.) по рабочему полю. Подобные характеристики позволяют сравнивать объективы между собой, судить об изопланатизме и, возможно, помогут несколько улучшить их параметры. В целом можно констатировать, что дальнейшее улучшение параметров фотолитографии слабо связано с улучшением aberrационных характеристик объективов, которые и так близки к идеальным.

Некоторые резервы улучшения распределения интенсивности изображения элементов и, как следствие, увеличение точностей фотолитографии связаны с учетом осветительной части проекционных систем. К этому выводу приводит практика выявления слабых мест технологии по результатам измерения уходов размеров тест-объекта. Для того чтобы уметь отнести эти уходы либо за счет

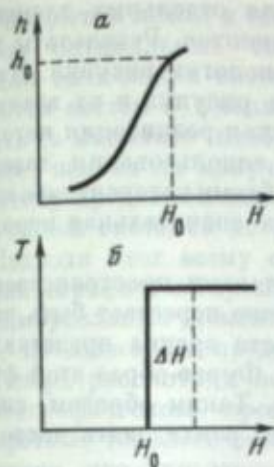


Рис. 1. Светочувствительные характеристики фоторезиста (а) и системы фоторезист—маскирующее покрытие (б)  
 $h$  — толщина слоя проявленного фоторезиста;  $H$  — экспозиция;  $T$  — пропускание маскирующего покрытия

Рис. 2. Распределение интенсивности в изображении  
 $I$  — интенсивность света в изображении;  
 $l$  — ширина линии;  $\Delta l$  — возможный уход размеров

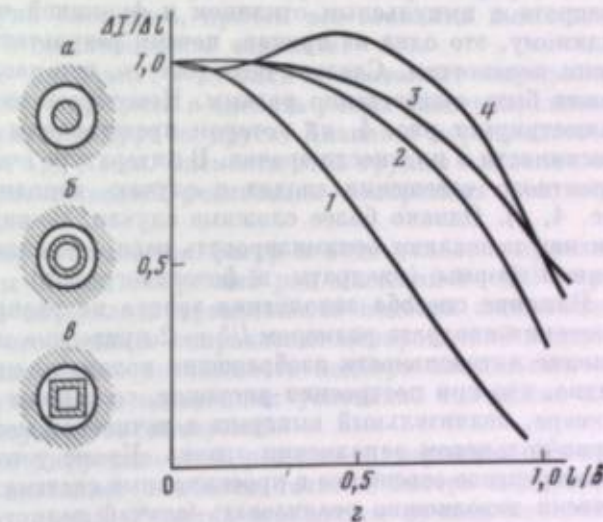
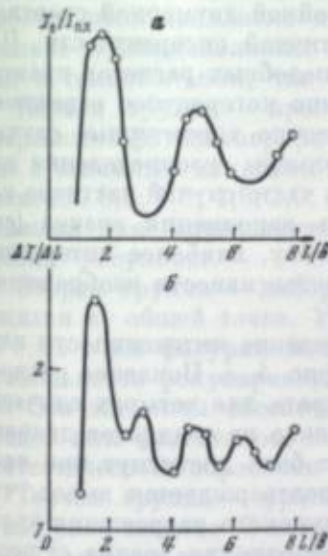
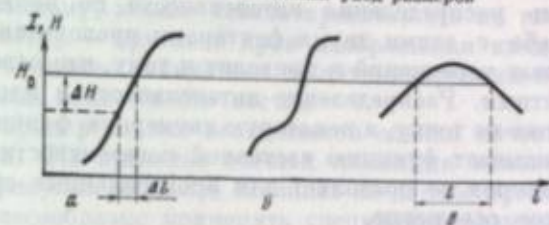


Рис. 3. Резонансные эффекты при когерентном освещении

Рис. 4. Распределение интенсивности в плоскости аэрача (а — а) и в изображении квадрата ( $l/\delta = 2$ ) (б)

а — а — заполнение аэрача при частично когерентном освещении; б — когерентное освещение; в — полное заполнение аэрача; г — некогерентное освещение; д — контурно-кольцевое заполнение аэрача

оптики, либо за счет технологии, надо знать, что можно ожидать от идеальных оптических систем при построении изображений типичных для фотолитографии элементов. Расчет распределения интенсивности в изображении элемента квадратной формы идеальной системой для когерентного и некогерентного случаев освещения сравнительно прост и сводится к вычислению интеграла типа двумерной свертки [2].

При когерентном освещении имеет место довольно сложное распределение интенсивности, существенно определяемое соотношением размера элемента и разрешения объектива ( $l/\delta$ ). На рис. 3, а приведена зависимость интенсивности разрешения объектива ( $l/\delta$ ). На рис. 3, б приведена зависимость интенсивности  $I/I_{пл}$  в центре изображения квадрата от его размеров. Подобным образом величина  $I/I_{пл}$  в центре изображения квадрата от его размеров. Подобным образом величина  $I/I_{пл}$  в центре изображения квадрата от его размеров. Подобным образом величина  $I/I_{пл}$  в центре изображения квадрата от его размеров.

Казалось бы, этот факт можно учитывать при построении рисунка, выбирая размеры элементов. Однако здесь возникает несколько сложностей. Во-пер-

ма, кроме расчета распределения интенсивности для отдельных элементов, возможен расчет влияния близко расположенных элементов. Результаты этих расчетов должны учитываться при проектировании топологии рисунка. Должны быть приняты рекомендации по размерам элементов рисунка и их взаимному расположению. Во-вторых, что гораздо важнее, практическая реализация когерентного освещения (и, за неимением, немислима без использования лазера, высокой временной когерентности которых создает проблему когерентного шума в изображении). Кроме того, для лазеров характерна значительная неравномерность распределения интенсивности по полю.

Борьба с этими двумя факторами проводится методами пространственно-временных усреднений и приводит к тому, что освещение перестает быть чисто когерентным. Распределение интенсивности в плоскости зрачка представляет собой уже не точку, а некоторую двумерную функцию. Фурье-образ этой функции описывает функцию частичной когерентности [3]. Таким образом, специфика лазера не позволяет для промышленных систем реализовать чисто когерентное освещение.

При частично когерентном освещении, которое имеет место при всех усреднениях, значительно усложняется расчет интенсивностей в изображении. Такое распределение интенсивности описывается двойной двумерной сверткой квадрата с импульсным откликом и функцией частичной когерентности. По-видимому, это одна из причин, почему результаты подобных расчетов практически неизвестны. Следует подчеркнуть, что частично когерентное освещение может быть существенно разным. Некоторые достаточно характерные случаи иллюстрирует рис. 4, на котором представлены примеры распределения интенсивности в плоскости зрачка. В литературе очень часто случай частично когерентного освещения сводят к случаю неполного заполнения зрачка (см. рис. 4, а). Однако более сложные случаи, по-видимому, наиболее интересны, так как позволяют оптимизировать распределение интенсивности изображения данной формы (квадраты в фотолитографии).

Влияние способа заполнения зрачка на распределение интенсивности изображения квадрата размером  $l/\delta = 2$  приведено на рис. 4, г. Показано распределение интенсивности изображения половины квадрата для четырех случаев. Видно, что при построении рисунков, состоящих только из квадратов данного размера, значительный выигрыш в точностях может быть достигнут при контурно-кольцевом заполнении зрачка. Кроме того, подтверждается вывод, что некогерентное освещение в проекционных системах высокого разрешения практически невозможно реализовать (случай полного заполнения зрачка существенно отличен от случая некогерентного освещения). Приведенные результаты являются предварительными; только полные расчеты могут показать, позволяет ли сложное заполнение зрачка повысить точность фотолитографии.

Другой путь улучшения распределения интенсивности в изображении, в некотором смысле подобный рассмотренному, может быть связан с применением аподизации. Целесообразность рассмотрения этого случая диктуется, на наш взгляд, уже упомянутой допустимостью значительного фона для фотолитографических оптических систем. Аподизация даже в простейших вариантах позволяет сузить центральный лепесток функции рассеяния за счет боковых. По-видимому, целесообразен поиск аподизирующих функций (желательно фазовых), оптимизирующих изображение квадрата при допустимом фоне. На предварительной стадии расчет проще, чем при частично когерентном освещении. Однако в конечном счете все сводится к расчету того же частично когерентного случая с импульсным откликом, определяемым аподизирующей функцией.

И наконец, есть еще один параметр, влияющий на распределение интенсивности в изображении, который ранее игнорировали. Распределение поля (и интенсивности) в самом объекте, изображение которого мы строим (или рассчитываем), не может иметь резкие границы. Резкие границы есть результат искажения квадратным и круглым отверстиями известны для маскирующих покрытий с идеальной проводимостью [4]. Распределение оказывается не резким, а плавным, с переходной областью  $0,2-0,5 \lambda$ . По-видимому, эта величина для реаль-

ных покрытий лежит в таких же пределах, и, возможно, допускает оптимизацию (выбор оптимальных оптических характеристик маскирующих покрытий).

Для оптических систем с  $M1:1$  это может оказаться существенным. Что касается систем с уменьшением  $10:1$  и больше, то этот факт можно игнорировать (в масштабе изображения нерезкость края  $\sim 0,02 \lambda$ ), однако возникает вопрос, нельзя ли получить изображение в виде квадрата, задавая на входе в систему предварительно искаженный квадрат, причем детали этих искажений оптической системой не разрешаются.

Подводя итог всему сказанному, можно констатировать, что по главному фотолитографическому параметру — крутизне края изображения квадратных и прямоугольных элементов — оптические системы не оптимизированы и, более того, не выяснены предельные возможности систем.

Теперь рассмотрим некоторые реальные возможности оценки качества фотолитографического процесса. На практике имеется тенденция использовать конкретные топологические рисунки наиболее сложных на данное время схем. Очевидно, что для этого целесообразно применять специализированные тест-объекты (миры), позволяющие получить максимум информации о системе. Мира состоит из повторяющихся ячеек. В  $M1:1$  размер ячейки  $0,6 \times 0,6$  мм. Рабочее поле заполнено ячейками равномерно. Рисунок миры содержит несколько функциональных групп элементов, причем все элементы выполнены как в темнопольном, так и в светлопольном варианте.

Первая группа — простые квадраты и штрихи — позволяет определить разрешение фотолитографического процесса и оценить уходы размеров, связанные с взаимным влиянием элементов друг на друга. Диапазон перекрываемых размеров 0,8; 1,0; 1,6; 2,0; 3,0; 4,5; 8 мкм. Элементы этой группы являются основными для определения возможностей реализации конкретных топологических рисунков.

Вторая группа — набор пересекающихся фигур в виде углов, соприкасающихся в общей точке. Углы имеют дискретный ряд значений  $0-180^\circ$  через  $15^\circ$ . По этим фигурам можно определять правильность подбора экспозиции, правильность фокусировки и необходимое направление юстировочной подвижки. Эти элементы обеспечивают также возможность подбора нескольких образцов или фрагментов, полученных в идентичных условиях, что важно для статистической обработки результатов измерений.

Третья группа — фрагмент дифракционной решетки с периодом 12 мкм и шириной штриха 3 мкм — позволяет наиболее точно и быстро определить уход размеров трехмикронных линий. Решетка освещается пучком когерентного света и измеряется соотношением интенсивностей в первом и втором порядках спектра. Преимущество решетки заключается в том, что при этом сразу оценивается средний по решетке размер и, кроме того, с очень высокой точностью ( $\sim 0,05$  мкм). Чтобы исключить влияние света от других элементов миры, решетку ориентируют под углом  $45^\circ$  к направлению их сторон.

Четвертая группа — набор элементов и линий 2—3 мкм, расположенных вблизи светлого поля, — позволяет оценить влияние света, рассеиваемого в слое фоторезиста, или возникающую при этом люминесценцию.

Измерение фотолитографического рисунка миры позволяет непосредственно оценить пригодность фотолитографического процесса и его точность, а статистическая обработка результатов многочисленных измерений — разделить влияние технологических факторов и оптической системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматин А. П., Ларина Р. М., Горбунов В. А. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1976, № 11, с. 60—63.
2. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. М.: Наука, 1973. 719 с.
3. Марешаль А., Франсон М. *Структура оптического изображения*. М.: Мир, 1964. 295 с.
4. Вайнштейн Л. А. *Электромагнитные волны*. М.: Сов. радио, 1957. 581 с.

#### ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ

В настоящей работе нас будет интересовать не обработка изображений вообще, а лишь та, которая необходима для распознавания изображения или его части. Изменение изображения во времени зачастую предоставляет информацию, значительно облегчающую (а иногда и единственно позволяющую) распознать объект. Наиболее яркий пример — наблюдение изображений движущихся точек, соответствующих основным суставам человека, — позволяет отличить человека от других движущихся объектов, опознать характер движения, пол и т. д. [1]. Некоторые пороки сердца распознаются по наблюдаемому на рентгенограмме изменению временной картины распространения возбуждения по мышечной ткани желудочка [2]. Во многих случаях представляется важным обнаружить перемещение или появление (исчезновение) определенного объекта на изображении.

Обработка любого изображения — задача весьма трудная из-за огромной информационной емкости изображения. Обработка изменяющегося изображения должна быть выполнена за время, характерное для изменения изображения (в реальном масштабе времени), что предъявляет очень высокие требования к быстродействию соответствующего процессора. Программная реализация методов обработки изображений на ЭВМ общего назначения позволяет в лучшем случае лишь моделировать обработку изменяющихся изображений [3, 4]. В то же время почти очевидно, что создание процессора изображений, работающего на иных, чем универсальная ЭВМ, принципах, требует по крайней мере некоторого понимания последовательности обработки изображений, воспринимаемых животными и человеком, тем более что практически все эти изображения — изменяющиеся во времени [5, 6].

Животные и человек имеют двухуровневую систему обработки изображений. Первичная обработка ведется на уровне глаза. На этом уровне происходит сглаживание изображения, выделение контуров, детектирование изменения изображения [5, 6]. Далее по зрительному нерву, число проводящих путей в котором много меньше числа рецепторов глаза, информация об изображении передается в мозг, который завершает обработку. Результатом является решение о действии, которое в простейшем случае может быть описано словами «да» или «нет». Таким образом, мозг производит дальнейшее резкое сжатие информации, содержащейся в изображении, используя при этом опыт, который можно представить в виде модели объекта, чье изображение наблюдается и анализируется. Промежуточные результаты такой модельной обработки управляют «настройкой» предварительной системы зрительной обработки (фокусировка хрусталика, размер зрачка, скорость и частота движений глаза).

Анализ архитектуры зрительной системы животных и человека показывает, что на начальных этапах обработки изображения количество обрабатываемой информации велико, однако алгоритмы, описывающие ее обработку, имеют вычислительную сложность не выше  $O(n \lg n)$  операций, где  $n$  — число элементов разложения изображений (рецепторов или т. п.), а, как правило, еще проще (упомянутые ранее операции имеют сложность  $O(n)$  [5]). Модельные используемые на этом уровне алгоритмы, по-видимому, значительно более сложны — моделирование соответствующих процессов на ЭВМ приводит иногда даже к неполиномиально сложным алгоритмам [4, 5, 7]. При обработке

изменяющихся изображений на ЭВМ детектирование изменения производят обычно на начальных этапах обработки, но после выделения контуров. Основной прием детектирования и измерения изменения изображения — совмещение контуров в двух последовательных кадрах — довольно трудоемкая ( $O(n^2)$ ) операция [8—12].

Из этого следует вывод о целесообразности применения универсальных ЭВМ и специализированных ЭВМ типа языковых процессоров на стадии модельного анализа и о необходимости распараллеливания обработки изображений на начальных этапах с использованием архитектуры «единный поток команд — множество потоков данных» [3, 11—13]. К этой группе процессоров принадлежат и оптические процессоры, выполняющие, как правило, одну единственную команду над всем изображением [14]. Такая команда может быть достаточно простой по сравнению с командами цифровых ЭВМ, а также и сравнимой по сложности (алгебраическое сложение, умножение изображений) или даже намного более сложной (интегральное преобразование над всем изображением) [15, 16].

При оптической реализации распознающей системы и без того не вполне четкая грань между первоначальной обработкой изображения и модельным анализом еще более стирается, что хорошо видно на примере когерентной оптической корреляционной распознающей системы, работающей по схеме согласованной фильтрации (рис. 1) [17]. При наличии нелинейности в фотоприемнике или в его выходной цепи такая система способна выдать сигнал типа «да/нет» о наличии/отсутствии максимума определенного уровня в корреляционной функции изображения с образцом.

Для работы в реальном масштабе времени процессор такого типа должен иметь быстродействующие средства ввода/вывода изображений. Если фотоприемники с неплохими параметрами уже достаточно хорошо известны [18], то проблема быстрого ввода изображения в когерентный тракт начала решаться лишь в самое последнее время [19, 20].

При обработке изменяющегося во времени изображения возникает еще одна проблема: если распознаванию подлежит лишь изменяющаяся компонента изображения, то неизменная во времени компонента представляет собой нежелательный шум, который тем не менее обрабатывается оптическим процессором, если он не подавлен на входе. Поэтому при обработке изменяющихся во времени изображений чрезвычайно заманчиво иметь не просто пространственный модулятор света, позволяющий преобразовать некогерентный свет в когерентный на входе оптического процессора, но пространственно-временной модулятор света, осуществляющий динамическую селекцию изображений (ДСИ), т. е. передающий (может быть, с некоторыми искажениями) изменяющиеся во времени составляющие изображения и подавляющий неизменные во времени составляющие.

Такой пространственно-временной модулятор света (ПВМС) был разработан в лаборатории квантовой радиоэлектроники Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР [21, 22] и получил название ПРИЗ. Он изготовлен из монокристалла фотопроводящего электрооптического материала товлен из монокристалла вырезанного специальным образом. На большие грани монокристалла напыляют прозрачные металлические электроды, шие которым во время работы модулятора прикладывают высокое (до 2 кВ) напряжение. Запись изображения на ПВМС ПРИЗ производят обычно светом с длиной волны в сине-зеленой области спектра, считывание — поляризованным светом (обычно в красной области) (рис. 2). Стирание записанного на ПВМС ПРИЗ изображения производят обычной лампой-вспышкой или УФ-лампой. Если электроды не отделены от фотопроводящего электрооптического материала диэлектрической прослойкой и во время записи на них все время подается высокое напряжение, то даже без специального стирания неизменное во времени изображение через некоторое время ( $10^{-2}$ — $10^2$  с в зависимости от экспозиции и пространственной частоты) перестает передаваться модулятором, т. е. наблюдается динамическая селекция изображений. Наиболее простой пример, иллюстрирующий это явление, приведена на рис. 3. На рис. 3, а дано изображение нескольких белых пятен сразу после его записи на ПРИЗ,



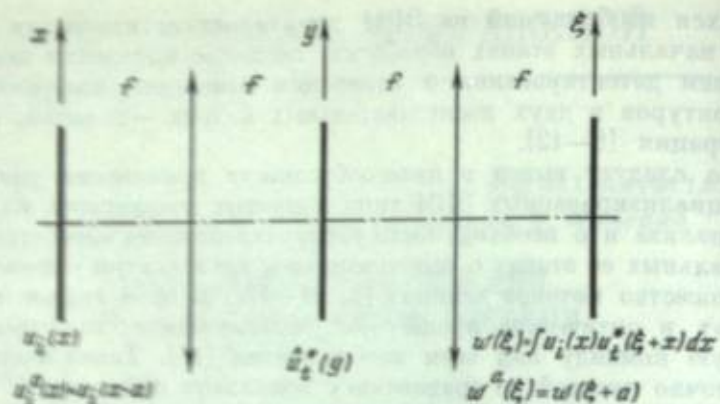


Рис. 1. Расфокусирование и определение координат по Ван дер Лугту [17]

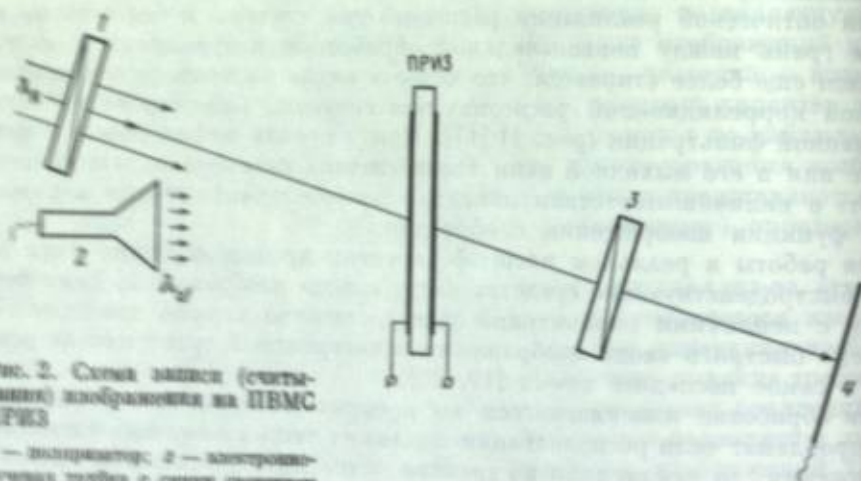


Рис. 2. Схема записи (считывания) изображения на ПВМС ПРИЗ

1 — лазерный источник; 2 — апертурно-селективная трубка с линзой сфокусированной на 440 нм; 3 — анализатор; 4 — фотоприемник. Длина волны считываемого света  $\lambda_d \sim 630$  нм

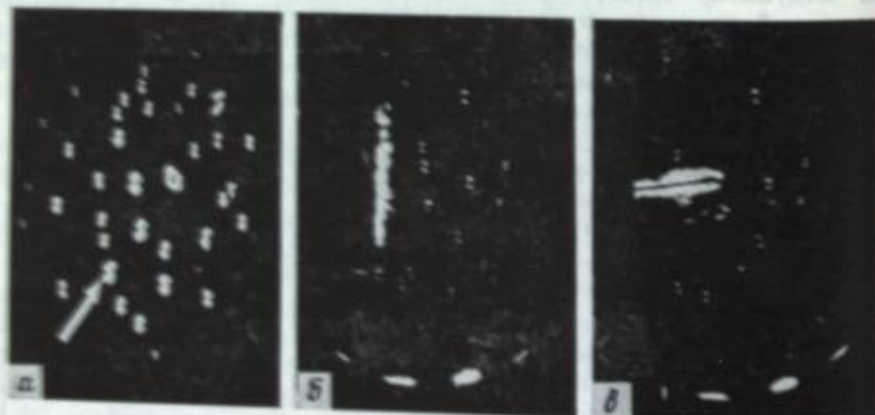


Рис. 3. Динамическая селекция изображений

Темная черта посередине каждого из пятен — проявление «цветовой фильтрации» ПВМС ПРИЗ — при необходимости может быть устранена

на рис. 3, б, в — изображение, передаваемое модулятором в режиме ДСИ примерно через 10 с после включения записи; светлое пятно, отмеченное на рис. 3, а стрелкой, движется.

Аналогичное подавление неподвижного фона наблюдается и в более сложных случаях (рис. 4 и 5). На рис. 4 изображена бабочка [23], движущаяся по

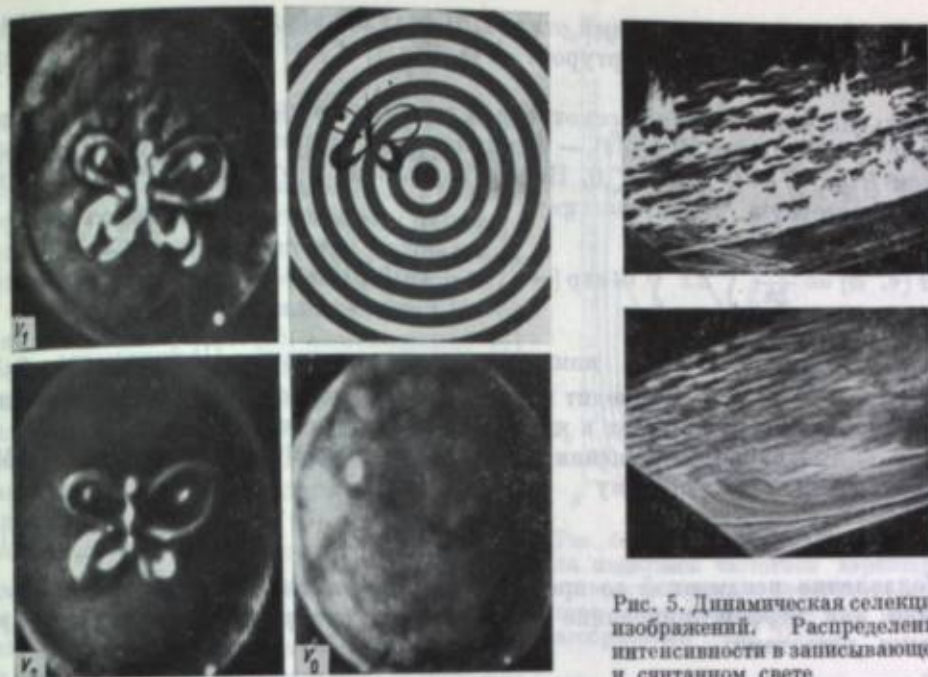


Рис. 5. Динамическая селекция изображений. Распределение интенсивности в записывающем и считанном свете

Рис. 4. Динамическая селекция изображения (снимки с экрана телемонитора)  $V_0 = 0, V_{1,2} \neq 0$

сложному мультипликативному фону (кольцам). Обращает на себя внимание пятно на правом крыле бабочки, невидимое на исходном изображении. На рис. 5 показан результат обработки ПВМС ПРИЗ изображения светлого пятна, движущегося по аддитивному фону, пространственное распределение яркости которого — белый шум [24]. Аналогичные результаты получаются и для мигающих изображений. Во всех случаях получено подавление неизменной во времени составляющей изображения на 12—40 дБ.

ПВМС с динамической селекцией изображений может быть применен не только как входное устройство когерентного оптического процессора; он может быть установлен, например, в фурье-плоскости [25]. Применение пространственно-временного модулятора света с динамической селекцией изображений в фурье-плоскости требует, однако, хорошей дифракционной эффективности и на высоких пространственных частотах, в то время как у ПВМС ПРИЗ дифракционная эффективность заметно падает с ростом пространственной частоты ( $\eta \sim \nu^{-2}$ ); поэтому ПВМС типа ПРИЗ целесообразнее применять во входной плоскости изображения когерентных оптических процессоров.

Явление динамической селекции изображений может быть описано количественно через отклик  $\kappa$  ПВМС (изменение состояния поляризации света, прошедшего через ПВМС) или его дифракционную эффективность  $\eta = |\kappa|^2$ . Обе эти величины — нелинейные функционалы истории изображения, [24]. Обе эти величины — нелинейные функционалы истории изображения, записанного на ПРИЗ:  $\kappa(\xi, t) = \kappa(\xi, t, \{I(\xi', t')\}_{t>t'})$ , где  $\xi$  — двумерная координата в плоскости ПРИЗ;  $I$  — интенсивность освещенности в указанной точке в указанный момент времени. Несмотря на то что эти функционалы могут быть линеаризованы лишь в малых областях изменений  $I$  и пространственных и временных частот, линейная феноменологическая теория ДСИ может дать некоторое представление о том, что можно ожидать от динамической селекции изображений, тем более что строгая линейная микроскопическая теория процессов, протекающих в ПВМС ПРИЗ и определяющих его отклик, оказывается довольно громоздкой [26].

Рассмотрим линейный отклик ПВМС. Для простоты можно пренебречь анизотропией монокристаллического пространственно-временного модулятора света, тогда

$$\kappa(\xi, t) = \int d\xi' \int dt' h(\xi, \xi'; t, t') I(\xi', t')$$

где  $h(\xi, \xi'; t, t')$  — импульсный отклик. В силу однородности времени и ПВМС (в пренебрежении его апертурой)  $h(\xi, \xi'; t, t') = H(\xi - \xi', t - t')$  при  $t > t'$ .

Здесь мы ограничимся рассмотрением отклика лишь на одномерные изображения; в результате  $H(x, t)$  — функция двух вещественных переменных, причем  $H(x, t) = 0$  при  $t < 0$ . Вместо импульсного отклика удобно рассматривать частотную характеристику

$$\hat{H}(v, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dt \exp[-i(vx + \omega t)] H(x, t),$$

считая ее функцией двух комплексных переменных. Причинность, т. е.  $H(x, t) = 0$  для  $t < 0$ , приводит к тому, что все полюса  $\hat{H}(v, \omega)$  как функции  $\omega$  при вещественных  $v$  лежат в нижней полуплоскости.

При симметричном отражении записываемого изображения отклик ПВМС ПРИЗ меняет знак, поэтому

$$\hat{H}(-v, \omega) = -\hat{H}(v, \omega). \quad (1)$$

Подавление неизменной во времени компоненты изображений может быть описано как дифференцирование составляющих изображения с малыми временными частотами:

$$\hat{H}(v, \omega) = O(\omega) \quad \text{при } \omega \rightarrow 0. \quad (2)$$

Оконтуривание изображения модулятором ПРИЗ описывается аналогично:

$$\hat{H}(v, \omega) = O(v) \quad \text{при } v \rightarrow 0. \quad (3)$$

Известны также и асимптотики  $\hat{H}(v, \omega)$  в области больших частот [21, 22, 24]:

$$\hat{H}(v, \omega) = O(1/v) \quad \text{при } v \rightarrow \infty \quad (4)$$

$$\hat{H}(v, \omega) = O(1/\omega) \quad \text{при } \omega \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Соотношениям (1—5) удовлетворяет следующая простейшая дробно-рациональная функция с минимальными степенями числителя и знаменателя (минимально-фазовый фильтр) [27]:

$$\hat{H}_1(v, \omega) = \frac{Av\omega}{(B^2 + v^2)(C - i\omega)^2}. \quad (6)$$

Нормировке  $\max_{v, \omega} |\hat{H}_1(v, \omega)|^2 = 1$  соответствует  $A = BC$ .

$$| \quad Imv = Im\omega = 0.$$

Однако для  $\hat{H}_1$  из выражения (6) пространственная частота  $v_0(\omega)$ , для которой  $|\hat{H}_1(v_0(\omega), \omega)|^2$  максимален при фиксированной  $\omega$  (или времени), не зависит от  $\omega$ :  $v_0(\omega) = B$ . Для реального ПВМС ПРИЗ  $v_0(\omega)$  растет при уменьшении  $\omega$ . Попытка минимально-фазового моделирования такой зависимости с выполнением условий (1—5) приводит к следующему выражению:

$$\hat{H}_2(v, \omega) = \frac{Av\omega}{(D - i\omega(v^2 + v_\infty^2))(C - i\omega)}. \quad (7)$$

Здесь  $v_0(\omega) = \left( v_\infty^4 + \left( \frac{\omega_\infty}{\omega} \right)^2 (v_\infty^4 - v_\infty^4) \right)^{1/4}$  ( $\lim_{\omega \rightarrow \infty} v_0(\omega) = v_\infty$ ),

$$D = \omega_\infty (v_\infty^4 - v_\infty^4)^{1/2}, \quad C = \omega_\infty \left( \frac{v_\infty^4 + v_\infty^4}{v_\infty^4 - v_\infty^4} \right)^{1/2}.$$

Нормировке  $\max_{v, \omega} |\hat{H}_2|^2 = 1$

$$Imv = Im\omega = 0$$

соответствует  $A = 4\omega_\infty^2 v_\infty^2 (v_\infty^4 + v_\infty^4) / (v_\infty^4 - v_\infty^4)$ . Максимум  $|\hat{H}_2(v, \omega)|^2$  достигается при  $v = v_\infty$  и  $\omega = \omega_\infty$ . Функция  $\hat{H}_2(7)$  фактически не содержит подгоночных параметров — ее вид определяется положением максимума  $(v_\infty, \omega_\infty)$  и асимптотикой  $f_\infty$ .

Рассмотрим выполнение условий (1—5) в выражениях (6) и (7). Соотношение (1) обеспечивается множителем  $v$  в числителе и независимостью оставшегося сомножителя лишь от  $v^2$ . Заодно тем самым обеспечивается выполнение (3). Условие (2) оказывается выполнено благодаря множителю  $\omega$  в числителе уравнений (6) и (7). Причинность, как уже говорилось, требует, чтобы полюса по  $\omega$   $\hat{H}(v, \omega)$  при  $Imv = 0$  лежали бы в нижней полуплоскости, т. е. знаменатель должен раскладываться на множители вида  $F(v^2) - i\omega$ , где  $F(v^2)$  — положительная функция. В выражении (6)  $F(v^2) \equiv C$ ; в (7)  $F_1 = D/(v^2 + v_\infty^2)$ ;  $F_2(v^2) = C$ . Таким образом, пространственные и временные частоты должны входить в выражение для  $\hat{H}(v, \omega)$  несимметрично. Асимптотики (4), (5) в области больших частот удовлетворяются в выражениях (6), (7) из-за того, что степень знаменателя выбрана на единицу большей степени числителя как по  $v$ , так и по  $\omega$ .

На рис. 6 приведена карта изолиний  $|\hat{H}_2(v, \omega)|^2$  при  $v_\infty = 3$ ,  $\omega_\infty = 2$ ,  $v_\infty = 0$ . Сходство поверхности  $|\hat{H}_2(v, \omega)|^2$  с поверхностью отклика человеческого глаза очевидно [6]. Возможно, что это сходство имеет под собой и более глубокие основания — и в глазу, и в ПВМС ПРИЗ обработка изображений описывается комбинацией диффузии и дрейфа [6, 26].

Итак, целесообразность динамической селекции при обработке изображений, изменяющихся во времени, несомненна. Прибор для динамической селекции изображений ПВМС ПРИЗ подавляет за несколько секунд неизменяемую во времени компоненту изображения на 12—40 дБ. Предложена феноменологическая линейная модель ПВМС ПРИЗ, описывающая динамическую селекцию изображений и демонстрирующая сходство ПРИЗа с глазом человека и животных!

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rashid R. F. — IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence, 1980, vol. PAMI-2, p. 574.
2. Tsotos J. K., Mylopoulos J., Covey H. D., Zuker S. W. — IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence, 1980, vol. PAMI-2, p. 563.
3. Digital image processing systems/Ed. L. Bolc, Z. Kulpa. B. (West): Springer-Verl., 1981. 384 p.
4. O'Rourke J., Badler N. I. — IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence, 1980, vol. PAMI-2, p. 522.
5. Ullman S. — Computer, 1981, vol. 14, N 8, p. 57.
6. Granrath D. J. — Proc. IEEE, 1981, vol. 69, p. 552.
7. Barrow H. G., Tenenbaum J. M. — Proc. IEEE, 1981, vol. 69, p. 572.
8. Aggarwal J. K., Davis L. S., Martin W. N. — Proc. IEEE, 1981, vol. 69, p. 562.
9. Jacobus C. J., Chien R. T., Selander J. M. — IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence, 1980, vol. PAMI-2, p. 495.
10. Thomson W. B., Barnard S. T. — Computer, 1981, vol. 14, N 8, p. 20.
11. Danielson P.-E., Leviadi S. — Computer, 1981, vol. 14, N 11, p. 53.
12. Schaefer D. H., Fischer J. R. — IEEE Spectrum, 1982, vol. 19, N 3, p. 32.
13. Gilbert A. L. — Computer, 1981, vol. 14, N 8, p. 50.
14. Пресмон К. Когерентные оптические вычислительные машины. М.: Мир, 1974. 401 с.
15. Leger J. R., Lee S. H. — Opt. Eng., 1979, vol. 18, p. 512.
16. Yatagai T., Choji K., Saito H. — Opt. Commun., 1981, vol. 38, p. 162.
17. Van der Lugt A. — IEEE Trans. Inform. Theory, 1964, vol. IT-10, p. 139.

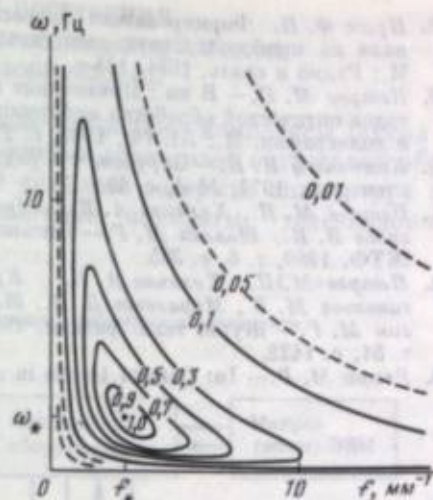


Рис. 6. Карта изолиний квадрата модуля модельной частотной характеристики пространственно-временного модулятора света с динамической селекцией изображений (типа ПРИЗ)

18. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1981. 135 с.
19. Петров М. П. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИАФ, 1980, с. 223.
20. Колпапец И. Н. — Зарубеж. радиоэлектрон., 1977, № 4, с. 46.
21. Петров М. П., Хоменко А. В., Марашонов В. И., Шлягин М. Г. — Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, с. 385.
22. Петров М. П., Хоменко А. В., Красилькова М. В., Марашонов В. И., Шлягин М. Г. — Журн. техн. физики, 1981, т. 51, с. 1422.
23. Petrov M. P. — In: Current trends in opt-

- tics/Ed. F. T. Arecchi, F. R. Aussenegg. L.: Taylor and Francis, 1981, p. 161.
24. Casavant D., Caimi F., Khomenko A. — Appl. Opt., 1981, vol. 20, p. 3090.
25. Петров М. П., Хоменко А. В., Ближенцев А. М., Капустин В. А. — В кн.: Всесоюз. конф. «Оптическое изображение и регистрирующие среды» (Ленинград, 1982): Тез. докл. Л.: ГОИ, 1982, с. 178.
26. Брыксин В. В., Коровин Л. И., Петров М. П., Хоменко А. В. — Физика твердого тела, 1982, т. 23, с. 337.
27. Оппенгеймер А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов. М.: Связь, 1979, с. 245.

УДК 621.372.914

Э. И. Круницкий

### ГИБРИДНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При автоматической обработке изображений широко используют всевозможные технические средства: электронные цифровые, оптические, телевизионные, а также различные их сочетания. Одним из возможных сочетаний является объединение в едином комплексе аналоговых оптических устройств обработки изображений и электронных цифровых. Такие системы называют гибридными оптико-электронными комплексами (ГОЭК).

Хотя первые описания ГОЭК для автоматической обработки изображений [1—4] относятся к концу 60-х годов, интенсивное развитие таких комплексов приходится на последние годы, когда было создано значительное число конкретных экспериментальных систем. Это объясняется, во-первых, необходимостью быстрой обработки больших массивов информации в таких областях науки и техники, как аэрокосмические исследования, геолого-геофизическая разведка, микробиология, медицина, контроль качества промышленных изделий, криминалистика и, во-вторых, отсутствием электронных цифровых машин, обладающих требуемой производительностью. Традиционные ЭВМ — это устройства последовательного действия, плохо приспособленные для обработки двумерной информации.

В настоящее время наметилась тенденция создания адекватных рассматриваемой задаче параллельных ЭВМ (ЭВМ матричного типа). Однако создание таких машин в будущем, по-видимому, не будет препятствовать использованию для решения конкретных задач обработки изображений гибридных оптико-электронных комплексов, в том числе с электронными цифровыми процессорами параллельного действия. При этом определяющими показателями должны стать уже не производительность, а стоимость, простота реализации и некоторые другие. Следует добавить, что перспективность использования ГОЭК возрастает в связи с бурным развитием техники мини- и микро-ЭВМ. Анализ литературных данных показывает, что подавляющая часть ГОЭК используется для автоматического распознавания изображений и лишь весьма незначительная часть — для улучшения изображений в реальном масштабе времени.

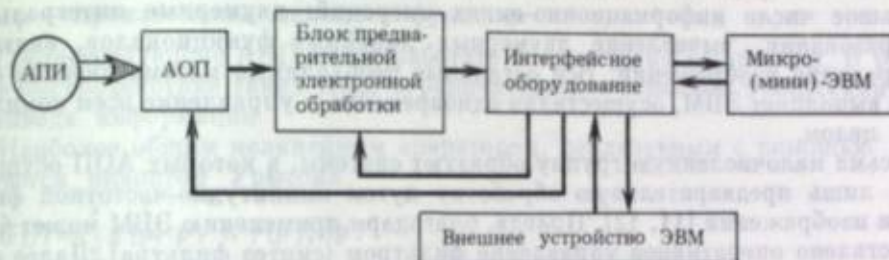
В настоящей работе рассматриваются общие принципы построения ГОЭК для автоматической обработки изображений, производится их сравнение с другими видами средств обработки изображений, оцениваются пути использования ГОЭК. Рассматриваются алгоритмические возможности аналоговых оптических процессоров без управления и с управлением оптическим излучением, исполь-

### ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Существуют два вида ГОЭК: автономные гибридные комплексы (схема 1) и гибридные комплексы с вынесенными пунктами аналоговой оптической обработки информации (схема 2). Автономный комплекс содержит аппаратуру получения изображений (АПИ) — фотосъемочные аппараты, телевизионные

Схема 1

Обобщенная структурная схема автономного гибридного комплекса для обработки изображений



камеры, микроскопы, рентгеновские установки и др.; аналоговый оптический процессор (АОП); блок предварительной электронной обработки сигналов, поступающих от фотоприемников, стоящих на выходе АОП; интерфейсное оборудование, необходимое для сопряжения всех устройств с ЭВМ; микро- или мини-ЭВМ; комплекс внешних устройств к ЭВМ, в который могут входить накопители данных, дисплеи, печатающие устройства и др. В блоке предварительной электронной обработки осуществляются обычно вспомогательные операции: усиление сигналов, нормировка, фильтрация, дискретизация по времени, коммутация, аналогово-цифровое преобразование и т. п. Примеры таких систем описаны, например, в работах [1, 5—7].

Второй тип систем отличается тем, что аналоговая оптическая обработка информации и цифровая электронная обработка осуществляются в разных местах, причем последняя — в центре сбора и обработки информации, оснащенном мощной ЭВМ и банками данных. Центр обработки по каналам связи может соединяться со многими вынесенными пунктами сбора и предварительной обработки информации (в простейшем случае информация может передаваться путем пересылки перфолент, магнитных дисков и других носителей). В числе вынесенных могут быть пункты, оснащенные аналоговыми оптическими процессорами для обработки изображений, как это показано на схеме 2. В ком-

Схема 2

Обобщенная структурная схема гибридного комплекса с вынесенным пунктом оптической обработки изображений



плекс оборудования такого вынесенного пункта входят аппаратура получения изображений; аналоговый оптический процессор; блок предварительной электронной обработки сигналов; буферное запоминающее устройство, необходимое для накопления данных до их передачи в центр обработки; аппаратура передачи данных в центр обработки; аппаратура настройки, контроля и управления. Примеры систем этого типа описаны в работах [8—10].

Выбор варианта системы зависит от специфики решаемой задачи. Заметим, что хотя на схемах изображен один оптический процессор, фактически их может быть несколько, причем они выполняют различные функции. Примером является система, в которой один АОП обеспечивает операцию поиска и обнаружения фрагмента, а другой — опознавание выделенного фрагмента [8].

Во всех гибридных комплексах оптические процессоры выполняют обычно небольшое число информационно-емких операций: двумерные интегральные преобразования, вычисление двумерных линейных функционалов, включая сканирование изображений. Все остальные необходимые математические операции выполняет ЭВМ, осуществляя одновременно и управление всем комплексом в целом.

Весьма малочисленную группу образуют системы, в которых АОП осуществляют лишь предварительную обработку путем амплитудно-частотной фильтрации изображений [11, 12]. Правда, благодаря применению ЭВМ может быть осуществлено оперативное управление фильтром (синтез фильтра). Далее следуют системы, в которых АОП осуществляют анализ изображений либо путем сканирования и определения некоторых параметров (углов наклона линий, числа пересечений и т. д.) [8, 10, 13], либо путем формирования обобщенных моментов [2, 3, 6, 14—16]. Весьма представительную группу составляют системы, в которых с помощью АОП осуществляют интегральное преобразование изображения (фурье-спектр, функция автокорреляции и т. д.) и последующий анализ путем дискретизации или определения обобщенных моментов [1, 3, 6, 9, 11, 12, 17—20].

Следующую многочисленную группу представляют системы, в которых корреляционным способом (главным образом с помощью голографических согласованных фильтров) осуществляется сравнение опознаваемых изображений с эталонными моделями классов [5, 7, 11, 21—27]. Здесь, так же как и в первом случае, ЭВМ может использоваться для перестройки фильтров путем синтеза эталонных изображений или их фурье-голограмм. Наконец, совсем малочисленную группу образуют системы, в которых АОП осуществляют обнаружение фрагмента корреляционным методом и последующий анализ фрагмента одним из отмеченных выше способов [8, 10, 21]. Необходимо отметить, что в некоторых системах предусмотрено несколько видов оптического анализа изображений, скажем, непосредственно по изображению и по фурье-спектру.

В реализованных гибридных комплексах крайне ограниченно используются достигнутые на сегодняшний день возможности выполнения математических операций с помощью АОП.

#### ОПЕРАЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В ГИБРИДНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ОПТИЧЕСКИМ АНАЛОГОВЫМ ПРОЦЕССОРОМ

К настоящему времени предложено большое количество аналоговых оптических процессоров. Принципиально они позволяют выполнять любые аналоговые математические операции. Наиболее общие свойства и возможности линейных и нелинейных АОП, работающих в когерентном свете, рассмотрены в работах [28, 29]. Значительный прогресс имеет место в последние годы и в области реализации АОП, работающих в некогерентном свете. Однако, учитывая, что в известных ГОЭК некогерентные АОП практически не используются, мы не будем на них останавливаться.

В когерентном свете может быть реализован общий линейный интегральный оператор

$$G[f] = \int_S g(\rho, \rho', t) f(\rho') d\rho', \quad (1)$$

где  $g$  — произвольно заданное ядро оператора;  $f$  — функция изображения;  $\rho$  и  $\rho'$  — двумерные радиусы-векторы точек в выходной и входной плоскостях процессора.

Наиболее просто реализуются, как известно, частный случай оператора (1), соответствующий разностному ядру  $g(\rho - \rho', t)$ , и оператор Фурье

$$F[f] = \int_S \exp(-i\omega\rho') f(\rho') d\rho'. \quad (2)$$

С помощью АОП реализуются также общие линейные функционалы

$$\Phi[f] = \int_S \varphi(\rho', t) f(\rho') d\rho', \quad (3)$$

где  $\varphi$  — произвольная заданная функция.

Соответствующие АОП могут работать без задержки во времени. В результате быстрдействие таких АОП ограничивается в основном процессами ввода и вывода информации.

Наиболее общим нелинейным оператором, реализуемым с помощью АОП, является оператор Урысона

$$G[f] = \int_S g[\rho, \rho', t, f(\rho')] d\rho'. \quad (4)$$

Однако известный метод синтеза таких операторов создает трудности обработки в реальном масштабе времени. Так же обстоит дело и с нелинейными функционалами, хотя разработанные методы позволяют в принципе реализовать достаточно общие функционалы вида

$$\Phi[f] = \int_S g[\varphi(\rho'), f(\rho')] d\rho', \quad (5)$$

где  $g$  и  $\varphi$  — произвольные функции.

Определенным шагом в направлении преодоления отмеченных выше трудностей является использование управляемых транспарантов для нелинейной обработки (см., например, [30]).

Рассмотрим несколько подробнее использование возможностей аналоговых оптических процессоров и их использование в ГОЭК. На стадии предварительной обработки изображений аналоговые оптические процессоры могут быть использованы для улучшения изображений и некоторых полезных преобразований. Так, с помощью простой амплитудной фильтрации, соответствующей установке в частотной плоскости маски, можно ослабить действие высокочастотных шумов и периодической структуры в изображении, если их спектры мало перекрываются со спектром обрабатываемого изображения. Столь же просто с помощью амплитудного фильтра осуществляется подчеркивание градиент изображения (оконтуривание), так как эта операция сводится к дифференцированию (см., например, [31]).

Эффективность оконтуривания становится значительнее, если предварительно осуществить усиление, а затем глубокое ограничение яркости изображения, либо усиление контраста за счет нелинейных преобразований, соответствующих оператору суперпозиции  $G\{f(x, y)\}$ . Способы реализации такого оператора отмечены в работе [29]. Если спектр подавляемой помехи перекрывается со спектром изображения, но само мешающее изображение известно (как, например, изображение местности, на фоне которой появляется интересующее нас изображение), то возможно применение голографического режекторного фильтра, описанного в работе [32]. Для ослабления помехи, вносимой искажением типа свертки с известным ядром, также может быть использована линейная фильтрация (инверсная фильтрация [33]). Задача ослабления случайной мультипликативной помехи или помехи типа свертки с неизвестным ядром требует нелинейного процесса логарифмирования.

Поддаются реализации с помощью АОП и операции коррекции нелинейных искажений за счет нелинейности характеристик регистрирующих сред и при-



имеют высокую стоимость и далеко не всегда отвечают требованиям по надежности, мощности излучения и массогабаритным показателям; высокие требования к качеству поверхностей оптических элементов и необходимость применения в ряде случаев иммерсионных кювет при вводе изображений на фотоэмульсию; повышенный уровень шума за счет спекл-эффекта и фазовых неоднородностей элементов; невозможность прямого ввода в АОП изображений, получаемых в некогерентном свете, в том числе от самосветящихся объектов, например с экранов электронно-лучевых трубок.

От этих недостатков в значительной степени свободны АОП, использующие некогерентный свет. Анализ литературных данных показывает, что почти все операции, осуществляемые когерентными АОП в гибридных комплексах, могут быть реализованы и на базе некогерентных устройств, как правило, более простых и свободных от перечисленных выше недостатков когерентных АОП. Однако их широкому применению препятствует ряд присущих им серьезных недостатков: низкая точность, уменьшенный динамический диапазон, ограниченная база обрабатываемых изображений ввиду ограниченности разрешения, недостаточная яркость источников света и некоторые другие.

### СРАВНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ДРУГИМИ ВИДАМИ СИСТЕМ

Для обработки изображений в настоящее время применяют ЭВМ последовательного и параллельного действия, телевизионные системы, оптико-телевизионные, оптические аналоговые процессоры, гибридные оптико-электронные комплексы. Сравнение оптических аналоговых и оптико-электронных гибридных систем обработки информации с ЭВМ проводится, например, в работах [20, 36—39]. Из-за трудностей достаточно полного количественного сравнения гибридных систем обработки с ЭВМ мы ограничимся в основном качественным сравнением. Некоторые полезные количественные оценки содержатся в отмеченных выше работах.

Сопоставим сначала гибридные системы с ЭВМ последовательного действия, которые получили наиболее широкое распространение при решении задач обработки изображений. Гибридные системы существенно превосходят их по быстродействию; выполнение операций в АОП, как правило, проще и дешевле. Выигрыш по быстродействию может достигать нескольких порядков и особенно значителен при обработке изображений с большим числом разрешаемых элементов. Однако гибридные системы уступают ЭВМ по гибкости (в особенности при величайших операциях), а также по потенциально достижимой точности. В некоторых сравнительно простых задачах обработки гибкость даже существующих гибридных систем вполне достаточна — эти системы дают такое же качество обработки, как и при обработке на ЭВМ. Это, в частности, относится к распознаванию изображений типа текстур (см., например, [20]). Вместе с тем недостаточная гибкость существующих АОП не позволяет эффективно решать в гибридных системах задачи коррекции и улучшения изображений.

Принципиальный характер носят ограничения гибридных систем по точности, обусловленные применением АОП. Однако следует иметь в виду, что точность, достигаемая с помощью АОП, хотя и ниже предельной точности ЭВМ, на практике часто оказывается вполне достаточной вследствие естественной зашумленности исходных изображений. Другими словами, более высокая точность ЭВМ оказывается нереализуемой. Это убедительно показано в работах [20, 38].

Серьезным конкурентом гибридных систем являются ЭВМ параллельного действия. Этот тип ЭВМ интенсивно развивается в последние годы. В работе [39] показано, что быстродействие параллельных ЭВМ сравнимо с быстродействием аналоговых оптических процессоров. Однако для достижения сравнимой точности могут потребоваться ЭВМ с очень большим числом параллельных входов (до  $10^6$ — $10^8$ ) в соответствии с числом разрешаемых элементов в изображении. Такие системы, очевидно, будут очень дороги, сложны и будут обладать

пониженной надежностью. Кроме того, при замене АОП на специализированную параллельную ЭВМ не решается проблема гибкости. Использование же не существующих пока параллельных ЭВМ универсального типа с выходом большой размерности представляется еще более проблематичным.

Переходя к сравнению гибридных систем с телевизионными и оптико-телевизионными [40], необходимо отметить, что данных для такого сравнения гораздо меньше, чем в предыдущем случае. Поэтому мы ограничимся лишь рядом общих соображений. Достоинствами этих систем являются простота осуществления локальной обработки, в том числе нелинейной, путем обработки видеосигнала, а также возможность использования источников некогерентного света и цветовой фильтрации. Системы допускают простую реализацию некоторых сложных алгоритмов, таких, как отслеживание линий и контуров на изображении и обнаружение характерных точек (обрывов, разветвлений, изломов, пересечений и др.). В дополнение к этому следует сказать, что оптико-телевизионные системы допускают реализацию интегральных операций, например пространственно-инвариантной и неинвариантной фильтрации. Благодаря простоте введения обратной связи они позволяют реализовать алгоритмы обращения некоторых линейных и нелинейных операторов.

Недостатками таких систем являются ограниченная точность, обусловленная сравнительно небольшим числом разрешаемых элементов, а также искажениями видеосигнала; трудность выполнения арифметических и логических операций; ограниченное быстродействие, обусловленное последовательным развертыванием изображения в телевизионных трубках. По существу, для решения задач обработки изображений эти системы следует дополнять цифровыми ЭВМ. Вместе с тем в задачах распознавания, не требующих высокой точности обработки, но нуждающихся в сложной коррекции изображений, этот класс гибридных систем может оказаться предпочтительным.

По сравнению с оптическими аналоговыми устройствами гибридные оптико-электронные комплексы обладают одним, но важным преимуществом — существенно большей гибкостью, позволяющей реализовать в целом достаточно сложные алгоритмы обработки изображений.

Из широкого арсенала средств аналоговой оптической обработки изображений, разработанных на сегодняшний день, в гибридных комплексах используется незначительная часть, соответствующая главным образом дифракционной формированию и дискретизации фурье-спектра, а также формированию функций корреляции голографическим методом; это говорит о том, что прочие возможности такой техники значительно превосходят те, которые в настоящее время используются в гибридных комплексах. Рассматриваемые системы обладают существенными достоинствами в сравнении с другими типами систем обработки изображений по быстродействию, стоимости или точности; их применение в гибридных комплексах для решения отдельных задач вполне оправдано.

Применение гибридных оптико-электронных комплексов при решении таких задач, как автоматическое распознавание изображений типа текстур, типа контуров линий, антропоморфических объектов, дает выгоду, сравнимую с той, которая достигается с помощью ЭВМ или ручной обработки оператором, но при значительно увеличении скорости обработки.

Наиболее оправдано применение рассмотренных гибридных комплексов в следующих случаях: при решении простых задач, когда требуется высокое быстродействие и/или высокая точность; при необходимости обработки очень больших массивов информации; при ограниченной базе данных, когда гибридные комплексы позволяют осуществлять сравнительно простую обработку — обработку в первом приближении; при решении сложных задач с целью сокращения времени выполнения некоторых операций, необходимых главным образом в процессе формирования информации об изображении.

Для дальнейшего прогресса в области гибридных оптико-электронных комплексов для обработки изображений необходимо совершенствование элементной

базы оптических процессоров, изыскание путей преодоления недостатков, присутствующих в системах, использующих высококогерентное оптическое излучение, а также создание микропроцессорных решеток и сравнительно дешевых ЭВМ параллельного действия, которые удобно соединять с параллельными оптическими процессорами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лендариус Дж. Г., Стэнли Г. Л. — Зарубеж. радиоэлектрон. 1968, т. 2, с. 110—117.
2. Эльман Р. И. — Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1968, № 1, с. 30—35.
3. Лендариус Дж. Г., Стэнли Г. Л. — ТИИЭР, 1970, т. 58, № 2, с. 22—40.
4. Крупицкий Э. И., Карпов Л. П., Зюлин О. М. — Материалы НТК ЛЭИС, 1970, вып. 2, с. 132—136.
5. Casasent D. — IEEE Trans. Comput., 1973, vol. C-22, N 9, p. 852—858.
6. Блок А. С., Зюлин О. М., Крупицкий Э. И., Фридман Г. Х. — Автометрия, 1974, № 1, с. 36—46.
7. Almeida S. P., Eu J. K.-T., Lai P. F. — IEEE Trans. Instrum. and Meas., 1977, vol. IM-26, N 4, p. 312—316.
8. Верякин Ф. Ф., Видрин Л. В., Давидов В. Т. и др. — Автометрия, 1975, № 3, с. 73—77.
9. Pernick B., Kopp R. E., Lisa J. — Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 21—51.
10. Блок А. С., Воронин В. Р., Крупицкий Э. И. и др. — Автометрия, 1981, № 2, с. 113—114.
11. Потапов О. А. Оптическая обработка геофизической и геологической информации. М.: Недра, 1977. 180 с.
12. Томпсон Б. Дж. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 4, с. 75—91.
13. McMahon D. H. — IEEE Trans. Comput., 1975, vol. C-24, N 4, p. 358—369.
14. Гумофеев А. В. — Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1971, № 6, с. 25—30.
15. Блок А. С., Зюлин О. М., Крупицкий Э. И., Фридман Г. Х. — Пробл. голографии, 1973, вып. 2, с. 78—82.
16. Smith F. A., Shenger P. S. — In: Proc. SOUTHEASTCON-78. Atlanta (Ga), 1978, p. 83—93.
17. Барбаш И. А., Богданов К. М., Козлов Ю. Г., Яновский К. А. — В кн.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М.: Наука, 1975, с. 164—169.
18. Baures R. Y., Davernoy J. — Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 3395.
19. Кошачук В. А., Феоктистов А. А. — В кн.: Оптическая обработка информации. Л.: ЛИЯФ, 1979, с. 92—96.
20. O'Toole R. K., Stark H. — Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 2496—2506.
21. Croze R., Burton G. — RCA Rev., 1971, vol. 32, N 12, p. 811—815.
22. Van der Lugt A. — Proc. Develop. Hologr. SPIE Seminar, 1971, vol. 25, p. 83—88.
23. Arkan S., Husain-Abidi A. — Pattern Recogn., 1973, vol. 5, N 1, p. 15—20.
24. Casasent D. — In: Coherent optical processing, San Diego (Cal.), 1974, p. 48—54.
25. Casasent D., Sterling W. M. — IEEE Trans. Comput., 1975, vol. C-24, N 4, p. 348—358.
26. Потапов О. А., Воробьев О. А., Дубинский В. И. — В кн.: Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ЛИЯФ, 1979, с. 95—101.
27. Юров Н. И., Тарасенко В. П. — В кн.: Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ЛИЯФ, 1979, с. 134—143.
28. Крупицкий Э. И. — В кн.: Оптическая обработка информации. Л.: ЛИЯФ, 1979, с. 3—34.
29. Крупицкий Э. И. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 3—21.
30. Гофман М. А., Нежевенко Е. С. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 252—256.
31. Sirohi R. S. — Opt. acta, 1977, vol. 24, N 11, p. 1105—1113.
32. Корбуков Г. Е., Крупицкий Э. И., Куликов В. В. — Радиофизика, 1977, т. 20, с. 705—711.
33. Василенко Г. И. — Голографическое опознавание образов. М.: Сов. радио, 1977. 328 с.
34. Морозов С. В. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 346—360.
35. Hirsch G. L. — Opt. acta, 1977, vol. 24, N 10, p. 521—525.
36. Престон К. — ТИИЭР, 1972, т. 60, № 10, с. 141—160.
37. Крупицкий Э. И., Эмдин В. С., Смирнов А. Я. — В кн.: Повышение эффективности и надежности радиоэлектронной аппаратуры. Л.: ЛЭТИ, 1975, вып. 4, с. 69—73.
38. Granrath D. J., Hunt B. R. — Appl. Opt., 1979, vol. 18, p. 36—43.
39. Эльман Р. И. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 22—31.
40. Гаприлов Г. А., Малый А. Ф. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 38—50.

## АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Изображения в задачах обработки (в отличие от задач передачи изображений) с теоретико-информационной точки зрения выступают не как сообщения, а как сигналы. Сообщениями же являются случайные параметры отдельных деталей изображений или его общей структуры, определение которых и является, собственно, конечной целью обработки. Конкретный смысл этих параметров, а также критерии их оценки определяются получателем.

Можно выделить два существенно различающихся класса таких критериев: структурно-информационные критерии и локально-информационные критерии. Структурно-информационные критерии рассматривают изображение или отдельные его фрагменты в целом и характеризуют их теми или иными макропараметрами типа статистических. При этом качество обработки изображения оценивается в среднем по ансамблю изображений, рассматриваемых как реализации случайного поля.

С точки зрения локально-информационных критериев изображения рассматриваются как совокупность случайных объектов интерпретации, представленных отдельными деталями изображений, и случайного фона; качество обработки изображений оценивается в среднем по случайным параметрам объектов интерпретации и (но не обязательно) по случайному фону. Часто требуется добиваться наилучшего качества обработки при фиксированном фоне. Это означает, что алгоритм обработки должен адаптироваться к фону. При обработке изображений необходимо учитывать еще один источник случайности обрабатываемых изображений — случайные искажения и помехи, возникающие при формировании изображений в изображающих системах. Как локально-информационные критерии предусматривают усреднение качества обработки по реализациям этих случайных искажений и помех.

Во многих задачах обработки изображений статистические параметры этих помех и искажений априори не заданы, их приходится определять непосредственно по наблюдаемому искаженному изображению. Это требует создания методов обработки, адаптирующихся к неизвестным искажениям и помехам.

Можно выделить три основные категории получателей информации, содержащейся в изображениях, а именно коллективный получатель (в телевизионной кинематографии, полиграфии), индивидуальный получатель (человек-оператор — в фотограмметрии, при интерпретации космо- и аэроснимков, медицинской — в рентгенограмметрии, при интерпретации космо- и аэроснимков, медицинской — в диагностике по рентгеновским снимкам и т. п.) и автомат. Существенной особенностью задач с индивидуальным получателем является принципиальное отсутствие формализованного критерия обработки. Это требует создания методов и средств обработки, позволяющих адаптироваться к пользователю и решаемой им задаче.

### АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОМЕХ И ИСКАЖЕНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Оценку статистических характеристик помех и искажений по наблюдаемому искаженному видеосигналу можно производить, разделяя характеристики искажений и неискаженного сигнала в соответствующих макрохарактеристиках искаженного сигнала. Разделение характеристик сигнала и шума может решаться как детерминированная задача (если соответствующая задача оценки неискаженного сигнала известна точно) или как статистическая задача оценки параметров. В последнем случае анализируемые характеристики сигнала следуют рассматривать как случайные величины (если это числа) или как случайные процессы (если это последовательности чисел), а характеристики, найденные для наблюдаемого сигнала, — как их реализации.

Построение оптимальных процедур оценки параметров в соответствии с таким подходом можно в принципе основывать на статистических моделях анализируемых характеристик, которые необходимо строить и обосновывать конкретно для каждой избранной характеристики. В большинстве практических случаев помехи являются в статистическом смысле очень простыми объектами, т. е. описываются только небольшим числом параметров, а характеристики неискаженного сигнала зависят в основном только от фоновой части изображения. Поэтому задача оценки параметров помех может быть решена сравнительно простыми средствами даже при весьма грубом и не очень детальном задании статистических характеристик измеримых характеристик видеосигнала. Необходимо только из всех доступных измерению характеристик сигнала выбирать такие, в которых искажение сигнала шумом проявлялось бы в возможно более просто обнаруживаемом их аномальном поведении.

Исходя из естественной и экспериментально оправданной априорной предпосылки о гладкости характеристик неискаженного сигнала, можно предложить два достаточно простых и универсальных метода обнаружения аномалий: метод предсказания и метод голосования.

Метод предсказания состоит в том, что для каждого данного элемента анализируемой последовательности находят отличие его значения от значения, предсказанного по предыдущим уже обследованным элементам. Если отличие превышает некоторый заданный порог, принимается решение о наличии аномального выброса.

Метод голосования заключается в том, что каждый элемент анализируемой последовательности рассматривают одновременно с некоторым количеством  $2n$  его соседних элементов ( $n$  слева и  $n$  справа в одномерном варианте). По этой выборке из  $(2n + 1)$  значений строят вариационный ряд и проверяют, не попал ли значение данного элемента в заданное число  $k$  крайних (т. е. наибольших или наименьших) значений упорядоченной выборки. При положительном ответе принимают решение о наличии аномально большого (или малого) значения в данном элементе. Величины  $n$  и  $k$  задаются априори из предположения о «нормальном» поведении исследуемой характеристики неискаженного сигнала.

Эти методы позволяют построить эффективные алгоритмы диагностики параметров следующих видов случайных помех на изображении: дисперсии и корреляционной функции аддитивного и независимого от сигнала флюктуационного широкополосного шума — по аномальному выбросу в начале координат эмпирической автокорреляционной функции зашумленного изображения; дисперсии аддитивного широкополосного шума на интерферограммах и голограммах, интенсивности и частоты гармонических составляющих периодических и других помех с узким спектральным составом — по аномальным выбросам спектра сигнала в соответствующем базисе; параметров импульсного шума — по аномальным выбросам самого видеосигнала; помех типа полосатости — по аномальным выбросам в последовательности значений видеосигнала, усредненных вдоль направления полос [1, 2].

### ЛИНЕЙНЫЕ ФИЛЬТРЫ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ

Подавление аддитивного шума. Пусть  $A = \{\alpha_k\}$  — вектор отсчетов спектра сигнала изображения по некоторому базису; этот сигнал следует оценить по его наблюдаемой аддитивной смеси

$$B = A + N \quad (1)$$

с независимым шумом  $N = \{v_k\}$ . Критерием качества оценки будем считать величину квадрата ошибки

$$\varepsilon^2 = \langle \sum_k |\alpha_k - \hat{\alpha}_k|^2 \rangle, \quad (2)$$

усредненную по случайным реализациям шума (черта сверху) и случайным параметрам объектов интерпретации (уголковые скобки) при фиксированном

фоновом изображении; потребуем, чтобы фильтрация обеспечивала минимум этой величины.

Найдем оптимальный линейный фильтр  $H = \{\eta_{k,l}\}$ , который при подаче на его вход сигнала  $B$  дает на выходе сигнал  $\hat{A}$ :

$$\hat{\alpha}_k = \sum_l \eta_{k,l} \beta_{l,n}$$

удовлетворяющий указанному критерию (фильтр МСКО).

Отыскивая оптимальные значения  $\{\eta_{k,l}\}$  как решения уравнений

$$\partial \varepsilon^2 / \partial \eta_{kl} = 0; \quad \partial \varepsilon^2 / \partial \eta_{kl}^* = 0,$$

где \* — знак комплексной сопряженности, получим следующую систему уравнений для  $\{\eta_{kl}\}$ :

$$\sum_l \eta_{kl} \langle \beta_l \beta_n^* \rangle = \langle \alpha_k \beta_n^* \rangle, \quad (3)$$

а если среднее значение отсчетов спектра шума  $\bar{v}_k$  равно нулю, то

$$\sum_l \eta_{kl} \langle \beta_l \beta_n^* \rangle = \langle \alpha_k \alpha_n^* \rangle, \quad (4)$$

или так как при независимом шуме

$$\langle \beta_l \beta_n^* \rangle = \langle \alpha_l \alpha_n^* \rangle + v_l v_n^*, \quad (5)$$

то

$$\sum_l \eta_{kl} \langle \beta_l \beta_n^* \rangle = \langle \beta_k \beta_n^* \rangle - \langle v_k v_n^* \rangle. \quad (6)$$

Если ограничиться только скалярными фильтрами-масками, определяемыми диагональными матрицами  $H = \{\eta_k \delta^{k-l}\}$ , то нетрудно получить, что оптимальные  $\eta_k$  определяются уравнением

$$\eta_k = \frac{\langle |\beta_k|^2 \rangle - |v_k|^2}{\langle |\beta_k|^2 \rangle}. \quad (7)$$

При применении локально-информационных критериев естественно считать, что объекты интерпретации занимают малую площадь по сравнению со всем изображением. Поэтому приближенно можно записать

$$\langle |\beta_k|^2 \rangle \approx |\beta_k|^2, \quad (8)$$

т. е.

$$\eta_k \approx \frac{|\beta_k|^2 - |v_k|^2}{|\beta_k|^2}. \quad (9)$$

Таким образом, частотная характеристика оптимального (в указанном смысле) фильтра определяется при заданном аддитивном шуме энергетическим спектром наблюдаемого изображения, усредненным по случайным реализациям шума, т. е. фильтр адаптируется к обрабатываемому изображению, большую часть площади которого занимает его фоновая составляющая.

Другим возможным критерием качества оценки является критерий восстановления спектра сигнала (см., например, [3]), в соответствии с которым при фильтрации требуется восстановить энергетический спектр неискаженного сигнала. В нашей трактовке это спектр, усредненный по вариациям объектов интерпретации при фиксированном фоновом изображении. Поэтому для критерия восстановления спектра сигнала запишем

$$\eta_k = \left( \frac{\langle |\beta_k|^2 \rangle - |v_k|^2}{|\beta_k|^2} \right)^{1/2} \approx \left( \frac{|\beta_k|^2 - |v_k|^2}{|\beta_k|^2} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Коррекция линейных искажений. Пусть сигнал  $A = \{\alpha_k\}$  наблюдается на фоне аддитивного независимого шума на выходе линейного фильтра-маски



$\Lambda = \{\lambda_k 0^{k-1}\}$ . Требуется по зашумленному искаженному сигналу  $V = \Lambda A + N$  восстановить сигнал  $A$ .

Найдем оптимальный восстанавливающий фильтр МСКО. Ограничимся для простоты фильтрами-масками  $H = \{\eta_k 0^{k-1}\}$ . Для таких фильтров средняя по ансамблю шума и случайным вариациям объектов интерпретации квадратичная ошибка коррекции на один отсчет сигнала будет минимальна, если по аналогии с уравнением (7)

$$\eta_k = \frac{\lambda_k^* |\alpha_k|^2}{\langle |\beta_k|^2 \rangle} = \begin{cases} \frac{\langle |\beta_k|^2 \rangle - |\nu_k|^2}{\lambda_k \langle |\beta_k|^2 \rangle}; & \lambda_k \neq 0; \\ 0; & \lambda_k = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Оптимальный по критерию восстановления спектра сигнала корректирующий фильтр определяется, очевидно, соотношением

$$\eta_k = \frac{1}{\lambda_k} \left( \frac{\langle |\beta_k|^2 \rangle - |\nu_k|^2}{\langle |\beta_k|^2 \rangle} \right)^{1/2} = \frac{|\lambda_k|}{\lambda_k} \left( \frac{\langle |\alpha_k|^2 \rangle}{\langle |\beta_k|^2 \rangle} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Вариантом такого метода фильтрации является метод коррекции неизвестной гладкой дефокусировки, описанный в работе [4], когда  $|\lambda_k| = \lambda_k$ .

**Оптимальные линейные фильтры для препарирования изображений и локализация объектов.** В задачах препарирования в качестве полезного сигнала выступают детали изображения, которые необходимо выделить для их интерпретации, а в качестве помехи — остальное фоновое изображение. При такой трактовке сигналов и помех получим следующее соотношение для фильтров-масок, оптимальных по критерию МСКО:

$$\eta_k = \frac{\langle |\alpha_k|^2 \rangle + \langle \alpha_k^* \nu_k \rangle}{\langle |\beta_k|^2 \rangle}, \quad (13)$$

где  $\{\alpha_k\}$  — отсчеты спектра выделяемого объекта по выбранному базису;  $\{\beta_k\}$  — отсчеты спектра наблюдаемого изображения;  $\{\nu_k\}$  — отсчеты спектра фоновой части изображения; квадратные скобки означают усреднение по всем возможным реализациям положения объекта на изображении; угловые скобки — усреднение по другим его случайным параметрам.

Ввиду усреднения по положению объекта величина  $\langle \alpha_k^* \nu_k \rangle$  отлична от нуля только для  $k = 0$ . Кроме того, в задачах препарирования изображений можно считать, что выделяемые объекты занимают только небольшую часть площади наблюдаемого изображения. Поэтому влиянием их вариаций на квадрат модуля спектра наблюдаемого сигнала можно пренебречь. Таким образом, в качестве рабочей может служить формула

$$\eta_k = \frac{\langle |\alpha_k|^2 \rangle}{\langle |\beta_k|^2 \rangle}. \quad (14)$$

Аналогично получается формула для фильтра-маски, оптимального по критерию восстановления спектра сигнала

$$\eta_k = \left( \frac{\langle |\alpha_k|^2 \rangle}{\langle |\beta_k|^2 \rangle} \right)^{1/2} \quad (15)$$

и оптимального по критерию максимума отношения интенсивности сигнала в точке локализации искомого объекта к среднеквадратичному значению фонового сигнала:

$$\eta_k = \frac{\langle \alpha_k^* \rangle}{\langle |\beta_k|^2 \rangle}. \quad (16)$$

Последний может использоваться для автоматической локализации объектов на изображении [1].

**Локально-адаптивные алгоритмы.** Алгоритмы фильтрации (формулы (7, 9, 10—16)) являются адаптивными, так как их параметры определяются на основании измерения характеристик наблюдаемого изображения. При этом в за-

висимости от глубины усреднения ошибки фильтрации по  $k$  они могут быть глобально-адаптивными или локально-адаптивными. В последнем случае ошибки фильтрации оцениваются в среднем по фрагментам изображения; в соответствующие формулы входят спектры не всего изображения, а его фрагментов.

## АДАПТАЦИЯ К ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ

Средством обеспечения адаптации к пользователю и задаче обработки является включение пользователя в систему обработки путем организации препарирования изображений в диалоговом режиме [1]. Основным средством диалоговой обработки является дисплейный процессор [5].

Можно выделить две категории методов препарирования: обработка признаков и геометрические преобразования. При обработке признаков также целесообразно адаптироваться к фоновой части изображений. Примерами адаптивных методов препарирования являются адаптивные амплитудные преобразования (эквализация, скользящая эквализация, степенная интенсификация, адаптивное квантование мод, управляемые адаптивные амплитудные преобразования), а также упомянутые выше линейные адаптивные методы фильтрации [1, 6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979. 312 с.
2. Ярославский Л. П. — В кн.: XIV Междунар. конгр. по высокоскоростной фотографии и фотонике: Тез. докл. М., 1980, с. 259—260.
3. Пратт У. Цифровая обработка изображений/Пер. под ред. Д. С. Лебедева. М.: Мир, 1982. 90 с.
4. Корнилов В. Н., Ярославский Л. П. — Письма в ЖТФ, 1980, т. 7, с. 908—911.
5. Бокштейн И. М., Ярославский Л. П. — Автометрия, 1980, № 3, с. 66—71.
6. Беликов Г. П., Ярославский Л. П. — Автометрия, 1980, № 4, с. 66—75.

УДК 618.7.013.82

А. Н. Королев

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ КОРРЕКЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Одной из важных задач научной фотографии является задача апостериорного улучшения качества фотоизображений. Исследования в этом направлении связаны с разработкой методов и средств повышения информативности изображений при их зрительном восприятии. Для преобразования изображений наиболее часто используют алгоритмы линейной фильтрации, достаточно просто реализуемые как в цифровой, так и в когерентно-оптической технике. Эти алгоритмы могут быть также эффективно использованы для преобразования изображений в сканирующих системах путем выполнения свертки с двухполярным импульсным откликом.

В настоящее время существует широкий класс устройств, преобразующих двумерный аналоговый сигнал, существующий в виде излучения или в виде распределения некоторого физического параметра на том или ином носителе, на пределения некоторого физического параметра на том или ином носителе, на пример фотографическом, в электрический сигнал, заменяющийся во времени. К таким устройствам относятся прежде всего сканирующие устройства с электронной и электромеханической разверткой, наиболее широко используемые в телевизионных и фототелеграфных системах. Принципиальным является наличие в этих системах трех основных блоков: считывания, преобразования и воспроизведения изображений. Это позволяет провести аналогию между оптическими системами формирования изображений и

оптико-электронными сканирующими системами, предназначенными для преобразования и передачи изображений.

Изображение на выходе сканирующей системы можно рассматривать по аналогии с оптическим как результат свертки с некоторым ядром, роль которого выполняет сканирующая апертура. Различие состоит лишь в том, что свертка в направлении строчной развертки является непрерывной, а в поперечном направлении — дискретной.

В то же время факт преобразования элементов изображения в электрические сигналы имеет важное значение не только с точки зрения возможности их передачи по каналам связи. В некогерентной оптической системе ядром преобразования при формировании изображения является функция рассеяния точки, которая может быть только положительной. Известно, однако, что реализация частотных характеристик фильтрации общего вида требует формирования двухполярного импульсного отклика [1]. Исходя из возможности использования положительных и отрицательных сигналов в электрическом тракте, можно говорить о важности преобразования элементов изображения в электрические сигналы с точки зрения применения сканирующих устройств для выполнения широкого класса преобразований методом свертки с двухполярным импульсным откликом.

Следует отметить, что развитие методов обработки и преобразования изображений в оптике основывалось на применении когерентно-оптических систем, в которых формирование двухполярного импульсного отклика обеспечивалось амплитудным взаимодействием световых волн. Поэтому подход, связанный с синтезом двухполярного импульсного отклика в системах, использующих некогерентное излучение, получил название псевдокогерентного [2].

Рассмотрим методы формирования двухполярного импульсного отклика в сканирующих устройствах фототелеграфного типа. Простейший вариант двухполярной сканирующей апертуры используется в электронных корректорах изображений для офсетной печати [3]. Сканирующая апертура таких электронных корректоров состоит из двух диафрагм, связанных с двумя фотоприемниками, сигналы которых имеют различную полярность и подаются на вход сумматора. Размер диафрагмы основного канала соответствует элементу разрешения, размер диафрагмы корректирующего канала — вдвое больше. Использование такой апертуры позволяет подчеркивать контуры изображений; изменение усиления в одном из каналов дает возможность легко и просто регулировать степень коррекции.

Для восстановления изображений, искаженных, например, смазом или дефокусировкой, требуются более сложные импульсные отклики со значительной пространственной протяженностью. Теоретически импульсный отклик, соответствующий восстанавливающему частотному фильтру, является бесконечно протяженным, однако в ряде работ показано, что возможно его разумное ограничение при сохранении достаточной эффективности восстановления [4, 5].

Формирование сложной двухполярной весовой функции может быть выполнено двумя путями. Более простой предполагает использование двухканальной схемы регистрации с двумя приемниками излучения и оптически сопряженными масками-транспарантами, пропускание которых соответствует положительной и отрицательной частям импульсного отклика [6]. Другим вариантом является использование матричных фотоэлектрических приемников излучения с многоканальной схемой обработки сигналов [7, 8].

Описано аналоговое оптико-электронное устройство [7], использующее для синтеза импульсного отклика матрицу фотодиодов. В связи с малой размерностью матрицы это устройство обеспечивает лишь определенный класс частотных характеристик преобразования, необходимых для моделирования зрительного анализатора.

Для исследования методов обработки изображений с целью повышения их информационных характеристик нами был разработан многоканальный оптико-электронный процессор с аналоговым преобразованием сигналов и сканирующим устройством фототелеграфного типа. Схема процессора приведена на рис. 1. Сканирующая апертура формируется в процессоре с помощью светового коллатора с кольцевыми зонами на входе, имеющего десять каналов.

Рис. 1. Схема многоканального оптико-электронного процессора

- 1 — барабан (А — зона анализа с исходным фотоизображением, С — зона синтеза с неиспользованной фотоэлементом);
- 2 — источник излучения;
- 3 — конденсор;
- 4 — зеркало;
- 5 — объектив;
- 6 — световолоконный коллатор с фотоприемниками;
- 7 — усилители;
- 8 — ключи;
- 9 — сумматоры;
- 10 — дифференциальный усилитель;
- 11 — источник излучения;
- 12 — модулятор;
- 13 — объектив. Стрелками указано направление вращения и перемещения барабана

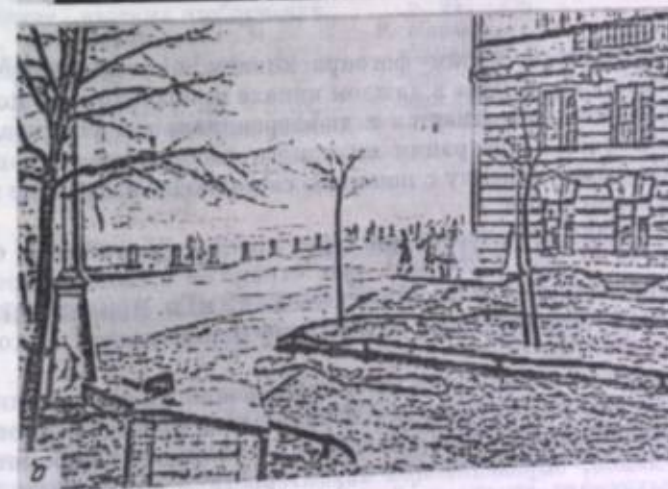
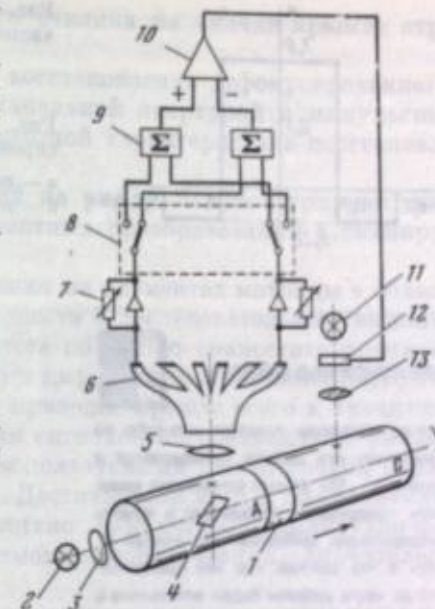


Рис. 2. Результат высокочастотной фильтрации изображения

а — исходное изображение; б — преобразованное изображение

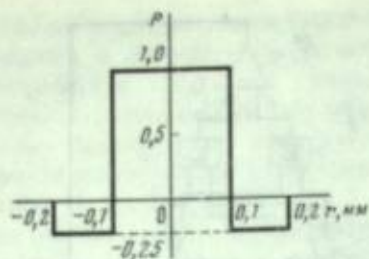


Рис. 3. Импульсный отклик для высоко-частотной фильтрации на рис. 2, б

Рис. 4. Результат восстановления дефокусированного изображения

а — исходное изображение;  
б — восстановленное изображение

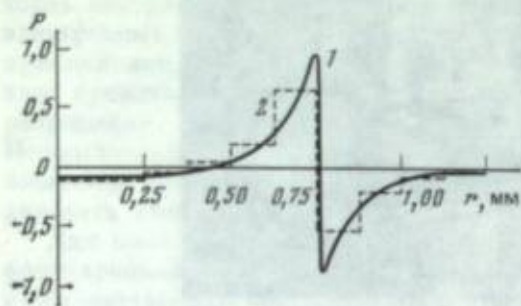
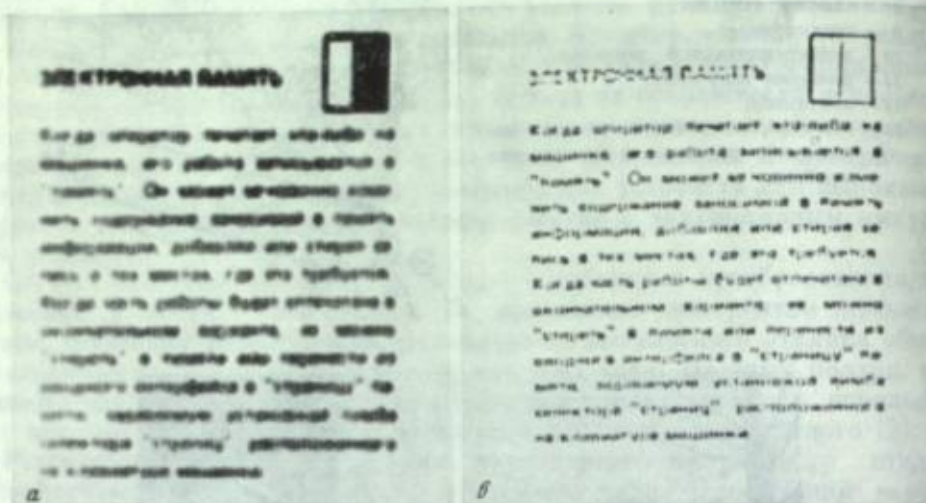


Рис. 5. Радиальное сечение импульсного отклика для восстановления дефокусировки на рис. 4, б

1 — расчетная кривая;  
2 — дискретные значения для 10 каналов.  
 $P(r)$  — ордината импульсного отклика в относительных единицах в зависимости от радиуса

Каждый канал снабжен своим фотоприемником с усилительным трактом. Изменение полярности сигнала в каждом канале производится с помощью ключей, а интегрирование выполняется в дифференциальном усилителе с использованием сумматоров. Регистрация выходного изображения производится на неэкспонированную фотопленку с помощью светодиода, излучение которого модулируется видеосигналом.

Основные технические характеристики процессора: размер обрабатываемого изображения —  $200 \times 200$  мм<sup>2</sup>, шаг строки — 0,125 мм, время обработки — 9 мин, полоса частот видеосигнала — 0—15 кГц, динамический диапазон вариации весовых коэффициентов и динамический диапазон выходных сигналов — не менее 30 дБ.

Основной задачей при создании процессора являлось обеспечение возможности синтеза широкого класса алгоритмов улучшения качества фотоизображений при разумно ограниченном числе каналов и регулируемых параметрах системы обработки сигналов, определяющих характеристики алгоритмов. Для выполнения преобразований разработана программа расчета весовых коэффициентов каналов по заданной частотной характеристике, учитывающая влияние пространственного ограничения и дискретизации импульсного отклика [5].

На рис. 2 приведены результаты преобразования изображения при использовании двух каналов в соответствии с импульсным откликом, представлен-

ным на рис. 3. Реакция импульсного отклика на скачки яркости отражает структуру выходного изображения.

На рис. 4 приведены результаты восстановления дефокусированного изображения при сканировании десятиканальной апертурой с импульсным откликом (рис. 5), соответствующим частотной характеристике восстанавливающего фильтра.

Результаты обработки изображений на рис. 2, 4 демонстрируют широкие возможности выполнения псевдокогерентных преобразований в сканирующих оптико-электронных системах.

Параллельная обработка изображения на элементах матрицы в области задания импульсного отклика в совокупности с последовательным выполнением такой процедуры в каждой точке отсчета позволяет совместить преимущества когерентно-оптической (параллельной) и цифровой (последовательной) техники обработки. Реализация такого метода приводит прежде всего к значительному упрощению аппаратуры для обработки сигналов по сравнению с универсальными и специализированными ЭВМ, используемыми для цифровой обработки, а также к повышению быстродействия. Достоинством метода по сравнению с когерентно-оптическим является отсутствие каких-либо амплитудно-фазовых фильтров, гибкое управление алгоритмом преобразования, значительное сокращение габаритов аппаратуры.

Развитие микроэлектронной технологии привело в последние годы к созданию различных классов твердотельных матричных фотоприемников, которые могут быть широко использованы для обработки изображений в сканирующих системах. Тенденции развития этой области электронной техники позволяют говорить о создании нового направления в технике обработки изображений — параллельно-последовательной обработки на базе функционально развитых матричных фотоприемников [9]. Это обеспечит выполнение обработки изображений в реальном масштабе времени сканирования с широким набором алгоритмов, реализуемых как аппаратно, так и с использованием средств программного обеспечения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А. Н. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980, с. 85—88.
2. Королев А. Н. — Автометрия, 1981, № 1, с. 46—54.
3. Угилевский В. А. Передача, обработка и воспроизведение цветных изображений. М.: Книга, 1981, 214 с.
4. Honda T., Tsujiuchi J. — Opt. acta, 1975, vol. 22, p. 537—549.
5. Королев А. Н., Морозова С. Л. — В кн.: Тр. IV Всесоюз. конф. по голографии
6. Swindell W. — Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 2459—2469.
7. Вайнштейн Г. Г. — В кн.: Иконика. Пространственная фильтрация изображений. М.: Наука, 1970, с. 5—12.
8. Honda T. — Oyo Buturi, 1978, vol. 47, p. 943—950.
9. Круликов С. В. — В кн.: Обработка изображений и дистанционные исследования: Тез. докл. региональной конференции (Новосибирск, 1981); Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1981, с. 103—105.

УДК 620.82:771.537.6

В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, В. Г. Взнулик

### ОГРАНИЧЕНИЯ АПОСТЕРИОРНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Изображение, зафиксированное фотографическим носителем, обычно предназначено для зрительного восприятия. Апостериорное улучшение качества снимка, очевидно, заключается в том, чтобы по записи  $F(x, y)$  изображения объекта, построенного оптической системой, получить в результате математической обработки новую запись  $\hat{F}(x, y)$ , при анализе которой наша зрительная система извлечет больше информации о предмете, чем из записи  $F(x, y)$ . Алгоритм обработки изображения, улучшающий дешифрируемость снимка, в столь общей постановке должен быть согласован с возможностями зрительного вос-

приятия, которое представляет собой чрезвычайно сложный и недостаточно изученный процесс обработки информации.

Не останавливаясь на особенностях зрительного восприятия трехмерных сцен по их двумерным проекциям (снимкам), будем считать, что основные закономерности изменения зрительного восприятия изображения в результате фильтрации можно установить при обработке двумерных тестовых объектов-символов, расположенных на некотором фоне. При этом следует иметь в виду, что глаз обладает способностью адаптироваться к изменениям условий освещения и большим перепадам яркости в чрезвычайно широких пределах. В результате этого восприятие изображения оказывается практически нечувствительным к нелинейным искажениям яркости. Допустимыми оказываются не только функциональные искажения яркости (например, запись изображения на нелинейном участке динамической характеристики фотоматериала), но и локальные, когда яркость малой детали определяется яркостью окружающего фона.

Нечувствительность глаза к нелинейным искажениям яркости, а также нечеткость критерия наилучшего зрительного восприятия приводят к тому, что результат апостериорной обработки изображения  $\hat{F}(x, y)$ , предназначенный для зрительного восприятия, не должен обязательно совпадать с изображением  $f(x, y)$ , построенным идеальной оптической системой, или быть его наилучшей оценкой, т. е. удовлетворять определенным образом выбранному минимуму ошибки между идеальным и обработанным изображениями. Тем не менее только критерий минимума ошибки  $\|f(x, y) - \hat{F}(x, y)\|$  между идеальным и обработанным изображениями может рассматриваться как объективный критерий качества обработки. При выборе алгоритма, улучшающего качество снимка, можно наложить дополнительные ограничения, продиктованные требованиями зрительного восприятия. Можно, например, потребовать, чтобы результат обработки удовлетворял нашему привычному представлению об идеальном изображении, т. е. описывался сверткой положительной функции с дифракционным изображением точки.

Таким образом, из рассмотрения следует исключить задачи улучшения изображительных свойств снимка, включающие  $\gamma$ -коррекцию, выравнивание освещенности по кадру, проработку деталей в тенях или на свету и т. д. Оценку идеального изображения, очевидно, имеет смысл искать лишь при условии, что существует статистически однозначная связь между результатом измерения  $F(x, y)$  и идеальным изображением  $f(x, y)$ , т. е. из рассмотрения следует исключить изображения, полученные с помощью выравнивающих проявителей, и с резко выраженными эффектами подчеркивания контраста мелких деталей.

Погрешности, возникающие при записи и считывании изображения, построенного оптической системой, зависят от исходного сигнала и свойств светоприемника. Хорошо разработанная в настоящее время теория статистических решений позволяет при известных статистических свойствах сигнала  $f(x, y)$  и помехи найти наилучшую оценку сигнала, удовлетворяющую заранее выбранному критерию. Полученная оценка при прочих равных условиях будет тем лучше, чем меньше погрешность, с которой найдено значение исходной интенсивности  $I(x, y)$  по записи  $F(x, y)$ .

В настоящее время есть необходимые технические средства для решения задачи апостериорного улучшения снимка. Имеется большое число работ, в которых на модельных задачах продемонстрирована эффективность получения наилучшей оценки идеального изображения  $f(x, y)$  в тех или иных предположениях. Однако, несмотря на чрезвычайную актуальность задачи, в литературе отсутствуют какие-либо примеры обработки реальных аэрофотоснимков, демонстрирующие повышение их разрешения. Обусловлено это, на наш взгляд, слишком большой реальной погрешностью считывания информации, записанной на фотографический носитель. Изучению этих погрешностей и посвящена настоящая работа.

При анализе погрешностей мы исходим из того, что апостериорное улучшение дешифрируемости снимка имеет практический смысл лишь при недостаточной яркости объекта съемки. В противном случае погрешность, возникающую при записи и считывании изображения, можно сделать достаточной малой путем соответствующего увеличения масштаба съемки.

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОТОПРОЦЕССА В ЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Наиболее распространенным панорамным светоприемником, не имеющим серьезных конкурентов при регистрации изображений, содержащих большие объемы информации, является фотографический материал. Несмотря на то что фотографическая регистрация существенно нелинейна, анализ фотопроецесса обычно ведется на основе теории линейных инвариантных к сдвигу систем. Обусловлено это в первую очередь математической простотой анализа, позволяющей воспользоваться спектральным представлением, а также возможностью при некоторых разумных допущениях получить, хотя бы приближенно, некоторые чрезвычайно удобные характеристики фотопроецесса. Такими характеристиками являются функция рассеяния точки, частотно-контрастная характеристика, спектр Винера шума и т. д. Эти характеристики с успехом используются при оценке возможностей прямых методов регистрации изображения, однако знания их совершенно недостаточно при решении обратной задачи повышения дешифрируемости снимка.

Интенсивность  $i(x, y)$  изображения, построенного оптическим прибором, связана с идеальным изображением  $f(x, y)$  линейным интегральным уравнением, которое для изопланатических систем приобретает вид свертки:

$$i(x, y) = f(x, y) \otimes g(x, y), \quad (1)$$

где  $g(x, y)$  — распределение интенсивности в изображении точки, которое в данном случае не зависит от координат точки.

В научной фотографии фотоматериал обычно обеспечивает с точностью до погрешностей, обусловленных шумом зерна, однозначное соответствие между интенсивностью упавшего потока и коэффициентом пропускания или каким-либо другим измеряемым параметром фотоэмульсии. Иногда же с целью расширить динамический диапазон фотоэмульсии или подчеркнуть контраст мелких деталей используют выравнивающие проявители или проявители с выраженным эффектом голодного проявления, для которых такая однозначность нарушается. В этом случае оператор  $\hat{H}\{i(x, y)\}$ , переводящий интенсивность упавшего потока в коэффициент пропускания эмульсии, не является однородным и монотонным. Нарушение однородности и монотонности оператора приводит к потере фотометрической информации и практически исключает или по крайней мере значительно затрудняет возможность решения обратной задачи восстановления исходной интенсивности. Предположение о монотонности оператора  $\hat{H}$  фигурирует практически во всех модельных экспериментах, связанных с апостериорным улучшением пространственного разрешения снимка.

Общим при решении модельных задач является предположение, что учет характеристической кривой позволяет представить результат считывания информации с фотографического носителя как свертку идеального изображения предмета с изображением точки, построенным оптической системой, включающей рассеяние света в фотоэмульсии. Обосновывается это предположение следующим образом.

Процесс записи—считывания может быть представлен в виде

$$F(x, y) = \hat{H}\{i(x, y)\} + N(x, y), \quad (2)$$

где  $F(x, y)$  — зарегистрированный сигнал, представляющий собой любой измеряемый параметр фотоэмульсии, например коэффициент пропускания, плотность или число зерен на элементе считывания;  $\hat{H}$  — монотонный оператор, описывающий функциональную нелинейность записи;  $i(x, y)$  — распределение интенсивности в изображении предмета, построенном оптической системой;  $N(x, y)$  — погрешность считывания.

Избавиться от функциональной нелинейности можно с помощью обратного преобразования  $\hat{H}^{-1}$ , и результат имеет вид

$$I(x, y) = \hat{H}^{-1}\{\hat{H}\{i(x, y)\} + N(x, y)\}. \quad (3)$$

Обратная нелинейность воздействует на сумму сигнала и помехи, в результате чего будет получена нелинейная комбинация сигнала с шумом. Поэтому вводится, вообще говоря, неверное предположение о том, что оператор  $H$  может быть применен к каждому из слагаемых в отдельности. Это предположение позволяет уравнение (3) представить в виде

$$I(x, y) = f(x, y) * g(x, y) + n(x, y) \quad (4)$$

при условии, что реакция пленки не зависит от координат и интенсивности источника. В этом случае  $g(x, y)$  описывает аппаратную функцию всей системы, включающей оптику, фотоматериал и элемент считывания;  $f(x, y)$  — идеальное изображение источника;  $n(x, y)$  — новый шумовой процесс, который считается не зависящим от входного сигнала  $f(x, y)$ .

Линейная аппроксимация реального процесса записи—считывания уравнением (4) позволяет при известном  $g(x, y)$ , зная статистические свойства искомого сигнала и шума, рассчитать эффективность обнаружения или распознавания любой детали, зарегистрированной на аэрофотоснимке. Можно также построить алгоритм восстановления изображения, который при некоторых достаточно общих предположениях оказывается линейным.

Частотно-контрастная характеристика всей системы (фурье-преобразование  $g(x, y)$ ) описывается произведением ЧКХ пленки, объектива и элемента считывания. ЧКХ пленки может быть получена как зависимость от пространственной частоты контраста впечатанной на фотографический носитель синусоидальной миры. Эквивалентная ей функция рассеяния точки может быть вычислена по данным фотометрических измерений изображения резкого края. Предполагается, что при достаточно надежном знании характеристической кривой полученные измерения ЧКХ пленки и функция рассеяния точки связаны фурье-преобразованием. Оптическая передаточная функция объектива, а также размер и форма диафрагмы считывания предполагаются известными.

При изучении статистических свойств шума эмульсии обычно предполагается, что свойства эмульсии близки к характеристикам идеального панорамного приемника, который при регистрации квантов с эффективностью  $\mathcal{E} < 1$  не изменяет координат отдельных фотонных событий. На месте каждого поглощенного кванта образуется зерно, размер которого существенно меньше элемента разрешения объектива и элемента считывания. При равномерной засветке зерна идеального фотослоя, как и кванты упавшего света, подчиняются пуассоновскому распределению. Стандартное отклонение числа зерен на площадке заданного размера равно  $\sqrt{\mathcal{E}\bar{n}}$ , где  $\bar{n}$  — среднее число квантов, упавших на площадку. Зная величину засветки, т. е. среднее число квантов, величину  $\mathcal{E}$  можно найти из соотношения

$$\mathcal{E} = \left( \frac{\Psi_0}{\sqrt{\mathcal{E}\bar{n}}} \right)^2 \left( \frac{\sqrt{\bar{n}}}{\bar{n}} \right)^2 = \left( \frac{\Psi_0}{\Psi_0} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\Psi_0$  — отношение сигнал/шум на входе, т. е. относительная флюктуация потока;  $\Psi$  — та же величина, полученная при считывании с эмульсии.

Определенная уравнением (5) величина  $\mathcal{E}$  впервые введена Джонсом [1] и называется обычно квантовой эффективностью детектирования (КЭД, или DQE). Измеряемой величиной в уравнении (5) является относительная величина флюктуации зарегистрированного сигнала. Для реального фотослоя величина  $\mathcal{E}$  может быть существенно меньше среднего квантового выхода отдельных зерен эмульсии, поскольку флюктуации выходного сигнала будут определяться флюктуацией плотности упаковки зерен и неодинаковой чувствительностью, а также разбросом размера проявленных зерен. Принято считать, однако, что эти отклонения реального фотослоя от идеального носителя не нарушают пуассоновской статистики погрешностей считывания (закон Селвина).

Предполагая справедливость такой модели реального фотослоя, можно при помощи единственного параметра  $\mathcal{E}$  полностью описать шумовые свойства эмульсии и, зная квантовую эффективность детектирования и ЧКХ пленки, рассчитать эффективность регистрации и возможности апостериорного улучшения качества снимка. Заметим, что такие оценки могут привести к гораздо более

оптимистическим выводам, чем это следует из попыток повышения дешифрируемости реальных аэрофотоснимков. Анализ причин такого расхождения посвящен следующий раздел.

## НЕЛИНЕЙНОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Среднеквадратичная флюктуация плотности, полученная объективными методами, обычно хорошо согласуется с субъективно воспринимаемым шумом, обусловленным наличием зерна эмульсии. Однако при решении обратных задач восстановления изображений погрешность  $n(x, y)$  определяется не только флюктуацией числа зерен на элементе считывания, но и неточностью аппроксимации реального процесса записи—считывания линейным уравнением (4).

При когерентно-оптической обработке результат считывания представляет собой амплитудный коэффициент пропускания транспаранта, на который переписано исходное изображение при соответствующей коррекции характеристической кривой согласно выражению (3). Для малоградиентных изображений линейризацию при перезаписи исходного снимка можно выполнить с достаточной точностью, применяя соответствующие тесты.

Ошибки, связанные с неточностью аппроксимации выражения (3) уравнением (4), легко обнаружить, анализируя пространственный спектр сигнала  $I(x, y)$ , переписанного с первичного фотографического носителя, который из-за наличия зерна существенно отличается от спектра оптического сигнала  $i(x, y)$ . Функцию  $I(x, y)$  можно рассматривать как некий шумовой процесс, огибающей которого является  $i(x, y)$ . Ширина спектра такого процесса простирается до очень высоких пространственных частот, значительно превышающих ширину спектра функции  $i(x, y)$ .

Формально спектр функции  $I(x, y)$  описывается сверткой спектра  $i(x, y)$  со спектром шумовой несущей, т. е. со спектром шума зерна. Поскольку коэффициент пропускания транспаранта — величина положительная, спектр шумовой несущей принадлежит к классу положительно определенных функций, характерной особенностью которых является наличие абсолютного максимума на нулевой частоте. Можно показать, что энергия нулевого максимума не может быть меньше суммарной энергии сигнала оказывается переданной на несущей с нулевой частотой и сосредоточена в окрестности нуля в области спектра сигнала  $i(x, y)$ . Уравнение (4) описывает именно эту часть сигнала  $I(x, y)$ . Сигнал, переданный остальными несущими, занимает всю спектральную область, включая частоты, соответствующие самым мелким зернам эмульсии. На рис. 1 приведено изображение, переданное на шумовых несущих. Центральная область спектра при этом была закрыта.

Наличие корреляции между изображениями, переданными различными шумовыми несущими, не может быть использовано при апостериорной обработке, заключающейся в решении уравнения (4), согласно которому сигнал, переданный шумовыми несущими, должен восприниматься как шум. При зрительном восприятии изображения в качестве шума выступает лишь та его часть, которая не скоррелирована с сигналом, переданным на нулевой несущей.

Дополнительные погрешности при решении обратных задач восстановления могут возникнуть из-за недостаточного строгого выполнения содержащегося в уравнении (4) предположения о том, что частотно-контрастные характеристики пленки и объектива перемножаются. Нестрогость этого предположения может оказаться заметной и при решении прямых задач оптимизации условий аэрофотосъемки. Действительно, при измерении функции рассеяния точки по резкому краю весьма существенными являются микроэффекты проявления (эффект Эбергарда). В аэрофотосъемке этот эффект обычно используют для повышения визуальной резкости мелких деталей. Химические пограничные эффекты приводят к уменьшению рассеяния вблизи яркой точки, не меняя его на больших расстояниях.

Для некоторых типов пленок с четко выраженными микроэффектами проявления (например, «Панатомик X») частотно-контрастная характеристика, полученная из измерений как зависимость коэффициента модуляции от про-

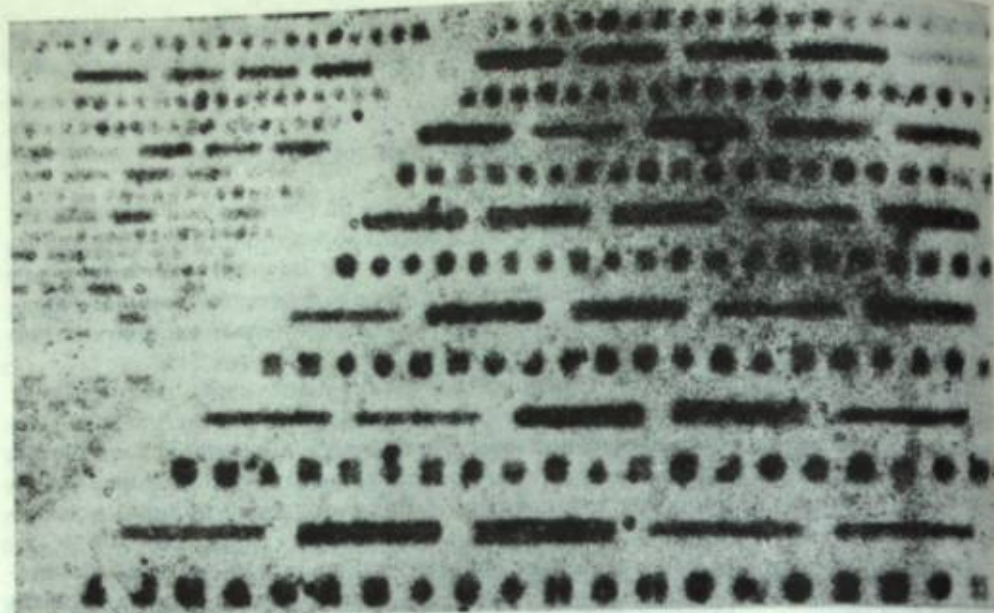


Рис. 1. Изображение, переданное на шумовых несущих

странственной частоты, имеет заметный максимум на частотах  $\sim 20 \text{ мм}^{-1}$ , в 1,2—1,5 раза превосходящий значение на нулевой частоте. Нетрудно видеть, что такой ЧКХ в предположении линейности не удовлетворяет никакая положительная функция рассеяния точки, что следует из свойств фурье-преобразования положительных функций. При записи изображения на такую пленку, естественно, нет никаких оснований ожидать, что ЧКХ пленки и объектива будут перемножаться. Предположение о возможности линеаризировать фотопроект с достаточной для восстановления точностью может оказаться справедливым лишь в случае, когда размер функции рассеяния точки в эмульсии существенно меньше размера изображения точки, сформированной оптической системой. Этот случай представляет интерес для апостериорных методов улучшения качества снимка, однако, как правило, не реализуется при оптимизации процесса съемки прямыми методами.

Очевидно, нет смысла доказывать, что химические эффекты проявления, связанные с устранением вуали пленки, с подчеркиванием контраста мелких деталей, обуславливают существенную нелинейность фотопроектса и не могут быть описаны уравнением (4). В силу отсутствия хорошо разработанного аппарата для исследования нелинейных процессов особую ценность представляют оценки возможностей аэрофотосъемки, полученные с помощью различных тестов, максимально приближающихся к реальным условиям, чему посвящен следующий раздел настоящей статьи.

Квантовая эффективность, определенная выше через погрешность считывания в пределах заданного окна, является характеристикой только фотослоя и для идеального фотоматериала не должна зависеть от размера окна считывания и плотности почернения. Для реальных фотоносителей нет решительно никаких оснований ожидать, что флюктуации пропускания фотослоя будут стремиться к нулю с увеличением размера окна. Здесь скажутся неоднородности полива, дефекты подложки и т. д., т. е. ошибки, никак не связанные с флюктуацией числа упавших фотонов. Нет основания также ожидать, что квантовая эффективность фотослоя останется не зависящей от плотности почернения.

Влияние всех отмеченных особенностей фотографического процесса на возможности апостериорной обработки продемонстрировано ниже на примере обработки двумерной тест-таблицы, снятой на реальную современную аэрофото-

В настоящее время промышленностью разработан целый ряд современных аэрофотопленок, отличающихся от хорошо известной пленки «Изопанхром Т-22» чрезвычайно малым рассеянием света в эмульсии. Некоторые типы пленок разрешают около  $400 \text{ мм}^{-1}$  в изображении мира абсолютного контраста, что практически соизмеримо с размером отдельных зерен эмульсии. Эти эмульсии, как правило, полны на лавсановую основу, которая по фотометрической однородности обычно уступает триацетатной. При исследовании предельных возможностей линейной фильтрации изображение фиксировали на пленку с разрешением около  $250 \text{ мм}^{-1}$  при чувствительности, в шесть раз меньшей, чем у пленки «Изопанхром Т-22». В дальнейшем эту пленку будем называть пленкой № 2, «Изопанхром Т-22» — пленкой № 1.

Как было отмечено выше, тщательный учет погрешностей, необходимый при решении задачи оптимизации условий съемки, приобретает особую важность при апостериорной обработке изображений. Это обусловлено известной некорректностью задачи восстановления, при которой малым погрешностям в зарегистрированном изображении могут соответствовать сколь угодно большие погрешности результата восстановления. Наличие даже слабой неучтенной нелинейности приводит к искажению фурье-спектра зарегистрированного изображения, в частности к перераспределению энергии в спектре и к появлению спектральных составляющих вне частотной области исходного сигнала. Поэтому процесс восстановления, заключающийся в коррекции высших пространственных частот изображения, может рассматриваться как весьма чувствительный тест правильности выбора параметров съемки.

Линейную фильтрацию изображений выполняли на когерентно-оптическом вычислителе Харьковской астрономической обсерватории [2]. Применение когерентно-оптической техники практически не ограничивает общности полученных результатов.

Для проведения модельных экспериментов по фильтрации изображений, зарегистрированных на реальных фотоматериалах, в качестве объекта использовали тест-таблицу с рядами простых геометрических символов размерами от 0,15 до 1,5 мм и контрастом 0,28. Объектив, формирующий изображение таблицы с пятикратным уменьшением, обеспечивает практически дифракционное разрешение при относительном отверстии  $1/12$ .

Ставили задачу подобрать такие предельно малые искажения оптической передаточной функции (ОПФ) объектива, устранение которых в зарегистрированном на реальную пленку изображении даст заметный эффект улучшения дешифрируемости тест-объекта. При выборе характера искажений мы руководствовались также требованием получить заданную ОПФ путем диафрагмирования объектива, при котором оставалась открытой узкая кольцевая зона. Ширина кольцевой зоны была выбрана такой, что на частотах от  $30 \text{ мм}^{-1}$  и вплоть до граничной частоты коэффициент передачи модуляции составлял около 10% от значения на нулевой частоте. Такое подавление высших пространственных частот можно считать типичным для характерных условий аэрофотосъемки (например, первый боковой лепесток ОПФ при смазе или дефокусировке составляет 10%). Радиальный разрез реализованной ОПФ приведен на рис. 2 (кривая 1). Отсутствие фазовой составляющей в выбранной ОПФ не меняет содержательной части полученных результатов, так как основная закономерности апостериорной обработки отчетливо прослеживаются при проведении чисто амплитудной фильтрации.

Ниже при анализе полученных результатов будет использоваться частотная терминология, которая обозначает следующее: для символов вида «две черты», «четыре точки» кратчайшее расстояние в миллиметрах от границы одной черты (точки) до аналогичной границы соседней черты (точки) соответствует частоте  $\nu$  ( $\text{мм}^{-1}$ ).

При подготовке исходного сигнала для ввода в когерентно-оптический процессор тщательно соблюдали требования линейности амплитудного коэффициента пропускания транспаранта относительно распределения интенсив-

ности в выходной плоскости оптической изображающей системы. Окончательный контроль достигнутой линейности осуществляли по фурье-спектрам скрещенных амплитудных решеток. На первичный негатив впечатывали дважды с произвольным поворотом изображения одномерных амплитудных решеток. При идеальной линейности в спектре таких решеток должны возникать лишь основные дифракционные максимумы, располагающиеся перпендикулярно направлению штрихов. При нелинейности в спектре возникают перекрестные максимумы, по энергии которых можно судить о величине нелинейности. На рис. 3 и 4 приведены фурье-спектры таких решеток при заметной (рис. 3) и слабой (рис. 4) нелинейности.

Простейшим видом обработки является инверсная линейная фильтрация, которая может оказаться эффективной, когда отношение сигнал/шум велико во всей используемой полосе частот. На рис. 5 приведен радиальный фотометрический разрез примененного инверсного фильтра, по оси ординат отложен амплитудный коэффициент пропускания. При заданном законе фильтрации коэффициент пропускания фильтра на нулевой частоте определяется граничной частотой, до которой следует вести фильтрацию. Для обрабатываемых изображений не имело смысла проводить спектральную коррекцию на частотах выше  $40 \text{ мм}^{-1}$ . Это определило коэффициент пропускания фильтра на нулевой частоте равным 0,18. Вид результирующей ОПФ, реализованной с этим фильтром, приведен на рис. 2 (кривая 2). Заметим, что с идеальным инверсным фильтром мы получили бы прямоугольную полосу с частотой среза, определяемой размером спектрального окна системы обработки ( $\sim 100 \text{ мм}^{-1}$ ).

Была выполнена также инверсная фильтрация с использованием различных аподизирующих фильтров, что преследовало цель уменьшить влияние шума в отфильтрованном изображении. В частности, один из фильтров на высших пространственных частотах представлял собой позитив спектра обрабатываемого изображения. При этом можно было рассчитывать на избирательное подавление спектра шума зерна.

Наилучшего результата как с точки зрения коррекции ОПФ, так и с точки зрения учета отношения сигнал/шум на различных частотах можно было ожидать от линейного фильтра, уравнивающего энергетические спектры (УЭС-фильтр). Отметим, что в Харьковской астрономической обсерватории фильтр такого типа был применен в 1974 г. при обработке космических панорам Марса и Венеры [3]. Фильтр описывается выражением

$$W(\omega) = \left[ \frac{s^2(\omega)}{g^2(\omega)s^2(\omega) + \gamma^2(\omega)} \right]^{1/2},$$

где  $g(\omega)$  — ОПФ системы, сформировавшей изображение;  $s^2(\omega)$  и  $\gamma^2(\omega)$  — спектральные плотности сигнала и шума соответственно.

От известного винеровского фильтра УЭС-фильтр отличается показателем степени. Наш опыт, а также известные попытки применения к оптическим изображениям винеровского фильтра заставляют нас относиться к последнему с осторожностью. Известно, что винеровский фильтр обеспечивает минимум квадрата ошибки при наличии аддитивной, не зависящей от сигнала помехи, т. е. при условиях, которые заведомо не выполняются для оптического изображения. Недостатком винеровского фильтра является резкое отсекание пространственных частот, на которых отношение сигнал/шум заметно меньше единицы. Это приводит к появлению осцилляций, особенно заметных вблизи контрастных деталей и на границе кадра. Резкому отсеканию подвергается высокочастотная часть спектра сигнала, где, как было отмечено выше, сосредоточен сигнал, передаваемый шумовыми несущими. Устранение шумовых несущих приводит к возрастанию части шума, не скоррелированного с сигналом, переданным на нулевой несущей, что вызывает укрупнение структуры шума. От УЭС-фильтра естественно ожидать более мягкого воздействия на изображение.

Еще на этапе подготовки материала к фильтрации было очевидно, что обработка одиночного изображения не даст хороших результатов. Шумовые свойства выбранной пленки таковы, что заметные искажения символов наблюдаются уже для размеров  $\sim 0,1 \text{ мм}$  (рис. 6, нижний ряд). Результат фильтрации таких изображений очевиден: искажения могут только усилиться, при этом

Рис. 2. Оптическая передаточная функция исходная (1) и реализованная в результате фильтрации (2)

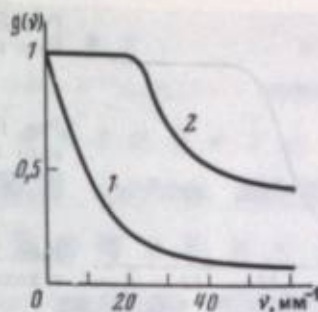


Рис. 3. Фурье-спектр решетки при заметной нелинейности процесса регистрации

Рис. 4. Фурье-спектр решетки при слабой нелинейности процесса регистрации







блинк-компаратора и полученное изображение обработано инверсным фильтром. Результат приведен на рис. 9. В этом случае наблюдается повышение дешифрируемости изображения практически до уровня контрольного (см. рис. 6). Результат усреднения серии отфильтрованных изображений практически аналогичен предыдущему. Линейная фильтрация семи контрольных изображений, полученных с полностью открытым объективом, после их усреднения также дала повышение дешифрируемости. Читаемость тест-таблицы оказалась почти такой же, как изображения, снятого на пленку «Микрат-300».

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ АЭРОФОТОПЛЕНОК

Описанные выше эксперименты по улучшению дешифрируемости изображений, зарегистрированных на аэрофотопленке № 2, обладающей разрешением  $250 \text{ мм}^{-1}$ , позволили сделать следующий вывод: коррекция спектральной полосы одиночного изображения с типичным для аэрофотосъемки контрастом  $K = 0,3$  неэффективна за пределами  $\nu = 25-30 \text{ мм}^{-1}$ . Попытаемся дать объяснение этому факту, основываясь на приведенных рассуждениях и полученных оценках информационных характеристик пленки.

Важнейшим параметром аэрофотосъемки является плотность упаковки информации, записываемой на фотографический носитель [4]. Обычно требуется обеспечить при заданных условиях съемки максимальное угловое разрешение при максимально возможном количестве информации, регистрируемой на пленку. Формально информационная емкость кадра описывается выражением

$$Q = N \lg_2 m,$$

где  $N$  — число независимых точек отсчета;  $m$  — число различных градаций в изображении объекта. Расстояние между независимыми точками отсчета определяется характерным размером изображения точки. Величина  $m$  определяется среднеквадратичной погрешностью измерения яркости в изображении и динамическим диапазоном фотоматериала.

Информационная емкость  $Q$  из-за трудностей учета нелинейности фотопроекции не находит широкого применения при практических расчетах, связанных с оптимизацией процесса съемки. В аэрофотосъемке, как и вообще в фотографии, вместо объективно измеряемой информационной емкости традиционно используют одну из простейших психофизических оценок, называемую разрешающей способностью. Разрешающая способность определяется частотой самых мелких различаемых глазом групп линий заданного тест-объекта, т. е. характеризует наивысшую пространственную частоту, которая может быть зарегистрирована пленкой. Отметим, что разрешающая способность, определяемая по мирам абсолютного контраста, дает существенно заниженные значения расстояния между независимыми точками отсчета.

Пренебрегая зависимостью  $\lg_2 m$  от типа пленки, для грубых оценок можно считать, что квадрат отношения разрешающих способностей пленок равен отношению их информационных емкостей. Другой характеристикой фотоэмульсии является ее чувствительность, которая определяется величиной светового потока, способного за время экспозиции вызвать заданную плотность почернения фотослоя. Если при переходе к более высокоразрешающей пленке увеличение разрешающей способности в  $n$  раз влечет за собой потерю чувствительности не более чем в  $n^2$  раз, согласование по энергетике путем соответствующего уменьшения фокусного расстояния увеличивает плотность упаковки информации в  $n^2$  раз. Выполнение этого соотношения не означает сохранения отношения сигнал/шум для деталей заданного углового размера зарегистрированного изображения. Для более точной оценки изменения информационной емкости необходим учет квантовой эффективности детектирования.

Исследованные нами пленки достаточно хорошо удовлетворяют отмеченному выше соотношению между разрешением и чувствительностью. Пленка

№ 1 (аэрофотопленка «Изопанхром Т-22») характеризуется чувствительностью, в 6—7 раз более высокой, чем пленка № 2, имеющая разрешение  $250 \text{ мм}^{-1}$ . Пленка № 3 с разрешением  $400 \text{ мм}^{-1}$  имеет чувствительность, в 10 раз более низкую, чем пленка № 1. Заметим, что пленки других типов этому соотношению не удовлетворяют. Например, пленка «Микрат-300», имеющая разрешение, сравнимое с аэрофотопленкой № 2, обладает в 20 раз более низкой чувствительностью.

Согласно приведенным данным, при переходе от пленки № 1 к пленке № 2 уменьшение масштаба съемки в 2,5 раза должно оставить без изменения дешифрируемость символов описанной выше тест-таблицы. Однако оказалось, что даже при двукратном уменьшении масштаба съемки пленка № 2 не смогла обеспечить той дешифрируемости символов, которая была получена с пленкой № 1. Это обозначает, что реальная информационная емкость пленки № 2 оказалась значительно ниже, чем это следует из соотношения разрешающих способностей пленок № 1 и 2.

На рис. 10 приведены зависимости значений квантовой эффективности от плотности почернения для пленок № 1—3. Величину квантовой эффективности детектирования определяли из выражения

$$\xi = (\Delta D / \sigma_D)^2 N / (\Delta N)^2,$$

где  $\Delta D$  — приращение плотности, вызванное сигналом  $\Delta N$ ;  $N$  — световой поток, выраженный числом фотонов, приходящихся на измеряемую площадку  $S$ ;  $\sigma_D$  — флуктуации плотности, измеренные с заданным размером элемента считывания. Для измерений  $\xi$  на исследуемую пленку впечатывали два поля с известным соотношением интенсивностей, абсолютную энергетическую привязку выполняли по астрономическим стандартам.

Величина  $\xi$  определяет шумовые свойства фотоматериала и непосредственно связана с дешифрируемостью малоконтрастных деталей объекта съемки. Учет полуторакратного уменьшения величины  $\xi$  у пленки № 2 по сравнению с пленкой № 1 объясняет соотношение их реальных информационных емкостей, оцененное по снимкам малоконтрастного тест-объекта.

На рис. 6 приведен фрагмент тест-объекта с двумерными символами контраста 0,28, снятого на пленку № 2 объективом с граничной частотой  $125 \text{ мм}^{-1}$ . Наименьшие из приводимых символов имеют размер  $1/15 \text{ мм}$ . Отчетливо видны искажения, заметные уже для самых крупных символов приведенного фрагмента. Причину столь низкого для высокоразрешающей пленки отношения сигнал/шум при детектировании сравнительно крупных символов может объяснить рис. 11, на котором приведена зависимость величины среднеквадратичной флуктуации плотности  $\sigma_D$  от размера площадки  $1/\sqrt{S}$ . В то время как для пленки № 1 величина  $\sigma_D$  пропорциональна  $1/\sqrt{S}$  вплоть до  $17 \text{ мм}^{-1}$ , как и должно быть при пуассоновском шуме, пленка № 2 обнаруживает аномально высокие значения  $\sigma_D$  уже для размеров площадки  $1/30 \text{ мм}$ . Отчасти это может объясняться неизбежным для такой высокоразрешающей пленки возрастанием относительного вклада дефектов основы и подложки, почти незаметных для более грубой пленки № 1. Отсутствие фотометрической однородности пленки, более грубой пленки № 1. Отсутствие фотометрической однородности пленки, соответствующее аномально высокой погрешности на нижних пространственных частотах, полностью объясняет сделанный в предыдущем разделе вывод о невозможности коррекции спектральной полосы одиночного изображения за пределами  $25-30 \text{ мм}^{-1}$ .

Все изложенное отражает способность фотоэмульсии к регистрации сигнала в присутствии шума в предположении, что оптика обладает разрешением, значительно превосходящим разрешение эмульсии. Реальная оптика, снижая контраст передачи малых деталей, уменьшает их детектируемость фотоэмульсией. Рис. 12 демонстрирует роль оптики в снижении реального разрешения пленки № 2. Точки пересечения кривых 5 и 6 с оптическими передаточными функциями определяют предельное разрешение, которое может быть получено на пленках № 2 и 3 с данным объективом при заданном контрасте исходного

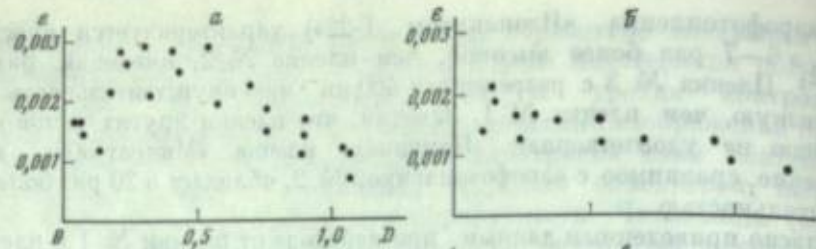


Рис. 10. Зависимость квантовой эффективности детектирования от плотности почернения для пленок № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в)

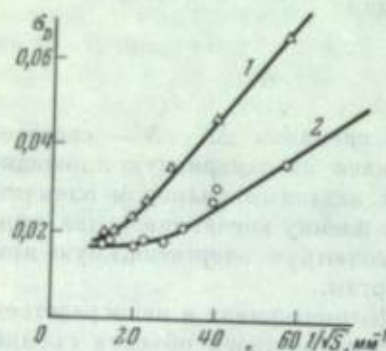
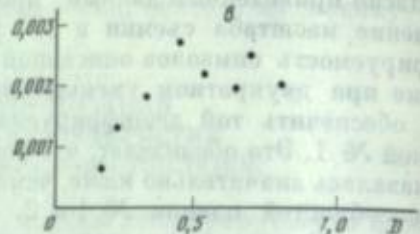


Рис. 11. Зависимость среднеквадратичной флуктуации плотности  $\sigma_D$  от размеров элемента считывания  $1/\sqrt{S}$   
1 — пленка № 1; 2 — № 2

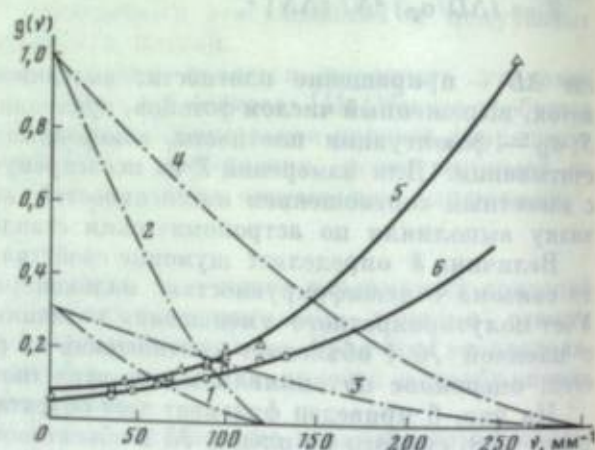
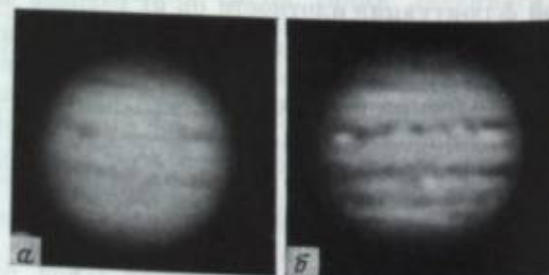


Рис. 12. Роль оптики в предельном разрешении пленок № 2 и 3  
1 — ОПФ дифракционного объектива при  $d/f = 1/12$ ,  $K = 0,3$ ; 2 — при  $d/f = 1/5$ ,  $K = 0,3$ ; 3 — при  $d/f = 1/12$ ,  $K = 1$ ; 4 — при  $d/f = 1/5$ ,  $K = 1$ ; 5 — кривая порогового контраста пленки № 2; 6 — пленка № 3

Рис. 13. Результат линейной фильтрации изображения Юпитера

а — исходное изображение;  
б — результат обработки



изображения. Из рисунка следует, что от пленки № 2 нет оснований ожидать способности регистрировать информацию за пределами полосы выше  $90 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте объекта 0,3 и использовании идеального дифракционного объектива с отношением  $d/f = 1/5$ . Для дифракционно ограниченного объектива с отношением  $d/f = 1/12$  предельная частота при контрасте объекта 0,3 составляет  $60 \text{ мм}^{-1}$ . Наличие неизбежных aberrаций оптики может привести только к снижению предельного разрешения.

Проведенные исследования позволяют говорить о не вполне исчерпанном резерве в использовании современных фотоматериалов при решении прямых

задач оптимизации условий аэрофотосъемки. При регистрации обычных для аэрофотосъемки малых слабоконтрастных деталей высокая разрешающая способность современных фотоматериалов не реализуется. Устранение низкочастотного шума должно привести к повышению величины квантовой эффективности детектирования, а следовательно, при прочих неизменных условиях — к улучшению воспроизведения малых деталей. Дополнительный резерв повышения информационного содержания аэрофотоснимков связан с улучшением параметров объективов, что наглядно демонстрирует рис. 12. Как видно из этого рисунка, повышения дешифрируемости можно достичь с помощью оптических систем, ОПФ которых не обнаруживает заметного спада на нижних и средних пространственных частотах.

Критерием выбора условий съемки может служить величина отношения сигнал/шум в изображении деталей тех угловых размеров, которые представляют интерес при съемке. При заданном световом потоке на элемент разрешения это отношение при правильном выборе условий съемки достигает максимума для всех допустимых соотношений чувствительности и масштаба и определяется частотно-контрастной характеристикой пленки и величиной квантовой эффективности детектирования. При этом контраст деталей может оказаться ниже пороговой чувствительности глаза. В этом случае, как и при необходимости фазовой коррекции ЧКХ объектива, требуется апостериорная обработка, состоящая в усилении тех пространственных частот, на которых отношение сигнал/шум больше единицы. Однако следует помнить, что к апостериорной обработке необходимо прибегать только в случае, когда исчерпаны все возможности получения изображения требуемого качества. Техника сбора исходной информации при этом должна быть согласована с целью и алгоритмом апостериорной обработки. При идеальной оптике оптимизация условий съемки исключает необходимость в апостериорной обработке.

В наблюдательной астрономии увеличение проникающей способности телескопа достигается путем перехода к менее чувствительному материалу при неизменном значении квантовой эффективности [5]. В аэрофотосъемке, а иногда и в астрономии такой путь неприемлем прежде всего из-за достаточно жестких ограничений по экспозиции. Кроме того, возможности разработки фотоматериалов, сохраняющих при изменении чувствительности неизменным эквивалентный квантовый выход, не безграничны. Выходом может быть регистрация серии изображений одного и того же объекта с последующим усреднением по реализациям. Легко видеть, что такой путь эквивалентен увеличению освещенности объекта. При этом апостериорная обработка, состоящая в суммировании изображений с их последующей фильтрацией, может дать заметный выигрыш в разрешении.

При решении задачи повышения дешифрируемости мы исходили из очевидного факта, что изображение, полученное с дифракционным разрешением идеального объектива на идеальном панорамном приемнике, не нуждается в апостериорной обработке. Идеальным панорамным приемником мы называем фотослой, который при регистрации не изменяет координат отдельных фотонных событий, при этом квантовая эффективность фотослоя может быть меньше единицы. На месте каждого поглощенного кванта образуется зерно, размер которого существенно меньше дифракционного разрешения объектива.

Для реальных снимков задача апостериорного повышения дешифрируемости имеет практический смысл в двух случаях:

- 1) яркость объекта недостаточна, дешифрируемость не может быть улучшена увеличением фокусного расстояния объектива;
- 2) имеется естественный предел по угловому разрешению, обусловленный условиями съемки. Этот случай типичен при съемке астрономических объектов, когда имеется предел по угловому разрешению, обусловленный наличием турбулентной атмосферы. При аэрофотосъемке это имеет место для очень светлой оптики, когда не удается скорректировать остаточные aberrации, а также при наличии неустраняемого смаза.

Мы исключаем из рассмотрения ситуацию, когда изображение, первоначально не предназначавшееся для апостериорной обработки, в процессе съемки было испорчено какими-либо непредвиденными факторами.

Повышение дешифрируемости аэрофотоизображений в методическом плане может обозначать решение двух, по существу, различных задач. Первая из них сводится к исправлению передаточной характеристики пленки, вторая — к исправлению передаточной функции оптической системы. Решение первой задачи в силу нелинейности фотографического процесса не сводится к исправлению ЧКХ пленки с помощью линейной фильтрации. Задача может быть сведена к перекодированию полученного изображения так, чтобы изображение стало эквивалентным записанному на идеальном фотографическом носителе. Когерентно-оптическая техника позволяет выполнить такую процедуру, однако вопрос о целесообразности такого перекодирования в настоящее время остается открытым. Постановка второй задачи правомерна лишь тогда, когда исключена необходимость решения первой, т. е., в сущности, когда выбор первичного фотоматериала произведен с учетом заранее планируемой апостериорной обработки. В этом случае задача состоит в устранении функциональной нелинейности фотопроцесса и построении оптимального линейного фильтра, улучшающего дешифрируемость снимка. Выбор фильтра осуществляется на основе изучения статистических свойств погрешностей считывания, включая погрешности, связанные с остаточной нелинейностью фотопроцесса.

Проведенные в работе исследования информационных характеристик современных аэрофотоэмульсий позволяют сделать следующие выводы.

1. Эффективность использования квантов света для аэрофотоэмульсии № 2 заметно ниже, чем для пленки «Изопанхром Т-22». Ограничения дешифрируемости снимка в основном обусловлены аномально высоким значением шума на низких и средних ( $\sim 30 \text{ мм}^{-1}$ ) пространственных частотах, что объясняется низкой фотометрической однородностью пленки.

2. Устранение низкочастотного шума должно привести к повышению величины квантовой эффективности детектирования, а, следовательно, при прочих неизменных условиях — к улучшению воспроизведения малых слабоконтрастных деталей, характерных для аэрофотосъемки. Того же результата, по крайней мере в принципе, можно достигнуть путем разработки оптики с максимально возможным коэффициентом передачи модуляции в области низких и средних пространственных частот.

3. Выбор оптимальных условий съемки должен производиться на основе критерия максимума отношения сигнал/шум в зарегистрированном изображении. При заданном количестве энергии, приходящемся на элемент разрешения, это достигается соответствующим выбором чувствительности и разрешения пленки и определяется ее квантовой эффективностью. Максимальное отношение сигнал/шум на всех представляющих интерес пространственных частотах не гарантирует, однако, получения требуемой дешифрируемости снимка. Может, например, возникнуть необходимость либо скорректировать фазовые искажения, либо усилить до необходимого уровня контраст изображения на частотах, где отношение сигнал/шум больше единицы. При этом следует помнить, что ввиду чрезвычайно жестких требований к сбору первичной информации, предъявляемых апостериорной обработкой, к ней следует прибегать лишь в случае, когда получение изображения требуемого качества принципиально невозможно.

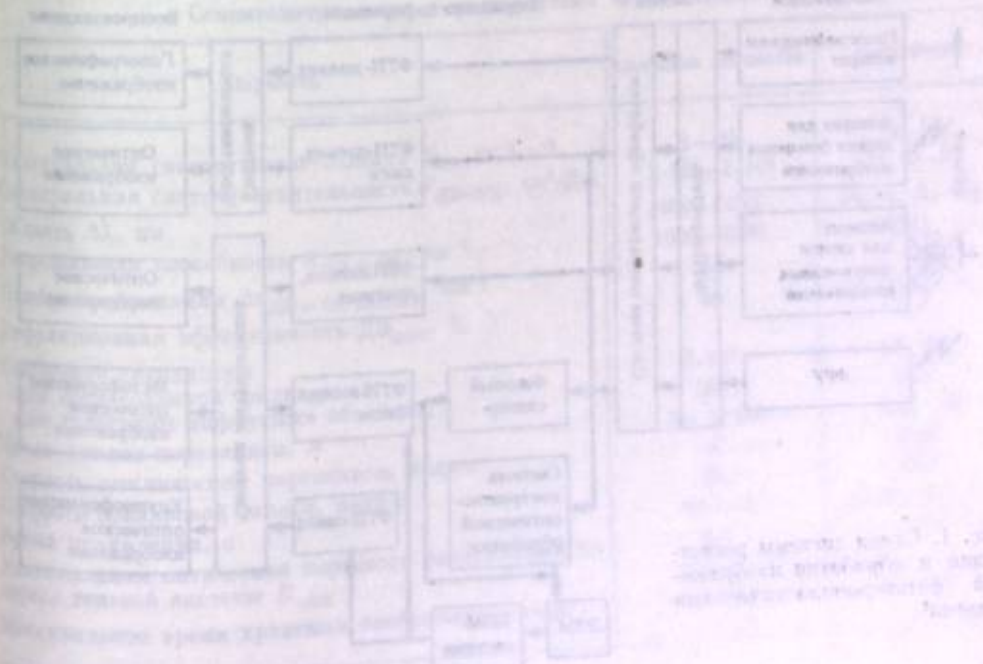
4. Невозможность повышения дешифрируемости при обработке одиночного изображения формально можно отнести к случаю, когда яркость объекта недостаточна. Поскольку в этом случае нельзя увеличить масштаб съемки или серии кадров с последующим наложением и фильтрацией.

5. Следует помнить, что, несмотря на требование высокой контрастной чувствительности при съемке малоконтрастных объектов, при апостериорной обработке увеличение контраста первичного носителя  $> 2$  вызывает значительные технические трудности. Общепринятая в аэрофотосъемке технология проявления и применение эмульсий с выраженными микроэффектами проявления существенно ограничивают возможности апостериорной обработки.

6. Несмотря на целый ряд технических трудностей, мы не видим принципиальных причин невозможности применения апостериорных методов повышения дешифрируемости к реальным аэрофотоизображениям. На рис. 13 приведен результат когерентно-оптической обработки изображения Юпитера, демонстрирующий двукратное увеличение пространственного разрешения. Изображения были зарегистрированы на пленку «Изопанхром Т-22» в 40-метровом фокусе семидесятисантиметрового телескопа. По сравнению с аэрофотосъемкой дополнительная трудность обработки астрономических изображений заключается в случайном характере аппаратной функции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jones R. C. — Photogr. Sci. Eng., 1958, vol. 2, p. 57.
2. Дудинов В. Н., Цветкова В. С., Кришталь В. А., Гуренко А. Н., Шпилинский Л. Ф. — Вести. Харьк. ун-та, 1977, № 160, с. 65—76.
3. Дудинов В. Н., Цветкова В. С., Кришталь В. А., Стадников Н. П., Шпилинский Л. Ф. — Вести. Харьк. ун-та, 1977, № 160, с. 76—86.
4. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации / Пер. под ред. К. В. Вендровского. М.: Мир, 1978. 670 с.
5. Marchant J. C., Millikan A. G. — J. Opt. Soc. Amer., 1965, vol. 55, N 8, p. 907—911.



Ю. А. Черкасов

УДК 772.822.4

## ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И ПРОБЛЕМЫ ИКОНИКИ

Фототермопластический (ФТП) процесс основан на использовании беззернистых сред со значительным усилением изображения и соответственно высокой светочувствительностью с быстрой сухой обработкой. Поэтому его разработка принципиально позволяет решить актуальные проблемы иконоки [1] — проблему оперативной регистрации и проблему оперативной обработки изображений [2]. Настоящая работа посвящена анализу возможных путей их решения. Здесь не будут рассматриваться общие принципиальные ограничения характеристик этапа записи и считывания информации (проанализированные ранее Алфимовым и Назаровым [3]), обусловленные квантостатистической и волновой природой света.

### ОБЩАЯ СХЕМА ОПЕРАТИВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

Регистрация и обработка изображений фотографическими средствами подразумевают применение оптического и голографического методов регистрации и методов когерентно-оптической или цифровой обработки. Структурная модель процесса оперативной регистрации — обработки изображений ФТП-средами представлена на рис. 1 и отражает наиболее существенные стороны процесса регистрации — обработки как системы материальных объектов и существующих между ними связей, которые обусловлены спецификой преобразования изображений.

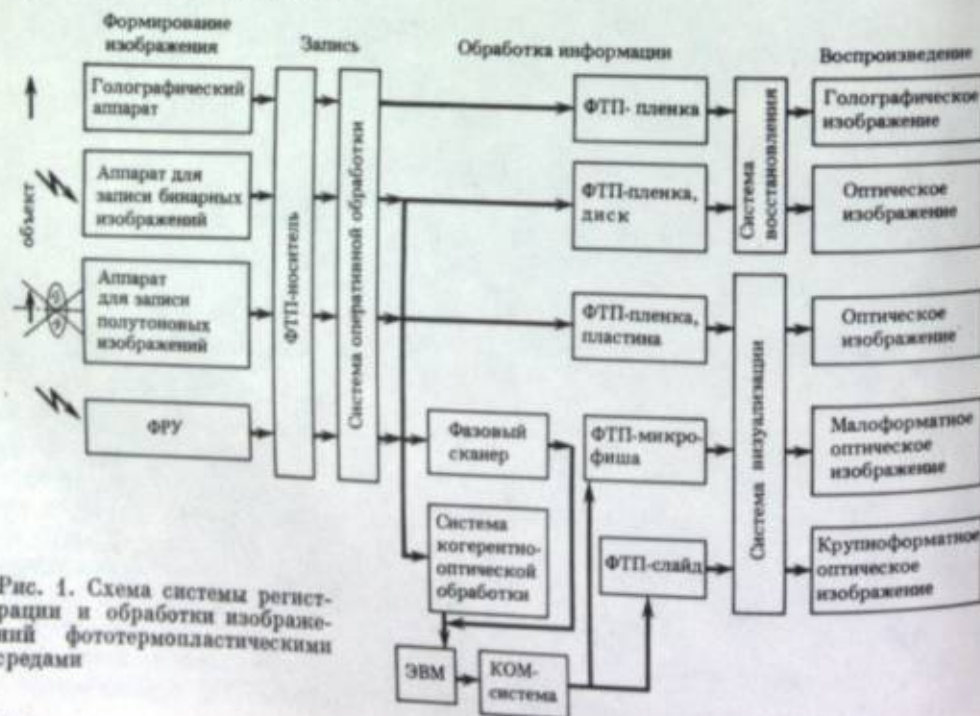


Рис. 1. Схема системы регистрации и обработки изображений фототермопластическими средствами

При анализе процесса с помощью структурной модели от стадии формирования регистрируемого изображения до стадии воспроизведения зарегистрированного изображения следует различать четыре основных стадии. На первой — формируется голографическое поле объекта или его оптическое изображение, являющееся формой представления информации [2]. Регистрации подлежат бинарные изображения, полутоновые изображения, получаемые при двумерной (покадровой), одномерной (целевой) или поэлементной (с использованием сканирующих фоторегистрирующих устройств — ФРУ) записи. На второй стадии в результате взаимодействия изображения с регистрирующей средой осуществляется запись изображения (или голографического поля). Третьей стадией является обработка информации, осуществляемая с применением системы когерентно-оптической и цифровой обработки с поэлементным вводом информации фазовым сканером в ЭВМ и выводом информации в виде микроформ (КОМ-система). Этап обработки завершается записью информации на носители различной формы (ФТП-пленка, пластинка, диск, микрофнша, слайд). Четвертой стадией является воспроизведение оптического или голографического изображения.

Перспективность создания и применения новых типов ФТП-носителей в значительной степени зависит от возможности осуществления всех этапов процесса регистрации — обработки при решении конкретных задач. Рассмотрим возможности построения системы оперативной регистрации и обработки изображений ФТП-средами, ее преимущества и недостатки по сравнению с другими оперативными средствами.

### СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ, ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНОЙ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ СРЕД

Достигнутые к настоящему времени характеристики ФТП-носителей для регистрации оптических изображений и голограмм приведены в табл. 1. Как видно, для ФТП-носителей характерны высокие параметры по разрешающей способности  $R$  при высокой светочувствительности  $S$ , широкой области светочувствительности, числу циклов перезаписи и отношению сигнала к шуму (ОСШ). Однако следует заметить, что указанные характеристики достигнуты для различных вариантов процесса. Поэтому разработка ФТП-носителей должна осуществляться для конкретных задач, ибо только в этом случае возможна оптимизация сенситометрических характеристик.

Таблица 1

#### Сенситометрические характеристики ФТП-материалов

Параметр	Значение параметра	Литература
Интегральная светочувствительность $S_{0,2}$ лк <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>	1—20	[4, 5]
Спектральная светочувствительность $S_{DЭ=1\%}$ см <sup>2</sup> /Дж	$2 \cdot 10^7$ — $1 \cdot 10^4$	[4, 6—9]
Область $\Delta\lambda$ , нм	400—1150	[4, 6, 9, 10]
Разрешающая способность $R_{DЭ=1\%}$ мм <sup>-1</sup>	1000—4000	[11]
Полоса пропускания $\Delta\nu_{DЭ=0,5}$ ДЭ <sub>max</sub> мм <sup>-1</sup>	500	[8]
Дифракционная эффективность $DЭ_{max}$ %	40	[11]
Отношение сигнал/шум для согласованной фильтрации для голограмм диффузных объектов	$2 \cdot 10^4$	[8, 12]
Число циклов перезаписи, $N$	200	[13]
Скорость циклической перезаписи, кадр/с	До 80 000	[14, 15]
Скорость покадровой записи, кадр/с	4	[16]
Время проявления, с	25	[17]
Максимальная оптическая плотность изображения на экране теневой системы $D_{max}$	$10^{-4}$ —1	[4, 18, 19—21]
Максимальное время хранения изображения, годы	2,0	[22]
	>10	[22]

Основные сенситометрические характеристики некоторых ФТП-материалов для оперативной записи оптических изображений и голограмм

Материал	Параметры
ФТП-пластина «Изопанхром», тип 3 [4]	$S_{0,2} = 20 + 30 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ; $S_{\text{ДЭ}} = 1\% = 10^7 \text{ см}^2/\text{Дж}$ ; $\Delta\lambda = 400 + 750 \text{ нм}$ ; $R = 400 + 500 \text{ мм}^{-1}$ ; $t_{\text{пр}} = 0,1 + 0,5 \text{ с}$
ФТП-пленка «Ортохром», тип 1 [5, 23]	$S_{0,2} = 0,3 + 1,5 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ; $R = 600 + 800 \text{ мм}^{-1}$ ; $N = 20 + 100$
ФТП-пленка «Панхром», тип 2 [5]	$S_{0,2} = 8 + 10 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ; $\Delta\lambda = 400 + 650 \text{ нм}$ ; $R = 400 + 500 \text{ мм}^{-1}$ ; $t_{\text{пр}} = 0,5 + 1 \text{ с}$
ФТП-пленка «Изопанхром», тип 1Г [23]	$S_{\text{ДЭ}} = 1\% = 10^6 \text{ см}^2/\text{Дж}$ ; $\Delta\lambda = 400 + 730 \text{ нм}$ ; $R = 600 + 800 \text{ мм}^{-1}$ ; $\text{ДЭ} = 20\%$ ; $T > 70\%$
ФТП-пленка ВУФ-1 [24]	$S_{0,2} = 10^6 + 10^7 \text{ см}^2/\text{Дж}$ ; $R = 600 + 800 \text{ мм}^{-1}$ ; $\Delta\lambda = 20 + 180 \text{ нм}$
ФТП-пленка ФТПН-АД [25]	$S = (2 + 5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Дж}$ ; $N = 100$
ФТП-пленка ФТПН-ЛВ (ЛО) [25]	$\text{ДЭ} = 5 + 10\%$ ; $R = 1000 \text{ мм}^{-1}$
ФТП-пленка «Калле-Хехст» АГ ПТ-1000 [20]	$S_{\text{ДЭ}} = 1\% \geq (1 + 5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Дж}$ ; $R = 1000 + 1500 \text{ мм}^{-1}$
ФТП-микрофили «Май-кросс-систем» [26]	$S_{0,2} = 0,1 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ; $R \approx 600 \text{ мм}^{-1}$ ; $N \approx 20 + 100$

Некоторые разработанные к настоящему времени типы носителей приведены в табл. 2. Они обеспечивают регистрацию оптических изображений и голограмм при времени сухой обработки 0,1–1 с в широком спектральном диапазоне при высоких сенситометрических характеристиках. В дополнение к данным, приведенным в табл. 1 и 2, отметим, что светочувствительность не снижается при уменьшении выдержки от 1 до  $10^{-2}$  с [27], так что при изменении экспозиции в пределах  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> дифракционная эффективность (ДЭ) может достигнуть 40%, а ДЭ = 1% достигается при экспозициях, диапазон изменения которых составляет  $10^5$  Дж/см<sup>2</sup> [11].

Светочувствительность высокоразрешающих ( $R > 4000 \text{ мм}^{-1}$ ) галогенсеребряных сред в области  $\lambda = 400 + 1000 \text{ нм}$  составляет  $10^3$ – $10^6 \text{ см}^2/\text{Дж}$  [28, 29]; для амплитудных голограмм ДЭ  $\approx 5\%$ , фазовых — 50% [28]; ОСШ при записи диффузных объектов для амплитудных голограмм — 200 [30]; для фазовых — 20 [28]. Для сегнетоэлектриков (в структуре типа ПРОМ) при  $\lambda = 441 \text{ нм}$   $S = 2 \cdot 10^5$ – $10^6 \text{ см}^2/\text{Дж}$ , при  $\lambda = 633 \text{ нм}$  светочувствительность в  $10^4$  раз ниже и составляет  $10^2 \text{ см}^2/\text{Дж}$ , максимальное значение разрешающей способности  $R \approx 320 \text{ мм}^{-1}$ , время хранения изображения не превышает 2 ч, скорость перезаписи информации до  $10^3$  кадр/с, число циклов перезаписи неограниченно [31]. Хотя ФТП-среды уступают галогенсеребряным по предельной разрешающей способности ( $4000$  по сравнению с  $10\,000 \text{ мм}^{-1}$ ), это не препятствует возможности их использования в большинстве практических задач как сред с обработкой в реальном масштабе времени [32].

Полосовая форма эффективной частотно-контрастной характеристики не только не снижает возможностей использования ФТП-сред при голографической регистрации, а, наоборот, расширяет их, позволяя снизить уровень межмодуляционных шумов [33]. Кроме того, диапазон частот регистрируемого сигнала в большинстве случаев не превышает  $500 \text{ мм}^{-1}$  (при регистрации оптических изображений полоса обычно  $0$ – $70 \text{ мм}^{-1}$ ). В случае необходимости ЧКХ фототермопластической среды может быть расширена с использованием метода параметрической модуляции [34], например нанесением ФТП-слоя на основу с синусоидальным рельефом. Такой недостаток ФТП-сред, как появление хаотических деформаций при проявлении, приводящее к увеличению уровня шума в изображении, можно устранить, по-видимому, практически пол-

ностью, используя определенной молекулярной структуры среду, например моводисперсные полимеры [35].

По сравнению с электрооптической фототермопластической средой в режиме циклической перезаписи обладает меньшей скоростью покадровой записи информации (4 кадр/с). Однако при покадровой съемке скорости сравнимы и достигают  $10^3$  кадр/с. Кроме того, на ФТП-среде в единицу времени может быть записан больший объем информации благодаря возможности применения крупноформатных носителей, например с размером кадра  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Большинство практических задач не требует более высоких скоростей записи.

К числу достоинств ФТП-сред по сравнению с электрооптическими следует отнести широкую область спектральной чувствительности и возможность неразрушающего считывания изображения, что позволяет использовать их для создания устройств ввода полихроматических некогерентных изображений в когерентно-оптические системы обработки изображений. Благодаря использованию при записи энергии всего спектрального диапазона такие системы намного чувствительнее, чем системы типа ПРОМ. В отличие от сегнетоэлектрических ФТП-среды допускают долговременное хранение зарегистрированных изображений (до нескольких лет) [32].

#### СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Воздействие света на ФТП-среду в сочетании с последующим нагреванием приводит к изменению комплексного показателя преломления  $\tilde{n} = n - ik$  ( $n$  — показатель преломления,  $k$  — коэффициент поглощения.) Как правило,  $\Delta n/n > \Delta k/k$  и регистрирующая среда является фазовой (или фазово-амплитудной). Изображение сформировано фазовыми деформациями, воспроизводящими картину экспонирующего светового сигнала. Качество воспроизведенного ФТП-средой зарегистрированного оптического изображения в значительной степени определяется шумами среды, нелинейными искажениями оптического изображения и отношением сигнал/шум.

Следует выделить три типа шумов ФТП-носителей: собственный случайный фазовый шум; шум ФТП-изображения, возникающий в процессе его получения на стадии электростатической зарядки, проявления и т. д.; межмодуляционный шум, обусловленный нелинейными искажениями изображения при регистрации.

Типичный спектр шума (дифракционный спектр мощности) ФТП-среды приведен на рис. 2. ФТП-среда характеризуется низкочастотным шумом, обусловленным фазовыми неоднородностями, величина которого спадает при переходе от частот, близких к нулевой, до  $100$ – $120 \text{ мм}^{-1}$  примерно в 500 раз. В связи с таким характером спектра шума следует рассмотреть, как он соотносится с оптической частотно-контрастной характеристикой той же среды, приведенной на том же рисунке [3]. ЧКХ определяется светорассеянием ФТП-носителя и имеет высокое значение в низкочастотной области спектра. Эффективная ЧКХ процесса будет зависеть от способов проявления и визуализации изображения. Значительный низкочастотный шум при высокой ЧКХ в этой области свидетельствует о возможности увеличения отношения сигнал/шум, например, методом оптической фильтрации.

Сильным источником шума является электростатическая зарядка [36], причем размеры области возмущения поверхностного потенциала слоя, определяющей размер возникающего дефекта, на порядок превышают размеры неоднородности, вызывающей это возмущение. Варьируя условия зарядки (скорость и ее время), можно оптимизировать динамический диапазон и область линейности для скрытого изображения. Процесс зарядки поверхности начинается при высокой скорости для поверхности и затем переходит в более медленный в объеме, поэтому распределение заряда, обеспечивающее достижение предельных параметров и соответствующее зарядке только поверхности, легко поддается контролю. Окончанию зарядки поверхности соответствует снижение скорости зарядки примерно до уровня 0,2 от максимальной.

Рассмотрение природы случайного шума и установление статистических характеристик шума, обусловленного гидродинамическими и электрическими флуктуациями и дефектами структуры материала, показали, что информационная емкость и информационная чувствительность ФТП-носителей ограничиваются спектральной плотностью шума хаотического рельефа как одного из основных источников шума [37—39]. Особенно высок уровень шума при записи в предельных электрических полях с получением хаотической луночной деформации [40, 41], что обусловлено прежде всего появлением под действием коронного разряда лунок в неосвещенных участках слоя [41].

Межмодуляционный шум возникает из-за собственной нелинейности, связанной с фазовым характером записи, и из-за нелинейности экспозиционной характеристики материала [42].

Случайный шум в ФТП-средах подобен гранулярному шуму в галогенсеребряных эмульсиях, но и существенно отличается от него. Хаотические (морозные) деформации имеют случайную ориентацию, но, так же как и регулярные деформации, обладают периодичностью [43—46]. Угловой спектр света, рассеянного на таких неоднородностях, имеет кольцевую структуру с максимумом, определяемым средней пространственной частотой. Обычно эта пространственная частота совпадает с частотой в максимуме эффективной ЧКХ. Поэтому при регулярной записи максимумы сигнала и шума морозной деформации будут наблюдаться на близких частотах. Это не означает, что отношение сигнал/шум не зависит от частоты. Термопластический случайный шум отличается от шума гранулярного тем, что хаотические (морозные) и регулярные деформации конкурируют между собой [44]. Если регулярные деформации велики, они стремятся подавить морозные, приводя к полному ослаблению шума и, следовательно, повышению ОСШ. Это отношение может быть также увеличено выбором рабочего потенциала, так как только для морозных деформаций существует пороговое значение потенциала, ниже которого они не появляются.

Такой подход не всегда приемлем для последовательного процесса, поскольку снижение рабочего потенциала приводит к понижению светочувствительности и, кроме того, деформации при малых плотностях заряда проявляются недостаточно быстро. В одновременном процессе усиление регулярных деформаций при малых плотностях заряда происходит более быстро, так что они успешно конкурируют с морозными деформациями до достижения порогового потенциала. Таким способом удается получить в одновременном ФТП-процессе фактически бесшумные голограммы [41].

Типичная зависимость ОСШ от контраста изображения приведена на рис. 3 [47]. Данные получены для синусоидальной решетки с пространственной частотой  $\sim 200 \text{ мм}^{-1}$ , причем условия измерения примерно такие же, как и при измерении среднеквадратичной гранулярности галогенсеребряных материалов (площадь измерительной апертуры  $400 \text{ мкм}^2$ ). Видно, что в соответствии с рис. 2 для данной пространственной частоты достигнуто  $\text{ОСШ} > 10^4$ , причем при контрасте изображения  $K \approx 10^{-3}$   $\text{ОСШ} > 2$ . Обращает на себя внимание значительная область линейной зависимости отношения сигнал/шум от контраста изображения.

Нелинейные искажения могут быть учтены для произвольного входного сигнала на всех этапах его передачи [37, 48—50]. Нелинейные искажения, обусловленные квадратичной зависимостью поля сил скрытого изображения от распределения плотности заряда в слое, даже при малых деформациях приводят к появлению в геометрическом рельефе поверхности, кроме основных гармоник пространственных частот, зарегистрированного изображения нелинейных членов удвоенных, суммарных и разностных частот [37]. Отношение межмодуляционной помехи к шуму в зависимости от степени нелинейности изменяется от практически нулевых значений до  $2 \cdot 10^3$  в области максимальной нелинейности [47].

Визуализация фототермопластического изображения основана на преобразовании фазового контраста в контраст интенсивностей. Разработанные в настоящее время методы визуализации фазовых изображений [51—55] не могут быть непосредственно использованы для высококачественной визуализации ФТП-

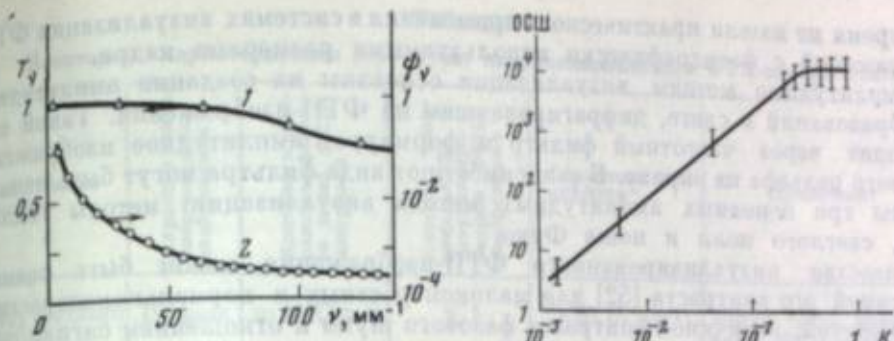


Рис. 2. Частотно-контрастная характеристика (1) и спектр шума (2) ФТП-носителя

Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от контраста регистрируемого на ФТП-носителе изображения синусоидальной решетки  $\nu \sim 200 \text{ мм}^{-1}$

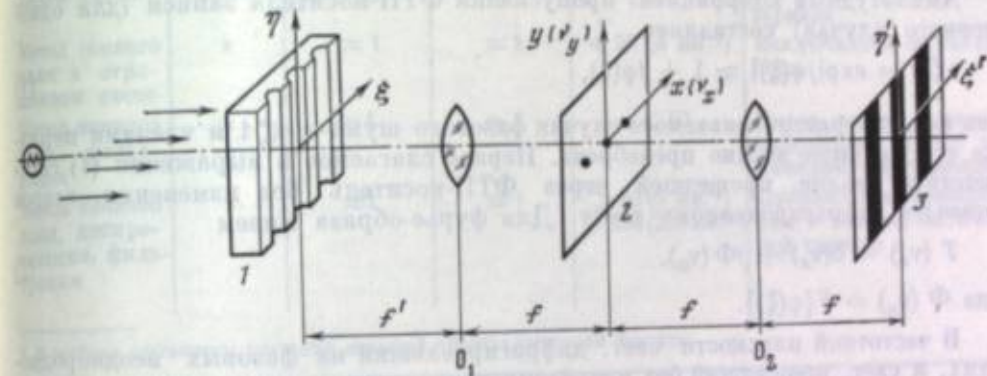


Рис. 4. Схема визуализации ФТП-изображения с получением оптического изображения прямого и обратного контраста

изображения без специального снижения характерного для ФТП-носителей низкочастотного шума. Оно может быть достигнуто, в частности, дополнительной оптической обработкой изображения в системе визуализации, использованием избыточности ФТП-носителей по разрешающей способности или детектированием амплитуд сигналов, превышающих уровень шума.

Схема визуализации показана на рис. 4. Фазовое ФТП-изображение (1) может быть описано функцией распределения комплексной амплитуды  $t(\xi, \eta)$ . Оно расположено в предметной плоскости фронта волны в плоскости визуализирующего устройства (2) формируется комплексный спектр фазового изображения [51, 53]  $T(v_x, v_y) = F\{t(\xi, \eta)\}$ , где  $v_x = x/\lambda f$ ;  $v_y = y/\lambda f$  — пространственные частоты;  $F$  — фурье-образ. Объектив  $O_2$  осуществляет обратное фурье-преобразование. В плоскости экрана (3), сопряженной с плоскостью предмета, точно до постоянного множителя восстанавливается исходное распределение комплексной амплитуды  $t(-\xi', -\eta')$ . Процесс визуализации состоит в оптической обработке изображения методом пространственной фильтрации при помощи фильтра пространственных частот визуализирующего устройства, установленного в частотной плоскости. В зависимости от характера визуализирующего устройства, преобразующего фазовую модуляцию в модуляцию интенсивностей, методы разделяются на две группы: фазовые и амплитудные.

Высокая чувствительность фазовых методов (Гильберта, фазового контраста Цернике, дефокусировки), достигающая по величине визуализируемой деформации ФТП-изображения  $0,1 \text{ нм}$  [56], для ФТП-носителей в настоящее время не может быть реализована не только из-за высокого уровня фазовых шумов ФТП-сред, но и из-за значительных трудностей при создании оптических систем с низким светорассеянием. Кроме того, реализация этих методов предъявляет высокие требования к когерентности освещения. Поэтому они в настоя-

Некоторые характеристики структуры визуализированного ФТП-изображения

Метод визуализации	Характер визуализированного изображения	Контраст в изображении фазового шума ФТП-материала	Контраст (максимальный) в визуализированном ФТП-изображении	Отношение сигнал/шум*	Примечание
Метод светлого поля	Прямое	$\approx \varphi^2(\xi) \approx 0$	$\approx 1$	$\geq 50$ ( $5 \text{ мм}^{-1}$ )	Могут быть использованы ФТП-материалы с достигнутым отношением сигнал/шум
Метод темного поля в проходящем свете	Обратное	$\approx 1$	$\approx 1$	$\leq 5$ ( $5 \text{ мм}^{-1}$ ) $\approx 200$ ( $200 \text{ мм}^{-1}$ )	Предъявляются высокие требования к фазовой однородности ФТП-материала
Метод темного поля в отраженном свете	"	$\approx 1$	$\approx 1$	$< 20$ ( $5 \text{ мм}^{-1}$ )	Исключаются шумы основы
Метод темного поля, фильтрация	"	$\approx 1$	$\approx 1$	$< 50$	Имеет место потеря информации за счет искажения изображения
Метод темного поля, дискретизация, фильтрация	"	$\approx 1$	$\approx 1$	$\geq 50$ ( $5 \text{ мм}^{-1}$ ) $\geq 200$ ( $200 \text{ мм}^{-1}$ )	Повышаются требования к тепловой оптической системе

\* В скобках приведены значения несущей пространственной частоты.

щее время не нашли практического применения в системах визуализации ФТП-изображений с фотографически используемыми размерами кадра.

Амплитудные методы визуализации основаны на создании амплитудных преобразований в свете, дифрагировавшем на ФТП-изображении. Такой свет проходит через частотный фильтр и формирует амплитудное изображение фазового рельефа на экране. В зависимости от вида фильтра могут быть использованы три основных амплитудных метода визуализации: методы темного поля, светлого поля и ножа Фуко.

Качество визуализированного ФТП-изображения может быть оценено величиной его контраста [52] для малоконтрастных и нормальноконтрастных изображений, величиной контраста фазового шума и отношением сигнал/шум.

Оценим контраст визуализированного изображения [52], а также шума и отношения сигнал/шум при различных методах визуализации. При оценке будем учитывать одинаковый характер частотного спектра типичных сигналов и шума, обусловленного фазовой неоднородностью регистрирующей среды.

Амплитудный коэффициент пропускания ФТП-носителя записи (для одномерного случая) составляет

$$t(\xi) = \exp[j\varphi(\xi)] \approx 1 + j\varphi(\xi), \quad (1)$$

так как для рассматриваемого случая фазового шума  $\varphi \ll 1$  и членами порядка  $\varphi^2(\xi)$  и выше можно пренебречь. Первое слагаемое в выражении (1) соответствует волне, прошедшей через ФТП-носитель без изменения, второе отвечает дифрагированному свету. Для фурье-образа имеем

$$T(v_x) = \delta(v_x) + j\Phi(v_x), \quad (2)$$

где  $\Phi(v_x) = F\{\varphi(\xi)\}$ .

В частотной плоскости свет, дифрагировавший на фазовых неоднородностях, и свет, прошедший без изменения направления, имеют разную угловую ориентацию, так как каждой пространственной частоте соответствует определенный угол дифракции.

Метод темного поля, при котором производится фильтрация нулевых пространственных частот, приводит к спектру вида

$$T'(v_x) = j\Phi(v_x).$$

Объектив  $O_2$  формирует на экране обратный фурье-образ преобразованного спектра, так что распределение комплексной амплитуды в отфильтрованном изображении имеет вид  $t'(\xi') = j\varphi(\xi')$ . Распределение интенсивности  $I(\xi')$  в визуализированном изображении равно

$$I'(\xi') = |\varphi(\xi)|^2. \quad (3)$$

Таким образом, если в отсутствие частотного фильтра распределение интенсивности на экране с учетом (1) составляет

$$I(\xi') = |\exp[j\varphi(\xi')]|^2 \equiv 1,$$

то, как видно из (3), его введение создает распределение интенсивности, нелинейно зависящее от фазовой неоднородности  $\varphi(\xi)$  ФТП-носителя. В случае отсутствия рассеянного света

$$K = (I_{\text{из}} - I_{\text{ф}})/I_{\text{из}} = [\varphi^2(\xi') - 0]/\varphi^2(\xi') = 1,$$

где  $I_{\text{ф}}$  и  $I_{\text{из}}$  — интенсивности фона и изображения шума.

Таким образом, при использовании метода темного поля фазовый шум ФТП-среды визуализируется с контрастом, равным единице. Хотя с таким же контрастом будут визуализироваться малые деформации ФТП-изображения, отношение сигнал/шум в оптическом изображении мало из-за значительного уровня низкочастотного шума (табл. 3). Разработанные к настоящему времени фототермопластические материалы повышенной чувствительности, особенно на лавсановой основе, не обеспечивают по этой причине требуемого качества изображения. Снижение уровня фазовых шумов лавсановой основы является сложной технологической задачей, и вряд ли в ближайшее время,

здесь можно ожидать успеха. В то же время при сохранении высокой чувствительности метода темного поля можно существенно увеличить ОСШ. Увеличение может быть достигнуто, во-первых, частотной фильтрацией шума в спектре изображения [57], во-вторых, переносом спектра изображения за область низкочастотного шума ФТП-материала методом дискретизации оптического изображения при записи с последующей частотной фильтрацией шума вне области сигнала [58] и, наконец, исключением фазовых шумов основы ФТП-материала путем визуализации ФТП-изображения в отраженном свете.

Исследование повышения отношения сигнал/шум частотной фильтрацией шума для штриховых изображений [57] показало, что эффективность фильтрации для весьма высока. При использовании несущей пространственной частоты  $50 \text{ мм}^{-1}$  и фильтрации всего света, кроме дифрагированного в первый порядок от регулярной фазовой структуры, ОСШ возрастает в 3—7 раз. При увеличении несущей частоты от  $50$  до  $200 \text{ мм}^{-1}$  ОСШ приблизительно экспоненциально возрастает.

Избыточность структурометрических характеристик ФТП-материалов по параметру разрешающей способности открывает новый путь увеличения отношения сигнал/шум, чему способствуют высокие значения частотно-контрастной характеристики и низкий уровень шума в области высоких пространственных частот для ФТП-изображений с упорядоченной структурой поля деформаций. Высокая частотная составляющая изображения может быть передана на собственных частотах ФТП-материала, а низкочастотная — на более высокой частотной частоте ФТП-материала, а низкочастотная — на более высокой частоте, полученной в результате оптической дискретизации изображения. Аддитивный шум при этом может быть отфильтрован без потери информации в изображении. Увеличение ОСШ достигается за счет избыточности, обусловленной высокой разрешающей способностью материала, и введения высокочастотного каскада в оптическую систему, т. е. примерно так, как это делается в радиотехнических системах с несущей частотой. Схема систем, обеспечивающих визуализацию фазового ФТП-изображения на частоте дискретизации с фильтрацией шумов, работающие в проходящем и отраженном свете, рассмотрены в работе [59].

серой шкалы 1,8 и разрешение  $\sim 300 \text{ мм}^{-1}$ . Вариант светлопольной системы, в котором вместо специальной визуализирующей диафрагмы используется виньетирование апертурой объектива, может быть применен для визуализации ФТП-изображений на читальных аппаратах и эпидиаскопах для амплитудных материалов [61] (с незначительным ухудшением качества изображения).

### ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Лазерная ФТП-фотография для записи и считывания изображений [62, 63] позволяет решить проблему создания систем оперативного управления информацией, включающую оперативную запись, хранение, обработку, считывание и воспроизведение оптических изображений. ФТП-процесс при сенситометрических характеристиках, превышающих характеристики серебро-содержащих материалов с сухим проявлением, бессеребряных электрофотографических сред высокого разрешения ( $600\text{--}1200 \text{ мм}^{-1}$ ) с миграцией изображения и с жидкостным проявлением тонером, позволяет производить обработку изображения за рекордно короткое время.

Рассмотрим возможность поэлементного считывания фототермопластического изображения. Фазовый характер ФТП-изображения не позволяет использовать известные методы поэлементного считывания, развитые для амплитудных изображений. Считывание визуализированного изображения апертурной диафрагмой энергетически невыгодно, поскольку требует увеличения мощности источника света, равного отношению площадей визуализированного участка изображения и апертурной диафрагмы и составляющего  $10^4\text{--}10^5$ . Встречает большие трудности (двулучепреломление, высокая точность совмещения) использование методов считывания, основанных на принципах волновой оптики, в частности интерференции в пятне малого размера.

Система элементного считывания (сканер) построена в отличие от систем интегральной визуализации на принципах геометрической оптики (явление преломления и отражения). Разработанный сканер [62, 63] предназначен для считывания рельефных ФТП-изображений и основан на использовании отклонения луча на рельефе поверхности как на гранях оптического клина. Угол отклонения зависит от угла наклона профиля рельефа. Измерительная система сканера при этом регистрирует только световые пучки, прошедшие через ФТП-изображение с изменением направления (аналог темнопольной системы), или, наоборот, пучки, прошедшие только без изменения направления (аналог светлого поля). Считанный сигнал пропорционален производной по координате от величины рельефа  $d\Delta(x)/dx$ , где  $\Delta(x)$  — распределение рельефа поверхности вдоль строки считывания, и описывает изменение рельефа поверхности. При восстановлении изображения функция  $\Delta(x)$  определяется однозначно с точностью до постоянной составляющей, которая может быть выбрана произвольно или по уровню среднего.

Оптическая схема сканера<sup>3</sup> приведена на рис. 7. Оптическая система 1 — 4 формирует в плоскости ФТП-материала (5) световое пятно диаметром 4 мкм. Считывание обеспечивается вращением оптических деталей 2—4 и 6—8. При этом световое пятно в плоскости ФТП-материала и плоскости входного торца световода 9 движется по дуге окружности с радиусом, равным расстоянию от оси вращения до оптической оси системы 4, 6, 8.

Максимальная скорость записи определяется тремя скоростями: предварительного электростатического очувствления, поэлементной записи информации и проявления. Наибольшую линейную скорость записи (до  $10^4 \text{ м/с}$ ) при  $R \approx 100 \text{ мм}^{-1}$  обеспечивает лазерная система записи. Скорость электростатического очувствления  $\sim 30 \text{ м/с}$ . Скорость проявления при малых габаритах проявляющего устройства (в частности, диаметр проявляющего вала 50 мм) составляет  $\sim 50 \text{ мм/с}$ , и именно она ограничивает время вывода информации [62, 63].

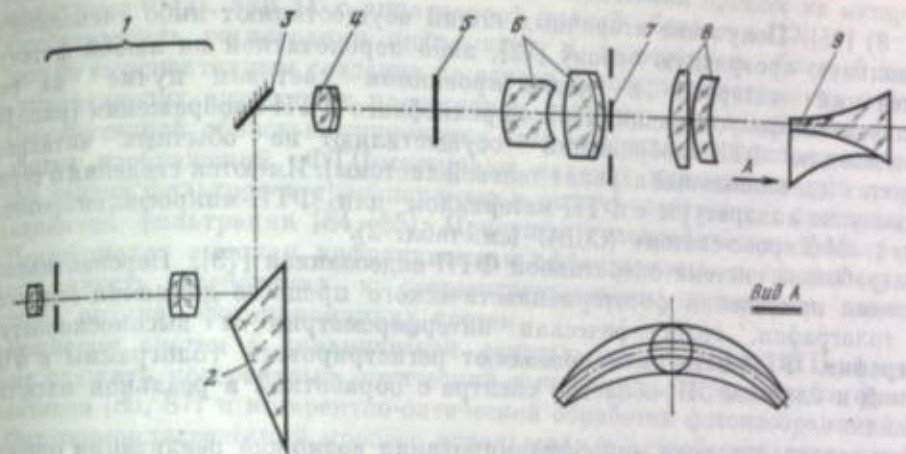


Рис. 7. Оптическая схема высоко разрешающего фазового сканера

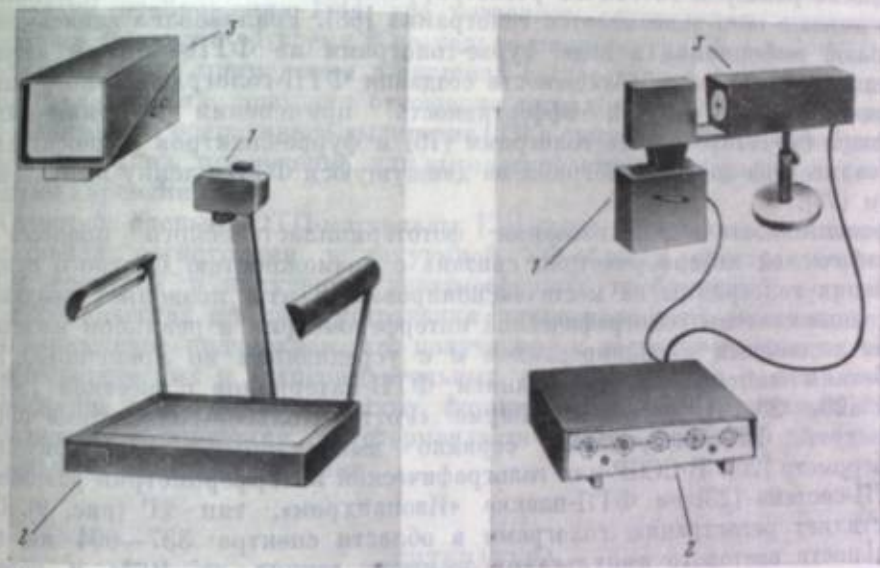


Рис. 8. Внешний вид ФТП-комплекса для микрофильмирования

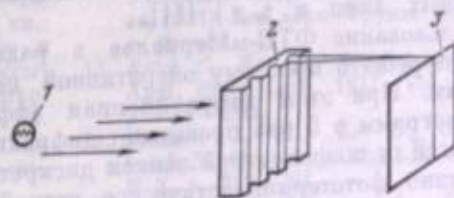
1 — фотокамера; 2 — стол с процессором для управления и контроля обработки; 3 — читальный аппарат

Рис. 9. Внешний вид ФТП-комплекса для голографической интерферометрии

1 — фотокамера; 2 — процессор; 3 — имитатор изображения

Рис. 10. Схема визуализации ФТП-изображения с использованием его фокусирующих свойств

1 — источник света;  
2 — ФТП-изображение;  
3 — наковый экран или фотокамера (при регистрации)



Фототермопластический процесс позволяет реализовать оперативную регистрацию и обработку оптических изображений и реверсивное микрофильмирование. ФТП-материал позволяет вносить изменения в микроизображение на первичных и вторичных микрофизах и осуществлять запись штриховых и полутонных изображений на одном и том же материале [64—67] при изменении режима записи. Цветной ФТП-процесс осуществлен кодированием направления раstra [67—70] или методом голографии сфокусированного изображения [71].

Для целей микрофильмирования разработаны ФТП-процесс на материале «Фторхром» ФТП, тип 2 и аппаратура записи, обработки и воспроизведения

<sup>3</sup> Расчет оптики выполнен В. Н. Весниным, конструирование системы — Г. Я. Шаничевым и В. В. Семанской, исследования выполнены автором совместно с Т. М. Пономаренко.



## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Термопластические среды (ТС) являются одним из перспективных типов носителей для оперативной регистрации оптической информации. Уже в первых работах [1—4], посвященных исследованию и использованию этих сред, отмечались многие их достоинства: дешевизна, недефицитность сырьевой базы, простота и технологичность изготовления, хранения и транспортировки, хорошая чувствительность и дифракционная эффективность записи в сочетании с высокой разрешающей способностью и малым поглощением в видимой области спектра. Кроме того, обработка термопластических сред проста и может производиться в реальном масштабе времени на месте экспонирования.

Физическая природа процесса регистрации позволяет проводить многократно запись и стирание информации, в том числе ее смену на заданных локальных участках. Однако получение высоких параметров записи возможно лишь при определенных оптимальных условиях и режимах процесса регистрации, что обуславливает применение специальных устройств управления [5—7]. Для оптимизации процесса регистрации необходимо проведение специальных исследований основных физических свойств [3] термопластических сред в условиях, максимально приближенных к практически используемым, а это в свою очередь требует разработки соответствующих экспериментальных методик [3, 8].

Настоящая работа посвящена управлению качеством изображения на термопластических средах при скоростной регистрации оптических голограмм, однако все основные выводы и рекомендации применимы и для иных способов регистрации информации на ТС. Управление здесь рассматривается на основе анализа последовательного способа [1, 4, 8] регистрации оптических голограмм с использованием однослойных гомогенных ТС — сополимеров 9-винил- и 9-пропенилкарбазола (9 ВК : 9 ПК) [9], обладающих и фотопроводниковыми, и термопластическими свойствами. В статье рассматриваются вопросы управления скоростной зарядкой ТС, управления формированием скрытого изображения, визуализируемым изображением, а также обсуждается аппаратура управления.

Очувствление термопластических сред перед регистрацией производят с помощью равномерной зарядки их поверхности, например с помощью коронного разряда. При зарядке наблюдаются два разделенных во времени процесса: зарядка геометрической емкости ТС ( $C$ ) и накопление объемного заряда [10]. При одном и том же потенциале поверхности ТС  $U$  накопление объемного заряда приводит к уменьшению значения напряженности электрического поля  $E$  в пленке, росту тока утечки и к уменьшению поверхностной плотности заряда. Это в свою очередь сопровождается ухудшением информационных свойств ТС, уменьшением светочувствительности и динамического диапазона записи, сужением полосы регистрируемых пространственных частот.

Наши исследования кинетики зарядки позволили установить, что при увеличении скорости зарядки путем повышения зарядного тока до величины, ограниченной устойчивостью разряда в зарядном устройстве, и при ограничении длительности зарядки можно обеспечить условия, при которых в термопластических средах достигаются предельные значения напряженности электрического поля и накапливаемый заряд является поверхностным. Кинетика процесса зарядки представлена на рис. 1. Видно, что при  $E \approx (0,06 \div 1,4) \cdot 10^8$  В/м полный ток  $J$ , протекающий через ТС, практически равен току  $C(dU/dt)$ , идущему на зарядку геометрической емкости ТС. Окончание процесса зарядки геометрической емкости ТС может быть установлено по значению производной полного тока зарядки, что позволяет достаточно просто и эффективно управлять зарядкой. При этом, как отмечалось выше, термопластические среды обладают оптимальными информационными свойствами.

Экспонирование термопластических сред в общем случае сопровождается образованием и ростом переменной составляющей поверхностного заряда, соответствующей переменной составляющей оптического изображения, снижением постоянной составляющей и накоплением модулированного объемного заряда из-за глубоких захватов в объеме пленки и низкой подвижности носителей тока [10]. Установлено, что использование однослойных гомогенных сред на основе 9 ВК : 9 ПК, сенсibilизированных электроакцепторными добавками в количестве более 1—4 мас. % позволяет в рабочем диапазоне полей в пленке при  $E \approx (0,5 \div 1,5) \cdot 10^8$  В/м свести до минимума накопленный в объеме заряд, обуславливающий паразитную память [8, 10]. В то же время снижение постоянной составляющей поверхностного заряда при экспонировании, особенно при малом контрасте ( $< 0,3-0,5$ ) интерференционных полос, приводит к значительному уменьшению линейного участка экспозиционных кривых  $h(t)$  (где  $h$  — амплитуда поверхностного рельефа ТС) и дифракционной эффективности записи  $\eta$  (рис. 2, кривые 1, 2), что обусловлено сильной степенью зависимостью фототока от напряженности электрического поля в пленке (показатель степени обычно  $\approx 2-3$ ) [11, 12].

Физическая природа процесса записи позволяет в значительной степени нивелировать указанные отрицательные явления. Проведение зарядки ТС совместно с экспонированием (рис. 2, кривая 3) или осуществление управляемой подзарядки при экспонировании позволяет в значительной степени снизить спад постоянной составляющей поверхностного заряда и в несколько раз увеличить эффективность записи и линейный участок экспозиционных кривых. Однако использование таких методов записи ограничено как максимально допустимыми значениями интенсивности облучающего света, так и временем экспонирования с подзарядкой (из-за ограниченной скорости подзарядки и наличия характерного времени накопления объемного заряда).

Наиболее радикальным способом управления при больших значениях интенсивности света или малом контрасте интерференционных полос является последовательное усиление скрытого изображения путем линейных дозарядок пленки в темноте и повторных экспонирований той же интерференционной картины (рис. 3). Такое управление скрытым изображением позволяет в  $\sim 10$  раз увеличить дифракционную эффективность и отношение сигнал/шум в восстановленном изображении (рис. 4) при малом контрасте, что в свою очередь способствует эффективной регистрации голограммы при отношении опорного луча к объектному до 1 : 1000. При этом также происходит расширение передаточной характеристики термопластической среды (рис. 5), а это значительно снижает частотные искажения в записи. Для практической реализации этого процесса необходимо использовать автоматическое управление процессами экспонирования и зарядки.

При проявлении термопластических сред одновременно с развитием геометрического рельефа поверхности (основное развитие осуществляется в области ньютоновского течения) происходит релаксация сил скрытого изображения, обусловленная термической активацией электропроводности. Поэтому оптимизация процесса изотермического и квазистационарного проявления сводится к обеспечению быстрого разогрева термопластической среды до температуры ньютоновского течения и ограничению нагрева по достижении заданного или максимального значения дифракционной эффективности (или отношения сигнал/шум). Для исследованных сред увеличение темпа нагрева до величины  $\partial T/\partial t \approx 10^6$  град/с, которую многократно без разрушений выдерживают эти среды и подложка, приводит к улучшению информационных свойств. Это обусловлено высоким значением энергии активации вязкого течения по сравнению с энергией активации электропроводности [8].

При таком скоростном проявлении между нагреваемым подслоем и поверхностью пленки возникает отрицательный температурный градиент, обусловленный конечной скоростью диффузии тепла в пленке, приводящий к модификации информационных свойств ТС по сравнению с обычным проявлением (расширение передаточной характеристики, отсутствие ее максимума и т. п.) [13]. Однако после прекращения нагрева указанный градиент исчезает, а из-за эффекта запаздывания наблюдаются значительные изменения дифракционной эффективности

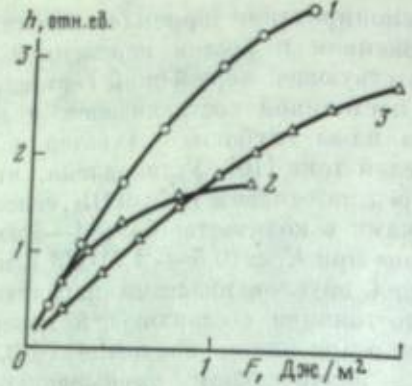
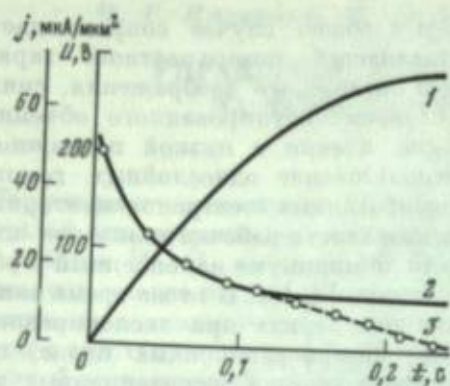


Рис. 1. Кинетика процесса зарядки термопластических сред  
 1 —  $U(t)$ ; 2 —  $j(t)$ ; 3 — расчетные значения  $C(dU/dt)$ .  $C$  — удельная геометрическая емкость ТС

Рис. 2. Экспозиционные характеристики термопластической среды при последовательной записи при контрасте, равном 0,8 (1), 0,25, (2), и при зарядке совместно с экспонированием при контрасте, равном 0,25 (3)

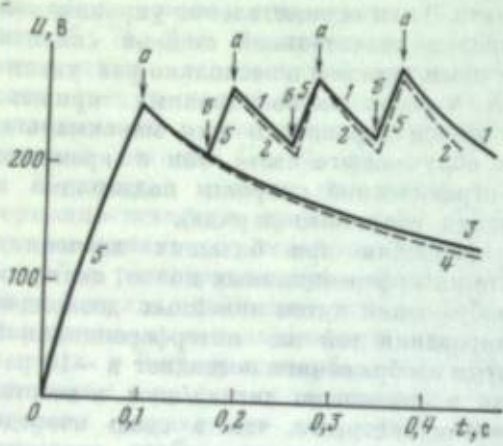
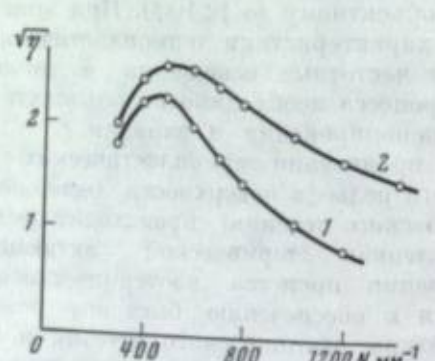
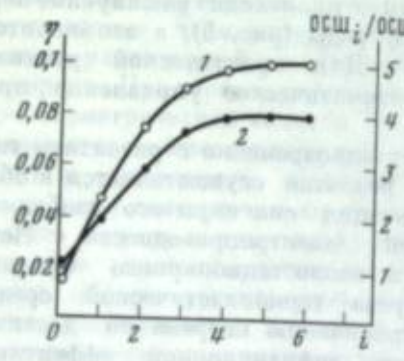


Рис. 3. Кинетика формирования скрытого электростатического изображения при обычной последовательной записи (кривые 3, 4) и при записи с усилением (5, 1, 2)

Интенсивность света  $I = 10 \text{ Вт/м}^2$  (1, 3) и  $11 \text{ Вт/м}^2$  (2, 4); 3 — зарядка в темноте; а, б — моменты начала и конца освещения

Рис. 4. Зависимости дифракционной эффективности (1) и отношения сигнал/шум (2) от количества циклов усиления  $i$   
 $i = 0$  соответствует обычной последовательной записи

Рис. 5. Передаточные характеристики термопластической среды при скоростной последовательной записи (1) и при записи с усилением (2)



и частотных характеристик записи, что делает малоэффективными отмеченные выше способы ограничения проявления. В этом режиме наиболее эффективным является ограничение проявления в момент уменьшения скорости развития геометрического рельефа (т. е. при появлении отрицательного ускорения). При этом за счет замедления релаксации сил скрытого изображения дифракционная эффективность записи может в 2 раза превышать эффективность, достигаемую в динамическом режиме.

Дальнейшая оптимизация проявления связана с осуществлением регулируемого темпа нагрева пленки [14]. Простейшим примером такого процесса является скоростной нагрев ТС до определенной температуры, после чего последняя поддерживается неизменной до момента окончания проявления (рис. 6).

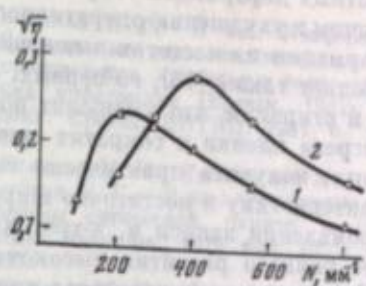
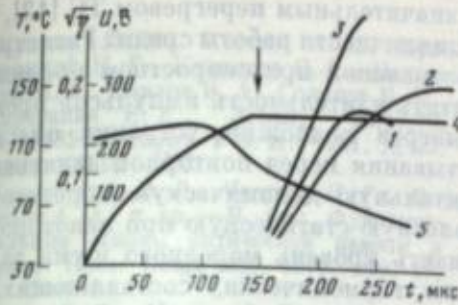


Рис. 6. Кинетика процесса проявления при регулируемом темпе нагрева  
 1—3 — зависимости  $\sqrt{\eta}(t)$  для пространственных частот  $N = 800 \text{ мм}^{-1}$  (1),  $200 \text{ мм}^{-1}$  (2); 4 — зависимость  $T(t)$  проводящего подслоя ТС; 5 — релаксация потенциала поверхности  $U(t)$ . Момент включения регулируемого нагрева показан стрелкой

Рис. 7. Передаточные характеристики термопластической среды при обычном (1) и регулируемом (2) проявлении

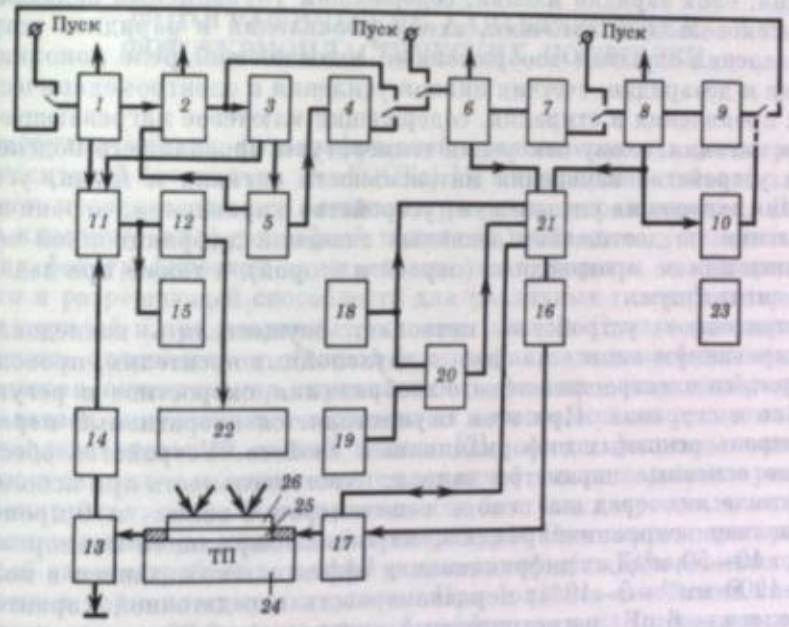


Рис. 8. Блок-схема прибора управления свойствами термопластических сред  
 1 — времязадающее реле зарядки; 2 — экспонирования; 3 — дозарядки; 4 — дополнительного экспонирования; 5 — проявления; 6 — считывания; 7 — стирания; 8 — охлаждения; 9 — счетчики количества циклов записи и усиления соответственно; 11 — задающий генератор; 12 — высоковольтный источник; 13 — схема измерения тока, протекающего через ТС; 15 — электромеханический затвор; 14, 21 — схемы управления; 22 — коронатор; 18, 19 — фотоприемное устройство полевого сигнала и шума соответственно; 20 — измеритель ОСШ; 16 — блок нагрева; 17 — схема измерения температуры ТС; 23 — блок питания; 24 — подложка; 25 — проводящий подслой; 26 — пленка ТС

При этом влияние эффекта запаздывания на информационные свойства термопластических сред незначительно из-за отсутствия температурного градиента, обусловленного скоростным нагревом. Наблюдается широкий спектр скоростей развития рельефа поверхности, замедление релаксации поверхностного потенциала, что приводит к увеличению эффективности записи, а влияние мелкого бассейна пленки на развитие низких частот приводит к смещению передаточной характеристики в высокочастотную область (рис. 7). Последнее позволяет увеличить отношение сигнал-шум за счет подавления низкочастотных модалых деформаций [13].

Оптимизация процесса стирания связана с ограничением снизу полосы регистрируемых пространственных частот величиной  $2\lambda Nd \geq 2 + 3(Nd - \text{произведение пространственной частоты на толщину ТС})$ , так как стирание низко-

частотных деформаций сопровождается значительным перегревом ТС [13], приводящим к ухудшению оперативности и цикличности работы среды. Регистрация информации на частотах выше квазирезонансной при скоростном проявлении позволяет также [13], во-первых, сократить длительность импульсов проявления и стирания, что уменьшит общий нагрев подложки, устранит опасность перегрева пленки и сократит время остывания перед повторной записью, во-вторых, получить практически горизонтальную динамическую передаточную характеристику и достаточно широкополосную статическую при некотором недоявлении записи и, в-третьих, снизить уровень морозного шума за счет более раннего развития высокочастотных гармонических составляющих.

Для реализации процессов управления информационными свойствами термопластических сред, а также в связи с невозможностью обеспечить комфортные условия для работы носителей и с отсутствием высокостабильных ТС необходимо создание специальных автоматизированных устройств с обратными связями и контролем основных параметров записи и информационных свойств на всех этапах работы. Вариант блок-схемы такой аппаратуры представлен на рис. 8. Устройство включает времязадающий программный блок, содержащий реле зарядки, экспонирования, дозарядки, проявления, считывания, стирания, охлаждения; блок зарядки пленки, содержащий управляемый задающий генератор, высоковольтный источник, схему управления и зарядное устройство; блок управления скрытым изображением, включающий реле дополнительной экспозиции и дозарядки, счетчик циклов усиления и электромеханический затвор; блок проявления и стирания, содержащий ключевое нагревающее устройство; блок питания, схему измерения температуры проводящего подслоя, фотоприемные устройства измерения интенсивности сигнала и шума, устройство определения отношения сигнал/шум, устройство управления, ограничивающее нагрев пленки по достижении заданных значений дифракционной эффективности записи или ее производных (первой и второй), а также при заданном отношении сигнал/шум.

Представленное устройство позволяет осуществлять последовательную и комбинированную запись на одно- и двухслойных носителях, проводить усиление скрытого электростатического изображения, скоростное и регулируемое проявление и стирание. При этом осуществляется оперативный неразрушающий контроль основных информационных свойств. Устройство обеспечивает следующие основные параметры записи: чувствительность при использовании термопластических сред на основе сополимеров 9-винил- и 9-пропенилкарбазола, полиэпоксипропилкарбазола, карбазолсодержащего полиорганосилоксана — до  $10-50 \text{ м}^2/\text{Дж}$ ; дифракционная эффективность записи в полосе частот  $400-1200 \text{ мм}^{-1}-5-10\%$ ; неравномерность передаточной характеристики в этой полосе — 6 дБ; регистрируемый контраст  $1-0,05$  и менее; отношение сигнал/шум зависит от природы объекта и схемы записи и для голограмм протяженных диффузных объектов может превышать 100; цикличность работы термопластических сред на основе сополимеров 9-винил- и 9-пропенилкарбазола — не менее 500 раз; длительность полного цикла записи — 0,1 с и более; максимальная частота записи — 10 Гц. Для дальнейшего повышения оперативности работы и улучшения качества записи необходимо совершенствовать систему зарядки и охлаждения пленок и проводить запись в обеспыленной атмосфере инертного газа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gaynor J., Aftergut S.— Photogr. Sci. Eng., 1963, vol. 7, N 4, p. 209—213.
2. Urbach J. C., Meter R. W.— Appl. Opt., 1966, vol. 5, p. 666—667.
3. Находкин Н. Г.— В кн.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. Киев: КГУ, 1969, вып. 1, с. 8—62.
4. Credelle T. L., Spong F. W.— RCA Rev., 1972, vol. 33, N 1, p. 206—210.
5. Pat. 3655257 (US). Apparature for forming a plane hologram on a deformable thermoplastic. J. Urbach.
6. Баженов М. Ю.— В кн.: Конференция по физическим основам передачи информации лазерным излучением. Киев, 1973; Тез. докл. Киев, 1973, с. 34.
7. Зюбрик А. И.— Приборы и техника эксперимента, 1981, вып. 5, с. 229.
8. Баженов М. Ю.— В кн.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Вища шк., 1979, вып. 10, с. 2—16.
9. А. с. 840786 (СССР). Носитель для регистрации оптических голограмм в реальном масштабе времени. Баженов М. Ю.,

Бараваш Ю. М., Костюк А. А., Кувшинский Н. Г., Кудинова С. И., Находкин Н. Г., Павлов В. А., Соколов Н. И., Сироткина Е. Е. Заявл. 25.07.79, № 2828548; Оpubл. в Б. И., 1981, № 23. МКИ СОЗС 1/72.

10. Кувшинский Н. Г., Чуприн Н. Г., Костюк А. А. и др.— В кн.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Вища шк., 1979, вып. 10, с. 97—113.
11. Ганчо Г. Н., Моукис Э. Б.— Лит. физ. сб., 1979, т. 19, с. 581—593.
12. Находкин Н. Г., Баженов М. Ю., Ку-

вшинский Н. Г.— В кн.: Конференция: Современные виды носителей для воспроизведения, хранения и распространения информации (Ереван, 1981); Тез. докл. Ереван: ВНТИЦ, 1981, с. 182—186.

13. Баженов М. Ю., Кувшинский Н. Г., Находкин Н. Г.— В кн.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Вища шк., 1979, вып. 10, с. 113—121.
14. Баженов М. Ю.— В кн.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Вища шк., 1981, вып. 12, с. 127—130.

Л. М. Панасюк

### ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ

Достиженные уровни фотографической чувствительности фототермопластических носителей (несколько ед. ГОСТа) [1] сделали злободневной задачей всестороннего исследования их сенситометрических характеристик. В сопоставимых с классической фотографией понятиях необходимо установить пределы изменения фотографической чувствительности и широты, коэффициента контрастности и разрешающей способности для различных типов фототермопластических носителей и при различных условиях записи. Однако фототермопластическая запись отличается от обычной фотографии не только физической природой процессов очувствления, проявления и фиксирования изображений, но и предполагает всевозможные варианты их чередования во времени. Так, возможен последовательный способ записи [2], когда фототермопластический (ФТП) носитель вначале очувствляется зарядкой в поле коронного разряда, затем экспонируется, после этого проявляется быстрым нагревом, а затем фиксируется охлаждением до комнатной температуры. Этот широко распространенный способ записи требует для своей реализации очень высокоомных полупроводниковых и термопластических слоев. При большом отношении сигнал/шум он обладает ярко выраженным краевым эффектом и для передачи полутонов требует принудительного растривания. Деформация поверхности ФТП-носителей имеет вид канав вдоль растра, разрешение фотографической системы ограничивается размером растра.

Известен одновременный способ записи [3], когда процессы зарядки и экспонирования проводятся одновременно. Этот способ менее критичен к удельному сопротивлению составляющих ФТП-слоев, позволяет достичь предельных потенциалов зарядки (максимально возможную чувствительность). Структура деформации имеет морозный характер. Сморщивание поверхности термопластического слоя происходит как в светлом, так и в темном участке изображения. Получаемые значения отношения сигнал/шум малы.

Предложен способ [4], когда ФТП-носитель вначале нагревают до температуры записи (проявляют), а затем очувствляют и экспонируют. Структура деформации поверхности ФТП-носителя имеет своеобразный (луночный) вид. Этот способ записи так же, как и предыдущий, менее критичен к сопротивлениям используемых материалов и позволяет достичь предельных напряжений зарядки. Поскольку возможно проведение процесса записи, когда лунки практически не появляются в темных участках ФТП-носителя, то возможно получение больших значений отношения сигнал/шум.

В настоящей статье описываются фотографические характеристики различных ФТП-носителей при некоторых вариантах последнего способа записи с луночным характером деформации.

Исследовали ФТП-носители, изготавливаемые путем последовательного (послойного) нанесения на лавсановую основу подстилающего электрода из металлического или полупроводникового материала, фоточувствительного полупроводникового слоя из стеклообразных халькогенидов мышьяка и термопластического слоя из различных полимерных материалов. Сенситометрические кривые снимали по методике, описанной в работе [5]. Коэффициент передачи оптической системы воспроизведения был не хуже 0,5. Поэтому чувствительность на графиках определялась на уровне  $\sim 0,2$ .

Фотографические характеристики ФТП-носителей в первую очередь определяются квантовым выходом, удельным сопротивлением и кратностью его изменения с освещением полупроводникового слоя. Известно, что стеклообразные полупроводники мало чувствительны к примесям. Поэтому обеспечить плавное изменение указанных параметров в широких пределах практически никогда не удается. Чтобы экспериментально проследить за влиянием свойств ХСП на фотографические характеристики ФТП-носителей, последние изготавливали на основе слоев  $As_2S_3$ ,  $As_2Se_3$ , твердого раствора  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}$  и гетеропереходов  $As_2S_3-As_2Se_3$  и  $As_2Se_3$  — твердый раствор  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}$ . На указанные полупроводниковые слои наносили один и тот же термопластик БМК-50 толщиной 1,5—2,0 мкм.

Указанный набор полупроводниковых фоточувствительных слоев обеспечивает вариацию сопротивлений от  $5 \cdot 10^{14}$  для  $As_2S_3$  до  $5 \cdot 10^{12}$  для  $As_2Se_3$  и изменение кратности от 2—3 для  $As_2S_3$  до 200 для  $As_2Se_3$ .

Анализ сенситометрических характеристик ФТП-носителей, изготовленных на основе указанных выше полупроводниковых слоев, показал, что с увеличением фотоответа полупроводникового слоя, служащего мерой эффективного квантового выхода, чувствительность ФТП-носителя растет, а фотографическая ширина сужается (рис. 1, кривые 1, 2). Увеличение фотографической чувствительности (в 10 раз) не соответствует возрастанию кратности изменения сопротивления (в 100 раз) и объясняется снижением роли полупроводникового слоя в перераспределении зарядов в двухслойной системе полупроводник—термопластик при падении темнового удельного сопротивления у  $As_2Se_3$  на два порядка по сравнению с  $As_2S_3$ .

Использование в качестве фоточувствительного слоя ФТП-носителя твердого раствора  $As_2S_3-As_2Se_3$  (в отношении 0,5 : 0,5), обладающего промежуточными параметрами как по сопротивлению, так и по кратности его изменения, приводит к незначительному увеличению фотографической чувствительности (рис. 1, кривая 3) и увеличению коэффициента контрастности. Создание ФТП-носителя на основе гетеропереходов  $As_2S_3-As_2Se_3$ , обладающих эффективным значениями удельных сопротивлений, близких к таковым для  $As_2S_3$ , и кратностями их изменения, близкими к таковым для  $As_2Se_3$ , позволили увеличить чувствительность до 3—4 лк $^{-1} \cdot c^{-1}$  и повысить коэффициент контрастности до 0,85—0,9.

Из сопоставления фотоэлектрических свойств ХСП и сенситометрических характеристик ФТП-носителей, изготовленных на основе этих слоев, можно сделать следующий вывод: смещение люкс-амперных характеристик в область низких значений освещенностей (увеличение кратности фотоответа) приводит к смещению сенситометрической кривой в область меньших экспозиций. Расширение области освещенностей, в которой наблюдается линейная рекомбинация (участок люкс-амперной характеристики, на котором между фототоком и освещенностью существует прямая зависимость), увеличивает значение фотографической ширины. Решающую роль при выбранном способе записи играет значение темнового удельного сопротивления. При одних и тех же кратностях фотоответа лучшие фотографические параметры получаются у ФТП-носителей, изготовленных из более высокоомных слоев.

Спектральная зависимость фотографической чувствительности ФТП-носителей хорошо согласуется со спектральной зависимостью фоточувствительности того полупроводникового слоя, на основе которого изготовлен данный носитель (рис. 2). Характерная для ХСП зависимость фоточувствительности от полярности освещаемого электрода проявляется и на фотографических параметрах ФТП-носителей. Фотографическая чувствительность всех фототермопла-

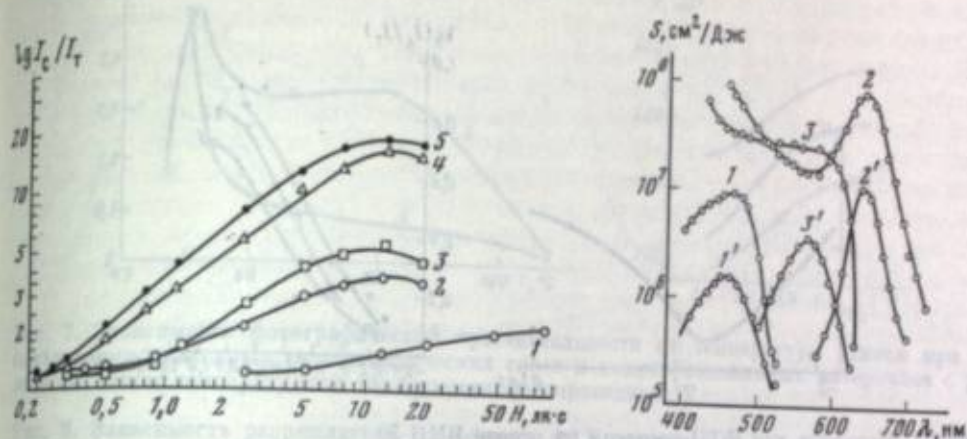


Рис. 1. Сенситометрические характеристики ФТП-носителей на основе  $As_2S_3$  (1),  $As_2Se_3$  (2),  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}$  (3), гетеропереходов  $As_2S_3-As_2Se_3$  (4),  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}-As_2Se_3$  (5)

Рис. 2. Спектральная зависимость фотографической чувствительности для ФТП-носителей на основе  $As_2S_3$  (1, 1'),  $As_2Se_3$  (2, 2'), твердого раствора  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}$  (3, 3')

1—3 — при положительной полярности освещаемого электрода; 1'—3' — при отрицательной

стических носителей при освещении отрицательного электрода значительно ниже, чем при освещении положительного электрода. Носители на основе сульфида мышьяка чувствительны только в коротковолновой области. Максимум достигается при  $\lambda = 460$  нм (кривые 1, 1'). ФТП-носители на основе селенида мышьяка имеют максимум фотографической чувствительности при  $\lambda = 630$  нм (кривые 2 и 2') и обладают расширенной в коротковолновую область спектральной характеристикой при положительной полярности на освещаемом электроде (кривая 2). Если использовать в качестве фотополупроводникового слоя твердые растворы этих ХСП, то можно плавно смещать длинноволновую границу спектральной фотографической чувствительности. Максимальная чувствительность достигается при соотношении сульфида мышьяка и селенида мышьяка 3 : 7, однако слои раствора (1 : 1) обладают оптимальными данными для записи и считывания на просвет гелий-неоновым лазером. Совершенно очевидно, что материалы подстилающего электрода, оказывающие существенное влияние на фоточувствительность слоев ХСП, оказывают такое же влияние и на фотографические параметры ФТП-носителей.

Применение в качестве фоточувствительного слоя ФТП-носителей гетероструктуры  $As_2Se_3-As_2S_3$  или  $As_2Se_3$  — твердый раствор  $(As_2S_3)_{0,5} \cdot (As_2Se_3)_{0,5}$  позволяет улучшить фотографическую чувствительность в основном за счет расширения области спектральной чувствительности и повышения эффективного значения темнового сопротивления. Изучение свойств носителей с различными потенциалами слоев, составляющих гетероструктуру, показывает, что оптимальное соотношение толщин слоев селенида и сульфида мышьяка 3 : 1 при общей толщине гетероструктуры 2,5—2,8 мкм.

Предложенный способ записи предполагает создание с помощью коронной зарядки разогретого ФТП-носителя неустойчивого равновесия в термопластическом слое. Поэтому включение экспозиции в момент достижения этого состояния приводит к записи изображений так же, как и при постоянном освещении. При этом каждому потенциалу коронирующего электрода соответствует свое оптимальное время предварительной (до экспозиции) зарядки ФТП-носителя, при котором достигается максимум сенситограмм в интервале освещенностей. Измерения, проведенные при записи сенситограмм в интервале освещенностей от 1 до 10 лк и изменении времени выдержки от 1/2 до 1/120 с, показывают, что для ФТП-носителей имеет место отклонение от закона взаимозаменяемости (рис. 3). Изоопака ФТП-носителя имеет ярко выраженный минимум, что свидетельствует о наличии оптимального времени выдержки  $t = 1/15$  с.

Для изучения зависимости фотографических характеристик фототермопластических носителей от материала термопластического слоя различные термо-

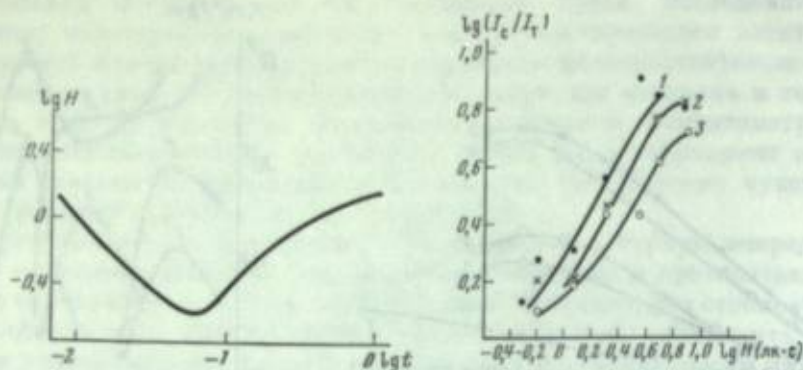


Рис. 3. Изонока для ФТП-носителя на основе БМК-50

Рис. 4. Сенситометрические характеристики ФТП-носителя на основе сополимеров октилметакрилата со стиролом в соотношении 40 : 60 (1), 30 : 70 (2), 20 : 80 (3)

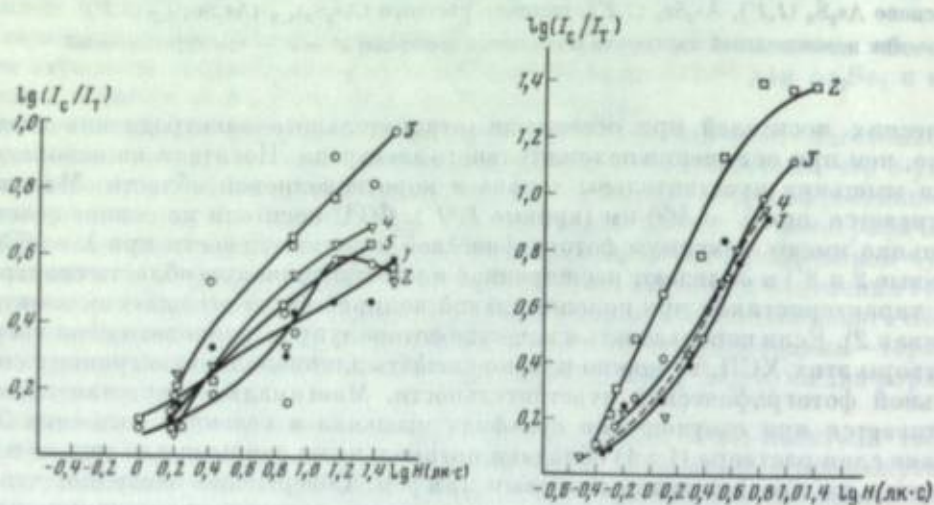


Рис. 5. Сенситометрические характеристики ФТП-носителей на основе сополимеров бутилметакрилата со стиролом в соотношении 70 : 30 (1), 60 : 40 (2), 50 : 50 (3), 40 : 60 (4), 30 : 70 (5)

Рис. 6. Сенситометрические характеристики ФТП-носителей на основе сополимеров октилметакрилата с винилнафталином в соотношении 60 : 40 (1), 50 : 50 (2), 40 : 60 (3), 30 : 70 (4)

пластические материалы наносили в одинаковых условиях на отрезки лавсановой ленты с подстилающим электродом из хрома, покрытой в едином технологическом процессе твердым раствором селенид-сульфид мышьяка в соотношении 1 : 1. Определяющее влияние на фотографические характеристики ФТП-носителей оказывает температура записи. Для всех исследованных термопластиков запись на ФТП-носителях становится возможной от температуры параметров этих носителей сильно зависят от условий фиксации изображений. Величина диапазона температур между температурой стеклования и текучести определяет степень зависимости фотографических параметров от точности соблюдения температуры записи. При этом материалы с большим диапазоном менее зависят от малых изменений температур.

Максимальная фотографическая чувствительность всегда достигается при температурах записи, соответствующих температуре текучести термопластического материала, который используется в данном ФТП-носителе. Поэтому сопоставление сенситометрических характеристик для носителей, различающихся материалом термопластического слоя, проводили при температурах, различных по абсолютной величине, но всегда соответствующих температуре

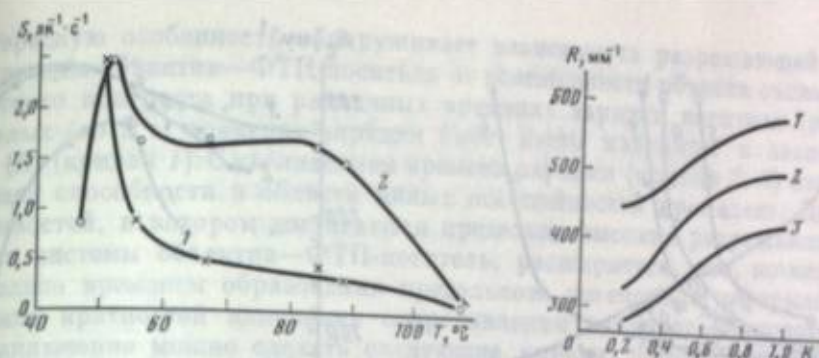


Рис. 7. Зависимость фотографической чувствительности от температуры записи при использовании различных термопластических слоев и полупроводниковых материалов с различным типом температурной зависимости фотопроводимости

Рис. 8. Зависимость разрешающей способности ФТП-носителей от контраста проецируемого изображения интерференционной решетки

Толщина термопластического слоя 1,5 мкм (1), 1,8 (2), 2,1 мкм (3)

текучести используемого термопластического материала. Это позволило проводить запись при примерно одинаковых значениях вязкости. Резкое различие в значениях удельного сопротивления у разных термопластических слоев требовало индивидуального подбора потенциала на коронирующем электроде. Время зарядки сохранялось всегда равным 1 с.

Исследованию были подвергнуты ФТП-носители, изготовленные на основе двойных сополимеров октилметакрилата со стиролом (рис. 4), бутилметакрилата со стиролом (рис. 5) и октилметакрилата с винилнафталином (рис. 6). Из рисунков видно, что для всех составов термопластических материалов подбором условий записи можно получить сравнительно мало различающиеся характеристические кривые. Чувствительность в зависимости от состава колеблется от 0,5 до 1 для ФТП-носителей на основе бутилметакрилата со стиролом, от 1,5 до 2 (октилметакрилат со стиролом) и от 2 до 2,5 лк<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> (октилметакрилат с винилнафталином). По-видимому, подбором температуры записи, обеспечивающей максимальную чувствительность, выравниваются термопластические и электрические параметры у использованных термопластических материалов.

Наблюдаемое различие в фотографической чувствительности у ФТП-носителей, изготовленных на основе различных классов полимеров, вероятно, объясняется их различной чувствительностью к деформации под действием сил электрического поля (зарядовой чувствительностью) и не может быть объяснено только уменьшением кратности фотоответа у использованного полупроводникового слоя с ростом температуры записи. Так, для ФТП-носителя на основе октилметакрилата со стиролом температура записи в зависимости от состава (см. рис. 4) изменялась от 52 до 70° С, а у ФТП-носителя на основе октилметакрилата с винилнафталином (см. рис. 6) от 47 до 84° С. Фотографическая чувствительность первой группы носителей всех составов термопластика ниже, чем у второй.

На более низкие значения фотографической чувствительности ФТП-носителей на основе бутилметакрилата со стиролом существенное влияние может оказать и снижение кратности фотоответа у полупроводника с ростом температуры записи. Температура записи для этой группы изменялась от 82 до 90° С (см. рис. 5). Для проверки были изготовлены два типа ФТП-носителей. Для систем первого типа кратность фотоответа полупроводникового слоя начинала уменьшаться при комнатной температуре и выше. Для второго типа кратность достигала максимума в области температур ~50–60° С.

Обе группы фототермопластических носителей были полны термопластическими материалами на основе октилметакрилата со стиролом с различным соотношением мономеров. Для них сняты характеристические кривые при температурах записи, соответствующих температуре текучести данного состава. Из рис. 7 видно, что фотографическая чувствительность первой группы ФТП-носителей (кривая 1) монотонно уменьшается с ростом температуры записи, а для второго типа (кри-

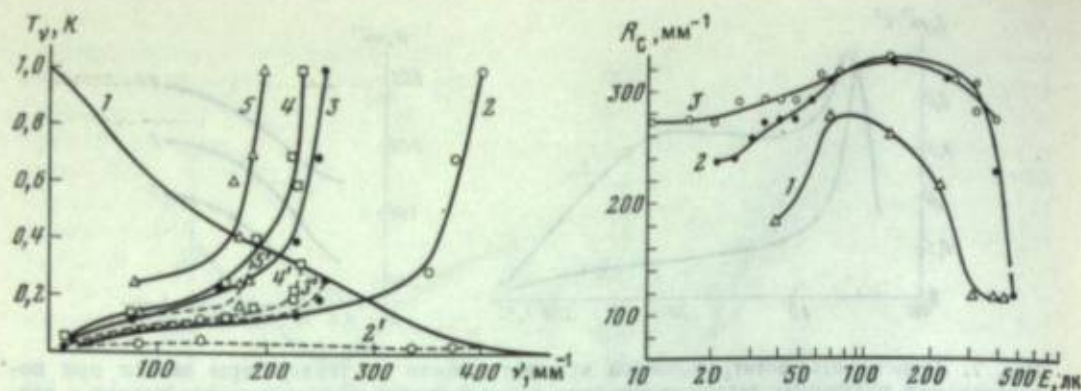


Рис. 9. Частотно-контрастные характеристики системы объектив «Индустар-70» — ФТП-носитель при различных толщинах термопластического слоя

$d$ , мкм: 1 — 0; 2 — 1,2; 3 — 2,3; 4 — 2,7; 5 — 3,6. 2' — 5' — соответствующие кривые порогового контраста

Рис. 10. Зависимость разрешающей способности от освещенности при времени зарядки 2 (1), 3 (2), 5 с (3)

вая 2) она переходит через максимум в районе  $50^\circ \text{C}$  аналогично изменению кратности фотответа полупроводникового слоя с ростом температуры.

Важной характеристикой фототермопластических носителей является их разрешающая способность. В случае луночной деформации полутоновые изображения передаются как за счет изменения плотности лунок при низких значениях пространственной частоты, так и за счет изменения их глубины и размеров при высоких значениях пространственной частоты. Поэтому размер лунок, возникших в процессе саморастривания, должен определять предельные значения разрешающей способности ФТП-носителей. Проведенные исследования показали, что на размер лунок решающее влияние оказывает толщина термопластического слоя. Существует обратная зависимость между толщиной термопластика  $d$  и пространственной частотой саморастривания  $f$  [6]. Коэффициент обратной пропорциональности обнаруживает слабую зависимость от толщины полупроводникового слоя, типа используемых полупроводникового и термопластического материалов и более сильную зависимость от температуры записи и потенциала на коронирующем электроде [7]. В силу этих причин коэффициент не имеет строго постоянного значения, а изменяется в наших экспериментах от 2 до 6.

Предельные значения разрешающей способности ФТП-носителей определялись нами по записи интерференционной картины, образованной двумя сходящимися когерентными пучками света. С ростом контраста проецируемой интерференционной решетки разрешающая способность увеличивается (рис. 8). Увеличение толщины термопластического слоя смещает кривую в область меньших значений  $R$ . Обнаружено, что размер лунок уменьшается на 30% с уменьшением пространственного периода проецируемой решетки. Предельно достигнутые значения разрешающей способности на ФТП-носителях с толщиной слоя термопластика  $\sim 0,5$  мкм составляют  $1800 \text{ мм}^{-1}$ .

Высокие значения разрешающей способности ФТП-носителей позволили повысить разрешение в системах ФТП-носитель — объектив для всех исследованных типов объективов. При оптимальных условиях записи разрешающая способность системы для ФТП-носителей с толщиной термопластика  $d = 1$  мкм составила с объективом «Индустар-70»  $440 \text{ мм}^{-1}$  при диафрагме 4, «Юпитер-9»  $410 \text{ мм}^{-1}$  при диафрагме 2,8, «Индустар-63»  $380 \text{ мм}^{-1}$  при диафрагме 4.

Уменьшение толщины термопластического слоя менее 1 мкм не приводит к росту разрешающей способности системы. По-видимому, в этих случаях достигаются предельные разрешения объектива. Увеличение толщины термопластического слоя уменьшает разрешающую способность системы (рис. 9, кривые 2—5). Уменьшение толщины термопластического слоя улучшает вид кривых порогового контраста.

Интересную особенность обнаруживает зависимость разрешающей способности системы объектив — ФТП-носитель от освещенности объекта съемки при абсолютном контрасте при различных временах зарядки носителя (рис. 10). При малых (до 2 с) временах зарядки имеет место максимум в зависимости разрешающей способности в области малых освещенностей пропадает. Диапазон разрешающей способности системы объектив — ФТП-носитель, расширяется, что, по-видимому, обусловлено временем образования предельного потенциала деформации для различных кратностей изменения сопротивления полупроводникового слоя.

В заключение можно сделать следующие выводы. Фототермопластические носители на основе последовательно нанесенных на металлизированную подложку слоев из стеклообразного фотополупроводника и термопластического материала обладают слабой взаимозависимостью между фотографической чувствительностью и разрешающей способностью, свойством не присущим галогенсеребряным эмульсиям. Фотографическая ширина ФТП-носителей зависит от диапазона освещенностей, в котором наблюдается линейная люксамперная характеристика для используемого полупроводникового слоя. При очень большой протяженности последней (в случае гетеропереходов) ограничения фотографической ширины достигаются при определенных кратностях изменения сопротивления.

На ФТП-носителях закон взаимозаместимости не выполняется, изопаки имеют минимум, обнаруживается максимум фотографической чувствительности при временах экспозиции  $1/15$  с.

Для создания ФТП-носителей может быть использован широкий набор термопластических материалов с сильно различающимися температурами стеклования и текучести. Подбором условий записи можно получить системы с близкими сенситометрическими параметрами. Предпочтительнее применение низкотемпературных полимеров, так как они обеспечивают запись при более высоких кратностях фотответа у используемых слоев халькогенидов мышьяка.

Разрешающая способность системы объектив — ФТП-носитель зависит не только от условий записи, контраста фотографируемого объекта, но и средней освещенности кадра при малых временах зарядки.

Фототермопластические носители на основе неорганических стеклообразных халькогенидов мышьяка могут быть использованы для замены высокоразрешающих галогенсеребряных негативных эмульсий, поскольку обеспечивают чувствительность  $1-2,5 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , фотографическую широту  $0,8-1,4$ , коэффициент контрастности  $0,8-1,0$  и разрешающую способность практически со всеми объективами  $R > 300 \text{ мм}^{-1}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасов Ю. А. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1981, т. 26, с. 470—472.
2. Гейнор Дж., Афтергут З. — В кн.: Термопластическая запись. М.: Искусство, 1966, с. 120—130.
3. Pat. 3196014 (US).
4. А. с. 877609 (СССР). Способ фототермопластической записи оптической информации/Панасюк Л. М., Воробьев В. Г., Конзело Л. А., Форш А. А., Шевченко А. И. Заявл. 19.03.79, № 2731801/18 — 10; Опубл. в Б. И., 1981, № 40, МКИ G41В 9/00.
5. Панасюк Л. М., Воробьев В. Г., Намчу С. Н. и др. — Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии, 1976, т. 21, с. 171—176.
6. Urbach J., Meier R. W. — Appl. Opt., 1966, vol. 5, p. 666.
7. Димов Ф. И. — В кн.: Современное состояние и перспективы развития высокоскоростной фотографии, кинематографии и метрологии быстропотекающих процессов (Москва, 1975); Тез. докл. М., 1975, с. 59.

### СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИ ЗАПИСИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТОЙ

Широкое развитие бессеребряных регистрирующих сред выдвинуло задачи по улучшению их характеристик и качества восстановленного изображения. Решение этих задач в области фототермопластической записи оптической информации может быть достигнуто как за счет усовершенствования структуры фототермопластических носителей, так и за счет применения новых методов записи, осуществления растривания, совершенствования систем воспроизведения. Роль растривания при термопластической визуализации впервые рассмотрел Урбах [1]. Однако как в этой, так и в последующих работах отсутствуют сведения о влиянии процесса растривания на сенситометрические характеристики конкретного типа носителей.

Для проведения записи изображений с несущей частотой нами использовался метод интерференционного растривания, позволяющий сравнительно просто получать высокие пространственные частоты растра, близкие к резонансной частоте термопластического слоя [2]. Схема записи приведена на рис. 1. Интерференционная решетка образуется в плоскости носителя двумя коллимированными когерентными пучками от лазера с мощностью излучения 2 мВт. Когерентное излучение и излучение от объекта могут проецироваться на носитель как одновременно, так и с некоторой задержкой относительно друг друга и относительно момента начала зарядки носителя. Время задержки и выдержки устанавливается блоком управления и фотозатворами.

В случае регистрации оптической информации на фототермопластических носителях с однослойным полупроводниковым слоем селенида мышьяка или твердого раствора  $(As_2Se_3)_{0,88}(As_2S_3)_{0,12}$  принцип записи при интерференционном растривании излучением с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм сводится к модуляции записи несущей частоты в виде решетки интенсивностью регистрируемого изображения [3]. При сравнительно малых значениях потенциала коронирующего электрода (4–5 кВ) дифракционная решетка формируется в основном в виде канавочного рельефа, причем с увеличением освещенности интегрального света уменьшается глубина рельефа и дифракционная эффективность при считывании. С повышением потенциала зарядки выше 5 кВ изображение формируется луночным рельефом и увеличение освещенности интегрального света приводит к росту плотности хаотической неупорядоченной деформации и соответственно к снижению дифракционной эффективности при считывании. Таким образом, при всех значениях потенциала зарядки наблюдается негативный процесс записи — неосвещенным участкам изображения соответствует максимальная дифракционная эффективность. Негативность процесса записи обусловлена уменьшением контраста интерференционных полос при одновременном воздействии когерентного и интегрального излучений, а также гашением кратности фотоответа полупроводникового слоя к когерентному излучению при экспонировании носителя излучением от объекта.

Считывание записанного на ФТП-носителе растриванного изображения клина освещенностей с наложенным макрорастром (ширина полос последнего  $\sim 1$  мм) проводили в когерентном свете на просвет (рис. 2). При перемещении ФТП-носителя перпендикулярно лазерному лучу различные ступени клина последовательно во времени считываются узкой ( $\sim 0,3$  мм) полосой луча. На фотоприемник пропускается первый порядок дифрагированного света.

Диаграммы считывания зарегистрированных изображений показывают, что в случае малых напряжений зарядки (до 5 кВ) интенсивность дифракционного максимума на освещенных полосах растра незначительно снижается с ростом экспозиции, а контраст считываемого изображения формируется в большей

степени возрастанием дифракционного максимума на темных полосах макрораstra с ростом экспозиции (рис. 3, а). Такое перераспределение интенсивностей дифрагированного света связано, по-видимому, с тем, что поверхностная плотность зарядов мала и ее перераспределение между темными и светлыми полосами макрораstra не приводит к возникновению авторегулярной деформации на освещенных полосах по всему клину освещенностей [4]. Незначительное возрастание интенсивности дифракционного максимума на светлых полосах макрораstra при малых освещенностях обусловлено появлением канавочной деформации малой глубины.

С увеличением потенциала зарядки выше критического значения образования авторегулярной деформации изображение макрораstra формируется ростом интенсивности дифракционного максимума на освещенных и темных

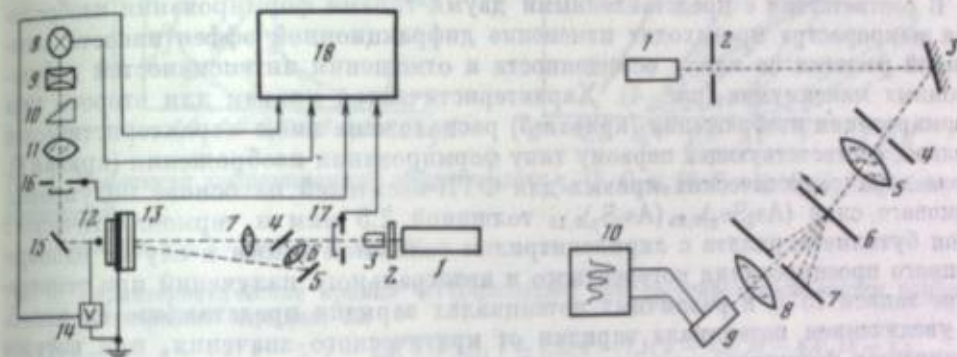


Рис. 1. Схема записи растриванных изображений

1 — лазер; 2 — поляризационный фильтр; 3 — коллиматор; 4, 5 — светоделительные элементы; 6, 7 — линзы; 8 — осветитель; 9 — конденсор; 10 — регистрируемый объект; 11 — объектив; 12 — ячейка записи; 13 — ФТП-носитель; 14 — зарядное устройство; 15 — зеркало; 16, 17 — затворы; 18 — автоматический блок управления

Рис. 2. Схема считывания растриванной записи

1 — лазер; 2 — очищающая диафрагма; 3 — зеркало; 4 — диафрагма; 5 — цилиндрическая линза; 6 — линза; 7 — ФТП-носитель на считывающем устройстве; 8 — собирающая линза; 9 — фотоприемник; 10 — регистрирующий прибор

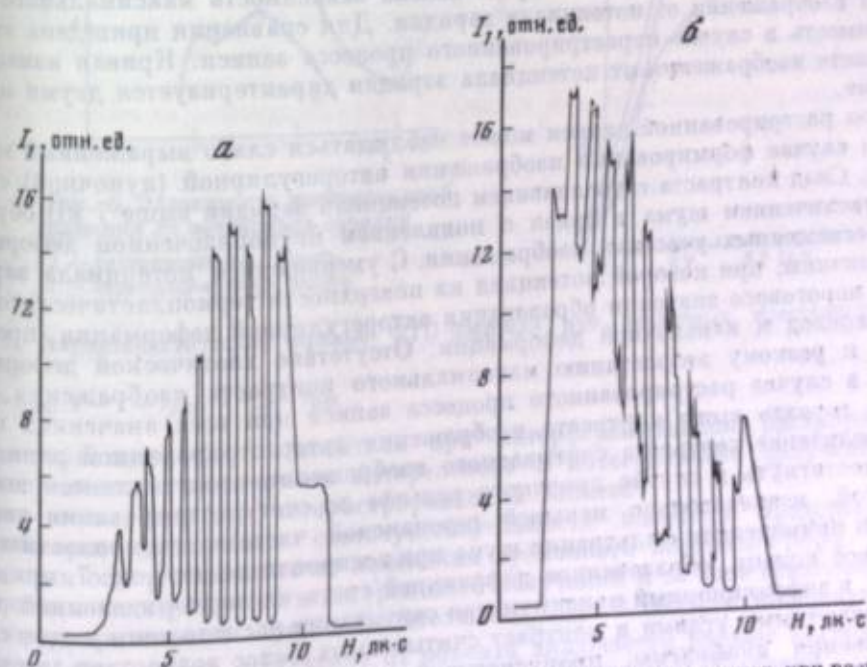


Рис. 3. Диаграммы считывания растриванных изображений, записанных при разных потенциалах зарядки

а:  $U_H = U_i$ ; б:  $U_H = U_i$ ;  $U_i < U_c$

полосах макрорастра при уменьшении освещенности (рис. 3, б). Контраст изображения и передача полутонов образуются за счет более быстрого спада интенсивности дифракционного максимума на освещенных полосах растра по сравнению с темными при больших уровнях освещенности. Резкое уменьшение интенсивности дифракционного максимума на освещенных полосах растра обусловлено исчезновением дифракционной решетки и появлением хаотической деформации. Измерив интенсивность дифракционного максимума от темных ( $I_{1T}$ ) и светлых ( $I_{1C}$ ) полос макрорастра для разных ступеней клина освещенностей, можно построить характеристические кривые в виде зависимости [3]

$$\lg(I_{1T}/I_{1C}) = f(\lg H).$$

В соответствии с представленными двумя типами формирования изображения макрорастра происходит изменение дифракционной эффективности записной решетки по клину освещенности и отношения интенсивностей дифракционных максимумов (рис. 4). Характеристическая кривая для второго типа формирования изображения (кривая 3) расположена ниже характеристической кривой, соответствующей первому типу формирования изображения (кривая 6). Поле характеристических кривых для ФТП-носителей на основе полупроводникового слоя  $(As_2Se_3)_{0,85}(As_2S_3)_{0,15}$  толщиной 2,5 мкм и термопластического слоя бутилметакрилата с акрилонитрилом толщиной 2 мкм в случае одновременного проецирования когерентного и интегрального излучений при температуре записи 75°С и различных потенциалах зарядки представлено на рис. 5. С увеличением потенциала зарядки от критического значения, при котором начинается формирование канавочной деформации (в рассматриваемом случае 4,2 кВ), кривые смещаются в область меньших значений  $H$ , коэффициент контрастности и фотографическая широта увеличиваются. Дальнейшее увеличение потенциала от 5 до 9 кВ приводит к уменьшению динамического диапазона и смещению кривых в область больших значений экспозиции.

Изменение светочувствительности носителя, фотографической широты и контраста изображения от потенциала зарядки происходит по кривым с максимумом, положение которого соответствует значению потенциала, при котором наблюдается переход от канавочного типа деформации к луночному. В качестве примера на рис. 6 представлена зависимость максимального контраста изображения от потенциала зарядки. Для сравнения приведена эта же зависимость в случае нерастрированного процесса записи. Кривая изменения контраста изображения от потенциала зарядки характеризуется двумя максимумами.

При растрированной записи может наблюдаться слабо выраженный максимум в случае формирования изображения авторегулярной (луночной) структурой. Спад контраста с увеличением потенциала зарядки выше 7 кВ обусловлен увеличением шума в связи с появлением неупорядоченной деформации на неосвещенных участках изображения. С уменьшением потенциала зарядки до величины, при которой потенциал на поверхности термопластического слоя ниже порогового значения образования авторегулярной деформации, происходит переход к канавочной деформации. Отсутствие хаотической деформации приводит к резкому возрастанию максимального контраста изображения. Контраст в случае растрированного процесса записи при всех значениях потенциала гораздо выше контраста изображения авторастрированной записи.

Увеличение контраста считываемого изображения представляется возможным достигнуть в случае луночного рельефа за счет растрирования несущей частотой, незначительно меньшей резонансной частоты термопластического слоя, и применением фильтрации шума при воспроизведении (рис. 7, кривая 3). Шумовое кольцо, образованное дифракцией света на неупорядоченной деформации, и дифракционный максимум при считывании расположены в этом случае под различными углами и контраст считываемых полос возрастает за счет использования диафрагмы, пропускающей только дифракционный максимум. Применение несущей частоты выше резонансной приводит к снижению контраста (рис. 7, кривая 1) в связи с резким спадом дифракционной эффектив-

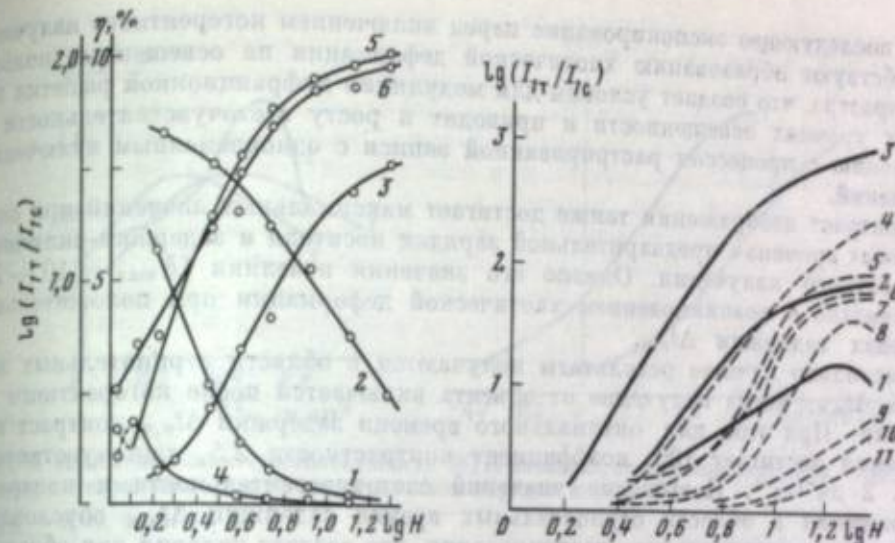


Рис. 4. Изменение дифракционной эффективности  $\eta_c$  (1, 4),  $\eta_T$  (2, 5) и  $\lg(I_{1T}/I_{1C})$  по клину освещенностей

1-2 — при  $U_1$ ; 4-6 — при  $U_2$ ;  $U_1 < U_2$

Рис. 5. Характеристические кривые ФТП-носителей при растрированной записи при различных потенциалах зарядки, кВ

1-4,2; 2-4,3; 3-4,4; 4-5; 5-5,3; 6-5,5; 7-5,8; 8-7,1; 9-7,8; 10-8,6; 11-9,4

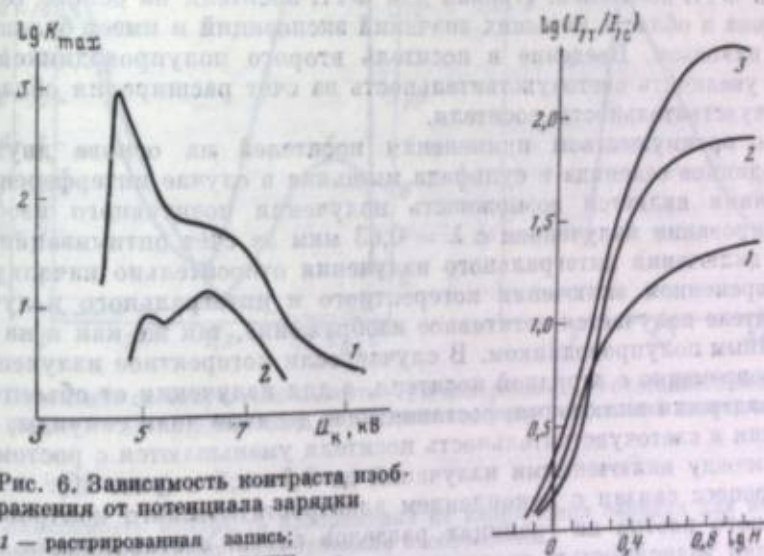


Рис. 6. Зависимость контраста изображения от потенциала зарядки

1 — растрированная запись; 2 — нерастрированная запись

Рис. 7. Характеристические кривые ФТП-носителя при различных пространственных частотах

1 —  $f > f_{\text{рез}}$ ; 2 —  $f = f_{\text{рез}}$ ; 3 —  $f < f_{\text{рез}}$

Светочувствительность носителя при интерференционном растрировании с одновременным включением когерентного и интегрального излучения несколько ниже, чем при авторастрированной записи.

Некоторое увеличение светочувствительности носителя представляется возможным осуществить за счет изменения временного интервала  $\Delta t_{н.к}$  между включением интегрального и когерентного излучений и за счет изменения времени предварительной зарядки носителя  $\Delta t_{U_{н.к}}$ . В области положительных значений  $\Delta t_{н.к}$ , когда излучение от объекта включается раньше когерентного излучения, светочувствительность достигает максимальных значений при определенных временах задержки  $\Delta t_{н.к}$  и соответствующих им временам предварительной зарядки носителя  $\Delta t_{U_{н.к}}$  (рис. 8). Предварительная зарядка носителя



ля и последующее экспонирование перед включением когерентного излучения способствуют образованию хаотической деформации на освещенных полосах макрорастра, что создает условия для модуляции дифракционной решетки при малых уровнях освещенности и приводит к росту светочувствительности по сравнению с процессом растриванной записи с одновременным включением излучений.

Контраст изображения также достигает максимальных значений при определенных временах предварительной зарядки носителя и задержки включения когерентного излучения. Однако его значения невелики ( $K_{max} = 10 \div 20$ ), что связано с возникновением хаотической деформации при положительных временах задержки  $\Delta t_{н.к.}$ .

Несколько лучшие результаты получаются в области отрицательных значений  $\Delta t_{н.к.}$ , когда излучение от объекта включается после когерентного излучения. При этом для оптимального времени задержки  $\Delta t_{н.к.}$  контраст изображения достигает 100, коэффициент контрастности 2,5, светочувствительность  $2 \text{ лк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Повышение значений светочувствительности и контраста изображения в области отрицательных времен задержки  $\Delta t_{н.к.}$  обусловлено влиянием предварительного растривания, что создает условия для образования упорядоченного микрорельефа и уменьшает критический потенциал образования деформации при последующем экспонировании интегральным светом.

Другой возможностью увеличения светочувствительности при интерференционном растривании является, так же как и в случае саморастриванного процесса, применение для записи носителей на основе гетеропереходов. На рис. 9 представлены характеристические кривые растриванной записи для двух типов ФТП-носителей. Кривая для ФТП-носителя на основе гетероперехода смещена в область меньших значений экспозиций и имеет больший динамический диапазон. Введение в носитель второго полупроводникового слоя позволяет увеличить светочувствительность за счет расширения области спектральной чувствительности носителя.

Другим преимуществом применения носителей на основе двухслойных полупроводников селенида и сульфида мышьяка в случае интерференционного растривания является возможность получения позитивного изображения при растривании излучением с  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  за счет оптимизации времени задержки включения интегрального излучения относительно начала зарядки. При одновременном включении когерентного и интегрального излучений на таком носителе получается негативное изображение, так же как и на носителе с однослойным полупроводником. В случае, если когерентное излучение включается одновременно с зарядкой носителя, а для излучения от объекта вводится время задержки включения, составляющее десятки доли секунды, контраст изображения и светочувствительность носителя уменьшаются с ростом времени задержки между включениями излучений до  $0,7-0,8 \text{ с}$  (рис. 10).

Этот процесс связан с накоплением электростатического контраста интерференционного растра на границах разделов слоев, составляющих носитель, и обусловлен зависимостью скорости его образования на поверхности термопластика от сопротивления нижнего слоя носителя — селенида мышьяка. При включении излучения от объекта в формировании контраста растра на освещенных участках играют роль два фактора: с одной стороны, гашение дальнейшего образования контраста при продолжающемся воздействии когерентного и интегрального излучений вследствие уменьшения кратности фототока селенида мышьяка к когерентному излучению; с другой — увеличение скорости накопления зарядов на поверхности термопластического слоя вследствие уменьшения сопротивления слоя селенида мышьяка в соответствии с электростатическим контрастом, образовавшимся до включения интегрального излучения в системе сульфид мышьяка — термопластик.

При определенном времени задержки включения интегрального излучения (в данном случае  $0,8 \text{ с}$ ) второй фактор настолько превышает первый, что на освещенных участках носителя формируется в результате продолжающегося процесса зарядки дифракционная решетка, по своей эффективности сравнимая с дифракционной решеткой, образующейся на неосвещенных участках. В результате исчезает контраст изображения — точка перехода негатива в по-

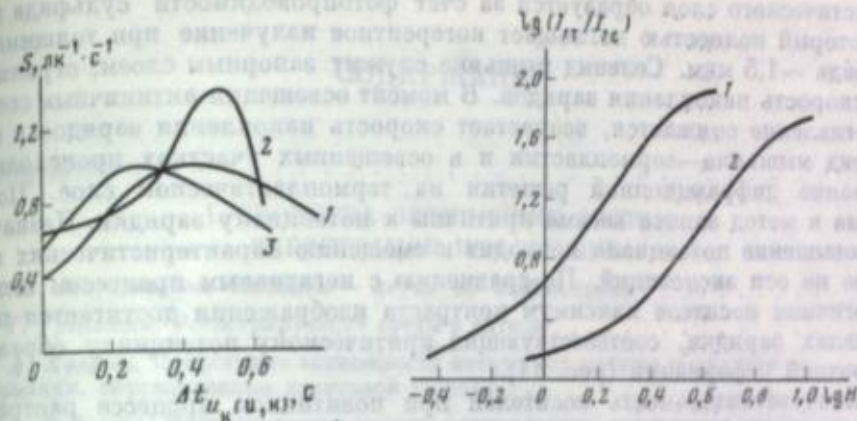


Рис. 8. Изменение светочувствительности ФТП-носителя от времени задержки между включением интегрального излучения и началом зарядки носителя

$M_{д.т.} = 0$  (1), 2 (2), 5 с (3)

Рис. 9. Характеристические кривые для ФТП-носителей на основе гетероструктуры (1) и на основе однослойного полупроводникового слоя (2)

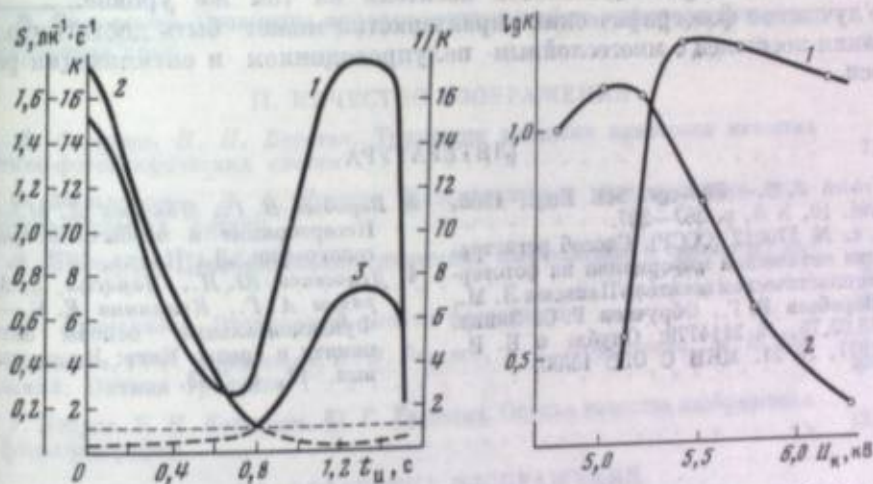


Рис. 10. Изменение светочувствительности (1) и контраста (2, 3) считанного изображения для носителя на основе гетероструктуры от времени задержки включений интегрального излучения

2 — контраст «негатив»; 3 — контраст «позитив»

Рис. 11. Зависимость контраста изображения от напряжения зарядки для негативного (1) и позитивного (2) процессов формирования изображения

зитив. Дальнейшее увеличение времени задержки включения интегрального излучения (до  $1,2 \text{ с}$ ) приводит к формированию позитивного изображения, росту контраста и светочувствительности носителя вследствие размыва электростатического контраста интерференционного растра на темных участках изображения после выключения когерентного излучения и уменьшения времени достижения критической разности потенциалов образования деформации термопластического слоя на освещенных участках.

Позитивное изображение на носителях с гетеропереходом в качестве фоточувствительного слоя образуется также и в случае одновременного включения когерентного и интегрального излучений, если выполняется условие полного поглощения когерентного излучения слоем полупроводника, находящимся в контакте с термопластическим слоем. При записи на носителях типа металл — селенид мышьяка — сульфид мышьяка — термопластик и растривании когерентным излучением с длиной волны  $0,441 \text{ мкм}$  (гелий-кадмиевый лазер) рентгеновским излучением с длиной волны  $0,441 \text{ мкм}$  дифракционной решетки на поверхности термопластический контраст интерференционной решетки на поверхности тер-

мопластического слоя образуется за счет фотопроводимости сульфида мышьяка, который полностью поглощает когерентное излучение при толщинах слоя сульфида ~1,5 мкм. Селенид мышьяка служит запорным слоем, ограничивающим скорость накопления зарядов. В момент освещения активным светом его сопротивление снижается, возрастает скорость накопления зарядов в системе сульфид мышьяка—термопластик и в освещенных участках происходит формирование дифракционной решетки на термопластическом слое. Подобная система и метод записи весьма критичны к потенциалу зарядки. Незначительное повышение потенциала приводит к смещению характеристических кривых вправо по оси экспозиций. По сравнению с негативным процессом записи на аналогичном носителе максимум контраста изображения достигается при потенциалах зарядки, соответствующих критическому потенциалу образования канавочной деформации (рис. 11).

Светочувствительность носителей при позитивном процессе растриванной записи несколько выше, чем при негативном, и максимум ее также достигается при малых критических потенциалах.

Таким образом, при записи изображений на фототермопластических носителях с осуществлением интерференционного растривания несущей частотой представляется возможным получить более высокий контраст воспроизведенного изображения по сравнению с процессом саморастриванной записи при сохранении светочувствительности носителя на том же уровне.

Улучшение фотографических характеристик может быть достигнуто за счет создания носителей с многослойным полупроводником и оптимизации режимов записи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Urbach J. C.— Photogr. Sci. Eng., 1966, vol. 10, N 5, p. 287—297.
2. А. с. № 570012 (СССР). Способ регистрации оптической информации на фототермопластическом носителе/Панасюк Л. М., Воробьев В. Г., Обручьев Г. С. Заявл. 13.03.75, № 2114779; Оубл. в Б. И., 1977, № 31. МКИ С 03С 13/00.
3. Воробьев В. Г., Панасюк Л. М.— В кн.: Несеребряные и необычные среды для голографии. Л.: Наука, 1978, с. 71—81.
4. Денисенко Ю. Н., Панасюк Л. М., Баратов А. Г., Калинина Е. Б.— В кн.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Вища шк., 1981, вып. 12, с. 143.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### I. СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ

М. М. Мирошников. Иконика — наука об изображении . . . . .	4
С. Г. Гренишин. Регистрирующие среды в оптике . . . . .	28
Л. А. Халфин. Предельные возможности оптических методов получения информации, обусловленные квантовой теорией . . . . .	39
С. А. Родионов. Математические модели формирования оптического изображения . . . . .	44
М. Г. Шлякин. Выбор и оптимизация параметров оптико-фотографических систем . . . . .	55
И. И. Цуккерман. Пути повышения информационной емкости в телевидении . . . . .	58
А. В. Луизов. Количественная оценка зрительного восприятия . . . . .	62
А. Ф. Симоненко. Сравнение информационных свойств различных фоторегистрирующих сред . . . . .	65

### II. КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А. Я. Смирнов, Н. П. Березин. Тенденции развития критериев качества оптико-фотографических систем . . . . .	72
А. Ф. Мельманович, Д. А. Януш. Математическое моделирование аэрофотографических систем . . . . .	85
В. Ф. Нестерук. Преобразование оптических изображений и оценка их качества . . . . .	93
К. М. Виноградов. Визуальный анализ фотоснимков . . . . .	102
В. Г. Ильин, Г. О. Каралетян, Н. В. Ремизов, Г. Т. Петровский, М. Н. Полянский. Оптика градианов . . . . .	106
С. Т. Бобров, Б. Н. Котляцов, Ю. Г. Туркеев. Оценка качества изображения в фотолитографии . . . . .	121

### III. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. П. Петров, В. А. Капустин, А. В. Хоменко. Обработка изображений, изменяющихся во времени . . . . .	126
Э. И. Крупицкий. Гибридные оптико-электронные комплексы для обработки изображений . . . . .	132
Л. П. Ярославский. Адаптивные методы обработки изображений . . . . .	141
А. Н. Коралев. Оптико-электронная коррекция и преобразование изображений в сканирующих системах . . . . .	145
В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, В. Г. Вакулик. Ограничения апостериорных методов повышения пространственного разрешения . . . . .	149

### IV. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ

Ю. А. Черкасов. Фототермопластический процесс и проблемы иконики . . . . .	166
Н. Г. Находкин, М. Ю. Баженов, Н. Г. Кушнинский. Управление качеством изображения на термопластических средах . . . . .	182
Л. М. Панасюк. Фотографические характеристики фототермопластических носителей . . . . .	187
Л. М. Панасюк, В. Г. Воробьев, Л. Н. Беллева. Сенситометрические характеристики фототермопластических носителей при записи изображений с несущей частотой . . . . .	194

УДК 621.397.612.843.7

Мирошкин М. М., Иконина — наука об изображении. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Изложены содержание и структура иконии — науки об изображении. Рассмотрены законы зрительного восприятия, охватывающие восприятие света, формирование уровня адаптации, восприятия сюжетного изображения, свойства константности и экстремальности зрительного восприятия. Обсуждаются общие аспекты обработки изображения, вопросы оценки качества и преобразования его; специально рассмотрены структура и свойства нелинейного статистического преобразования. Приведены примеры обработки. Обсуждается реализация алгоритмов в оптико-электронной аппаратуре.

Табл. 1. Ил. 16. Библиогр. 12 назв.

УДК 772.773

Гренишин С. Г. Регистрирующие среды в оптике. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Дан обзор фотографических процессов (регистрирующих систем), сыгравших и продолжающих играть исключительную важную роль в развитии оптики как науки, а также в разных направлениях ее применения. Наряду с галогенсеребряными фотографическими процессами в ряде областей науки и техники успешно применяются и бессеребряные процессы, которые все большую роль начинают играть в оптике и оптическом приборостроении. В статье рассматриваются бессеребряные фотографические процессы, которые найдут или найдут в ближайшее время практическое применение. Основные сенситометрические характеристики этих процессов сравниваются с характеристиками галогенсеребряных фотографических процессов.

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр. 24 назв.

УДК 535.81

Халфин Л. А. Предельные возможности оптических методов получения информации, обусловленные квантовой теорией. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Исследуются предельные возможности оптических методов, обусловленные квантовой теорией. Обсуждаются принципиальные недостатки классического подхода. Исследуется предельная разрешающая способность при наличии внешних и внутренних помех. Исследуется асимптотика предельной разрешающей способности при сверхвысоких энергиях (частотах).

Библиогр. 19 назв.

УДК 535.81

Родионов С. А. Математические модели формирования оптического изображения. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Рассматривается система математических моделей оптических изображающих устройств, основанная на блочно-иерархическом подходе и удовлетворяющая требованиям адекватности, универсальности, однозначности и простоты. Рассмотрена задача оценки качества изображения и приведены выражения для объективных критериев качества в моделях с оптимальным анализатором и аддитивным гауссовским шумом, в изображающих системах, координатных измерительных приборах и системах с бинарными регистрирующими слоями.

Ил. 5. Библиогр. 17 назв.

УДК 771.537.61

Шпильки М. Г. Выбор и оптимизация параметров оптико-фотографических систем. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Обсуждается ограничение разрешающей способности оптико-фотографической системы, определяемое квантовой эффективностью фотоматериала. Зависимость отношения сигнал/шум от экспозиции, характеристика для фотографии, сравнивается с аналогичной зависимостью для оптоэлектронного приемника. Рассмотрена задача выбора оптимального фокусного расстояния фотоаппарата без учета и с учетом движения аппарата во время экспонирования.

Ил. 1. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.397.2.637.372

Цуккерман И. И. Пути повышения информационной емкости в телевидении. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Обсуждаются возможности повышения информационной емкости телевизионной системы, используемой для регистрации оптических изображений. Особенно эффективен переход от аналоговой способности телевизионной системы при цифровой регистрации одноэлектронных событий может быть увеличена по крайней мере на порядок. Значительно расширяется при цифровом накоплении и динамический диапазон.

Ил. 2. Библиогр. 5 назв.

УДК 612.843.7:007

Луинов А. В. Количественная оценка зрительного восприятия. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

На основе определения зависимости предельного угла разрешения глаза от яркости фона, контраста и углового расстояния объекта от зрительной оси определена информационная емкость и информационная пропускная способность периферической части органа зрения. Проведено сравнение этой пропускной способности с пропускной способностью зрения в целом.

Библиогр. 9 назв.

УДК 771.537

Симоненко А. Ф. Сравнение информационных свойств различных фоторегистрирующих сред. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Проведено сопоставление регистрирующих изображений систем с фотографическими, фотохромными, фотоломинесцентными и фототермопластическими носителями. Показаны преимущества таких информационных параметров, как эффективность детектирования, оптимальная экспозиция и разрешающая способность.

Выполнен анализ последовательных стадий преобразования изображения в этих системах, показано, что для систем с фотохромной и фотоломинесцентной записью изображения лимитирующей величиной эффективности являются стадии визуализации и считывания.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр. 9 назв.

УДК 771.537

Смирнов А. Я., Березин Н. П. Тенденции развития критериев качества оптико-фотографических систем. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

На протяжении долгого времени специалисты по оптике и фотографии отождествляли качество аппаратуры с разрешающей способностью, т. е. минимальным размером деталей, различаемых в регистрируемых изображениях. Критерии разрешения до сих пор не потеряли практического значения, однако под влиянием ряда разделов современной кибернетики и квалиметрия проблема оценки качества оптико-фотографических систем вышла далеко за пределы понятия о разрешении и превратилась в самостоятельную область исследований. В работе делается попытка систематизации возможных подходов к решению этой проблемы, проводится обзор основных результатов и тенденций развития.

Схемы 4. Ил. 4. Библиогр. 12 назв.

УДК 778.35

Мельников А. Ф., Януш Д. А. Математическое моделирование аэрофотографических систем. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Рассмотрены методологические аспекты математического моделирования аэрофотографических систем (АФС) в задачах формирования изображения, анализа и синтеза. Указаны особенности математической модели АФС, предназначенной для черно-белого фотографирования подкроматических объектов. Приведена структурная схема анализа АФС по показателю качества изображения — разрешающей способности. Синтез АФС отнесен к задачам нелинейного программирования. Основное внимание уделено поиску множества векторов технических параметров АФС, на котором должна быть задана целевая функция. Независимо от используемого показателя качества изображения математическая модель АФС в задаче синтеза включает процедуры поиска функции рассеивания АФС, ее декомпозиции и оптимизации. Для сокращения пространства решений и исключения физически нереализуемых систем введены ограничения. Описана структура синтеза АФС по вероятности обнаружения известного объекта. Приведены результаты моделирования.

Ил. 3. Библиогр. 16 назв.

УДК 621.397 : 612.843.7

Нестерук В. Ф. Преобразование оптических изображений и оценка их качества. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

На основе методов иконии рассматриваются задачи нелинейных безмерционных преобразований плоских черно-белых изображений. Математические алгоритмы преобразований строятся из законов зрительного восприятия. Они позволяют, основываясь на простейших статистических характеристиках изображений — гистограммах, дать общее выражение для оптимального по максимуму вероятности преобразования алгоритма, а также ряда других по заданному виду распределения вероятностей преобразованного изображения, методам вычисления контраста — одного из параметров качества изображения.

Отдельно выделен вопрос о зависимости информационной емкости изображения от параметра разрешения и показано, что если не вводить ограничения на величину мгновенных значений яркости элементов, то имеется оптимальное значение параметра, согласующееся с визуальной оценкой качества.

Ил. 1. Библиогр. 10 назв.

УДК 778.148

Виноградов К. М. Визуальный анализ фотоснимков. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Для изучения земной поверхности применяются различные средства наблюдения, позволяющие получать аэрофотоснимки. В связи с этим весьма актуальной является задача визуального анализа фотоснимков. Возникновение новых средств наблюдения требует создания новой аппаратуры для дешифрирования. Наряду с традиционными просмотрными столами, лупами и стереоскопами применяются проекционно-просмотровые приборы, приборы синтеза многоканальных изображений, оптико-электронные системы дешифрирования. Специфического подхода требует также назначение результатов дешифрирования.

В перспективе следует ожидать усиления влияния метрологических характеристик в качестве за счет использования количественных тоновых и структурометрических характеристик в процессе дешифрирования признака.

Ил. 1. Библиогр. 23 назв.

УДК 535.666.189.2

Ильин В. Г., Каранетя Г. О., Ремизов Н. В., Петровский Г. Т., Подлинский М. Н. Оптика градиентов. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Описаны основные положения геометрической оптики градиентов и метрологии градиентных сред.

Обсуждаются конкретные изделия на основе градиентов, серийно выпускаемые для волоконно-оптических линий связи и систем передачи изображений. Отмечается, что градиентная оптика находится в самом начале своего развития, а описание применения лишь иллюстрирует те широкие возможности, которые открывает в оптическом приборостроении использование новых оптических материалов с градиентом физических свойств.

Табл. 1. Ил. 14. Библиогр. 57 назв.

УДК 621.383.8 : 776

Бобров С. Т., Котлецов В. Н., Туркевич Ю. Г. Оценка качества изображения в фотолитографии. — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Рассмотрены особенности оценки качества проекционных оптических систем для прецизионной фотолитографии. Специфическими требованиями и таким оптическим системам являются изопланатизм и высокая крутизна распределения интенсивности в изображении штриховых элементов, близкая по размерам к дифракционному разрешению. По этим параметрам оптические системы рассчитываются и оптимизируются. Обсуждаются возможные пути оптимизации. Приведены результаты расчета частично оптимизированных изображений квадратного элемента при некоторых случаях частично определения интенсивности в изображении, позволяющих оценивать качество фотолитографического процесса.

Ил. 4. Библиогр. 4 назв.

УДК 681.7.014.3 + 681.7.013.61.8 + 621.391.26

Петров М. П., Капустин В. А., Хоменко А. В. **Обработка изображений, изменяющихся во времени.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Приведены доводы в пользу динамической селекции изображений при обработке изображений, изменяющихся во времени. Продемонстрирована возможность динамической селекции изображений в оптических процессорах при использовании пространственно-временного модулятора ПРИЗ, разработанного в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Подавление неизменной во времени компоненты изображения во всех режимах составляет 12—40 дБ. Построена феноменологическая линейная модель частотной характеристики пространственно-временного модулятора света с динамической селекцией изображений (типа ПРИЗ). Квадрат модуля этой частотной характеристики обнаруживает замечательное сходство с квадратом модуля частотной характеристики глаза животных и человека.

Ил. 6. Библиогр. 27 назв.

УДК 535.818

З. И. Крупицкий. **Гибридные оптико-электронные комплексы для обработки изображений.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

В обзоре обобщаются накопленные данные по гибридным оптико-электронным комплексам для обработки изображений (ГОЭК), в которые входит аналоговый оптический процессор, микро(мини)-ЭВМ, а также аппаратура сопряжения и отображения информации. Рассматриваются общие принципы построения ГОЭК, алгоритмические возможности аналоговой оптической части как с управлением, так и без управления оптическим излучением, производится качественное сравнение ГОЭК с другими средствами обработки изображений (электронными цифровыми, телевизионными и др.) и намечаются пути целесообразного использования ГОЭК для решения практических задач.

Схемы 2. Библиогр. 40 назв.

УДК 535 : 621.383.8

Л. П. Ярославский. **Адаптивные методы обработки изображений.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Обсуждаются проблемы создания методов обработки, адаптирующихся к неизвестным искажениям и помехам. Рассматривается автоматизация диагностики помех и искажений на изображениях, характеристики линейных фильтров с автоматической настройкой параметров.

Библиогр. 6 назв.

УДК 618.7.013.82

Королев А. Н. **Оптико-электронная коррекция и преобразование изображений в сканирующих системах.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Рассмотрены возможности реализации алгоритмов линейной двумерной фильтрации общего вида в сканирующих системах. Преобразование изображений выполняется методом свертки изображений с двухмерным импульсным откликом в реальном времени сканирования. Описана схема многоканальной оптико-электронной процессора для обработки изображений и приведены результаты обработки для случая изотропного импульсного отклика. Анализируются возможные пути развития данного метода для широкого класса задач обработки изображений.

Ил. 5. Библиогр. 9 назв.

УДК 520.82 : 771.537.64

Дудинов В. Н., Цветкова В. С., Вакулин В. Г. **Ограничения апостериорных методов повышения пространственного разрешения.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Описаны результаты моделирования возможностей улучшения дешифрируемости изображения, записанного на тонкую аэрофотоплёнку, обладающую разрешением  $250 \text{ мм}^{-1}$ . Сделан вывод о неэффективности коррекции оптической передаточной функции аэрофотоплёнки за пределами полосы  $25-30 \text{ мм}^{-1}$ , что обусловлено наличием аномально высокого шума на низких и средних пространственных частотах. Оценены информационные характеристики некоторых типов современных аэрофотоплёнок. Продемонстрировано заметное улучшение дешифрируемости при апостериорной обработке снимков, полученных усреднением по нескольким кадрам.

Ил. 13. Библиогр. 5 назв.

УДК 772.932.45

Черкасов Ю. А. **Фототермопластический процесс и проблемы иконки.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Дана общая схема оперативной регистрации и обработки изображений ФТП-средами. Сопоставлены свойства фототермопластических, галогенсеребряных и электрооптических сред. Рассмотрена структура оптического изображения при ФТП-регистрации и применение ФТП-материала для оперативной регистрации и обработки изображений.

Табл. 3. Ил. 10. Библиогр. 5 назв.

УДК 772.932.45 : 772.773

Находкин Н. Г., Баженов М. Ю., Кувшинский Н. Г. **Управление качеством изображения на термопластических средах.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

На основе анализа физических процессов, протекающих в термопластических средах при световой регистрации оптических голограмм, рассмотрены вопросы управления информационными свойствами сред и повышения качества записи. Предложен оптимальный вариант аппаратуры управления термопластическими средами.

Ил. 8. Библиогр. 14 назв.

УДК 772.932.45

Панасюк Л. М. **Фотографические характеристики фототермопластических носителей.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Приводятся данные по исследованию сенситометрических характеристик фототермопластических (ФТП) носителей, фоточувствительный слой которых выполнен на основе стеклообразных халькогенидов мышьяка, а в качестве визуализирующего слоя используются сополимеры бутилметакрилата со стиролом, остилметакрилатом и винилнафталином. Показано, что фотографические параметры ФТП-носителей в первую очередь определяются квантовым выходом внутреннего фотоэффекта из материала полупроводникового слоя, его спектральной и температурной зависимостью. Наибольшими фоточувствительностью и фотографической широтой обладает ФТП-носитель с фоточувствительным слоем в виде гетероструктуры. Наименением условий записи возможно получение близких сенситометрических характеристик для широкого набора термопластических материалов.

Приводятся частотно-контрастные характеристики системы ФТП-носитель—объектив. Делается вывод, что фототермопластические носители на основе неорганических стеклообразных халькогенидов мышьяка могут быть использованы для замены высоко разрешающих галогенсеребряных негативных эмульсий.

Ил. 10. Библиогр. 7 назв.

УДК 772.932.45

Панасюк Л. М., Воробьев В. Г., Белыева Л. Н. **Сенситометрические характеристики фототермопластических носителей при записи изображений с несущей частотой.** — В кн.: Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985, т. 23.

Рассмотрено влияние процесса растривания на сенситометрические характеристики ФТП-носителей. Представлены схемы устройств записи и считывания изображений при различных напряжениях растривания. Рассматривается механизм формирования изображения при различных напряжениях зарядки поверхности носителя. Варьируя время задержки выключения интегрального и когерентного излучения относительно друг друга и время предварительной зарядки носителя, можно улучшить фотографические характеристики ФТП-носителей. Другой возможностью увеличения светочувствительности является применение для записи носителей на основе двухслойных фоточувствительных слоев. Показана возможность получения негативных и позитивных изображений на ФТП-носителях с различными фоточувствительными слоями.

Ил. 11. Библиогр. 4 назв.

**УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ**

т. XXIII

Оптическое изображение  
и регистрирующие среды

Утверждено к печати  
Институтом электрохимии  
АН СССР им. А. Н. Фрумкина

Редактор Е. П. Шумилова. Редактор издательства М. С. Бучаченко  
Художественный редактор Г. П. Ваалас. Технический редактор И. И. Плохова.  
Корректоры И. Г. Васильева, Т. С. Коалова

ИБ № 27812

Сдано в набор 12.10.84. Подписано к печати 28.12.84. Т-20453. Формат 70×108<sup>1/8</sup>  
Бумага типографская № 1  
Гарнитура осыновленная. Печать высокая. Усл. печ. л. 18,2. Уч.-изд. л. 21,4.  
Усл. кр. отт. 18,55. Тираж 1000 экз. Тип. зак. 670. Цена 3 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Наука» 117804 ГСП-7, Мясца В-485, Профсоюзная ул., 90,  
2-я типография издательства «Наука» 121099, Москва, Г-90, Шубинский пер., 6

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НАУКА»

ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ

КНИГИ:

**УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ**

Т. XXIV

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ  
И ХИМИИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Том составлен из обзорных статей ведущих специалистов в области галоген-серебряных фотографических процессов. Подробно рассмотрен механизм образования и роста плоских микрокристаллов галогенидов серебра, их физические и фотографические свойства. Детально обсуждается одна из важных проблем теории: механизм агрегации фотолитического серебра. Рассмотрен механизм суперсенситивизации галогенида серебра адсорбированным на нем красителем, предложена химическая теория спектральной сенситивизации. В последней части сборника обсуждаются вопросы усиления фотографического изображения, в том числе в результате каталитического образования красителя. Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области химии и физики фотографических процессов.

К. В. ЧИБИСОВ, В. И. ШЕБЕРСТОВ

**ФОТОГРАФИЯ В ПРОШЛОМ,  
НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ.**

Это научно-популярное издание, которое включает рассмотрение фундаментальных основ фотографии; кроме того книга охватывает весь сложный путь развития фотографических процессов: от начальных, уже исторических способов проходит далее через их современное состояние и заканчивается рассмотрением важнейших применений и перспектив дальнейшего прогресса в области природы традиционного фотографического процесса и необычных, бессеребряных средств фотографии.

Книга предназначена для лиц, знакомых с практикой и принципами фотографии, но желающих расширить и углубить свои знания.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу: 117192, Москва, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197345 Ленинград, Петровская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига», имеющий отдел «Книга — почтой».

- |        |   |        |   |
|--------|---|--------|---|
| 480091 | Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97<br>(«Книга — почтой»);     | 196034 | Ленинград, В/О, 9 линия, 16;  |
| 370005 | Баку, ул. Джапаридзе, 13 («Книга — почтой»);              | 220012 | Минск, Ленинский проспект, 72<br>(«Книга — почтой»);                    |
| 320093 | Днепропетровск, проспект Гагарина, 24 («Книга — почтой»); | 103009 | Москва, ул. Горького, 19а;  |
| 734001 | Душанбе, проспект Ленина, 95<br>(«Книга — почтой»);       | 117312 | Москва, ул. Вавилова, 55/7;   |
| 375002 | Ереван, ул. Туманяна, 31;                                 | 630076 | Новосибирск, Красный проспект, 51;                                      |
| 664033 | Иркутск, ул. Лермонтова, 289;                             | 630000 | Новосибирск, Академгородок,<br>Морской проспект, 22 («Книга — почтой»); |
| 420043 | Казань, ул. Достоевского, 53;                             | 142292 | Пуццио, Московская обл., МР,<br>«В», 1;                                 |
| 252030 | Киев, ул. Ленина, 42;                                     | 620151 | Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 («Книга — почтой»);                |
| 252030 | Киев, ул. Пирогова, 2;                                    | 700029 | Ташкент, ул. Ленина, 73;  |
| 252142 | Киев, проспект Вернадского, 79;                           | 700100 | Ташкент, ул. Шота Руставели, 43;  |
| 252030 | Киев, ул. Пирогова, 4 («Книга — почтой»);                 | 700187 | Ташкент, ул. Дружбы народов, 6<br>(«Книга — почтой»);                   |
| 277012 | Кашива, проспект Ленина, 148<br>(«Книга — почтой»);       | 634050 | Томск, наб. реки Ушайки, 19;  |
| 343900 | Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1;                  | 450059 | Уфа, ул. Р. Зорге, 10 («Книга — почтой»);                               |
| 660049 | Красноярск, проспект Мира, 84;                            | 450025 | Уфа, ул. Коммунистическая, 49;  |
| 443002 | Куйбышев, проспект Ленина, 2<br>(«Книга — почтой»);       | 720001 | Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 («Книга — почтой»);                    |
| 191104 | Ленинград, Литейный проспект, 57;                         | 310078 | Харьков, ул. Чернышевского, 8,<br>(«Книга — почтой»);                   |
| 199184 | Ленинград, Таможенный пер., 2;                            |        |   |

ПОЛУЧЕНИЕ ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

ИЛИ ДОСТАВКА

3 р. 30 к.

1811