A-61 [6]

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ГЕОДЕЗИИ, АЭРОФОТОСЪЕМКИ и КАРТОГРАФИИ

На правах рукописи

В.А.Вергасов

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ КРИВЫХ НА ПРИМЕРЕ ГОРИЗОНТАЛЕЙ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ

Специальность 05.256 - точное приборостроение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1971

В последние годы ведутся интенсивные исследования в области создания количественных методов обработки информации, представленной на разного вида картах. Целью таких исследований является выявление наиболее приемлемых алгоритмов работы считывающих и распознающих автоматов, освоение которых в картографическом производстве позволит полностью автоматизировать процессы создания географических и специальных карт и решить по ним ряд специальных задач (картометрических, морфометрических и т.д.). В силу большой информативной емкости карт эти процессы автоматизации немыслимы без применения ЭВМ. Одной из главных задач при построении автоматизированных систем является задача чтения картографической информации (дискретной и линейной, масштабной и внемасштабной) на разного вида географических и специальных картах. Решение этой задачи требует разработки методов распознавания соответствующих образов. Если для дискретной картографической информации эта задача считается принципиально решенной, то для линейной картографической информации ее решение встречает еще ряд принципиальных трудностей. Наиболее трудной задачей для автоматизации является аналитическая интерпретация определенной совокупности изолиний (горизонталей, изобат и т.п.), отождествляемых с соответствующими типами рельефа (суши, морского дна и т.п.), т.е. задача их машинной классификации. Автоматическое распознавание типов рельефа необходимо для того, чтобы весь геометрический анализ рельефа и его приложения к решению разнообразных народнохозяйственных задач возложить на ЭВМ. Использование аналитических методов с применением ЭВМ позволит превратить геометрию рельефа в подлинную основу объективного геоморфологического картирования и широко использовать морфометрические данные при проектировании инженерных сооружений, сельскохозяйственных мероприятий, для поисков полезных ископаемых, в тектонике и др.

Для автоматического анализа рельефа поверхности земли необходимо его математическое описание. В этом отношении большие возможности предоставляют работы, опубликованные в сборнике "Рельеф Земли и математика" (изд."Мысль", М.,1967) под редакцией профессора А.С.Девдариани. В них показано, что области земной поверхности со сложным рельефом, включающим множество форм, образующих тип рельефа, не поддаются аппроксимации функциональными зависимостями. Методы математического описания таких областей вытекают из представления рельефа как случайного поля высот. (Бусалаев И.В., Грейсух В.Л., Краузе, Мейар, Протодьяконов М.М., Хромченко А.И., Шарапов И.П.). При реализации процесса автоматического распознавания типов рельефа по картам следует ориентироваться на автоматические и полуавтоматические устройства считывания картографической информации. Такими устройствами являются: фотоследящие, сканирующие или сканирующе-следящие устройства. При известных достоинствах математических моделей, рассматриваемых в указанном выше сборнике, получение их с использованием нашедших применение в картографии считывающих устройств сопряжено с определенными техническими трудностями, поскольку в процессе считывания необходимо знать высотные отметки считываемых точек, а также какому знаку (дискретному или линейному) принадлежит та или иная точка на карте.

Целью данной работы являлось обоснование и разработка математических методов описания горизонталей, метода их автоматического распознавания (27-и типов рельефа), автоматического считывания, свертывания и воспроизведения горизонталей по признакам, положенным в основу для их классификации.



Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения и приложения, где представлены результаты экспериментов автора по выявлению отличительных признаков совокупности горизонталей на картах масштаба I:25 000, отождествляемой с 27 типами рельефа.

I.

Теория распознавания образов развивается в двух направлениях:

I) исследование свойств фиксированного (известного) набора множества объектов из бесконечного числа классов;

2) исследование нефиксированного (неизвестного) набора множества объектов из бесконечного числа классов.

Формированию этих направлений способствовали работы ученых из крупнейших научных центров как нашей страны, - Институт общих проблем управления АН СССР, Институт проблем передачи информации АН СССР, Всесоюзный институт научной и технической информации АН СССР, Институт кибернетики АН УССР, Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им.Н.Э.Баумана и др., - так и зарубежных - Массачузетский технологический институт, Вашингтонский университет, Станфордский университет и др.

Предлагаемая работа соответствует первому из вышеприведенных направлений, которое по отношению к рельефу означает, что из бесконечного многообразия горизонталей выбирают по некоторым признакам определенные их совокупности, идентифицируемые с конечным числом типов рельефа, подлежащих исследованию.

В дальнейшем применяются термины, которые представлены в таблице I.

Таблица I

| Основные понятия теории распознавания образов | Исследуемые объекты |
|---|---|
| Образ | Горизонталь |
| Метод распознавания образа | Алгоритм отождествления горизонтали с информацией выходного сигнала |
| Модель образа | Описание горизонтали |
| Обучение модели | Процесс обработки данных о горизонтали |
| Класс образов | Тип рельефа |
| Реализация класса образов | Горизонталь |
| Алфавит класса образов | Множество типов рельефа |
| Признак образа | Количественная или качественная оценка свойств горизонтали |
| Критерий распознавания | Правило разбиения множества текущей информации на типы рельефа |
| Обучающая выборка алфавита классов | Множество значений признаков для соответствующих типов рельефа |

Рассматриваемый образ (горизонталь) является типичным представителем сложной геометрической фигуры, т.е. по определению в работе его можно представить в виде

$$A=\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\,, \qquad A_i \cap A_j = \phi\,,\ \ i \neq j \qquad \text{(I)}$$

где $A_i$ - простейшая геометрическая фигура, т.е. стандартное по форме геометрическое место точек на плоскости.

Существующие детерминированные методы распознавания образов - сравнение векторов признаков, их скалярного произведения, метод дискриминантных функций, сравнение площадей фигур, метод обобщенного портрета и т.д. - характеризуются тем, что классы образов, как совокупности векторов признаков, не пересекаются. Такой подход, скажем, для дискретной картографической информации



сильно усложняет задачу выбора пространства признаков образов, поскольку множества признаков для разных классов должны быть априорно разделимы. Что же касается линейной картографической информации - горизонталей, линий гидрографии, то выявление таких признаков в силу их различной протяженности и бесконечного разнообразия рисовки, т.е. недетерминированности объектов, становится нереальным. Отметим, что большие перспективы в решении проблемы распознавания образов открывают структурные методы анализа изображений.

Для распознавания дискретных внемасштабных картографических знаков может быть предложен метод, разработанный автором. Этот метод исходит из особенностей знаков и основан на использовании фотоэлектрического датчика (ФЭД) с линейной пеленгационной характеристикой. Весь процесс распознавания состоит из следующих этапов: поиск знака, ориентирование светочувствительной площадки ФЭД относительно знака, определение признаковой функции текущего знака, идентификация (опознавание) знака. Под признаковой функцией знака понимается множество упорядоченных пар вида: $\{V_{y_i}, \alpha_i\}$, где $\alpha_i$ - $i$ -ый отсчет угла $\alpha$ между нейтральной линией ФЭД и той линией знака, которая совпадает в первоначальный момент времени с нейтральной линией, $V_{y_i}$ - максимальное значение выходного напряжения ФЭД положительной величины, соответствующее $\alpha_i$ и получаемое при обходе светового пятна фотоследящего устройства по контуру знака (либо при построчном сканировании). В силу того, что конфигурация и размеры знаков различны, получаем взаимно однозначное соответствие между цифровыми кодами и знаками. Рассмотренные в работе примеры построения кодов для типовых картографических знаков позволяют осуществить это построение для всего множества знаков как с постоянной, так и с переменной ориентацией. Алгоритмом для опознавания в разработанном методе является операция покомпонентного сравнения текущего и априорного кодов (например, по норме Хэмминга). В силу линейности выходного сигнала с ФЭД, применение этого алгоритма позволяет избежать возникновения избыточности информации, имеющей место при записи значений монотонной функции. Простота технической реализации метода создает реальные возможности для построения читающих автоматов, работающих по этому принципу.

Существующие статистические модели (Ковалевского, Мэрилла-Грина, Чжоу и др.) реализуют статистическую процедуру опознавания объектов, являющихся в нашем смысле простыми геометрическими фигурами; кроме того, в этих моделях априорно постулируется аналитическая форма записи передаточной функции распознающего устройства. Не представляется возможным применение этих моделей для распознавания типов рельефа, поскольку, в силу построения моделей, требуется найти для горизонталей некий детерминированный эталон с наложенным на него шумом. Наибольшие перспективы для автоматического распознавания типов рельефа представляет та статистическая процедура, при которой классификатор анализирует поступающую на его вход информацию в каждый текущий момент времени и выносит решение в соответствии с некоторым критерием оптимизации. Такая трактовка статистических методов классификации, широко применяемых в радиотехнике, радиолокации, геологии и т.д., не предполагает наличие каких-либо детерминированных элементов, и основана на статистике появления вторичных признаков, идентифицируемых с объектами. Эта особенность статистических методов является наиболее приемлемой для решения задачи распознавания типов рельефа.



П.

В главе рассмотрена специфика картографического изображения и проанализированы факторы, влияющие на процесс распознавания линейной картографической информации (рельефа). Рассмотренные структура и характер картографического изображения показали, что применение существующих считывающих устройств (например, типа "Фотоглаз") для отдельных элементов содержания карты встречает еще ряд принципиальных трудностей. Для горизонталей эти трудности обусловлены, как правило, характером самой местности, что находит свое отражение в рисунке условных знаков. Этот рисунок влияет не только на процесс автоматического считывания, но и на эффективность работы алгоритмов распознавания. Поэтому для разработки этих алгоритмов вначале необходимо изучение некоторых количественных характеристик, непосредственно влияющих на процесс распознавания рельефа. Такими характеристиками являются: масштаб карты, плотность (густота) распознаваемых знаков, тип знака, минимальное расстояние между знаками одного и того же типа. Разработанная в соответствии с количественными характеристиками логика работы автомата, позволяет последовательно принимать решение о типе линейного картографического знака. Предложенная схема автомата реализует последовательность анализа линейной картографической информации.

Анализ типов рельефа и форм, их порождающих, на топографических картах масштаба 1:25 000 по характеру соответствующего рисунка горизонталей позволил выделить те типы рельефа, которые удовлетворяют особенностям работы ФССи, следовательно, целесообразны для обоснования математических методов описания соответствующих горизонталей и их применения к автоматическому анализу и распознаванию типов рельефа с помощью ЭВМ.

## Ш.

Анализ различных типов рельефа на топографических картах показал, что каждый тип рельефа, в глобальном смысле, характеризуется вполне определенным поведением извилистости соответствующих горизонталей по их длине. Однако в локальном смысле кривые одного и того же типа рельефа имеют некоторые отличия, которые при просмотре всей кривой не влияют на результат отождествления ее с каким-то из типов рельефа. Поэтому анализ типов рельефа будем производить, исходя из построения их вероятностно-статистической модели. В качестве признаков, обусловливающих модель, рассматриваются две характеристики:

I) эмпирическая функция плотности распределения вероятностей кривизны линии по ее длине;

2) эмпирическая функция плотности распределения вероятностей извилистости линии по ее длине.

Причем по определению полагаем, что кривая имеет извилистость, если существует такой момент времени $\ell$, при котором кривизна $\rho$ (или радиус кривизны) удовлетворяет соотношению:

$$\rho(\ell)\rho(\ell\pm 0)\leqslant 0, \tag{2}$$

где

$$\rho^2(\ell)+\rho^2(\ell\pm 0)>0. \tag{3}$$

Для удобства рассуждений при построении модели полагаем, что анализ рисунка горизонталей производится с помощью фотоследящей системы (ФСС) типа "Фотоглаз" (хотя в равной мере может быть использовано любое другое считывающее устройство). Назовем <u>состоянием точки кривой</u> такое положение светового пятна, которое соответствует вполне определенному знаку радиуса кривизны точки кривой, куда попадает световое пятно. Знак радиуса кривизны определяется по принципу дихотомии, т.е. если одна из выпуклостей (вогнутостей) принята положительной, то другая, ей противоположная - отрицательной. Можно выделить три состояния:



п е р в о е  с о с т о я н и е, когда радиус кривизны имеет положительное конечное значение;

в т о р о е  с о с т о я н и е, когда радиус кривизны равен бесконечности;

т р е т ь е  с о с т о я н и е, когда радиус кривизны имеет отрицательное конечное значение.

Основываясь на зависимости каждого состояния участка линии от состояния только на предыдущем участке, построена простейшая марковская модель горизонталей. Эта модель связана непосредственно с матрицей переходных вероятностей

$$A=\|\alpha_{ij}\|, \quad i,j=1,2,3, \tag{4}$$

где $\alpha_{ij}=\alpha_{ij}(\ell)$ - вероятность перехода из $i^{\text{ого}}$ состояния в $j^{\text{ое}}$ в момент времени $\ell$. Заметим, что возможны те и только те переходы, которые соответствуют индексам параметра $\alpha_{ij}(\ell)$, подчиняющимся условию

$$|i-j|\leqslant 1 \tag{5}$$

В соответствии с (5) получено матричное дифференциальное уравнение, описывающее горизонталь:

$$\frac{dP^{\text{тр}}(\ell)}{d\ell}=\tilde{B}P^{\text{тр}}(\ell), \tag{6}$$

где $\tilde{B}=(B_1,B_2,B_3)$ - перестраиваемая по элементам случайным образом матрица; $B_i$, $i$ = I, 2, 3, - $i^{\text{ая}}$ микроситуация горизонтали, т.е. участок горизонтали, имеющей только либо два состояния (для $i$ = I, 2), либо три - (для $i$ = I,2, 3). $P(\ell)=(\tilde{P}_1(\ell),\tilde{P}_2(\ell),\tilde{P}_3(\ell))$, $\tilde{P}_i(\ell)=\|\rho_{ij}(\ell)\|$, $\rho_{ij}(\ell)$ - вероятность $j^{\text{ого}}$ состояния в $i^{\text{ой}}$ микроситуации. Решения (6) умножаются на вероятности $q_i(\ell)$ появления $B_i$.

Решения уравнения (6) позволяют определить среднее количество ячеек блока памяти ЭВМ при работе со знаками фиксированного класса. А именно, при фиксированном объеме выборки $n$ среднее количество точек $i^{\underline{\text{ого}}}$ состояния равно

$$n_{io} = \int_0^\infty \bar{n}_i \, G(\bar{n}_i^{-1}(L)) \left| \frac{d\bar{n}_i^{-1}(L)}{d\bar{n}_i} \right| d\bar{n}_i, \tag{7}$$

где $G(\bar{n}_i^{-1}(L))$ – плотность распределения вероятностей длины линии $L$ при фиксированном $n$,

$$\frac{d\bar{n}_i^{-1}(L)}{d\bar{n}_i} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Delta\ell\, Q(\Delta\ell)\, d\Delta\ell}{\int_0^{\bar{n}_i^{-1}(L)} P_i(\ell) W(\ell) d\ell + P_i(\bar{n}_i^{-1}(L)) W(\bar{n}_i^{-1}(L)) \bar{n}_i^{-1}(L)}, \tag{8}$$

$Q(\Delta\ell)$– плотность распределения вероятностей шага (по состоянию) дискретности линии; $W(\ell)$ – плотность распределения вероятностей правого конца отрезка с абсциссой $\ell$,

$$W(\ell) = \int_{-\infty}^{\ell} dy \left\{ \int_0 \int_{(n-1)} Q(x_1) Q(x_2) \dots Q(x_{n-1}) Q(y - x_1 - x_2 - \dots - x_{n-1}) dx_1 dx_2 \dots dx_{n-1} \right\} \tag{9}$$

Среднее количество ячеек блока памяти машины при заданном объеме выборки с учетом (7-9) равно

$$N = 5(\bar{n}_{10} + \bar{n}_{20} + \bar{n}_{30}). \tag{I0}$$

Величины $\alpha_{ij}$ и $q_i$ допускают геометрическую интерпретацию.

$\alpha_{ij}$ представляет собой среднюю длину участка линии $i^{\underline{\text{ого}}}$ состояния, если за ним следует $j^{\underline{\text{ое}}}$ состояние.

$q_i$ – средняя длина участка линии $i^{\underline{\text{ой}}}$ микроситуации.

Следовательно,

$$\alpha_{ij} = \int_0^\infty \Delta\ell \, \tilde{Q}_i(\Delta\ell) d\Delta\ell, \tag{II}$$

где

$$\tilde{Q}_i(\Delta\ell) = \frac{\tilde{Q}(\Delta\ell_i, \Delta\ell_j)}{\tilde{Q}_{усл.}(\Delta\ell_j / \Delta\ell_i)}. \tag{I2}$$

Однако полученная модель (6) связана только с моментами перехода в другие состояния без учета времени задержки в каждом



из них. Отметим, что время задержки каждого состояния характеризует протяженность соответствующего участка горизонтали. Поэтому стохастические уравнения Чепмена-Колмогорова применить к горизонталям не удается. В связи с этим в работе построена обобщенная математическая модель горизонталей, позволяющая производить анализ рельефа с помощью ЭВМ. Введем обозначения:

$\ell_{ij}$ – протяженность участка горизонтали $i^{\underline{\text{ого}}}$ состояния при условии, что за ним следует участок горизонтали $j^{\underline{\text{ого}}}$ состояния ($\ell_{ij}$ есть время задержки) $Z_{ij}(\ell)$– плотность распределения вероятностей $\ell_{ij}$.

Тогда плотность вероятности задержки в $i^{\underline{\text{ом}}}$ состоянии равна

$$v_i(\ell) = \sum_{j=1}^{3}{}' \alpha_{ij} Z_{ij}(\ell), \tag{I3}$$

где штрих означает суммирование с учетом (5).

Среднее время задержки в каждом из состояний равно

$$\bar{\ell}_i = \sum_{j=1}^{3}{}' \alpha_{ij} \ell_{ij} \tag{I4}$$

Функция распределения вероятностей для безусловного времени ожидания $\ell_i$ равна

$$\hat{v}_i(\ell) = \int_{-\infty}^{\ell} v_i(u) du, \quad i = 1, 2, 3 \tag{I5}$$

Исходя из возможности реальных сочетаний различных состояний (табл.2), т.е. геометрии рисунка горизонталей, получены аналитические формулы для $w_{ij}(\ell)$– кумулятивной функции распределения вероятностей того, что система в момент времени $\ell$ находится в $j^{\underline{\text{ом}}}$ состоянии при условии, что при $\ell = \ell_0$ она находилась в $i^{\underline{\text{ом}}}$ состоянии. Как видно из таблицы, имеются неравнозначные свойства каждого из состояний. Например, состояние "два" совершает виртуальные переходы (т.е. само в себя), что соответствует гребнеобразному рельефу (с острым замыканием). Функции $w_{ij}(\ell)$ получаются из решения системы интегральных уравнений типа Фредгольма. Асимптотическое поведение этих функций определяется с помощью формулы

Таблица 2

| Состояние I | | Состояние 2 | | Состояние 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Вероятности | Переходы | Вероятности | Переходы | Вероятности | Переходы |
| $\alpha_{II}$ | I→I | $\alpha_{2I}$ | 2→I | $\alpha_{32}$ | 3→2 |
| $\alpha_{I2}$ | I→2 | $\alpha_{22}$ | 2→2 | $\alpha_{33}$ | 3→3 |
| $w_{II}$ | I→I→I | $\alpha_{23}$ | 2→3 | $w_{3I}$ | 3→2→I |
| $w_{II}$ | I→2→I | $w_{2I}$ | 2→I→I | $w_{3I}$ | 3→3→I |
| $w_{I2}$ | I→I→2 | $w_{2I}$ | 2→2→I | $w_{32}$ | 3→2→2 |
| $w_{I2}$ | I→2→2 | $w_{2I}$ | 2→3→I | $w_{32}$ | 3→3→2 |
| $w_{I3}$ | I→I→3 | $w_{22}$ | 2→I→2 | $w_{33}$ | 3→2→3 |
| $w_{I3}$ | I→2→3 | $w_{22}$ | 2→2→2 | $w_{33}$ | 3→3→3 |
| | | $w_{22}$ | 2→3→2 | | |
| | | $w_{23}$ | 2→I→3 | | |
| | | $w_{23}$ | 2→2→3 | | |
| | | $w_{23}$ | 2→3→3 | | |



$$w_{ij} = -\frac{2V_j'(0)\Delta_{ij}'(0)}{\Delta''(0)} = \frac{2\ell_j f_1(\{\alpha_{ij}\},\{M_{z_{ij}}\},\{\mathcal{D}_{z_{ij}}\})}{f_2(\{\alpha_{ij}\},\{M_{z_{ij}}\},\{\mathcal{D}_{z_{ij}}\})} \qquad (I6)$$

куда входят коэффициенты, непосредственно связанные с рисунком горизонталей, обусловливающим различные формы рельефа:

$\bar{\ell}_i$ – средняя длина участка линии, соответствующего состоянию $i$ вне зависимости от состояния последующего участка линии;

$\tilde{\alpha}_{11} = \alpha_{12}\alpha_{21}$ – вероятность появления фрагмента горизонтали, соответствующего плоским формам склона, либо $\cup$ -образному характеру замыкания горизонтали в тальвегах лощин. Этот фрагмент горизонтали представляет собой прямолинейный участок линии, сопряженный с двух ее концов с криволинейными (выпуклыми) участками одинаковых по знаку кривизн;

$\tilde{\alpha}_{33} = \alpha_{32}\alpha_{23}$ – вероятность появления того же фрагмента горизонтали, но с вогнутыми криволинейными участками;

$B_{ii} = \alpha_{ii} M_{z_{ii}}$ – средняя длина участка линии неизменяемой по знаку кривизны, взятая с соответствующим весовым коэффициентом $\alpha_{ii}$;

$b_{ij} = M_{z_{ij}}$, $i \neq j$ – средняя длина участка линии, определяемого состоянием $i$, если за ним следует участок линии, определяемого состоянием $j$;

$\mathcal{D}_{z_{ij}}$ разброс длины участка линии $\ell_{ij}$ относительной средней ее длины $M_{z_{ij}}$.

Указанные параметры горизонталей связаны между собой соотношениями

$$\begin{aligned} B_{11} &= \bar{\ell}_1 - \alpha_{12} M_{z_{12}}, \\ B_{22} &= \bar{\ell}_2 - (\alpha_{21} M_{z_{21}} + \alpha_{23} M_{z_{23}}), \\ B_{33} &= \bar{\ell}_3 - \alpha_{32} M_{z_{32}}. \end{aligned} \qquad (I7)$$

Вероятности $w_{ij}(\ell)$ появления состояний к моменту времени $\ell$ являются необходимыми для решения ряда картометрических задач. В частности, можно указать на задачу измерения информационной емкости карты по отдельным ее участкам, не попадающим в поле зрения следящей системы, т.е. решать задачу экстраполяции количества информации. Величина $w_{ij}(\ell)$ позволяет судить об ожидаемых формах рельефа на соседних листах карты. В случае, если на участке горизонтали от $\ell_1$ до $\ell_2$ имеется разрыв, то следящая система в состоянии скопировать этот участок разрыва линией соответствующей по знаку кривизны, ориентируясь на величину

$$\max_j \int_{\ell_1}^{\ell_2} w_{ij}(\eta)d\eta = \int_{\ell_1}^{\ell_2} w_{ik}(\eta)d\eta. \tag{18}$$

Однако для решения подобного рода задач знание функции $w_{ij}(\ell)$ недостаточно, поскольку каждое состояние кривой формируется посредством чередования информативных точек, одними из которых рассматриваются точки сопряжения участков линии с различными состояниями. В силу случайного характера изменения состояний появление этих точек будет также случайным с некоторой кумулятивной функцией распределения $\mathcal{X}(n,\ell)$. Очевидно, что

$$\mathcal{X}_{ij}(0,\ell) = \delta(i-j)\int_{\ell}^{\infty} v_i(\eta)d\eta, \tag{19}$$

где $\delta(i-j)$ символ Кронекера.

Справедливо рекуррентное соотношение

$$\mathcal{X}_{ij}(n+1,\ell) = \{\mathcal{X}_{kt}(n,\ell)\} J_{ij}(\ell), \tag{20}$$

где $J_{ij}(\ell)$ интегральный оператор для $w_{ij}(\ell)$, $i,j,k,t = 1,2,3$

Следовательно, $\mathcal{X}_{ij}(n,\ell) = \varphi_{ij}(n,\ell)$. (21)

Поэтому экстраполяция линии производится на основе равенства

$$\mathcal{X}_{ij^*}(n^*,\ell) = \max_n \max_j \varphi_{ij}(n,\ell), \tag{22}$$

обобщающего (18). Формула (22 ) может использоваться также и для решения задачи отождествления линий после точки их пересечения с другими знаками. Вероятности $\mathcal{X}_{ij}(n,\ell)$ связаны с другой характеристикой кривых $q_{ij}(n,\ell)$ - вероятностью появления ровно $n$ информативных точек в момент времени $\ell$ при $j^{\underline{ом}}$ конечном и $i^{\underline{ом}}$ начальном состояниях. Из геометрии рисунка кривых следует, что $q_{ij}(0,\ell)=0$, $\forall \ell \geq 0$, $i,j=1,2,3$; $q_{11}(k,\ell)=q_{12}(k,\ell)=q_{21}(k,\ell)=q_{23}(k,\ell)=q_{32}(k,\ell)=0$, при $k \geq 3$.



Величины $q_{13}(n,\ell)$, $q_{22}(n,\ell)$, $q_{31}(n,\ell)$, $q_{33}(n,\ell)$ для каждого фиксированного $n$ представляют собой вероятности появления соответствующих микроситуаций $n^{\underline{ого}}$ порядка, т.е. сочетаний двух участков линии с разными граничащими друг с другом состояниями при наличии $n$ информативных точек. Величины $\mathcal{X}_{ij}(n,\ell)$ и $q_{ij}(n,\ell)$ связаны между собой уравнениями связи

$$\mathcal{X}_{ij}(n,\ell) = \sum_{i=1}^{n}{}' \int_0^{\ell} q_{ij}(n,\ell)\mathcal{X}_{ij}(n-k,\ell-\tau)d\tau \tag{23}$$

Полученные аналитические характеристики горизонталей зависят от двух параметров $\alpha_{ij}$ и $z_{ij}$, которые должны быть уточнены с учетом случайного начального времени слежения по кривой. Эти уточненные значения параметров в соответствии с теоремой Байеса имеют вид

$$\hat{\alpha}_{ij} = \alpha_{ij}\left[\int_0^{\infty}\sum_i{}' \alpha_{ij} v_i(\ell) z_{ij}(\ell)d\ell\right]^{-1}\int_0^{\infty} v_i(\ell)z_{ij}(\ell)d\ell \tag{24}$$

$$\hat{z}_{ij}(\ell) = \alpha_{ij}\int_0^{\infty}\frac{v_i^2(\tau)}{\int_0^{\infty}\sum_i{}' v_i(\ell)\alpha_{ij}z_{ij}(\ell)d\ell}d\tau. \tag{25}$$

Приведенный статистический анализ рисунка горизонталей неразрывно связан с процессом автоматического считывания. Поэтому, основываясь на групповом доказательстве представления горизонталей посредством объединения значений отдельных параметров, для которых определены операции объединения, вращения, вертикального и горизонтального сжатия, приводится анализ различных типов интерполяторов: линейного, линейно-кругового, параболического.

В результате анализа показано, что оптимальным интерполятором, в смысле наличия наибольшего коэффициента сжатия и минимума количества точек для записи, является круговой интерполятор. Поэтому весь процесс автоматического считывания горизонталей сводится к определению координат информативных точек, - точки сопряже-

[illegible]

[illegible]

$$S = \min [illegible] \frac{[illegible]}{[illegible]\max\{P(H_i), P(H_j)\}} \qquad (23)$$

Заметим, что при различных $P(H_i)$ значение $S$ [illegible]

Каждый тип рельефа, попадающий в одну группу, является при автоматической их идентификации конкурирующим по отношению ко всем остальным, попадающим в эту группу.

Поэтому разработана процедура идентификации типов рельефа по их функциональным признаковым характеристикам, представляющая собой оптимальный алгоритм, в смысле А.Вальда, решения задачи проверки статистических гипотез. Эта процедура сводится к построению отношения вероятностей

$$\Lambda(k)=\frac{P_1(\bar{X})}{P_0(\bar{X})}, \qquad (29)$$

которое сравнивается с наперед заданными порогами А и В; где $0<B<1<A$, $P_i(\bar{X}), i=0,1$ - плотность распределения вероятностей вектора для типа рельефа, $dim\bar{X}=k$. В основу алгоритма положено функциональное соотношение

$$P_i(x_i)=\alpha_i(P(x_i))P(x_i) \qquad (30)$$

между конкурирующими гипотезами и приводящее к инвариантной относительно плотностей распределения процедуре идентификации, при которой сравнению с порогами подвергается величина $\bar{\Lambda}(k)$, равная

$$\bar{\Lambda}(k)=exp(\frac{\sigma^2}{2}-a), \qquad (31)$$

где $a$ - сумма математических ожиданий для $\ln\alpha_i(0)$,

$\sigma^2$ - сумма дисперсий для $\ln\alpha_i(0)$.

Отметим, что $\alpha_i(0)$ есть случайная величина в силу того, что распознавание типов рельефа осуществляется по множеству горизонталей.

Вероятности принять гипотезу $H_1$ и $H_0$ равны соответственно

$$\rho_1=\frac{1}{2}\left[1-\hat{\Phi}\left(\frac{\ln A-a}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right], \qquad (32)$$

$$\rho_0=\frac{1}{2}\left[1-\hat{\Phi}\left(\frac{a-\ln B}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right], \qquad (33)$$



где $\hat{\Phi}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}}dt$ - интеграл вероятностей.

Вероятности $\rho_0$ и $\rho_1$ выражают степень доверия к вынесенным решениям при идентификации двух типов рельефа. Область одинаковой предпочтительности гипотез $H_0$ и $H_1$ равна

$$\mathcal{U}=\{a:|e^{2a}-AB|\leq\varepsilon\}. \qquad (34)$$

Границы для среднего числа наблюдений определяются формулой

$$\frac{\alpha\ln\frac{\alpha}{1-\beta}+(1-\alpha)\ln\frac{1-\alpha}{\beta}}{\max\limits_i \ln\frac{\bar{\alpha}_i(0)+1}{2}}\leq N\leq\frac{\alpha\ln\frac{\alpha}{1-\beta}+(1-\alpha)\ln\frac{1-\alpha}{\beta}}{\min\limits_i \ln\frac{\bar{\alpha}_i(0)+1}{2}} \qquad (35)$$

Приведенный оптимальный алгоритм распознавания, очевидно, сопровождается некоторыми ошибками: $\rho_i(e)$ и $\gamma_i(e)$ - соответственно, вероятность необнаруженной и обнаруженной ошибок $i^{\text{ого}}$ класса. По Хайлиману число этих ошибок подчиняется биномиальному закону распределения $Bi(m_i,\rho)$, где $m_i$ - объем выборки $i^{\text{ого}}$ класса образов, $\rho=\rho_i(e)$ или $\gamma_i(e)$

$$Bi(m_i,\rho)\sim C_{m_i}^x\rho^x(1-\rho)^{m_i-x}=f(x) \qquad (36)$$

Для заданной вероятности $f(x)$, фиксированного числа неправильно опознанных образов $x$ и вероятности $\rho$, можно определить необходимое число образов $m_i$ для обучения автомата.

Для исключения подобного рода ошибок при отождествлении указанных признаковых функций с типами рельефа процесс распознавания должен базироваться на предвидении последствий принимаемых решений. Это предвидение понимается в смысле соответствия текущей распознаваемой информации с распознанной, т.е. с той графической информацией, которая граничит с текущей. В связи с этим разработана эвристическая программа работы автомата и его блок-схема, сущность которой заключается в логическом анализе реальных сочетаний между различными типами рельефа и тех, которые получаются в процессе их распознавания. Геометрически каждое сочетание представляется дугой ориентированного графа, характеризующегося: наименованием, условием и временем появления; условием и временем окончания. Разность между временем появления и окончания характеризует временную протяженность каждого из сочетаний и является переменной величиной, специфической для различных типов местности, отображенной на карте. Разработанный эвристический алгоритм работы автомата является оптимальным с точки зрения минимума числа переборов вариантов.

Из вышеизложенного анализа горизонталей следует, что в процессе процедуры распознавания в памяти ЭВМ фиксируются:

I. Координаты информативных точек:

а) точки локальных экстремумов $\{M_{1l}\}$, $l=\overline{1,n_1}$,

б) точки сопряжения криволинейных участков линии с прямолинейными $\{M_{2j}\}$, $j=\overline{1,n_2}$,

в) точки перегиба $\{M_{3k}\}$, $k=\overline{1,n_3}$

2. Кривизна и длина участка линии в каждой информативной точке (с индексацией, соответствующей типу информативной точки).

3. Параметры признаковых функций для $\rho$ и $\Delta l$

Общее количество чисел, хранящихся в памяти ЭВМ, равно

$$Q=8\sum_{j=1}^{N} n_{1j}+7\sum_{j=1}^{N} n_{2j}+5\sum_{j=1}^{N} n_{3j}+4\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{2} S_i(\Theta_j)+k+1, \qquad (37)$$

где $N$ - число горизонталей; $S_i(\Theta_j)$ - число отрезков разбиения объема выборки для $i^{\text{ого}}$ параметра $j^{\text{ой}}$ горизонтали; $k$ - число микроситуаций.

При больших значениях $Q$, вызывающих переполнение блока памяти ЭВМ, возникает задача уменьшения (редукции) $Q$ при условии, что оставшийся набор чисел достаточно полно, в некотором смысле, характеризует первоначальную информацию. Наиболее приемлемым методом редукции больших массивов графической инфор-



Таблица 4

| Тип исходной информативной точки | Тип следующей информативной точки | Возможные соотношения между параметрами $\Theta_i$ | Соотношения для принятия решения о редукции: $\oplus$ редуцировать $\ominus$ не редуцировать | Тип редуцируемого (выбрасываемого) параметра |
|---|---|---|---|---|
| | 2 (без точки перегиба | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+=\Delta l_2^-$ | $\Delta l_1^+=\Delta l_2^-$ $\oplus$ | $\Delta l_2^-$ |
| 1 | —"— | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+<\Delta l_2^-$ | $\ominus$ | нет |
| | —"— | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+>\Delta l_2^-$ | $\ominus$ | нет |
| | 2 (с точкой перегиба) | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+=\Delta l_2^-$ | $\Delta l_1^+=\Delta l_2^-$ $\oplus$ | $\Delta l_2^-$ |
| 1 | —"— | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+<\Delta l_2^-$ | $\ominus$ | нет |
| | —"— | $\rho_1>\rho_2$ $\Delta l_1^+>\Delta l_2^-$ | $\ominus$ | нет |
| | 2 (без точки перегиба и с ней) | $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ | $\oplus$ $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ | $\rho_{22}$ $\Delta l_{22}^-$ |
| | —"— | $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-<\Delta l_{22}^-$ | $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\oplus$ | $\rho_{22}$ |
| | —"— | $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^->\Delta l_{22}^-$ | $\rho_{21}=\rho_{22}$ $\oplus$ если $\lVert\rho_{22}-\tilde\rho\rVert\le\varepsilon$, где $\tilde\rho\in C(1/\rho_{21},\Delta l_{21}^-+\Delta l_{22}^-)$ | $\rho_{22}$ $\rho_{21}$ |
| | —"— | $\rho_{21}<\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ | $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ $\oplus$ | $\Delta l_{22}^-$ |
| 2 | —"— | $\rho_{21}<\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-<\Delta l_{22}^-$ | $\ominus$ | нет |
| | —"— | $\rho_{21}<\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^->\Delta l_{22}^-$ | $\oplus$ если $\lVert\rho_{22}-\tilde\rho\rVert\le\varepsilon$, где $\tilde\rho\in C(1/\rho_{21},\Delta l_{21}^-+\Delta l_{22}^-)$ | $\rho_{21}$ |
| | —"— | $\rho_{21}>\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ | $\Delta l_{21}^-=\Delta l_{22}^-$ $\oplus$ | $\Delta l_{22}^-$ |
| | —"— | $\rho_{21}>\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^-<\Delta l_{22}^-$ | $\ominus$ | нет |
| | —"— | $\rho_{21}>\rho_{22}$ $\Delta l_{21}^->\Delta l_{22}^-$ | $\oplus$ если $\lVert\rho_{22}-\tilde\rho\rVert\le\varepsilon$, где $\tilde\rho\in C(1/\rho_{21},\Delta l_{21}^-+\Delta l_{22}^-)$ | $\rho_{21}$ |
| | 2 | $\Delta l_3=\Delta l_2^+$ | $\Delta l_3\underset{\oplus}{=}\Delta l_2^+$ | $\Delta l_2^+$ |
| 3 | —"— | $\Delta l_3<\Delta l_2^+$ | $\oplus$ если $\lVert\rho_{22}-\tilde\rho\rVert\le\varepsilon$, где $\tilde\rho\in C(1/\rho_{21},\Delta l_3+\Delta l_2^+)$ | $\rho_3$ |
| | —"— | $\Delta l_3>\Delta l_2^+$ | $\ominus$ | нет |

мации является метод выбрасывания точек в зависимости от соотношений приписываемых к ним $\rho$ и $\Delta\ell$, и точности $\varepsilon$ нанесения этих точек на карту. Редукция осуществляется в соответствии с табл. 4.

В табл. 4 приняты следующие обозначения:

$\theta_i$ - параметр ($\theta=\rho$, либо $\theta=\Delta\ell$) для $i^{\text{ого}}$ типа точки;

$\Delta\ell_i^+(\Delta\ell_i^-)$ - значение отрезка $\Delta\ell$ справа (слева) от $i^{\text{ого}}$ типа точки;

$|\rho_i-\rho_j|$ евклидово расстояние между точками $\rho_i$ и $\rho_j$;

$\theta_{ij}$ - параметр $\theta$ для $i^{\text{ого}}$ типа точки, занимающей в ряду чисел $j^{\text{ое}}$ место;

$C(\frac{1}{\rho_i},\Delta\ell)$ - участок окружности радиуса $\frac{1}{\rho_i}$ и длиной $\Delta\ell$;

$\varepsilon=\frac{1}{8}h, h$ - расстояние между горизонталями.

Поскольку каждой информативной точке поставлены в соответствие два параметра $\rho$ и $\Delta\ell$ и вероятностные признаки, то процедура восстановления (аппроксимации) $j^{\text{ой}}$ горизонтали состоит в выполнении двух чередующихся этапов: детерминированного $D(\Gamma_j)$ и стохастического $S(\Gamma_j)$, а именно

$$R(\Gamma_j)=\begin{cases} D(\Gamma_j), & \text{если } (x,y)\in C(\frac{1}{\rho_{ij}},\Delta\ell_{ij}) \\ S(\Gamma_j), & \text{если } (x,y)\notin C(\frac{1}{\rho_{ij}},\Delta\ell_{ij}) \end{cases} \tag{38}$$

Причем, под стохастической процедурой воспроизведения горизонталей понимается процесс моделирования двумерного случайного вектора $\vec{\xi}(\rho,\Delta\ell)$, имеющего функцию плотности распределения вероятностей $P_j(\rho,\Delta\ell)=W_j(\rho)P_j(\Delta\ell/\rho)$. В силу правила записи графической информации этот процесс моделирования осуществляется при наличии ограничений



$$\begin{gathered} \hat{\rho}_{1j}\vee\rho\vee\hat{\rho}_{2j}, \\ \sum_{i=1}^{m+1}\Delta\ell_{ik}=\Delta\ell_k. \end{gathered} \tag{39}$$

Эксперименты для отдельных фрагментов кривых показали, что применение правила $S(\Gamma_j)$ обеспечивает необходимую для практических целей точность воспроизведения.

Рассмотренный подход к проблеме распознавания линейных элементов содержания карты на примере горизонталей позволяет в некоторой степени упорядочить процесс генерализации этих элементов, осуществляемый до настоящего времени картографом с использованием различных инструкций и руководств по составлению карт, приблизительных рекомендаций и наглядных примеров.

Количественные характеристики признаковых функций различных типов рельефа являются удобными показателями, с точки зрения использования ЭВМ, визуальных и описательных свойств рельефа, в частности, его извилистости и расчлененности. Следовательно, процесс обобщения представляет собой требуемое изменение признаковых функций, а отбор есть некоторый логический оператор, решающий двуальтернативную задачу, при которой отдельные фрагменты горизонталей остаются, если вероятность их появления превышает некоторый априорно выбранный порог, и выбрасываются - в противном случае. Процесс изменения признаковых функций и выбор вероятностного порога должны базироваться на результатах анализа большого статистического материала.

x x x

Основные результаты проведенных в диссертации исследований состоят в следующем.

1. Исходя из бесконечного многообразия кривых, реализуемых горизонталями, показано, что применение детерминированных эталонов

для каждого линейного картографического знака (горизонтали) недостаточно для автоматического исследования типов рельефа.

2. С целью получения по картам необходимой информации и ее анализа, а также создания методов совместного использования карт разной тематики (например, для исследования корреляций) разработаны принципы оценки содержания информации для линейных картографических объектов - горизонталей. На основе исследования закономерностей картографической формы передачи информации построена вероятностно-статистическая модель горизонталей, которая позволила произвести статистический анализ горизонталей методами теории марковских процессов.

3. Получены аналитические формулы для определения априорного среднего количества ячеек блока памяти ЭВМ при заданном объеме выборки, решить (в первом приближении) задачу математического описания горизонталей.

4. Показано, что приведенная простейшая марковская модель является частным случаем более общей модели, в которой учтены протяженности участков линий кривых, соответствующих определенным по знаку кривизнам. В этой модели найдены функциональные соотношения (интегральные уравнения типа Фредгольма) между вероятностными характеристиками горизонталей. Всего таких характеристик шесть, три из которых являются исходными, а остальные - производными от исходных.

5. Полученные системы интегральных уравнений типа Фредгольма для производных вероятностных характеристик и их решения являются необходимыми для решения ряда картометрических задач: измерение информационной емкости карты по отдельным ее участкам, не попадающим в поле зрения следящей системы; получение сведений об ожидаемых формах рельефа на соседних листах карты и т.п. Используя вероятностные характеристики, следящее устройство способно с помощью разработанных алгоритмов воспроизводить участок линии между двумя точками ее разрыва, а также выбирать истинное продолжение линии слежения в случае пересечения ее другими элементами содержания карты. Показано, что вероятностные характеристики горизонталей допускают наглядную интерпретацию их рисунка (форму, степень расчленения, глубину врезания лощин, характер замыкания, степень извилистости и т.д.). Кроме того, выведены формулы пересчета этих характеристик с учетом случайного характера начального времени слежения по кривой.



6. Сравнительный анализ интерполяторов показал, что наибольшее предпочтение следует отдать линейно-круговому интерполятору; этот же результат подтверждается теоретически. Ориентируясь на этот вид интерполятора, разработаны теоретические и технические аспекты, связанные с автоматической фиксацией точек перегиба и точек локальных экстремумов.

7. Проведены эксперименты по выявлению доверительных областей, где расположены признаковые функции для 27 типов рельефа.

8. Полученная формула для надежности распознавания типов рельефа и экспериментальные признаковые характеристики показали, что надежность распознавания по этим характеристикам равна 0,85 - 0,93.

9. Рассмотренная процедура опознавания типов рельефа по дискретному набору значений отдельных параметров признаковых функций обобщена на случай сравнения самих функций, т.е. рассмотрена задача проверки статистических гипотез.

10. Получена формула для отношения вероятностей, зависящего только от соотношений между конкурирующими признаковыми функциями. Это позволило вывести формулы для оценки надежности предложенной процедуры распознавания, найти область одинаковой предпочтительности проверяемых гипотез, а также указать границы для среднего числа наблюдений.

II. Разработана эвристическая программа работы автомата и его блок-схема. Автомат решает задачи чтения и анализа линейной картографической информации (горизонталей). Показано, что предложенный алгоритм работы автомата является оптимальным с точки зрения минимума числа переборов вариантов для сочетаний различных типов рельефа.

12. Для записанного в цифровой форме массива картографической информации в виде набора координат информативных точек предложен логический метод редукции, основанный на выбрасывании определенных точек.

I3. Разработан способ аппроксимации (воспроизведения) непрерывных кривых на примере горизонталей в зависимости от признаков для их распознавания. Способ, включающий в себя выполнение детерминированной и стохастической (по методу Монте-Карло) процедур воспроизведения кривой, показал при лабораторной проверке приемлемую для практических целей точность.

14. Разработанный способ математического описания горизонталей является базой для создания количественных методов обработки соответствующей картографической информации.

15. Показано, что разработанный метод автоматического распознавания типов рельефа можно использовать для создания автоматических способов генерализации.

16. Внедрение распознающих систем в картографическое производство освобождает картографов от ручного ввода исходной информации в автоматизированные системы обработки информации, в устройства воспроизведения изображений, позволит автоматизировать процесс ориентирования на местности по формам рельефа, выбрать оптимальный вариант развития геодезических сетей. Данные на выходе распознающего устройства могут быть использованы для подсчета информативной емкости карты, для площадных и линейных измерений при выполнении картометрических работ, а также для решения важных народнохозяйственных задач.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора.

1. ВЕРГАСОВ В.А. Об одной простейшей марковской модели линейных картографических знаков. Из.ВУЗов, "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.5, 1970.

2. ВЕРГАСОВ В.А. Об инвариантных признаках в задаче распознавания линейной картографической информации. Труды МИИГАиК, вып.58, 1971.

3. ВЕРГАСОВ В.А. О логических принципах работы автоматов при подготовке к изготовлению издательских оригиналов карт. Труды МИИГАиК, вып.58, 1971.

4. ВЕРГАСОВ В.А., ВАСМУТ А.С., ПРУГАЛОВА Н.А. Об опытах получения обучающей выборки для задач распознавания типов рельефа с помощью ЭВМ. "Геодезия и картография", № 7, 1971.

5. ВАСМУТ А.С., ВЕРГАСОВ В.А., МАРТЫНЕНКО А.И. К вопросу об автоматическом чтении картографической информации. Изв. ВУЗов, "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.6, 1970.

Материалы по теме диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (1968, 1969, 1970, 1971 гг.).

Л-82200 от 5.11.71 г.

Зак.515 КПЛ МИИГАиК Тир.150