6
А45

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА

Министерство сельского хозяйства СССР

На правах рукописи

Юрий Иванович ФИВЕНСКИЙ

УЛУЧШЕНИЕ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ФОТОСНИМКОВ СО СМАЗОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТОДОМ МАСКИРОВАНИЯ

Специальность 05.24.02
Аэросъемка, фототопография

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1973

6
45

Работа выполнена в лаборатории аэрофотометодов кафедры геодезии и картографии географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Б.Н.РОДИОНОВ.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор В.Я.МИХАЙЛОВ ;
- кандидат технических наук, доцент К.А.ЗЫКОВ .

Ведущее предприятие - Военно-инженерная ордена Ленина краснознаменная академия имени В.В.Куйбышева.

Автореферат разослан " " 1973 г.

Защита диссертации состоится " " 1973 г. в " " часов на заседании ученого Совета Московского института инженеров землеустройства по адресу: г. Москва, К-64, ул. Казакова, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваши отзывы и замечания на автореферат, заверенные печатью (в 2 экземплярах) просим направлять в адрес института.

Ученый секретарь Совета

О.Ф.Козырева

Возрастающие требования к эффективности аэро- и космических съемок при изучении земной и лунной поверхности заставили обратить серьезное внимание на повышение качества аэрокосмических снимков и совершенствование методов их послесъемочной обработки. Необходимость решения этих задач вытекает из директив XXIУ съезда КПСС по развитию народного хозяйства СССР. Ускорение темпов развития ряда отраслей промышленности и особенно сельского хозяйства требует наиболее рационального использования природных ресурсов страны. Важная роль в решении этой проблемы принадлежит аэро- и космическим съемкам, материалы которых служат основой для решения практических задач в инженерных изысканиях, землеустройстве и сельскохозяйственном картографировании. Повышение качества аэрофотоизображения открывает реальные перспективы снижения себестоимости и сокращения сроков работ при аэросъемке и картографировании обширных территорий за счет уменьшения масштаба фотографирования и последующего использования снимков с большими увеличениями.

Одной из основных причин ухудшения изобразительных свойств аэрокосмических снимков является сдвиг оптического изображения, вызываемый перемещением фотоаппарата во время экспонирования. Сдвиг уменьшает детальность воспроизведения объекта и препятствует эффективному использованию для съемки фотографирующих систем с высокой исходной разрешающей способностью. Визуальное дешифрирование снимков со смазанным из-за сдвига изображением затруднено тем, что часть содержащейся в нем информации оказывается записанной в непонятной для наблюдателя форме. Поэтому действительные возможности изображения обычно реализуются неполностью.

Вопросы влияния сдвига на качество фотографического изображения, несмотря на достигнутые за 30- летнюю историю их исследовани успехи, остаются недостаточно изученными. До сих пор не разработана методика оценки качества работы фотографирующих систем в при-

1-1149

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии педаг. наук СССР

сутствии сдвига, удовлетворяющая возросшим требованиям практики. Это объясняется общими трудностями проблемы оценки качества изображения и спецификой вызываемых сдвигом изменений передаточных свойств системы. Неопределенность результатов численной оценки качества фотографирующих систем стала особенно заметна в связи с развитием методов коррекции изображения, направленных на улучшение изобразительных свойств снимков при их послесъемочной обработке.

Проводимым в условиях съемки мероприятиям по уменьшению сдвига изображения (компенсация линейного сдвига, стабилизация фотоаппарата, выбор достаточно короткой выдержки) свойственны недостатки, в силу которых их применение на практике ограничено и не гарантирует полного исключения любого вида сдвига. Коррекция призвана устранять ухудшающие визуальное качество изображения явления (в частности, смаз изображения из-за остаточных сдвигов) и способствовать этим более полной реализации потенциальных возможностей фотографирующих систем при дешифрировании снимков. Однако, вопросы коррекции изображения требуют своего дальнейшего теоретического и практического развития. Известные способы коррекции конструктивно сложны и не всегда применимы для уменьшения смаза изображения. Недостаточно изучены вопросы оценки качества восстановленного изображения и выбора оптимальных условий проведения коррекции. Вместе с тем, не все еще пути осуществления коррекции изображений со смазом исследованы. Одним из таких путей является использование техники фотографического маскирования.

Основная задача реферируемой работы состояла в исследовании теоретических и практических возможностей применения фотографического маскирования для уменьшения смаза изображения на аэрокосмических снимках. Эта задача, однако, не могла быть решена без рассмотрения характера происходящих при сдвиге изменений передаточных свойств фотографирующей системы, от которых зависит качество под-

лежащего коррекции первичного изображения. Поэтому при разработке темы дополнительно было исследовано влияние сдвига на качество работы фотографирующих систем с целью внесения уточнений в методику их оценки и выбора характеристик отдельных их элементов, обеспечивающих возможность эффективного применения коррекции для уменьшения смаза в получаемом изображении.

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения на 143 машинописных страницах, списка литературы и приложений.

В первой главе проведен анализ геометрических и частотных характеристик некоторых наиболее часто встречающихся при фотографировании сдвигов изображения. При этом на основе имеющихся в литературе сведений рассмотрены элементарные сдвиги, возникающие в кадровых фотоаппаратах с плоской прикладной рамкой (в том числе, с компенсирующими устройствами), в некоторых панорамных сканирующих аэрокамерах и высокоскоростных фотографических камерах с покадровой съемкой.

Исходными для определения передаточных свойств сдвига являются закон движения и закон изменения яркости точек оптического изображения в течение времени экспонирования. В связи с этим различаются геометрический и экспозиционный сдвиги изображения. Основными характеристиками геометрического сдвига принимаются: величина сдвига a, траектория $f(x,y)=0$ и скорость движения точки изображения по траектории $w=\dot{u}(t)$. Экспозиционная форма сдвига рассматривается на стадии образования изображения в действующих экспозициях. Понятие "экспозиционный сдвиг" является удобным для представления сдвига в качестве статичного (в отличие от динамической природы процесса) элемента фотографирующей системы, передаточные свойства которого полностью описываются функцией рассеяния точки $g_s(u)$, определенной для всех значений аргумента и тождественно

равной нулю вне интервала $(0, a)$. При этом форма и размеры пятна рассеяния экспозиционного сдвига определяются траекторией и величиной геометрического сдвига. Для описания передаточных свойств экспозиционного сдвига на частотном языке вместо функции рассеяния используется ее преобразование Фурье $T_s(j a \nu_u)$, называемое амплитудно-фазовой пространственно-частотной характеристикой (ν_u - пространственная частота в мм$^{-1}$). Название сдвига определяется видом порождающего его движения оптического изображения.

В результате анализа известных из литературы законов движения оптического изображения установлено, что при постоянстве значений векторов скорости поступательного и вращательного движений фотоаппарата возникают сдвиги гиперболического типа по виду функции $\dot{u}(t)$. Ввиду малости временного интервала экспонирования эти сдвиги могут быть сведены к случаю равномерно-ускоренного, выражение которого с учетом ошибки m компенсации постоянной составляющей скорости движения w_0 имеет вид:

$$w = w_0(m + 2Ct), \qquad 0 \leqslant t \leqslant \tau \quad , \qquad (1)$$

где C - постоянная, величина которой зависит от элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимка, скорости перемещения фотоаппарата и координат точки изображения в начальный момент времени.

Равномерно-ускоренный сдвиг возникает также в силу конструктивных особенностей съемочной аппаратуры и методических погрешностей компенсирующих устройств. Он может рассматриваться как частный случай других видов сдвига, обусловленных неравномерностью перемещения фотоаппарата. Это позволяет считать его наиболее распространенным их элементарных видов сдвига изображения.

В диссертации изложен путь расчета и получены на основе использования операционного метода математические выражения для частотных характеристик гиперболического и равномерно-ускоренного сдвигов, учитывающие в отличие от известных выражений величину коэффициента полезного действия затвора η и ошибки m компенсации. При $0 \leqslant m \leqslant 1$ и $\eta = 1{,}0$ амплитудно-частотная $A_s(a\nu)$ и фазо-частотная $\Phi_s(a\nu)$ характеристики равномерно-ускоренного сдвига, являющиеся соответственно модулем и аргументом функции $T_s(ja\nu)$, имеют вид:

$$T_s(ja\nu) = b_1(a\nu) + j b_2(a\nu), \quad A_s(a\nu) = \sqrt{b_1^2(a\nu) + b_2^2(a\nu)}, \quad \Phi_s(a\nu) = \operatorname{arctg} \frac{b_2(a\nu)}{b_1(a\nu)}, \text{ где}$$

$$b_1(a\nu) = \left[C(2\sqrt{N\nu + a\nu}) - C(2\sqrt{N\nu})\right] \cdot \left[2(\sqrt{N\nu + a\nu} - \sqrt{N\nu})\right]^{-1},$$

$$b_2(a\nu) = -\left[S(2\sqrt{N\nu + a\nu}) - S(2\sqrt{N\nu})\right] \cdot \left[2(\sqrt{N\nu + a\nu} - \sqrt{N\nu})\right]^{-1}. \qquad (2)$$

Здесь $N = \frac{w_0 m^2}{4C}$; $C(a\nu)$ и $S(a\nu)$ - косинус- и синус-интегралы Френеля. При $0{,}5 \leqslant \eta \leqslant 1{,}0$ и $m = 0$

$$b_1(a\nu) = \frac{\sin(1-2\eta+2\eta^2)\pi a\nu \cdot \cos(1-2\eta)\pi a\nu - \sin \pi a\nu \cdot \cos \pi a\nu}{2\eta(1-\eta)\pi a\nu} +$$

$$+ \frac{1}{2\eta(1-\eta)\sqrt{a\nu}} \left\{ C[2\sqrt{a\nu}] - (1-\eta) C[2(1-\eta)\sqrt{a\nu}] - \eta C[2\eta\sqrt{a\nu}] \right\}, \qquad (3)$$

$$b_2(a\nu) = \frac{\cos(1-2\eta+2\eta^2)\pi a\nu \cdot \cos(1-2\eta)\pi a\nu - \cos^2 \pi a\nu}{2\eta(1-\eta)\pi a\nu} -$$

$$- \frac{1}{2\eta(1-\eta)\sqrt{a\nu}} \left\{ S[2\sqrt{a\nu}] - (1-\eta) S[2(1-\eta)\sqrt{a\nu}] - \eta S[2\sqrt{a\nu}] \right\}.$$

Автором выполнен сравнительный анализ частотных характеристик равномерного, гиперболического, равномерно-ускоренного, косинусоидального (синусоидального) и случайного сдвигов, на основании которого выявлены их общие и специфические свойства. В области низких относительных частот ($0 < a\nu < 1$) амплитудно-частотные характеристики различных видов сдвига по своей форме мало отличаются одна от другой и могут быть совмещены путем линейного изменения масштаба шкалы частот $A_s(k_a^{-1} a\nu)$. Это обстоятельство позволяет с достаточной для практических целей точностью использовать для описания передаточных свойств малых по величине (меньших разрешения фотографирующей системы) сдвигов частотную характеристику равномерного сдвига, имеющую более простое математическое выражение.

Основные качественные различия, определяющие специфику дейст-

вия отдельных видов сдвига, приходятся на более высокочастотные области ($a\nu > 1$) их частотных характеристик и требуют своего учета при больших сдвигах, превышающих по величине линейное разрешение фотографирующей системы. При этом из рассмотренных малых и больших по величине детерминированных сдвигов наиболее опасным (в смысле ухудшения передаточных свойств системы), по мнению автора, следует считать равномерный сдвиг, оказывающий наибольшее фильтрующее действие в области высоких пространственных частот.

Одновременно отмечается, что косинусоидальный сдвиг является весьма упрощенной моделью сдвигов вибрационного происхождения. Его частотные характеристики имеют существенный разброс в зависимости от величины фазового угла φ колебания в средний момент выдержки, значение которого в реальных условиях съемки обычно остается неизвестным. Эта неопределенность передаточных характеристик косинусоидального сдвига препятствует их эффективному применению и заставляет при выборе параметров системы ориентироваться на худший вариант ($\varphi = 0$), а при оценке результатов съемки использовать вероятное значение фазового угла, в качестве которого автором рекомендовано $\varphi = 0{,}25\pi$. Показано, что малые косинусоидальные сдвиги с вероятностью P = 0,66 в меньшей степени ухудшают передаточные свойства фотографирующей системы, чем равномерный сдвиг той же величины.

Уменьшение коэффициента полезного действия затвора фотоаппарата при условии сохранения величины эффективной выдержки приводит к ухудшению передаточных свойств сдвигов, в первую очередь, за счет уменьшения величин коэффициента передачи амплитуды в области высоких пространственных частот. В общем случае, эти изменения тем заметнее, чем больше неравномерность сдвига.

Во второй главе рассмотрены вопросы качественной и количественной оценки влияния сдвига на изобразительные свойства фотографических снимков с целью внесения уточнений в методику оценки качества работы фотографирующих систем и выбора характеристик отдельных их элементов, обеспечивающих возможность эффективного применения коррекции для уменьшения смаза в изображении.

Краткий обзор наиболее обстоятельных отечественных и зарубежных работ свидетельствует о том, что для численной оценки степени ухудшения изображения до настоящего времени используются функциональные зависимости разрешающей способности от величины различных видов сдвига, полученные экспериментально или расчетом по частотным характеристикам. Эти зависимости, как показывает практика, позволяют лишь в первом приближении оценивать действительные возможности фотографирующих систем. Вопросы использования более совершенных критериев для оценки влияния сдвига мало освещены в литературе. Оценка качества работы фотографирующих систем выполняется пока применительно к визуальному восприятию первичного изображения и не учитывает возможности его улучшения путем коррекции в процессе послесъемочной обработки снимка.

В диссертации выполнен анализ методов оценки и сравнения фотографирующих систем в присутствии сдвига, базирующихся на использовании наиболее распространенных критериев: разрешающая способность R, среднеквадратичный градиент $\overline{G_x^2}$, эквивалентная полоса пропускания N_e по О.Шадэ. На основе учета взаимосвязи указанных критериев с частотными характеристиками вскрыты дополнительные причины имеющегося в ряде случаев практики несовпадения результатов численной и визуальной оценок получаемых системами изображений. Теоретически и экспериментально показано, что условием дальнейшего совершенствования методов численной оценки является нахождение способов строгого учета пропускаемых системой высокочастотных составляющих (в том числе, частот "ложного разрешения" и других дефазированных частот), а также происходящих при сдвиге деформаций пятна рассеяния. В порядке первого опыта решения этой задачи на при-

мере равномерного сдвига рассмотрены возможности модернизации численной оценки на базе использования критериев R и N_e.

Разрешающая способность не учитывает частоты, относящиеся к явлению "ложного разрешения", которое часто встречается при сдвиге и до сих пор остается вне внимания исследователей. Между тем, даже при больших величинах равномерного сдвига ($aR_o \leqslant 20$) при КПД затвора $\eta = 1{,}0$ в спектре изображения могут сохраняться частоты, всего лишь в два раза меньшие разрешающей способности статичной системы ($\nu \approx 0{,}5 R_o$). Автором предложено в дополнение к разрешающей способности характеризовать систему величиной действительно максимальной сохраняемой в направлении сдвига частоты $\hat{R}$. Экспериментально показано, что функциональные зависимости $\hat{R}(a)$ более чувствительны к различию сравниваемых систем, чем $R(a)$, а их совместное использование позволяет производить качественную оценку характера изменения резкости изображения, согласующуюся с оценкой по среднеинтегральному градиенту. Величина $\hat{R}$ дает представление о сохраняемой части разрешающей способности полосе дефазированных частот, которые могут быть использованы для улучшения изображения путем восстановления, т.е. о потенциальных возможностях системы.

Показано, что существующие критерии в различной степени и, вместе с тем, недостаточно пригодны для решения задачи сравнения систем, функции рассеяния точки которых имеют несимметричный (в частности, при сдвиге) характер. Наиболее подходящим, по мнению автора, является критерий N_e, рациональное зерно которого состоит в идее максимального перехода от реальных частотных характеристик систем к характеристикам эталонного вида, в качестве которого удобно принять $\exp(-k\nu^2)$. Математическая сторона перехода требует, однако, коррекции, поскольку критерий N_e принижает роль высокочастотных составляющих. Сравнение же частотных характеристик одного или двух приборов производить по критерию R, который в отличие от

других функционалов учитывает зернистость фотоматериала. Это было использовано при разработке уточненного варианта методики оценки качества систем, отличающихся характеристиками двух элементов (фотоматериал, сдвиг) и, в частности, при выводе условия эквивалентности их работы по визуальному восприятию получаемых изображений.

Для систем с КПД затвора $\eta = 1{,}0$, частотная характеристика которых удовлетворительно описывается функцией $\exp(-k\nu^2)$, автором получена формула условия эквивалентности их работы при равномерном сдвиге:

$$k_\delta\left(\alpha, \frac{R_{o\delta}}{R_{om}}\right) \cdot \frac{R_{o\delta}}{R_{om}} = \sqrt[4]{\frac{2{,}0 + (a_\delta R_{o\delta})^2}{2{,}0 + (a_m R_{om})^2}}, \qquad (4)$$

где: $R_{o\delta}$ и R_{om} – бо́льшая и меньшая исходные разрешающие способности сравниваемых систем;

k_δ – поправочная функция, учитывающая несовершенство критерия N_e;

α – контраст фотографируемого объекта по Селвину.

В диссертации обоснована постановка специального эксперимента для определения функции k_δ. II наблюдателям, имеющим опыт дешифрирования аэроснимков, была поставлена задача: из нескольких серий снимков макета лунной поверхности ($\alpha \approx 0{,}9$), полученных двумя системами при различных величинах равномерного сдвига и небольших расфокусировок, составить пары снимков, эквивалентных по общему визуальному восприятию изображений. Измерение разрешающей способности производилось с ошибкой 1,0– 1,5%, а величины сдвига – 3–5%. Экспериментом установлено следующее.

1. Глаз обнаруживает изменение качества изображения при изменении величины равномерного сдвига в среднем на 15% для $aR_o \geqslant 1$.
2. При малых расфокусировках глаз обнаруживает ухудшение качества снимка, соответствующее 3–4% изменению разрешающей способности.
3. Из-за неполного учета критерием N_e частот "ложного разрешения" формула (4) при $k_\delta = 1$ занижает величину $a_\delta \cdot a_m^{-1}$. В частности, при $R_{o\delta} \cdot R_{om}^{-1} = 1{,}6$ ошибка составляет в среднем 34%.

С учетом этих данных было получено выражение поправочной функции для случая высокого контраста фотографируемого объекта

$$k_\delta = 0{,}24\frac{R_{об}}{R_{ом}} + 0{,}76 \quad . \qquad (5)$$

Можно ожидать, что для малого контраста ($\alpha < 0{,}2$) объекта $k_\delta \approx 1$.

На основании проведенного таким образом исследования роли частот "ложного разрешения" в процессе формирования изображения автором внесены уточнения в методику численной оценки качества работы фотографирующих систем при равномерном сдвиге.

Качество работы фотографирующей системы с деформированным в результате сдвига пятном рассеяния предложено характеризовать величиной разрешающей способности $R_{экв.}$ эквивалентной ей (по визуальному восприятию получаемого изображения) системы с круглым пятном рассеяния, распределение освещенности в котором описывается функцией $\exp(-r^2)$. Расчет $R_{экв.}$ системы с КПД затвора, близким к единице, производится по формуле условия эквивалентности систем. Для этого в (4,5) достаточно положить: $R_{ом} = R_{экв.}$, $a_{ом} = 0$.

При равенстве $R_{экв.}$ сравниваемых систем для съемки следует выбирать ту, которая пропускает в направлении сдвига более широкую полосу частот "ложного разрешения", оцениваемую по величине $\hat{R}\cdot R^{-1}$. Этим достигаются более высокие потенциальные изобразительные свойства фотоснимка, реализуемые при его соответствующей послесъемочной обработке. В частности, если системы различаются характеристиками элементов: фотоматериал, сдвиг,- то при съемке выгоднее использовать систему с более мелкозернистым аэрофотоматериалом.

Последняя рекомендация особенно важна для выбора параметров космических фотографирующих систем, перед которыми ставится задача сбора максимально возможного количества сведений об объекте.

В диссертации представлены результаты дешифрирования снимков со смазом изображения, полученных разными системами, подтверждающие наличие линейной связи между эквивалентным разрешением системы

$R^{-1}_{экв.}$ и размером детали объекта, опознаваемой с вероятностью 50%. Кроме того, показано, что дешифрирование снимков с одинаковой величиной $R_{экв.}$ по специальной методике позволяет опознать с той же вероятностью детали меньшего размера на снимках, полученных системой, пропускающей более широкую полосу частот "ложного разрешения".

Изложенная методика специально разработана для оценки качества работы фотографирующих систем, предназначенных для съемки поверхности Луны из космоса с высоким разрешением. Она принята к использованию Институтом космических исследований АН СССР и была применена для выбора параметров фотографирующей системы, установленной на борту советской орбитальной станции "Салют".

В параграфе 4 второй главы рассмотрены возможности использования сдвига изображения для решения ряда практических задач. На основе анализа особенностей частотных характеристик некоторых видов сдвига в области частот "ложного разрешения" предложен способ измерения пороговых характеристик фотоматериалов. В отличие от известных способов он позволяет при единичном впечатывании специальной синусоидальной миры в резольвометре определять сразу несколько точек кривой порогового контраста фотоматериала вплоть до частот, соответствующих его разрешающей способности.

Впечатываемое на фотослой экспозиционное изображение непрерывной синусоидальной миры периодически изменяющегося контраста ($0 \leq \alpha_м < 1$) создается в резольвометре с помощью двух последовательных экспонирований клиновой синусоидальной миры постоянного контраста ($\alpha \approx 1$), между которыми миру сдвигают в своей плоскости на заданную величину a в направлении, перпендикулярном ее осевому штриху. Частотная характеристика такого сдвига имеет вид $A_s(\nu) = \cos \pi a \nu$. На резольвограмме измеряют частоты $\nu = R_i$, соответствующие началу и концу каждой из видимых полос "ложного разрешения", и по их значениям на графике функции $\alpha_м = \alpha|\cos \pi a \nu|$ находят точки

кривой порогового контраста фотоматериала $M_d(\nu)$, рис. I.

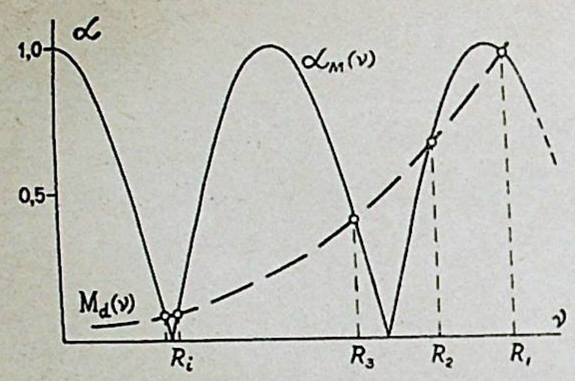

Рис.I. Способ измерения кривых порогового контраста фотоматериалов по синусоидальной мире переменного контраста $\alpha_M(\nu)$, синтезируемой с помощью сдвига $A_s = \cos \pi a \nu$.

Экспериментальная проверка способа была выполнена в Центральном научно-исследовательском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии и показала возможность достижения достаточно высокой точности измерений.

В третьей главе изложены теоретические основы уменьшения влияния сдвига на резкость фотографического изображения при послесъемочной обработке аэрокосмических снимков. Особое внимание уделено разработке и исследованию способов коррекции изображения с применением техники фотографического маскирования.

Краткий обзор отечественных и зарубежных работ свидетельствует о том, что за последнее десятилетие арсенал способов борьбы со сдвигом изображения существенно расширился. Однако, обобщающая сводка по этому вопросу в литературе отсутствует. В предложенной автором классификации методов борьбы со сдвигом выделены три основные группы: активные, пассивные и комбинированные методы.

Активные методы преследуют цель создания во время экспонирования условий, близких к условиям съемки с неподвижной платформы, или предполагают активное вмешательство в динамику процесса построения изображения. К ним относятся компенсация сдвига, демпфирование колебаний фотоаппарата, выбор условий съемки и характеристик элементов фотографирующей системы.

Пассивные методы применяются при послесъемочной обработке снимков, когда уже установлен факт присутствия смаза в проявленном изображении. Сюда входят способы частотной и пространственной коррекции нерезких изображений, а также использование соответствующей методики дешифрирования снимков.

К группе комбинированных относятся способы, состоящие из органически взаимосвязанных активной и пассивной операций, каждая из которых в отдельности не приводит к уменьшению смаза в изображении. Пока известен всего один такой способ, разработанный Брингдалем и Лохманом (США) в 1969 г.

В диссертации выполнен критический анализ теории и практики применения существующих способов коррекции изображения, на основе которого обсуждены возможности их использования для уменьшения смаза и возникающие при этом трудности. Не все известные способы коррекции применимы для уменьшения направленных потерь резкости изображения. Некоторые из них эффективны лишь для определенных видов сдвига, требуют наложения ограничений на характер фотографируемого объекта и знания характеристик сдвига, действовавшего во время съемки. Особые трудности возникают, когда закон движения отдельных точек оптического изображения неодинаков. Вопросы оценки качества восстановленного изображения, а также выбора оптимальных условий проведения коррекции изучены недостаточно. Для коррекции изображений со смазом требуются специальные фильтры пространственных частот, когерентные источники света, различные сложные установки, что препятствует пока ее широкому применению на практике.

Большая часть главы посвящена разработке теоретических основ применения техники маскирования для уменьшения смаза с учетом критических замечаний в адрес известных методов коррекции изображения.

Автором теоретически разработан и практически осуществлен способ уменьшения смаза на одиночных аэроснимках, не требующий в

отличие от аналогичных методов наложения ограничений на вид фотографируемого объекта и применения каких-либо сложных установок для коррекции изображения. Он состоит в следующем. С исходного негатива со смазом изображения изготавливают резкую позитивную маску меньшего контраста $\gamma_п = \bar{\gamma} \cdot \gamma_н$, ($\bar{\gamma} < 1$). Затем негатив и позитив накладывают один на другой так, чтобы направление смаза идентичных деталей изображений совпадало, а начала смазов были смещены в ту или иную сторону на величину, в m раз меньшую величины исходного сдвига a. Со сложенных таким образом негатива и позитива изготавливают n резких масок разного контраста, изменяющегося в порядке арифметической прогрессии с последним членом, равным ее разности. Затем выполняют операцию сложения оптических плотностей изображений на масках при условии их совмещения по направлению смаза идентичных деталей и смещения начала смазов в порядке уменьшения контраста на величины $a(\lambda - 1)$, где $\lambda = 1, 2, 3, \ldots n$, в ту сторону в которую был смещен позитив относительно исходного негатива. В результате получают восстановленное изображение с уменьшенным смазом.

Теория способа разработана применительно к случаям линейной и нелинейной фотографирующих систем. При уменьшении смаза, вызванного равномерным сдвигом изображения, в линейном случае амплитудно-частотная характеристика уменьшенного сдвига имеет вид:

$$A_s(\nu) = A_{a/m}(\nu) \cdot Q(\nu) \quad , \qquad (6)$$

где: $A_{a/m}(\nu)$ - амплитудно-частотная характеристика сдвига, в m раз меньшей величины, чем исходный равномерный;

$$Q(\nu) = \frac{1+\bar{\gamma}}{m} + \frac{\left[\sin\left(n+\frac{m-1}{m}\right)\pi a\nu - \bar{\gamma}\sin\left(n+\frac{m+1}{m}\right)\pi a\nu\right]\sin \pi n a\nu}{n\, m \sin \pi a\nu \cdot \sin \pi \frac{a}{m}\nu} .$$

Выбор значений параметров маскирования m, n, $\bar{\gamma}$ определяется конкретными требованиями к качеству восстановленного изображения. В частности, если уменьшение смаза не сопровождается выравниванием

контрастов крупных и малых деталей изображения, рекомендовано

$$\bar{\gamma} \approx \frac{m(n+1)-1}{m(n+1)+1} . \qquad (7)$$

Показано, что в нелинейном случае восстановленное изображение передает контраст между близко расположенными деталями так же, как изображение, полученное при съемке со сдвигом в m раз меньшей величины. Перепад оптических плотностей ΔD этих деталей в направлении сдвига:

$$\Delta D \approx 0{,}4343 \cdot \gamma_н \frac{4}{m} \cdot \mathcal{L}_{a/m}(x) \cdot \left[1 \pm \frac{2\bar{\mathcal{L}}_{a/m}}{m\sqrt{n}\,\mathcal{L}_{a/m}(x)}\right] , \qquad (8)$$

где $\bar{\mathcal{L}}_{a/m}$ - средний контраст изображения при сдвиге величиной $a \cdot m^{-1}$. $\bar{\gamma}$ дополнительно зависит от интервала оптических плотностей исходного изображения и имеет несколько меньшую величину, чем в линейном случае. Вторые слагаемые в (6,8) показывают контраст паразитных остаточных изображений, накладывающихся на восстановленное. Их уменьшают увеличением n. На практике обычно достаточно $n = 2 \div 4$.

Автором разработаны теория и практика комбинированного способа уменьшения сдвига. В отличие от существующих способов он не требует знания геометрических характеристик сдвига, позволяет восстанавливать в спектре изображения пропавшие при сдвиге частотные составляющие и применим для уменьшения любого вида сдвига, в том числе и случайного происхождения. Эффективность его применения не снижается даже при одновременном фотографировании нескольких объектов, закон движения которых неодинаков.

Способ основан на замешивании в спектр изображения недостающих частот в определенном амплитудном и фазовом соотношении. Для этого при съемке с помощью двух идентичных и синхронно включающихся фотоаппаратов дополнительно к основному снимку со сдвигом a требуется получить путем увеличения выдержки второй снимок с несколько большим сдвигом $a + b$ ($a \cdot b^{-1} = m$ - кратность требуемого уменьшения сдвига). Затем с данными фотоснимками, используя второй

снимок как маску для первого, необходимо выполнить операцию вычитания оптических плотностей изображений при условии совмещения начала и направления сдвигов идентичных деталей объектов. В результате получается изображение с уменьшенным смазом, соответствующим разности исходных сдвигов. Для правильного осуществления коррекции требуется, чтобы отношение коэффициентов контрастности, до которых проявляются исходные снимки со сдвигом, было равно отношению величин сдвигов:

$$\frac{\gamma_{a+в}}{\gamma_a} = \frac{a+в}{a} . \qquad (9)$$

Из теории способа следует, что решение задачи является строгим в случае линейной фотографирущей системы. Для нелинейных систем условие (9) сохраняет справедливость и минимизирует контраст остаточных изображений, накладывающихся на восстановленное. При этом разность оптических плотностей соседних в направлении сдвига точек восстанавливается, как

$$\Delta D \approx 0{,}4343\, \gamma_a \frac{2в}{a} \alpha_в . \qquad (10)$$

В параграфе 5 третьей главы рассмотрено влияние зернистости фотоматериала и КПД затвора системы как основных факторов, ограничивающих степень возможного уменьшения смаза и определяющих выбор оптимальных параметров маскирования при коррекции изображения.

Особенностью разработанных автором способов коррекции является уменьшение смаза, а не полное его устранение. Коррекция сопровождается ухудшением соотношения "сигнал/шум" в восстановленном изображении из-за уменьшения его контраста и увеличения зернистости. Поэтому нельзя неограниченно увеличивать значения параметров маскирования m и n. В диссертации показано, что не имеет смысла уменьшать сдвиг до величин, меньших линейного разрешения статичной системы, поскольку это приводит к ухудшению качества восстановленного изображения. Выбор оптимальных значений параметров m и n зависит от выбора критерия качества. Автором рассмотрено решение

этой задачи под условием достижения максимума разрешающей способности восстановленного изображения

Теория предложенных автором способов уменьшения смаза на фотоснимках распространена на случай фотографирующих систем с КПД затвора $0{,}5 \leq \eta < 1{,}0$. Установлено, что уменьшение η приводит к снижению предельно достижимой кратности m уменьшения величины исходного эффективного сдвига $a\eta$:

$$m = \frac{\eta}{1-\eta} . \qquad (11)$$

Это еще раз подтверждает, что при аэрокосмических съемках, когда сдвиг является основным ухудшающим качество изображения фактором, невыгодно использовать системы с низким КПД затвора. В комбинированном способе уменьшения смаза при $\eta < 1$ решение задачи под условием минимума остаточных изображений показывает, что для съемки лучше использовать затворы, время открытия которых не зависит от величины выдержки. Этому требованию, например, удовлетворяет шторно-щелевой затвор с регулированием выдержки шириной щели, размер которой больше диаметра сечения пучка проектирующих лучей.

В диссертации представлены образцы аэро- и фотоснимков с уменьшенным путем фотографического маскирования смазом, подтверждающие справедливость теории разработанных автором способов пространственной коррекции изображения.

Основные результаты работы состоят в следующем:

I. На основании анализа существующих закономерностей движения оптического изображения установлено, что при постоянной скорости линейных и угловых перемещений фотоаппарата возникают сдвиги гиперболического типа по характеру изменения скорости движения изображения. Эти сдвиги из-за малости временного интервала экспонирования приводятся к виду равномерно-ускоренного сдвига, имеющего наибольшее распространение в различных случаях съемки. Выведены мате-

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академия наук Укр. ССР

матические выражения для частотных характеристик гиперболического и равномерно-ускоренного сдвигов, учитывающие в отличие от известных выражений влияние КПД затвора и ошибки компенсации постоянной составляющей скорости движения изображения.

2. В результате анализа передаточных характеристик различных видов сдвига изображения установлено, что их частотные характеристики по своей форме мало отличаются одна от другой в области низких относительных частот ($0<a\nu<1$) и с достаточной для практических целей точностью могут быть сведены к частотной характеристике равномерного сдвига путем простого масштабного преобразования шкалы частот. Основные качественные различия, определяющие специфику действия отдельных видов сдвига, приходятся на более высокочастотные области ($a\nu>1$) их частотных характеристик. При этом из детерминированных сдвигов наихудшими передаточными свойствами обладает равномерный сдвиг, оказывающий наибольшее фильтрующее действие в области высоких пространственных частот.

3. Разработана методика оценки качества работы фотографирующих систем с КПД затвора, близким к единице, при равномерном сдвиге изображения, которая в результате учета пропускаемых системой высокочастотных составляющих (в том числе, частот "ложного разрешения") позволяет получать сопоставимые с общей визуальной оценкой изображения результаты.

Методика принята к использованию Институтом космических исследований АН СССР и была применена для выбора параметров фотографирующей системы, установленной на борту советской орбитальной станции "Салют".

4. Предложен способ измерения пороговых характеристик фотоматериалов, позволяющий в отличие от известных способов при единичном впечатывании специальной синусоидальной миры в резольвометре определять сразу несколько точек кривой порогового контраста фото-

материала вплоть до частот, соответствующих его разрешающей способности.

Экспериментальная проверка способа, выполненная в Центральном научно-исследовательском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, показала возможность достижения достаточно высокой точности измерений.

5. Теоретически разработан и практически осуществлен способ уменьшения смаза изображения на одиночных аэроснимках на основе использования техники фотографического маскирования, не требующий в отличие от аналогичных способов наложения ограничений на вид фотографируемого объекта и применения сложных установок для коррекции изображения.

6. Разработана теория и практика комбинированного способа борьбы со сдвигом изображения, в котором корректирующая фотографическая маска изготавливается в условиях съемки одновременно с исходным нерезким изображением. В отличие от существующих способов он не требует знания геометрических характеристик сдвига, позволяет восстанавливать в спектре изображения пропавшие при сдвиге частотные составляющие и применим для уменьшения влияния на резкость изображения любого вида сдвига, в том числе, и случайного происхождения.

Основные положения диссертации докладывались на Семинаре междуведомственной комиссии по аэросъемке при АН СССР по проблеме оценки качества аэрофотоизображения (Ленинград, январь 1968 г.), на Семинаре по структурным свойствам фотографических изображений комиссии по химии фотографических процессов при АН СССР (Москва, март 1968 г.), на X Междуведомственном совещании по аэросъемке (Ленинград, ноябрь 1969 г.), а также отражены в следующих публикациях автора:

1. Применение фотографического маскирования для уменьшения влияния сдвига на резкость фотографического изображения. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., т. 13, № 6, 1968. /в соавторстве с Ю.Л.Бирюковым и Ю.М.Чесноковым/.
2. Уменьшение смаза изображения фотографическим путем. Сб. Качество аэрофотоизображения (материалы семинара междуведомственной комиссии по аэросъемке при АН СССР), Изд. Географическое общество СССР, Ленинград, 1969. /в соавторстве с Ю.Л.Бирюковым/.
3. Уменьшение смаза изображения на одиночных аэроснимках. Сб. Космическая иконика (Труды ИКИ АН СССР), Изд. Наука, 1973. /в соавторстве с Ю.Л.Бирюковым/.

ПОДП. К ПЕЧАТИ 12/П-73 Г. Л-71192. Ф. 60x90/16
ФИЗ.П.Л. 1,25. УЧ.-ИЗД.Л. 1,0. ЗАКАЗ 1149. ТИР. 200

ОТПЕЧАТАНО НА РОТАПРИНТАХ В ТИП. ИЗД. МГУ
МОСКВА, ЛЕНГОРЫ