

УДК 528.721.126:681.3

На правах рукописи

ББК Д131.413с51

Белошапкин Михаил Александрович

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ЦИФРОВОГО ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ АЭРОФОТОСНИМКОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПОПРАВOK.

05.24.02

«Аэрокосмические съемки, фотограмметрия, фототопография»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск - 1998 г.

Работа выполнена в Сибирской государственной геодезической академии.

Научный руководитель

доктор технических наук,  
профессор  
Гук А. П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук  
профессор  
Журкин И. Г.;  
кандидат технических наук  
доцент  
Гиенко Г. А.

Ведущая организация

Сибирский научно-исследовательский и  
производственный центр геоинформации  
и прикладной геодезии  
(центр «Сибгеоинформ»).

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1998 г. в \_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 064.14.01 в Сибирской государственной  
геодезической академии (СГГА) по адресу: 630108, Новосибирск 108,  
Плахотного, 10, СГГА, аудитория 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1998 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Середович В. А.

### Общая характеристика работы

Технические возможности современных систем сбора и обработки данных позволяют по-новому подойти к решению ряда традиционных задач фотограмметрии. К существенным особенностям таких систем следует отнести возможности обработки цифровых аэрофотоснимков высокого разрешения, в том числе цветных, выполнение сложных вычислений в реальном времени, развитые средства пользовательского интерфейса, возможность реализации фотограмметрической технологии на настольном компьютере. Быстрый рост производительности персональных ЭВМ и телекоммуникационных систем в последние годы привел к образованию инфраструктуры для широкого внедрения технологий цифровых ГИС в различных отраслях производства и управления.

Тем не менее, средства обновления информации в ГИС остаются недоступными для большинства пользователей из-за высокой стоимости существующих технологий фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, ориентированных на аппаратные платформы класса Workstation или Mainframe. Поэтому разработка современной технологии цифрового ортотрансформирования для персонального компьютера на основе комплексного анализа методов оптимизации является актуальной задачей цифровой фотограмметрии.

Теоретические основы ортотрансформирования аэрофотоснимков детально разработаны в трудах отечественных и зарубежных ученых А. Н. Лобанова, И. Г. Журкина, А. П. Гука, А. В. Чекалина, Г. Конекни и др. В то же время, реализация современной технологии цифрового ортотрансформирования для настольной ГИС требует дополнительных исследований.

Цель настоящей диссертационной работы состоит в разработке теории, методов и программного обеспечения для получения высококачественных цифровых ортоснимков и моделей рельефа, рассчитанного на широкое применение в составе настольной ГИС на базе персонального компьютера.

Для достижения поставленной цели:

- выполнен анализ проблемы цифрового ортотрансформирования снимков и рассмотрены факторы, влияющие на взаимосвязь координат точек исходного снимка и цифрового ортоснимка с точки зрения сквозной оптимизации вычислительного процесса;

- разработана математическая модель цифрового ортотрансформирования, основанная на использовании матрицы обобщенных поправок (МОП);

- разработан алгоритм быстрого ортотрансформирования аэрофотоснимков и автоматизированная технология их цифровой обработки, включающая в себя фотограмметрические измерения по стереопаре в полуавтоматическом и автоматическом режимах, построение модели и формирование ЦМР, получение цветных ортоснимков высокого разрешения;

- разработана новая методика автоматизированного поиска соответственных точек на цифровых стереопарах с использованием эквивалентных хроматических координат для цветных изображений.

Научная новизна выполненной работы состоит в том, что форма представления цифровой модели рельефа (ЦМР) выбирается таким образом, чтобы общее количество вычислений в процессе формирования ЦМР и ортотрансформирования было минимальным. Для этого на основе известных методов трансформирования аэрофотоснимков по зонам разработана новая методика ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок (МОП). Выведены и проверены расчетные формулы для формирования ЦМР в виде МОП. Разработана математическая модель ортотрансформирования с возможностью регулирования соотношения между точностью и

производительностью, в зависимости от технических требований к выходным ортоснимкам. Кроме этого, в диссертации разрабатывается новая методика автоматизированного поиска соответственных точек на цифровых стереопарах с использованием эквивалентных хроматических координат для цветных изображений.

Основные научные положения диссертации реализованы в виде пакета программ OrthoPhoto-SDS, ориентированного на платформу Pentium + Windows 95, и технологии цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять построение модели по стереопаре в полуавтоматическом режиме, измерение координат соответствующих точек в полуавтоматическом и автоматическом режимах, формирование ЦМР и быстрое цифровое ортотрансформирование аэрофотоснимков с использованием матрицы обобщенных поправок.

Исследования, выполненные с использованием реальных снимков, показали, что точность построения ортофотоплана и производительность алгоритма соответствуют теоретическим расчетам.

По предложенной в диссертации технологии с помощью программного обеспечения OrthoPhoto-SDS были выполнены производственные работы по ортотрансформированию снимков для создания карт земельного кадастра масштаба 1:2000.

Программное обеспечение OrthoPhoto-SDS внедрено в учебный процесс на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА. Оно экспонировалось на 19 конгрессе ISPRS (Вена, 1996 г.) и на международной конференции Интеркарто-3 (Новосибирск, 1997 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в десяти научных работах.

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации

115 страниц. В ней представлены 7 таблиц и 19 рисунков. Список использованных источников включает 81 наименование.

### Содержание работы

Во введении сформулирована актуальность, определены цель, задачи и методы исследований, приведена общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы приводится краткий исторический обзор развития методов получения ортоскопичных изображений местности, рассмотрены оптико-механические и современные цифровые приборы для ортотрансформирования аэрофотоснимков.

На основе анализа нормативно-технической документации, характеристик аэрофотоаппаратов и аэрофотопленок, существующих методов цифрового ортотрансформирования и возможностей современных персональных компьютеров дается характеристика проблем, возникающих при решении поставленных задач:

1. Проблема быстродействия. На основе анализа информационной емкости фотографических слоев установлено, что современная методика ортотрансформирования аэрофотоснимков должна предусматривать работу с цифровыми изображениями объемом от 30 Мбайт до 1,0-1,5 Гбайт. В условиях дефицита вычислительных ресурсов персонального компьютера обработка массивов данных такого объема требует комплексной оптимизации всего процесса цифрового ортотрансформирования, включая этапы формирования цифровой модели рельефа (ЦМР) и фотограмметрических измерений.
2. Проблема точности. Предельная точность ортоснимка при обработке методом прямого сканирования определяется разрешением исходного цифрового изображения, и может достигать значений 5-10 мкм. Для

получения такой высокой точности необходимо учитывать тонкие влияния на смещения изображений объектов на снимке, такие как атмосферная рефракция и дисторсия объектива.

3. Проблема качества ЦМР. При формировании ЦМР по стереопаре информативность модели определяется количеством измерений координат соответственных точек. Кроме того, значительное влияние оказывает метод интерполяции результатов этих измерений. ЦМР должна обеспечивать возможность быстрого и точного расчета высоты на местности в пределах области ее определения, передавать особенности геоморфологического строения рельефа, его генеральные тенденции и мелкие детали.
4. Проблема автоматизации измерений. Количество измерений по стереопаре для построения высококачественной модели рельефа зависит от содержания снимков, но в любом случае составляет не менее нескольких сотен. Точные фотограмметрические измерения быстро утомляют оператора, снижается его производительность труда, увеличивается вероятность ошибок. Поэтому для решения проблемы точности и информативности ЦМР необходима автоматизация измерений соответственных точек.
5. Проблема машинного восприятия цвета. Эта проблема возникает вследствие того, что человеческий глаз и сканирующее устройство имеют различные характеристики чувствительности в диапазоне видимого спектра.

Все пять перечисленных проблем взаимосвязаны, а для их комплексного решения методика цифрового ортотрансформирования должна удовлетворять противоречивым требованиям.

Во второй главе предлагается метод ортотрансформирования аэрофотоснимков по матрице обобщенных поправок (МОП) в качестве одного из возможных средств решения сформулированных в первой главе проблем.

В процессе цифровой обработки аэрофотоснимков измерения выполняются не по самим снимкам, а по их цифровым изображениям, поэтому вводится целочисленная положительно определенная система координат цифрового изображения, связанная с системой координат аэрофотоснимка. Она имеет два важных свойства:

1. Существует взаимно-однозначное соответствие между округленными до целых чисел координатами в системе координат цифрового аэрофотоснимка  $S_d$  и адресом в оперативной памяти компьютера. Это соответствие задается так же целочисленным арифметическим выражением, например  $a = a_0 + n(l y_d + x_d)$ , где  $a$  - адрес в оперативной памяти компьютера,  $n$  - число байт, которыми задается каждый пиксель изображения,  $l$  - количество пикселей в одной строке изображения,  $a_0$  - адрес буфера памяти. Таким образом, если геометрическое преобразование задано в системе координат цифрового изображения, оно может быть эффективно реализовано алгоритмически.
2. Хотя системы цифрового изображения  $S_d$  и аэрофотоснимка  $S_i$  являются прямоугольными, связь между ними может определяться аффинным или даже нелинейным преобразованием. Это объясняется тем, что  $S_d$  и  $S_i$  заданы для разных объектов. Мы будем считать, что система  $S_i$  связана с изображением, существовавшим в аэрофотоаппарате в момент съемки, а система  $S_d$  - с цифровым изображением в памяти компьютера. Первое изображение превращается во второе в процессе химико-фотографической обработки, хранения и сканирования, испытывая при этом деформации, в общем случае нелинейные.



Далее рассмотрены два известных и один новый метод оптимизации ортотрансформирования относительно преобразований, заданных в системах координат цифровых изображений. Здесь же выводится оценка выигрыша от применения этих методов.

1) *Сведение двумерной задачи к квазиодномерной задаче.* Так как выходной массив данных обычно формируется построчно, в процессе обработки одной строки можно вместо оператора трансформирования  $\mathbf{T}(x,y)$  использовать его сокращенный вариант для  $y=const$   $\mathbf{T}_x(x)$ , выполняя предвычисления величин, зависящих от  $y$  перед обработкой каждой строки. Пусть обрабатывается изображение размером  $p \times p$  пикселей, оператор  $\mathbf{T}(x,y)$  содержит  $n$  операций, оператор  $\mathbf{T}_x(x)$  -  $m < n$  операций, а для формирования оператора  $\mathbf{T}_x = \mathbf{T}_{y=const}$  требуется  $q$  операций. Тогда относительный выигрыш от применения данного метода оптимизации  $b = \frac{pn}{pm+q} \approx \frac{n}{m}$ . Для изображений высокого разрешения  $p \gg q$ ,  $n > 2m$ ,  $b > 2$ , то есть можно увеличить производительность алгоритма более, чем в 2 раза. При разработке реальной программы возможно достижение большего выигрыша за счет увеличения отношения  $n/m$  алгоритмическими средствами. Достоинством такого подхода является сохранение точности вычислений.

2) *Применение дифференциальной формы оператора трансформирования.* Аналитическая форма первой производной  $\frac{\partial \mathbf{T}_x}{\partial x}$  часто оказывается проще, чем форма оператора  $\mathbf{T}_x$ . Так как в процессе трансформирования в пределах одной строки цифрового ортоснимка координата  $x_o$  всегда получает приращение +1,0, приращение  $\mathbf{T}_x$  численно равно  $\frac{\partial \mathbf{T}_x}{\partial x}$ , вычисление оператора трансформирования можно заменить вычислением его приращения и получить рекуррентную формулу для  $i$  пикселя  $j$  строки выходного ортоснимка:

$$\begin{pmatrix} x_{d[i,j]} \\ y_{d[i,j]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{d[i-1,j]} \\ y_{d[i-1,j]} \end{pmatrix} + \frac{\partial \mathbf{T}_x(x_{o[i,j]}, y_{o[i,j]})}{\partial x_o}. \quad (1)$$

В общем случае, такому подходу свойственно быстрое накопление ошибки по мере движения вдоль строки изображения, однако при алгоритмической реализации трансформирования накопление ошибки можно уменьшить до пренебрежимо малой величины.

3) *Ортотрансформирование по матрице обобщенных поправок.* Этот метод оптимизации алгоритмов сложных геометрических преобразований является одним из основных предметов разработки в настоящей диссертации. Будем искать приближение оператора трансформирования в виде

$$\tilde{\mathbf{T}}(x, y) = A(x, y) + \mathbf{c}_{i,j}, \quad (3)$$

где  $A(x, y)$  - упрощенная аналитическая форма  $\mathbf{T}(x, y)$ ,

$\mathbf{c}_{i,j} = \mathbf{T}(k(i + \frac{1}{2}), k(j + \frac{1}{2})) - A(k(i + \frac{1}{2}), k(j + \frac{1}{2}))$  - элемент МОП,  $k$  - масштаб

МОП,  $i, j, k$  - натуральные числа. *Матрица обобщенных поправок строится в масштабе, кратном масштабу выходного цифрового ортоснимка и содержит поправки в масштабе исходного цифрового изображения.* Смещение индексов  $+1/2$  вводится для того, чтобы точное значение поправки относилось к середине диапазона ее действия.

Вычислительный процесс при обратном трансформировании цифрового изображения по МОП состоит из следующих операций:

- для текущего пикселя цифрового ортоснимка приближенно вычисляются координаты соответствующего пикселя исходного изображения

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_d \\ \tilde{y}_d \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} \text{ по упрощенной формуле. В общем случае это может быть}$$

дробно-линейное аффинное или другое простое преобразование координат. В диссертации подробно рассматривается использование в качестве приближения преобразования (11);

- из матрицы обобщенных поправок выбирается соответствующий вектор поправки  $\mathbf{c}_{i,j}$ ,  $i = \frac{x_o}{k}, j = \frac{y_o}{k}$ ;
- приближенные значения координат пикселя исходного снимка уточняются с использованием выбранного вектора поправки:  $\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \tilde{x}_d \\ \tilde{y}_d \end{pmatrix} + \mathbf{c}_{i,j}$ ;
- текущему пикселю ортоснимка присваивается значение яркости или цвета найденного пикселя исходного изображения.

Рассмотрим выигрыш от применения такого метода оптимизации. Пусть для вычисления  $\mathbf{T}(x, y)$  требуется  $n$  операций, а для вычисления  $A(x, y)$  -  $m < n$  операций. Тогда для вычисления  $\mathbf{c}_{i,j}$  потребуется  $n+m$  операций, а для вычисления  $\tilde{\mathbf{T}}(x, y)$  приблизительно  $m$  операций, так как вычисления с целыми числами для большинства компьютеров выполняются гораздо быстрее, чем с действительными, временем выборки вектора обобщенной поправки из матрицы можно пренебречь. На построение матрицы поправок размером  $p \times p$  и трансформирование цифрового изображения по ней необходимо  $p^2(n+2m)$ , а на трансформирование с использованием оператора  $\mathbf{T}$  -  $k^2 p^2 n$  операций. Относительный выигрыш  $b = \frac{k^2}{1 + \frac{2m}{n}}$  пропорционален  $k^2$  (!).

При  $k=1$   $\tilde{\mathbf{T}}(x, y) = \mathbf{T}(x, y)$  для всех пикселей ортоснимка, если для них определено  $A(x, y)$ , то есть преобразование (3) является точным. При этом трансформирование (с учетом времени построения матрицы поправок) выполняется в  $1 + \frac{2m}{n}$  раз медленнее, чем при прямом применении оператора  $\mathbf{T}$ . Начиная с  $k=2$ , производительность алгоритма быстро возрастает.

При  $k > 1$  один и тот же вектор поправки используется для уточнения значений координат в квадратной области

$$k(i - \frac{1}{2}) < x_o < k(i + \frac{1}{2}),$$

$$k(j - \frac{1}{2}) < y_o < k(j + \frac{1}{2}),$$

при этом точное значение получается только для пикселя  $(x_o = ki, y_o = kj)$ . Для остальных  $k^2 - 1$  пикселей значения координат  $(x_d, y_d)$  получаются с ошибкой. Величина ошибки зависит от того, насколько хорошо аппроксимирует  $A(x, y)$  оператор трансформирования  $\mathbf{T}$ , т. е. от поведения функции обобщенной поправки  $C(x, y) = \mathbf{T}(x, y) - A(x, y)$ .

Установлено, что для большинства видов аэрофотосъемки достаточная точность трансформирования получается при  $k=5, \dots, 10$  (меньшие значения для горного рельефа местности) и применение данного метода оптимизации позволяет увеличить производительность цифрового ортотрансформирования в 25-100 раз.

Важным достоинством трансформирования по МОП является возможность регулирования соотношения между точностью и производительностью процесса, при помощи изменения значения масштаба матрицы  $k$ . Если провести аналогию между принципом действия аналитического фототрансформатора Gestalt Photomapper II и предложенным методом трансформирования, то изменение масштаба матрицы в цифровом методе соответствует смене маски проектирующей головки в оптико-механическом. Значение  $k=5$  соответствует маске размером всего 0,15x0,15 мм при разрешении сканера 800 dpi или 0,1x0,1 мм при 1200 dpi, что гораздо меньше, чем в приборе (0,8x4,0 мм). Таким образом, предлагаемый метод обеспечивает значительно более высокую точность выходного ортоснимка, чем лучшие образцы оптико-механических приборов.

В разработанной методике цифрового ортотрансформирования применяются все три рассмотренных способа оптимизации и выводятся соответствующие расчетные формулы. Установлено, что метод МОП может

применяться для компенсации влияния атмосферной рефракции, кривизны поверхности Земли, дисторсии объектива, деформаций фотоматериала и погрешностей сканирующего устройства. Сам процесс трансформирования инвариантен относительно этих факторов, они учитываются в формулах для формирования МОП. Таким образом, наряду с информацией о рельефе, МОП может содержать поправки для учета разнообразных факторов, влияющих на взаимосвязь координат при ортотрансформировании. Эта особенность и определила название предложенного метода.

В диссертации приводится вывод расчетных формул для цифрового ортотрансформирования и формирования МОП.

Пусть системы координат исходного снимка и его цифрового изображения связаны аффинным преобразованием, а цифровой ортоснимок строится с разрешением  $k$  метров на местности в одном пикселе.

Системы координат цифрового изображения  $S_d$  и изображения  $S_i$  развернуты и смещены относительно друг друга из-за неизбежной неточности установки снимка в сканер.

Представим связь между этими системами линейным оператором:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \mathbf{i} + \mathbf{d}^0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{d} \equiv \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix}$  - положение точки  $\mathbf{i} \equiv \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$  исходного изображения после

ввода последнего в ЭВМ в системе координат  $S_d$ ,  $\mathbf{d}^0 \equiv \begin{pmatrix} x_d^0 \\ y_d^0 \end{pmatrix}$  - положение

главной точки снимка в этой же системе, коэффициенты  $r_{11} \dots r_{22}$  определяются в процессе внутреннего ориентирования снимка.

Связь координат цифрового ортоснимка и местности выражается в виде:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} x^o \\ y^o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0^o \\ Y_0^o \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $(X_0^o, Y_0^o)$  координаты точки местности, соответствующей центру первого пикселя первой строки цифрового ортоснимка,  $(x^o, y^o)$  - координаты (индексы) пикселя цифрового ортоснимка.

Непосредственное применение уравнений коллинеарности дает следующее соотношение между координатами ортоснимка и исходного снимка:

$$\begin{aligned} x - x_0 &\approx -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_S) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_S) - c_1 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_S) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_S) - c_3 H_f}, \\ y - y_0 &\approx -f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_S) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_S) - c_2 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_S) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_S) - c_3 H_f}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $(X_S, Y_S)$  - координаты точки фотографирования. Знаки приближенного равенства в (6) указывают на то, что здесь учитываются не все факторы, влияющие на взаимосвязь координат.

На практике при цифровом трансформировании возникает дополнительное условие. Изображение исходного снимка должно быть вписано в границы формируемого ортоснимка.

Для этого необходимо определить координаты  $(X_0^o, Y_0^o)$ , а также длину строки  $l^o$  и высоту столбца  $h^o$  цифрового ортоснимка в пикселях.

Пусть  $(X_i, Y_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  координаты точек местности, изобразившихся в углах исходного снимка. Тогда

$$\begin{aligned} X_0^o &= \min(X_i), \\ Y_0^o &= \min(Y_i), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} l^o &= \frac{\max(X_i) - X_0^o}{k}, \\ h^o &= \frac{\max(Y_i) - Y_0^o}{k}. \end{aligned} \quad (8)$$

Найдем приближенную зависимость между координатами цифрового ортоснимка и координатами цифрового изображения исходного снимка.

Применяя оптимизацию методом сведения двумерной задачи к квазиодномерной, частично избавимся от квадратичной зависимости объема счета от разрешения и получим формулы для одной строки ортоснимка, выполняя все возможные предвычисления в промежутках между процедурами обработки строк.

При движении алгоритма вдоль строки выходного цифрового ортоснимка  $y_o = const$ . Обозначив в (6)

$$A = -kfa_1, \quad B = -f(a_1(X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1H_f),$$

$$C = -kfa_2, \quad D = -f(a_2(X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2H_f),$$

$$E = ka_3, \quad F = a_3(X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3H_f,$$

получим

$$\begin{aligned} x - x_0 &\approx \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F}, \\ y - y_0 &\approx \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (4), получим

$$\begin{aligned} x_d &\approx r_{11} \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F} + r_{12} \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F} + x_d^0, \\ y_d &\approx r_{21} \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F} + r_{22} \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F} + y_d^0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $(x_d, y_d)$  - координаты пикселя цифрового изображения исходного снимка, соответствующего пикселю цифрового ортоснимка  $(x_o, y_o)$ .

Еще раз выполнив замену  $M = Ar_{11} + Cr_{12} + Ex_d^0$ ,  $N = Br_{11} + Dr_{12} + Fx_d^0$ ,  $P = Ar_{21} + Cr_{22} + Ey_d^0$ ,  $Q = Br_{21} + Dr_{22} + Fy_d^0$ , окончательно получим дробно-линейное преобразование:

$$x_d \approx \frac{Mx^o + N}{Ex^o + F}, \quad y_d \approx \frac{Px^o + Q}{Ex^o + F}. \quad (11)$$

В пределах строки адрес пикселя эквивалентен его абсциссе (стр. 8, свойство 1 системы координат цифрового изображения), поэтому соотношение (11) фактически связывает адрес в буфере выходной строки ортоснимка с координатами исходного цифрового изображения. От величины  $y^o$  зависят значения  $N, Q$  и  $F$ . Они вычисляются заново для каждой строки, но это практически не влияет на время счета, т.к. одна строка содержит до  $10^4$  пикселей и более. Такая форма аналитической аппроксимации допускает исключительно эффективную реализацию алгоритма. Преобразование (11) учитывает линейные деформации фотоматериала, смещение оптической оси фотоаппарата, элементы внутреннего, взаимного и абсолютного ориентирования снимка, линейные компоненты искажений сканирующего устройства. Знаменатели дробей равны, поэтому при алгоритмической реализации для вычисления (11) требуется три операции сложения и две операции деления для каждого пикселя формируемого ортоснимка.

В диссертации рассматривается формирование матрицы обобщенных поправок аналитическим методом, хотя на практике следует использовать для этого вычислительную процедуру.

Аналитическая аппроксимация для произвольных координат имеет вид:

$$A(x_o, y_o) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \\ -f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \end{pmatrix} + \mathbf{D}^0. \quad (12)$$



При  $y_o = \text{const}$   $A(x_o, y_o)$  принимает вид (11).

Пусть из ЦМР известна высота рельефа для произвольных координат местности  $Z(X, Y)$ , измеренная от той же отметки, что и высота фотографирования  $H_f$ . Тогда точное преобразование координат при ортотрансформировании имеет следующий вид:

$$\mathbf{T}(x^o, y^o) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \left( -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))} \right. \\ \left. - f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))} \right) + \mathbf{D}^o. \quad (13)$$

Вектор обобщенной поправки для пикселя ортоснимка  $(x_o, y_o)$ :

$$\mathbf{c}(x^o, y^o) = \mathbf{T}(x^o, y^o) - A(x^o, y^o), \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \approx A(x^o, y^o) + \mathbf{c}(x^o, y^o). \quad (15)$$

Таким образом, матрица обобщенных поправок строится в системе координат цифрового ортоснимка и содержит поправки, значения которых вычисляются в системе координат исходного цифрового изображения.

Поскольку поправки  $\mathbf{c}(x^o, y^o)$  относительно невелики, можно получить достаточную точность трансформирования, используя одну и ту же поправку для нескольких пикселей ортоснимка. Если задаться коэффициентом разрежения матрицы поправок  $n$ , то элементы разреженной матрицы

$$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{T}(n(i + \frac{1}{2}), n(j + \frac{1}{2})) - A(n(i + \frac{1}{2}), n(j + \frac{1}{2})), \\ \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \approx A(x^o, y^o) + \mathbf{c}_{ij}. \quad (16)$$

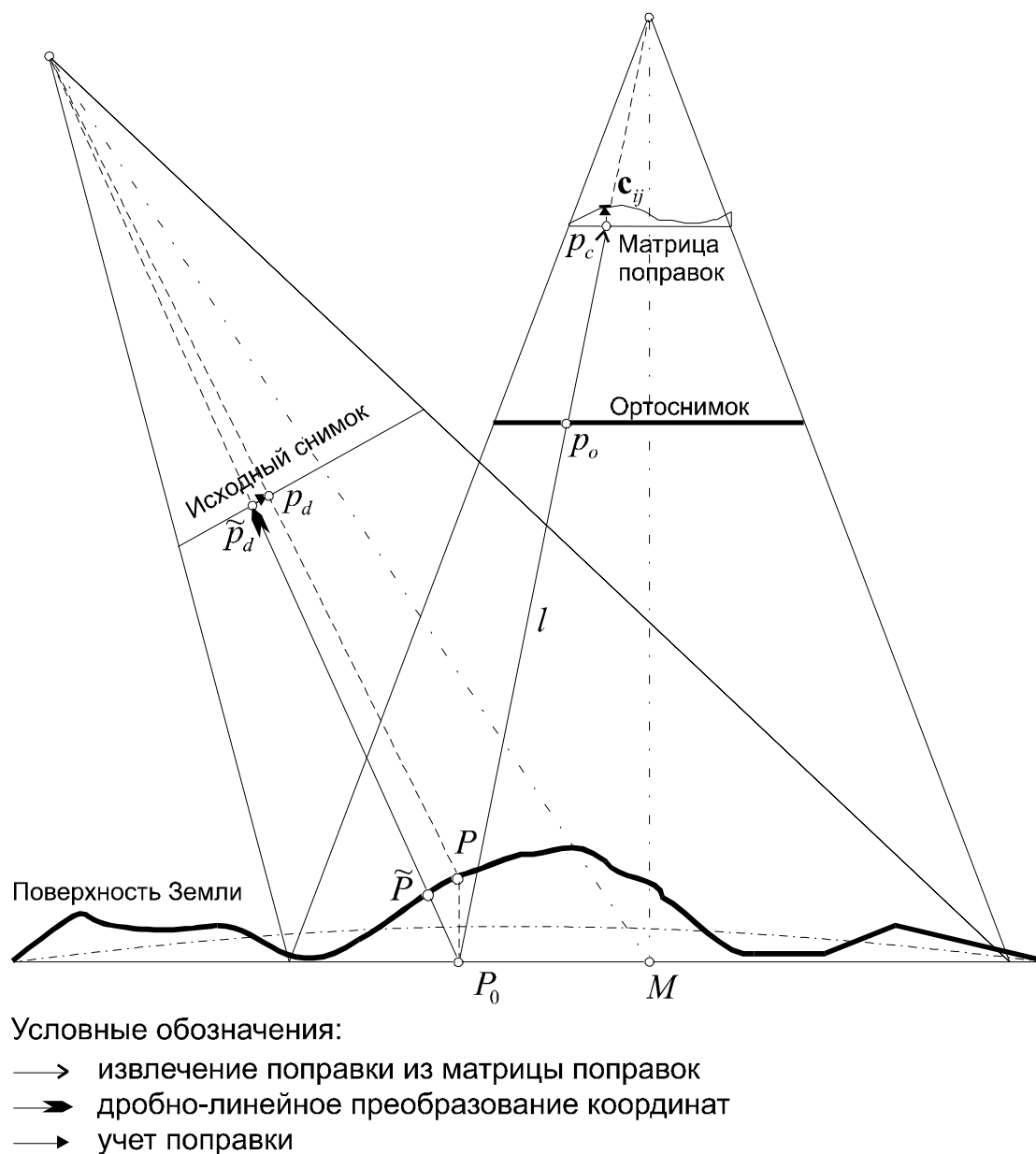


Рис 2. Схема движения данных в процессе ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок.

Преобразование (16) при алгоритмической реализации требует лишь два деления и четыре сложения с плавающей точкой. В то же время оно может использоваться для высокоточного ортотрансформирования цифровых аэрофотоснимков.

Соотношение между точностью и производительностью предложенного метода ортотрансформирования целиком определяется значением коэффициента разрежения  $n$ . При  $n=1$  скорость вычислений соответствует

тривиальному методу обратного ортотрансформирования по точным формулам связи координат. При этом практически весь объем расчетов выполняется при формировании матрицы обобщенных поправок. При  $n > 1$  производительность увеличивается пропорционально  $n^2$ .

При ортотрансформировании аэрофотоснимков предложенным методом рассматриваются только плоские прямоугольные системы координат цифровых изображений исходного снимка и ортоснимка. Поэтому преобразования координат нельзя проиллюстрировать в виде традиционных для фотограмметрии геометрических построений. Вместо этого рассмотрим схему движения данных в процессе получения цифрового ортоснимка (рис. 2).

Системы координат цифрового ортоснимка и матрицы обобщенных поправок отличаются только масштабом, поэтому можно условно считать, что они связаны отношением центральной проекции. Таким же отношением ортоснимок связан с вертикальной проекцией местности на уровневую плоскость.

Поэтому для ортоснимка можно определить условный центр проекции и ввести понятие проектирующего луча  $l$ , проходящего через пиксель ортоснимка  $p_o$ , элемент матрицы поправок  $c_{ij}$ , и проекцию соответствующей точки местности на уровневую плоскость  $P_0$ . Пространственное положение этого луча задается аналитической аппроксимацией  $A$ .

Рассмотрим процесс движения данных при ортотрансформировании для текущего пикселя цифрового ортоснимка  $p_o (x_o, y_o)$ . Этому пикселю необходимо присвоить значение яркости, содержащееся в пикселе  $p_d$  исходного снимка, в котором изобразилась точка местности  $P$ . Если подставить координаты пикселя  $p_o$  в аналитическую аппроксимацию, получим координаты пикселя  $\tilde{p}_d$ , близкого к искомому пикселю  $p_d$ . Вектор поправки  $\overline{\tilde{p}_d p_d}$  можно получить по формуле (14), но это потребует значительного количества вычислений. Так как величина этого вектора мала,

то можно использовать один и тот же вектор поправки  $\mathbf{c}_{ij}$  для нескольких пикселей в окрестностях  $\tilde{p}_d$ , взяв его из заранее рассчитанной разреженной матрицы обобщенных поправок.

Таким образом, в процессе ортотрансформирования оценка  $\tilde{p}_d$  положения искомого пикселя  $p_d$  уточняется по матрице обобщенных поправок:  $\overline{\tilde{p}_d p_d} = \mathbf{c}_{ij}$ . Так как при этом выполняется очень мало вычислений, основные вычислительные затраты приходятся на формирование матрицы поправок. Размер этой матрицы в  $n^2$  раз меньше исходного изображения, поэтому при трансформировании цифровых аэрофотоснимков методом МОП можно получить значительный выигрыш в быстродействии.

Формирование качественной ЦМР для цифрового ортотрансформирования снимков требует большого числа измерений на стереопаре. В связи с этим, в диссертации были рассмотрены различные варианты автоматизации этого процесса и разработаны методики полуавтоматического и автоматического измерения координат соответственных точек. Для повышения надежности подбора соответствующих точек корреляционным методом предложено использовать эквивалентные хроматические координаты, которые определяются в соответствии со стандартами CIE.

Разработанные алгоритмы были реализованы в виде пакета программ OrthoPhoto-SDS, который описан в третьей главе диссертации. OrthoPhoto-SDS позволяет выполнять следующие операции:

- 1) внутреннее ориентирование по измерительным маркам на прикладной рамке АФА;
- 2) полуавтоматический поиск соответственных точек на стереопарах;
- 3) автоматический поиск соответственных точек на стереопарах;
- 4) подпиксельная редакция положения соответственных точек;
- 5) ведение базы данных соответственных и опорных точек;

- 6) взаимное ориентирование снимков стереопары аналитическим методом;
- 7) внешнее ориентирование снимков стереопары аналитическим методом;
- 8) ручное ориентирование снимков с использованием эмуляторов коррекционных механизмов;
- 9) измерение 2D и 3D координат на местности по стереопаре;
- 10) формирование цифровых моделей местности по стереопарам;
- 11) построение цифровых моделей местности по горизонталям в векторном формате;
- 12) быстрое ортотрансформирование цифровых аэрофотоснимков высокого разрешения.

Во время испытаний основные технические характеристики пакета программ измерялись для расчетной платформы.

Основные технические характеристики OrthoPhoto-SDS:

- Расчетная аппаратная платформа - Pentium - 120, RAM 64 Мбайт, SVGA 1024x768 noninterlaced, HDD 1,6 Гбайт EIDE 11 мс. Характеристики программы приводятся для расчетной платформы, если не указана другая конфигурация.
- Минимальная аппаратная платформа - 486DX4 - 100, RAM 16 Мбайт, SVGA 800x600 256 color, HDD 1,2 Гбайт 20 мс.
- Скорость трансформирования цифрового изображения - не менее 18 Мбайт/мин.
- Расчетный объем исходного снимка или суммарный объем стереопары пропорционален квадрату объема ОЗУ компьютера:

Объем ОЗУ	Объем снимка
16 Мбайт	16 МБайт

32 Мбайт	64 Мбайт
48 Мбайт	128 Мбайт
64 Мбайт	256 Мбайт

Максимальный объем исходного снимка 512 Мбайт при снижении скорости трансформирования на 50%.

Максимальное время построения цифровой модели рельефа по 1000 измеренным точкам - 160 сек.

В третьей главе приводятся также результаты тестирования и методика цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков. В процессе испытаний выполнялась обработка как черно-белых, так и цветных аэрофотоснимков. Установлено, что корреляционный алгоритм автоматической идентификации соответствующих точек на цветных снимках работает более устойчиво, чем на черно-белых, за счет использования эквивалентных хроматических координат в качестве информативных характеристик цифровых изображений.

В таблице 1 приводятся условия тестирования пакета программ OrthoPhoto-SDS по цветным аэрофотоснимкам масштаба 1:6000, в таблице 2 - результаты контроля точности ортотрансформирования.

Таблица 1. Условия тестирования пакета программ OrthoPhoto-SDS

АФА	RMK A 15/23
Объектив	PLEOGON A2
Фокусное расстояние, мм	151,153
Дисторсия объектива, мкм	не более 4
Высота фотографирования, м	900
Характер рельефа	побережье
Диапазон превышений на местности, м	0..170
Сканер	UMAX PowerLook 1000
Растр сканирования, мкм	31,75
Информационный объем исходных снимков, Мбайт	50,0
Процессор	Pentium 120

Жесткий диск	Quantum 4500 об/мин
ОЗУ	EDO RAM 32 Мб, 60 нс
Операционная система	Windows 95
Коэффициент разрежения МОП	5
Средний объем МОП, Мбайт	4,80
Время ортотрансформирования одного снимка	2 мин 41 с
Скорость трансформирования, Мбайт/мин	18,6

Оценка точности выполнялась по контрольным точкам, полученным из фототриангуляции. Они были замаркированы на исходных цифровых снимках с помощью растрового редактора. Затем координаты этих точек были измерены по цифровому ортоснимку.

Комплекс программ OrthoPhoto-SDS использовался для выполнения производственных работ по созданию цифрового ортофотоплана и цифровой карты масштаба 1:2000.

Таблица 2. Результаты контроля точности ортотрансформирования

Результаты измерений при помощи OrthoPhoto-SDS						Контрольные координаты		Погрешность измерений		
№ точки	<i>x, мм</i>	<i>y, мм</i>	<i>X, м</i>	<i>Y, м</i>	<i>q, мкм</i>	<i>X, м</i>	<i>Y, м</i>	<i>dX, м</i>	<i>dY, м</i>	<i>dS, м</i>
321	25,932	12,371	66538,325	4999,654	5,0	66538,33	4999,770	-0,011	-0,116	0,116
						6				
322	93,383	32,262	66950,972	5173,830	7,5	66951,04	5174,000	-0,074	-0,170	0,185
						6				
324	78,422	3,341	66857,068	4979,203	2,6	66857,05	4979,181	0,011	0,022	0,025
						7				
326	100,82	21,900	66990,821	5109,475	20,8	66991,31	5109,960	-0,489	-0,485	0,688
	7					0				
327	96,728	12,189	66968,270	5046,309	9,9	66968,39	5046,539	-0,127	-0,230	0,263
						7				
330	102,28	-87,602	66919,509	4534,057	6,4	66919,55	4534,167	-0,045	-0,110	0,119
	7					4				
331	95,791	-93,750	66887,157	4503,999	2,4	66887,17	4503,976	-0,019	0,023	0,030
						6				
332	82,961	-97,605	66833,154	4474,542	6,3	66833,10	4474,448	0,046	0,094	0,104
						8				
333	65,044	-41,966	66766,296	4714,658	11,9	66766,46	4714,912	-0,165	-0,254	0,303
						1				
336	42,842	-73,000	66648,223	4548,508	24,7	66647,59	4547,997	0,633	0,511	0,813
						0				
343	31,252	-90,090	66591,060	4464,310	5,1	66591,08	4464,399	-0,026	-0,089	0,093
						6				
347	-12,380	-80,718	66366,700	4461,837	25,1	66366,01	4461,283	0,683	0,554	0,880
						7				
349	-19,462	-75,145	66325,187	4487,884	4,7	66325,18	4487,783	0,003	0,101	0,101
						4				
352	2,056	-24,831	66417,086	4762,440	28,5	66418,06	4763,114	-0,976	-0,674	1,186
						2				
353	-15,067	-23,628	66315,713	4757,516	21,5	66316,27	4758,029	-0,566	-0,513	0,764
						9				
354	-35,039	-36,653	66208,388	4670,766	8,5	66208,29	4670,571	0,092	0,195	0,216
						6				
357	-14,833	-28,543	66320,524	4730,009	8,2	66320,62	4730,203	-0,101	-0,194	0,218
						5				
358	-1,760	-27,209	66396,260	4746,033	31,4	66397,42	4746,777	-1,168	-0,744	1,385



						8				
360	11,865	-15,042	66468,707	4826,027	18,8	66469,11	4826,467	-0,409	-0,440	0,600
						6				
361	9,713	-14,025	66455,131	4830,723	7,1	66455,05	4830,569	0,074	0,154	0,171
						7				
362	8,820	-15,155	66450,944	4823,335	40,2	66452,85	4824,286	-1,909	-0,951	2,132
						3				
363	8,063	-14,018	66445,119	4829,845	31,0	66446,22	4830,572	-1,106	-0,727	1,324
						5				
364	5,015	-14,888	66428,788	4822,156	8,9	66428,86	4822,359	-0,074	-0,203	0,216
						2				
365	-4,645	-19,260	66374,444	4790,026	32,6	66373,19	4789,246	1,252	0,780	1,475
						2				
366	10,561	7,392	66448,158	4958,796	7,4	66448,23	4958,964	-0,073	-0,168	0,183
						1				
321	59,762	7,372	66738,113	4989,804	2,0	66738,11	4989,785	-0,004	0,019	0,019
						7				
425	88,148	-82,556	66863,843	4541,117	4,8	66863,80	4541,065	0,034	0,052	0,062
						9				
						Среднеквадратичное отклонение $dS, M$ 0,563				

Исходные черно-белые снимки имели масштаб 1:6000, размер картографируемого участка 4,5 км<sup>2</sup>, фокусное расстояние АФА - 140 мм. Координаты опорных точек для построения модели были получены из фототриангуляции. Средняя ошибка положения контуров на ортофотоплане составила  $\pm 0,8$  м в масштабе местности.

### Заключение

Основные научные и практические результаты исследований, выполненных в диссертации, заключаются в следующем:

1. На основе комплексного анализа факторов, влияющих на связь координат исходного цифрового снимка и ортоснимка, разработана математическая модель и алгоритм цифрового ортотранс-формирования, основанные на использовании матрицы обобщенных поправок.

2. Разработана методика идентификации соответствующих точек на цветных цифровых стереопарах для формирования ЦМР в полуавтоматическом и автоматическом режимах.

3. Разработан пакет программ OrthoPhoto-SDS, ориентированный на использование в настольной ГИС и обеспечивающий измерение координат соответствующих точек в полуавтоматическом и автоматическом режимах, формирование модели местности по стереопаре, цифровое ортотрансформирование снимков.

4. Выполнены теоретические и экспериментальные оценки точности и производительности разработанного алгоритма. Точность трансформирования составляет  $\pm 1$  пиксель цифрового изображения. С использованием комплекса программ OrthoPhoto-SDS выполнены производственные работы по созданию цифровой карты земельного кадастра масштаба 1:2000 по аэрофотоснимкам масштаба 1:6000.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. Перспективные инструментальные средства цифровой фотограмметрической системы. В сб. Автоматизированная обработка визуальной информации. Новосибирск, ВЦ СО АН, 1989г, с. 93-101. (соавт. Губин А. В.)
2. Комплекс программ для автоматизированного дешифрирования цифровых аэрокосмических снимков. в сб. Труды конференции молодых ученых, Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1995г, с. 17-26.
3. Интерактивная настройка алгоритмов автоматического выделения контуров в технологии ГИС. Цифровое картографирование, городской кадастр и ГИС: научн.-техн. сб. по геодезии, аэрокосм. съемкам и картографии.—М.: ЦНИИГАИК, 1996г, с. 50-57.
4. Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт. - М.: Геодезия и картография, 1996г. № 12., с. 39-48. (соавт. Гук А. П., Самушкин В. А., Кирзо А. В., Коркин В. С.)
5. Эффективный алгоритм ортотрансформирования цифровых аэрофотоснимков. Вестник СГГА, Новосибирск, 1997, вып. 2, с. 28-37 (соавт. Гук А. П.)
6. Digital Orthophoto Generation in SDS Technology. Workshop ISPRS, Commision V, Workgroup 4, Haifa, 1997, presented paper. (соавт. Гук А. П.)
7. OrthoPhoto-SDS: фотограмметрический модуль настольной ГИС.-М., САПР и графика, N 11, 1997, с. 37-41.
8. Адаптивная информационно-программная среда интерпретатора цифровых карт местности. Препринт ВЦ СО РАН №1006, Новосибирск, 1993.-51 с. (соавт. Анисимов М. М., Губин А. В., Калантаев П. А., Никифоров С. В., Пяткин В. П.)
9. Региональная интегрированная распределенная система обработки аэрокосмической информации. В сб. Математические и технические проблемы обработки визуальной информации, Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1992г., с. 3-16. (соавт. Алексеев А. С., Пяткин В. П.)
10. Siberian Digital Stereoplotter. New Photogrammetric Technologies for 3d Data Capture and up-date for GIS/LIS. Proceedings of the international conference Intercarto-3, Novosibirsk, Russia, 1997, pp. 320-337. (соавт. Гук А. П., Самушкин В. А., Кирзо А. В., Коркин В. С.)