

Сибирская государственная геодезическая академия

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор технических наук  
профессор Гук А. П.

Новосибирск - 1997

## Содержание

Введение .....	3
1 Обзор современного состояния проблемы.....	7
1.2 Применение цифровых методов в фотограмметрии.....	15
1.1 История вопроса .....	7
1.3 Проблемы цифрового ортотрансформи-рования аэрофотоснимков.....	20
2 Теоретические основы современной методики цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков .....	28
2.1 Выбор систем координат и условных обозначений .....	29
2.2 Методы оптимизации вычислительного процесса цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков. ....	34
2.3 Разработка методики формирования матрицы обобщенных поправок.....	42
2.4 Математическая модель цифрового ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок.....	57
2.5 Формирование цифровой модели рельефа.....	68
2.6 Автоматизация фотограмметрических измерений .....	80
3 Результаты экспериментов и программная реализация .....	92
3.1 Результаты вычислительных экспериментов.....	92
3.1.1 Результаты испытаний автомата-коррелятора. ....	92
3.1.2 Результаты испытаний алгоритма ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок.....	100
3.1.3 Результаты тестирования точности ортотрансформирования методом МОП. ....	103
3.2 Пакет программ OrthoPhoto-SDS.....	108
4. Заключение .....	111
Список использованных источников .....	113

## ВВЕДЕНИЕ

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. [1,2,14,21,30,31,32,44,45,3,4,5]. 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. 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 по аэрофотоснимкам масштаба 1:6000.

В первом разделе диссертационной работы приводится краткий исторический обзор развития методов получения ортоскопичных изображений местности, рассмотрены оптикомеханические и современные цифровые приборы для ортотрансформирования аэрофотоснимков. Здесь же дается характеристика проблем, возникающих при реализации технологии цифрового ортотрансформирования.

Во втором разделе рассматриваются факторы, вызывающие искажения на цифровых аэрофотоснимках, обосновывается метод ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок (МОП),

выводятся расчетные формулы для формирования МОП и ее использования для цифрового ортотрансформирования. Здесь же разрабатывается методика автоматизации фотограмметрических измерений для цветных цифровых аэрофотоснимков.

В третьем разделе приводятся результаты вычислительных экспериментов и краткое описание пакета программ OrthoPhoto-SDS, в котором реализованы выполненные в диссертации теоретические разработки.

*Практическая эффективность* предложенных в диссертационной работе технических решений проверена в серии вычислительных экспериментов, а также в процессе выполнения производственных работ по созданию кадастровой карты с. Ярково Новосибирской области.

Результаты, представленные в диссертации опубликованы в [6,7,8,9,10,11,12,24,32], разработанный на основе этих результатов пакет программ OrthoPhoto-SDS экспонировался на 19 конгрессе ISPRS (Вена, 1996 г.) [13] и на международной конференции Интеркарто-3 (Новосибирск, 1997 г.) [24].

## 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ.

### 1.1 История вопроса

Первые попытки исследования закономерностей образования оптических изображений и восприятия их глазом человека были предприняты учеными и художниками задолго до появления фотографии. Еще в 1492 г. великий гений итальянского возрождения Леонардо да Винчи создал чертежи, изображающие принципы оптической проекции. Кроме этого он разработал и построил механизмы для изготовления и полировки линз, а также первым в истории человечества предпринял попытку определить силу света в зависимости от расстояния. Леонардо да Винчи стремился аналитическими методами добиться верности передачи изображения в живописных полотнах. Теоретическим проблемам оптики отдавали должное и другие художники Возрождения. Так исследования Альбрехта Дюрера (1471-1528) в области перспективных искажений изображения привели к созданию в 1525 г. механического мольберта, дававшего художнику возможность контролировать правильность передачи перспективы во время рисования [14]. Около 1600 г. немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571-1630) дает точное определение принципов стереоскопического восприятия сцены, на основе которых флорентийский художник Джакомо Чименти рисует, по-видимому, первую в истории стереопару.

Первая попытка получить топографическую карту путем трансформирования изображений местности была предпринята шведским физиком Ф. Капеллером, который в 1726 г., применив законы стереоскопии, построил карту Люцернского озера на основе рисунков художника, сделанных с окрестных гор.

Фундаментальные принципы, составившие впоследствии основы фотограмметрии, впервые были изложены в 1759 г. в классической работе Генри Ламберта (1728-1777) «The Free Perspective». В этом же году немецкий химик Шульц обнаружил почернение кристаллов нитрата серебра под действием солнечного света. С этого момента выполняются многочисленные исследования способов получения и сохранения фотографических изображений.

С изобретением оптических призм в начале XIX века появляются первые модели стереоскопов. В это время темпы технического прогресса заметно ускоряются, и на протяжении нескольких десятилетий изобретается ахроматический четырехлинзовый объектив, «гелиографический» процесс и, хотя самолет братьев Райт взлетит только в 1903 г., в небо над Европой уже поднимаются воздушные шары. В 1852 г. француз Жиффар оснащает шар паровым двигателем и совершает на нем управляемый полет. В 1829 г. выходит научный труд Г. Шрайбера под названием «Способы и формулы решения аэрофотографических уравнений и определения положения съемочной камеры».

Таким образом, к середине XIX века в западной Европе складываются все условия для возникновения практической аэрофототопографии, и в 1859 г. император Наполеон III отдает приказ выполнить аэрофотосъемку неприятельских позиций перед битвой при Сольферино с воздушного шара.

Не отстает от европейских стран и Россия. 23 мая 1839 г. Ю. Фрицше делает доклад «О гелиографических опытах» на заседании Петербургской Академии наук и демонстрирует собственные фотографии листьев растений, а в 1840 г. московский изобретатель А. Греков уже открывает «художественный кабинет» - первую в России фотостудию. В 1875 г. конструктор Д. Езучевский создает стереофотоаппарат, в 1881 г.



И. Болдырев изобретает прозрачную и эластичную негорючую пленку с сухим желатиновым слоем, в 1883 г. С. Юрковский изобретает «моментальный» затвор для фотообъектива. Наконец, в 1886 г. А. М. Кованько выполняет аэрофотосъемку Кронштадта с воздушного шара аэрофотоаппаратом конструкции В. Н. Срезневского.

С началом Первой мировой войны обновление топографических карт при помощи аэрофотосъемки становится стратегически важной задачей и аэрофототопографические методы получают дальнейшее развитие. При осаде крепости Перемышль в России впервые применяется аэрофотографирование с самолета. К этому времени уже появляются специализированные приборы для измерения по аэрофотоснимкам. Это «Zeiss Parallelogram» Карла Цейса (1901 г.) и «stereoplanigraph» английского инженера Вивиана Томпсона (1908 г.).

По мере увеличения объемов аэрофотосъемочных работ все большее значение приобретает проблема трансформирования изображений в проекцию топографической карты. В 1920-1930 гг. в Канаде выполняются широкомасштабные работы по составлению топографических карт труднопроходимой местности с использованием более чем 100000 аэрофотоснимков. Для трансформирования координат объектов местности используется метод перспективных сеток, рассчитанных с учетом высоты полета и наклона камеры, получивший впоследствии название «Canadian Grid Method».

До появления специального оборудования для трансформирования изображений применялись графические и графоаналитические методы. При этом трансформированию подвергались не сами изображения, а контуры объектов местности, получаемые по ним. Так при составлении схем и планов по горизонтальным снимкам применялись пантографы для приведения изображений к одному масштабу. При помощи построения на

снимке и основе карты проективных сеток можно было учитывать поправки за углы наклона аэрофотоснимков. Влияние рельефа местности учитывалось путем разбиения снимка на зоны, в пределах которых высота считалась условно одинаковой, после чего зоны трансформировались по отдельности. Все эти работы требовали большого количества ручного труда квалифицированных операторов, поэтому для их автоматизации были разработаны специальные приборы, стереоавтограф (1933), топографический стереометр (1938) Ф. В. Дробышева, перспектограф Н. А. Алексапольского [15]. Применив оригинальные решающие механизмы в 1957 г. и принцип преобразования связок проектирующих лучей, Ф. В. Дробышев создает фотограмметрический прибор принципиально нового типа - стереограф СД-1, а затем СД-2 и СД-3. Последняя модель стереографа позволяла с высокой точностью рисовать горизонтالي и контуры объектов в геодезических координатах, наблюдая стереоскопическое изображение местности. Впоследствии появились универсальные стереоприборы, дающие возможность выполнять все технологические процессы создания контуров объектов по аэрофотоснимкам на одном рабочем месте. Такой подход применяется и в современных цифровых фотограмметрических системах, так как объем вычислений, необходимых для трансформирования цифровой карты, значительно меньше, чем для исходного цифрового изображения [16].

Для преобразования изображения местности в масштаб карты были разработаны оптико-механические методы трансформирования аэрофотоснимков. Очевидное решение этой задачи состоит в том, чтобы восстановить взаимное расположение аэрофотоснимка и плоскости нулевой высоты на местности в момент съемки. При этом необходимо одновременно обеспечить резкость выходного изображения (оптическое условие) и точность преобразования координат (геометрическое условие).

Оптическое условие выполняется, если плоскости, в которых расположены аэрофотоснимок, фотоматериал и главная плоскость объектива пересекаются по одной прямой. На этом принципе основано действие фототрансформаторов первого рода. Недостатком трансформаторов, основанных на принципе подобия проектирующих лучей, является необходимость в наборе сменных объективов с фокусными расстояниями, соответствующими фокусным расстояниям используемых АФА.

Для того чтобы выполнять трансформирование различных аэрофотоснимков одним и тем же объективом были разработаны фототрансформаторы второго рода, использующие преобразованные связки проектирующих лучей. Действие этих приборов основано на том, что при перемещении объектива по окружности с центром в главной точке схода лучей можно получать изображения на экране фототрансформатора в заданном масштабе, независимо от фокусного расстояния объектива, использованного при съемке. В общем случае ход лучей при этом не подобен ходу лучей в момент съемки.

Фототрансформаторы выпускались фирмами *Bauch & Lomb*, *Dell*, *K&E*, *Wild*, *Zeiss*, *Leika* и др. и применяются на практике по настоящее время. Современный фототрансформатор представляет собой дорогостоящий оптико-механический прибор, управляемый электроникой. Так фототрансформатор *DELL FOSTER RSS 200* оснащается компьютером *NOVA 1200* и принтером. Элементы ориентирования аэрофотоснимка вводятся в компьютер с консоли или с магнитной ленты. Здесь они пересчитываются в величины смещений объектива, рабочего стола и кассеты прибора. Все механизмы приводятся в движение сервоприводами, также управляемыми компьютером. Этот фототрансформатор позволяет получать отпечатки размером до 107х127 см с оригиналов размером до

24x24 см с коэффициентом трансформирования от 0,5х до 5,1х, с введением децентрации до  $\pm 53$  мм [14].

Подобные приборы до недавнего времени считались весьма совершенными но и они не позволяют получать высокоточные ортоизображения горной или всхолмленной местности, так как в фототрансформаторе можно учесть только общую тенденцию рельефа, но не его детали. Для решения этой проблемы применяется фототрансформирование снимков по зонам, но трудоемкость работ по монтажу выходных изображений ограничивает применение этого подхода.

С 1956 г. отечественными учеными Ф. В. Дробышевым и А. Н. Калантаровым ведутся работы по созданию дифференциальных фототрансформаторов. Эти сложные приборы позволяют в высокой степени автоматизировать процесс получения высокоточных ортофотоснимков с поправками за рельеф. Они представляют собой своеобразную комбинацию универсального стереоприбора и фототрансформатора. Фотопечать выполняется через проектирующую щель, которая перемещается относительно фотоматериала. Во время перемещения щели оператор наблюдает стереоскопическое изображение местности при помощи стереоприбора и проводит его измерительную марку по поверхности рельефа. Проектирующая головка фототрансформатора связана с движениями марки таким образом, что при изменении высоты рельефа вводятся соответствующие изменения в масштаб выходного фотоизображения. После прохода щели через весь снимок он перемещается на длину щели и процесс продолжается до построения всего изображения. Этот метод реализован в отечественном ортофотопроекторе ОФПД, выполненном на базе стереографа СД-3.

За рубежом разработаны и применяются дифференциальные ортофотопроекторы Orthoscan K-320 (Kelsh), Gigas Zeiss Orthoprojector

GZ-1 (Zeiss), T-64 (US Geological Survey), Orthophoto-B (Jena), Orthophoto Simplex (Galileo-Santoni), OR-1 (Wild). Эти приборы являются самыми совершенными оптико-механическими инструментами для получения ортофотоснимков.

Ортофотопроектор Gigas Zeiss предназначен для работы совместно с обычным стереоприбором, например, стереопланиографом Zeiss C-8. Его проектирующая головка может приводиться в движение механическим приводом от стереопланиографа или при помощи сельсина, управляемого электрическим сигналом. Сигнал, соответствующий высоте рельефа местности может формироваться непосредственно стереоприбором или считываться с магнитного носителя информации. Последнее свойство делает возможной автономную работу проектора. Проектирующая щель прибора совершает движение по траектории в виде меандра по неподвижному фотоматериалу. При этом масштаб проекции все время изменяется в соответствии с текущим значением высоты рельефа местности. Имеется автоматика для установки диафрагмы объектива и автоматическая регулировка яркости источника света для сохранения постоянной освещенности фотоматериала при изменении масштаба проекции.

Ортофотопроектор Kelsh K-320 Orthoscan работает на основе весьма оригинального метода получения ортофотоснимка. Проектирующая головка, исходный снимок и фотоматериал во время работы неподвижны, а влияние рельефа учитывается перемещением специальной экспонирующей головки по высоте. Изображение переносится от экспонирующей головки к фотоматериалу при помощи гибкого волоконно-оптического кабеля, имеющего сечение 2х27 мм и длину 910 мм. За один проход по фотоматериалу прибор создает полосу изображения шириной до 24 мм. Проектирующая головка имеет электромеханический затвор,

регулирующий экспозицию во время ее движения. Затвор снабжен набором сменных щелевых диафрагм, определяющих сечение оптического потока во время экспозиции. Диафрагмы могут меняться при помощи специального механизма во время работы прибора в зависимости от крутизны рельефа. Также как и Gigas Zeiss проектор К-320 управляется электрическим сигналом от стереоприбора и может работать в автономном режиме, считывая информацию с магнитной ленты в цифровом виде. Такая информация фактически представляет собой цифровую модель рельефа (ЦМР).

Еще один подход к получению ортоснимков был реализован в приборе Photomapper II фирмы Gestalt. Его нельзя даже назвать ортофотопроектором, так как он объединяет в себе инженерные решения из разных областей техники: аналоговой и цифровой электроники, механики, оптики, телевидения и комплектуется разнообразным программным обеспечением для штатного компьютера Nova 800.

Photomapper II выполнен на базе аналитического стереоплоттера, у которого пишущий узел координатографа заменен электронно-лучевой проектирующей головкой. Для изменения параллаксов применяется автоматическая корреляция исходных изображений. Прибор создает ортофотоизображения путем дифференциального трансформирования. Сканирующие головки выполнены на основе приемных телевизионных трубок и имеют рабочее поле зрения размером 8х9 мм. Проектирующая головка оборудована механизмом смены маски, который может изменять сечение выходного оптического потока в зависимости от характера рельефа. В состав прибора входят управляющий компьютер с периферийными устройствами, два сканера, алфавитно-цифровой терминал, телевизионный монитор высокого разрешения, коррелятор и выходной фотопостроитель.

К управляющему компьютеру Nova 800 с 64 КБайт оперативной памяти подключается дисплей, два 9-дорожечных накопителя на магнитной ленте и принтер. Изображения правого и левого снимков преобразуются сканерами в аналоговые электрические сигналы. Электронная система управления сканирующей головкой и обработки видеосигналов позволяет линейно масштабировать и разворачивать их. Сканированные изображения выдаются для контроля на телевизионный монитор. Коррелятор способен измерять параллаксы на снимках, анализируя видеосигналы правого и левого изображений. Значения параллаксов используются для построения ЦМР, коррекции движения сканирующих и проектирующих головок. Проектирующие головки способны не только выполнять печать ортофотоизображения, но и печатать на выходном ортоснимке алфавитно-цифровую информацию и горизонтالي. ЦМР, рассчитанная на этом приборе записывается в цифровом виде на магнитную ленту.

Таким образом, Gestalt Photomapper II представляет собой гибридный аналого-цифровой прибор. Его можно рассматривать как переходную разработку, завершающую период применения оптико-механических методов для ортотрансформирования аэрофотоснимков.

## 1.2 Применение цифровых методов в фотограмметрии

Цифровые методы обработки изображений привлекали внимание разработчиков фотограмметрических приборов со времени появления первых ЭВМ. Невысокая производительность таких машин позволяла в лучшем случае решать уравнения проективной геометрии численными методами, рассчитывать макетные аэрофотоснимки и проверять новые

аналитические методы [17]. Тем не менее, уже в 1957 г. У. В. Хелава предлагает концепцию аналитического стереоплоттера, а в 1964 г. даже получает патент Соединенных Штатов Америки на изобретение этого прибора [18]. Основной принцип концепции состоит в том, чтобы заменить механическое моделирование проекции стереопары математическим моделированием. В то время Хелава еще не предлагает использовать цифровые изображения. Но замена прецизионных механизмов математическими моделями обещает существенно сократить стоимость и габариты оборудования, повысить точность и производительность фотограмметрических работ.

Идея Хелавы была весьма сдержанно воспринята фотограмметрическим сообществом, поскольку компьютеры были еще очень дороги и ненадежны. Первый аналитический стереоприбор AP-1 был изготовлен только в 1961 г. по заказу Римского центра авиационных исследований (RADC) итальянской фирмой Ottico Meccanica Italiana (OMI). Успешные испытания прибора закончились заказом еще двух аппаратов AP-2 с расширенными возможностями. На этих стереоплоттерах можно было выполнять фотограмметрическую обработку панорамных снимков и специальных снимков, с нестандартной геометрией проектирующих лучей.

Результаты работ были представлены на второй международной фотограмметрической конференции в Оттаве в 1963 г., где они получили всеобщее признание. С этого времени все ведущие фирмы начинают исследования в области цифровых методов фотограмметрии. Новые модели аналитических стереоприборов появляются почти ежегодно: AP-C (OMI, 1964) - модификация AP-2 для гражданских применений, AS11A (OMI, 1965) - усовершенствованный вариант AP-2, UNAMACE (1968, Bunker-Ramo Corporation) - первый стереоприбор с электронным коррелятором. На конгресс ISP в Хельсинки в 1976 г. было представлено 8



новых моделей аналитических стереоплоттеров, из которых четыре в виде готовых к использованию на производстве образцов. В качестве управляющих ЭВМ в них использовались, в основном, компьютеры фирмы DEC от PDP-11/03 до PDP-11/45.

Приблизительно в этот же период времени были разработаны отечественные аналоги зарубежных систем на базе ЭВМ СМ-4, а затем СМ-1420, в основном для применения в военных целях. Поэтому их результаты были опубликованы намного позже, чем образцы поступили на вооружение. Автору посчастливилось участвовать в этих разработках в качестве программиста-математика [19,16,20].

ЭВМ того времени были способны выполнять все фотограмметрические расчеты, управлять механизмами стереоплоттера и даже выполнять поиск соответствующих точек стереопары путем вычисления корреляции между оцифрованными участками изображений и хранить в памяти цифровую модель рельефа. Но они еще не были способны обрабатывать с нужной точностью цифровое изображение целого аэрофотоснимка.

В 1979 г. появляется работа К. Терренса и Д. Бостона по практическому ортотрансформированию цифровых аэрофотоснимков [21]. Метод обработки исходных аэрофотоснимков заключался в том, что они вначале полностью вводились в ЭВМ при помощи микроденситометра, а затем обрабатывались полностью аналитическим путем. Результаты обработки выводились на фотопостроитель. Такой подход получил название метод прямого сканирования (Direct Digitization).

Принципиальные преимущества этого метода очевидны. После ввода в ЭВМ снимки не подвергаются никаким внешним воздействиям, они не деформируются вследствие изменений температуры и влажности. Алгоритмы их обработки дают одинаковые результаты независимо от

времени и условий их применения, в отличие от оптико-механических приборов, требующих периодической юстировки и особого микроклимата в производственных помещениях. Математические модели позволяют описывать тонкие явления, не подлежащие моделированию механическим путем. Среди них обычно выделяют кривизну поверхности Земли, атмосферную рефракцию и дисторсию объектива АФА. Методом прямого сканирования можно обрабатывать снимки, полученные из различных источников: искусственных спутников Земли, специализированных фотокамер, бортовых сканеров, радаров и т. п. Для обработки таких снимков нецифровыми методами каждый раз пришлось бы конструировать новый прибор. Выходные данные цифровой фотограмметрической системы могут использоваться непосредственно в геоинформационных системах в цифровом виде, без получения твердых копий. Они могут передаваться по сетям передачи данных, что обеспечивает оперативное получение информации дистанционного зондирования. Последнее свойство чрезвычайно важно для решения некоторых задач ГИС - мониторинга окружающей среды, борьбы с лесными пожарами и последствиями катастроф.

В настоящее время цифровые стереоприборы на базе рабочих станций Sun Sparkstation и Silicon Graphics являются наиболее совершенными фотограмметрическими системами в мире и широко применяются на практике. В состав таких систем входят модули цифрового ортотрансформирования аэрокосмических изображений. Лидирующей на рынке ГИС фирмой Intergraph разработан пакет ISIR (MGE/Image Station Image Rectifier) для рабочих станций Intergraph 2000, 3000 и 6000 [22]. Среди новейших разработок можно отметить созданный в Техническом университете геодезии и картографии г. Вухань (КНР) пакет программ VirtuoZo [23]. Этот пакет предназначен для обработки полноцветных (24

бит/пиксел) цифровых изображений, введенных с растром от 7 до 100 мкм. Функциональные возможности VirtuoZo разнообразны: кроме традиционных функций ортотрансформирования и формирования ЦМР возможна обработка неметрических снимков, трехмерное моделирование, реконструкция фасадов архитектурных сооружений. Аппаратная платформа - SGI, Indy, Indigo, Onix с 64-96 Мбайт ОЗУ. Пакет работает с беспроводными обтюраторными стереоочками Qualix Crystall Eyes.

Сравнительно высокая стоимость рабочих станций делает их недоступными для широкого круга пользователей настольных геоинформационных систем. Так, представленная на конференции Интеркарто-3 ЦФС фирмы Leica AG предлагалась к продаже по цене 170 тыс. долларов США [24]. Для сравнения, стоимость программного обеспечения распространенной настольной ГИС WinGIS составляет всего 700 долларов США. Тем не менее, пакет WinGIS позволяет решать широкий круг задач обработки пространственной информации, включая возможности multimedia и оптимизации маршрутов.

Диспаритет в стоимости цифровых фотограмметрических систем и ГИС широкого применения обуславливает актуальность разработки настольных фотограмметрических технологий. В качестве примера ЦФС в стиле desktop можно привести PC версию стереоплоттера DVP (1993 г.) [25]. Рекомендованная платформа для системы DVP это IBM-PC AT 486, с жестким диском более 200 Мб и оперативной памятью более 8 Мбайт, работающий под управлением MS-DOS 5.0 и выше. Опыт применения DVP в Сибирской государственной геодезической академии показал, что хотя система формально обеспечивает полный набор функций для фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, крайне ограниченные возможности рекомендованной платформы делают систему мало пригодной для практической работы с производственными материалами.

Использование современного компьютера класса Pentium под управлением Windows - 95 открывает новые возможности для разработки цифровой фотограмметрической технологии в стиле desktop.

### 1.3 Проблемы цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков

Основным препятствием для применения метода прямого сканирования в фотограмметрии до недавнего времени был огромный объем информации, заключенной в аэрофотоснимке, особенно в цветном. Еще в 1973 г. К. В. Вендровским был предложен метод количественного определения информационной емкости фотоизображения [26,27]. Количество информации, приходящейся на единицу площади в битах на  $\text{см}^2$ , определяется формулой:

$$Q = n \log_2 q, \quad (1.1)$$

где  $n$  - число различных элементарных участков на единице площади,  $q$  - число различных градаций яркости. Для величины  $n$  предлагается полуэмпирическая формула  $n = 4N^2$ , где  $N$  - пространственная граничная частота передачи модуляции, соответствующая выбранному коэффициенту контраста. Для черно-белых аэрофотопленок отечественного производства определены следующие показатели информационной емкости [28]:

Таблица 1.1 Информационная емкость аэрофотоплёнок

Показатели информационной емкости аэрофотоплёнок	Тип аэрофотоплёнки				
	тип 18	тип 17	тип 20	тип 15	тип 13
Плотность информации при коэффициенте контрастности 0,2 Q, Мбайт/см <sup>2</sup>	5,9	1,5	2,1	0,5	0,15
Информационная емкость аэрофотоснимка размером 180x180 мм, Мбайт	1900	486	680	162	49
Разрешающая способность эмульсионного слоя, линий/мм	250	120	140	85	70

Из приведенных данных следует, что при цифровой фотограмметрической обработке методом прямого сканирования аэрофотоснимки должны быть представлены в виде массивов данных объемом до 2 Гбайт. Впрочем, максимальная информационная емкость фотографического слоя используется далеко не всегда, так как распространенные объективы АФА имеют более низкую разрешающую способность, чем лучшие образцы аэрофотоплёнки. Общая разрешающая способность системы АФА-фотоматериал подчиняется соотношению:

$$\frac{1}{R_{sys}} = \frac{1}{R_{lens}} + \frac{1}{R_{film}}, \quad (1.3)$$

где  $R_{sys}$  - разрешение системы,  $R_{lens}$  - разрешение объектива,  $R_{film}$  - разрешение фотоматериала в линиях на единицу длины [29].

В таблице 1.2 приведены результаты расчета информационных показателей разрешающей способности некоторых АФА.

Таблица 1.2 Информационные показатели разрешающей способности АФА

Наименование показателя	Тип АФА				
	АФА-ТЭ	MSK-4	АФА-41	MRB	LMK
Разрешающая способность объектива в центре, лин/мм	30	150	40	80	250
Разрешающая способность объектива на краю, лин/мм	15	-	10	20	65
Размер кадра, см	18x18	5.5x8.1	18x18	23x23	23x23
Ориентировочная информационная емкость изображения без учета влияния фотоматериала, Мбайт	29	100	52	340	836 <sup>1)</sup>
<sup>1)</sup> Значение рассчитано, исходя из средней по полю кадра разрешающей способности					

Ориентировочный расчет выполнен на основе того же подхода, что и для фотоматериалов, при этом в качестве исходного показателя использовалось разрешение объектива в центре кадра, заявленное изготовителем, а количество градаций принималось равным 256.

На практике получить предельную разрешающую способность АФА, как правило, не удастся из-за рассеяния света в атмосфере, смазывания изображения вследствие движения самолета и ряда других причин.

Отечественная нормативная документация на проведение фотограмметрических измерений устанавливает допуски на средние квадратические отклонения при 10 контрольных точках  $\leq 0,01$  мм. Для достижения такой точности измерений при обработке аэрофотоснимков необходимо, чтобы апертура сканирования была как минимум вдвое меньше. При формате снимков 180x180 мм сканирование с такой апертурой порождает массив данных объемом 1300 Мбайт.

Таким образом, современная методика ортотрансформирования аэрофотоснимков должна предусматривать работу с цифровыми изображениями объемом до 1,0..1,5 Гбайт. Работа с данными такого объема требует специальных системотехнических решений, которые будут рассмотрены в разделе 3.

Использование цифровых изображений высокого разрешения порождает проблему обеспечения быстродействия алгоритма ортотрансформирования. Непосредственное применение аналитических моделей искажений исходного снимка приводит к неприемлемо низкой скорости ортотрансформирования из-за большого количества операций с плавающей точкой. Некоторые модели искажений задаются в пространственных системах координат, поэтому необходимы преобразования из плоских систем координат цифровых изображений в пространственные фотограмметрические системы координат.

Известен ряд методов оптимизации процесса ортотрансформирования по быстродействию [21,30,31,32,33,34]. Наибольшее распространение получили подходы, основанные на сокращении вычислений за счет совмещения математических моделей искажений в одной модели и упрощении расчетных формул для одной строки цифрового ортоснимка. В последнем случае для сокращения вычислений используется тот факт, что при движении вдоль строки или столбца выходного ортоснимка изменяется только одна из координат. Таким образом, появляется возможность вычислить часть переменных между обработкой отдельных строк, а во время обработки строки использовать их как константы.

Другая группа методов оптимизации основана на идее обработки цифрового изображения по частям или по зонам. Такой подход позволяет обрабатывать массивы данных значительного размера в условиях дефицита

вычислительных ресурсов. В пределах каждой зоны можно применять для трансформирования упрощенные преобразования координат. Исследования в этой области выполнялись А. Е. Малыхиным в 1981-1988 г. [3,4,5]. Им предложена методика цифрового ортотрансформирования снимков, основанная на трехуровневой дифференциации<sup>1</sup> изображений и сокращения вычислений за счет применения билинейной интерполяции.

Применение таких методов приводит к значительному ускорению цифрового ортотрансформирования. Дальнейшее увеличение производительности процесса возможно при *комплексном* подходе к решению проблемы быстрогодействия. Такой подход подразумевает *сквозную оптимизацию и автоматизацию* всех технологических операций процесса ортотрансформирования - фотограмметрических измерений, взаимного и абсолютного ориентирования, построения цифровой модели рельефа по стереопаре и собственно трансформирования аэрофотоснимка по этой модели. При этом значительное увеличение эффективности достигается за счет формирования цифровой модели рельефа в «удобном» для вычислений при трансформировании виде. Комплексный подход к решению проблемы быстрогодействия при цифровом ортотрансформировании аэрофотоснимков разрабатывается во втором разделе настоящей диссертации.

С проблемой быстрогодействия тесно связана проблема обеспечения точности ортотрансформирования. 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.

---

<sup>1</sup> Термин «трехуровневая дифференциация» предложен А. Е. Малыхиным.



Для плановых снимков наибольшие значения поправок получаются при учете рельефа местности. Поэтому для решения проблемы точности трансформирования большое значение имеет качество цифровой модели рельефа. При построении 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.

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.

Этому вопросу посвящены обширные исследования. В первых моделях аналитических стереоплоттеров для автоматизации измерений применялись аналоговые корреляторы. Впоследствии были разработаны различные методы отождествления соответственных точек на цифровых изображениях [35,36,37,38,39]. Среди них можно отметить методы, основанные на вычислении взаимной корреляции цифровых изображений, спектральном анализе, выделении границ, углов и других особенностей изображений. Стереопары, составленные из производственных аэрофотоснимков обладают рядом свойств, позволяющих эффективно применять в качестве критерия поиска соответственных точек взаимную корреляцию цифровых изображений для большинства реальных объектов

местности. К таким свойствам относятся примерное равенство масштабов снимков и малые углы их относительного наклона и разворота. При этом одной из основных проблем является машинная интерпретация цвета при обработке современных цветных аэрофотоснимков.

Проблема машинного восприятия цвета возникает вследствие того, что человеческий глаз и сканирующее устройство имеют различные характеристики чувствительности в диапазоне видимого спектра. При сканировании для каждого пиксела цифрового изображения формируются три значения, соответствующие интенсивностям красного, синего и зеленого цветов. Такое кодирование цвета получило название RGB. Иногда применяются и другие кодировки, например CMY (cyan, magenta, yellow), HSV (hue, saturation, value) и др. В любом случае нельзя ожидать, что кривые спектральной чувствительности датчиков сканера и слоев фотоматериала в точности совпадут с соответствующими кривыми чувствительности глаза человека.

Такое несоответствие приводит к тому, что во многих случаях те участки изображения, которые кажутся визуально различными, оказываются почти одинаковыми с точки зрения взаимной корреляции цифровых изображений и наоборот, для одинаковых на глаз участков алгоритм обнаруживает существенные различия, так как производители фотоматериалов стремятся обеспечить именно визуальное качество фотографических изображений.

Эта проблема исследуется со времен появления цветного телевидения. Основная трудность в ее решении заключается в стандартизации усредненной трехстимульной функции чувствительности человеческого глаза, что связано с проведением дорогостоящих экспериментов. До недавнего времени такие исследования выполнялись в инициативном порядке крупными зарубежными фирмами Kodak, Fuji и др.

В результате разрабатывались внутренние фирменные стандарты и оборудование различных производителей давало разные результаты при обработке цветных изображений. В последнее время международной комиссией по свету CIE утверждена серия стандартов на обработку цветных изображений, в соответствии с которыми разрабатывается новое оборудование.

Применение стандартов CIE в алгоритмах автоматического поиска соответственных точек позволило увеличить надежность и производительность фотограмметрических измерений по цветным изображениям в разработанном комплексе программ.

Увеличению производительности технологии в целом способствуют также продуманный дизайн пользовательского интерфейса, развитые средства хранения и визуализации сертификатов снимков и моделей рельефа, удобный механизм управления базой данных опорных точек.

Таким образом, для разработки технологически эффективной методики ортотрансформирования современных цветных высококачественных аэрофотоснимков необходимо комплексное решение проблем точности, быстродействия, обработки больших массивов данных и автоматизации фотограмметрических измерений.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДИКИ ЦИФРОВОГО ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ АЭРОФОТОСНИМКОВ

На основе материала первой главы можно сформулировать набор основных требований к современной методике цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков:

1. Точность ортотрансформирования. Для того чтобы удовлетворить требованиям точности, необходимо включить в методику трансформирования математические модели источников искажений и обеспечить возможность трансформирования изображений высокого разрешения. Требование точности предъявляется также к построению цифровой модели рельефа.

2. Производительность системы. Это требование противоречит требованию точности, так как чем полнее математическая модель поправок, тем больше требуется вычислений и ниже производительность системы. Необходимо найти компромисс между этими двумя требованиями из условия точности, удовлетворяющей технологическим требованиям, при максимально возможной производительности. Так как технологические требования могут быть различными, необходимо предусмотреть возможность оперативно регулировать соотношение между точностью и производительностью. Производительность системы определяется не только скоростью самого трансформирования, но и временем, необходимым для фотограмметрических измерений и подготовительных работ. Его можно существенно сократить за счет автоматизации измерений и продуманного дизайна пользовательского интерфейса системы.

3. Возможность обработки современных производственных материалов. Прежде всего, необходимо предусмотреть возможность обработки цветных и зональных аэрофотоснимков. При этом необходимо ориентироваться на

отечественные АФА с размером кадра 180x180 мм и 300x300 мм, и на зарубежные, с размером кадра от 60x60 до 250x250 мм, с различным количеством калибровочных меток на прикладной рамке.

Рассмотрим теоретические основы методики ортотрансформирования цифровых аэрофотоснимков, удовлетворяющей перечисленным требованиям.

## 2.1 Выбор систем координат и условных обозначений

В отечественной и зарубежной литературе встречаются различные условные обозначения величин, используемых в фотограмметрии. Применение фотограмметрических методов к цифровым изображениям приводит к необходимости введения дополнительных систем координат. Для большей ясности изложения материала введем единые для всей диссертации обозначения переменных и систем координат, взяв за основу классическую монографию А. Н. Лобанова [5].

*Геодезической* системой координат называется система координат Гаусса, связанная с местностью. Будем обозначать ее  $O_{\Gamma} X_{\Gamma} Y_{\Gamma} Z_{\Gamma}$  (рис. 2.1) или сокращенно  $S_{\Gamma}$ . Ее начало координат находится на пересечении среднего меридиана соответствующей зоны с экватором, ось  $X_{\Gamma}$  направлена на север, а ось  $Y_{\Gamma}$  - на восток.

*Фотограмметрическая* система координат является правой системой Гаусса и вводится так, чтобы рассматриваемые математические зависимости имели удобный для вычислений вид. Будем обозначать ее  $OXYZ$  или  $S$ . Если фотограмметрическая система координат связана с центром проекции правого или левого снимков, то она обозначается  $S'$  или

$S^l$ . Для краткости будем называть такие системы системой правого снимка, системой левого снимка или просто системой снимка.

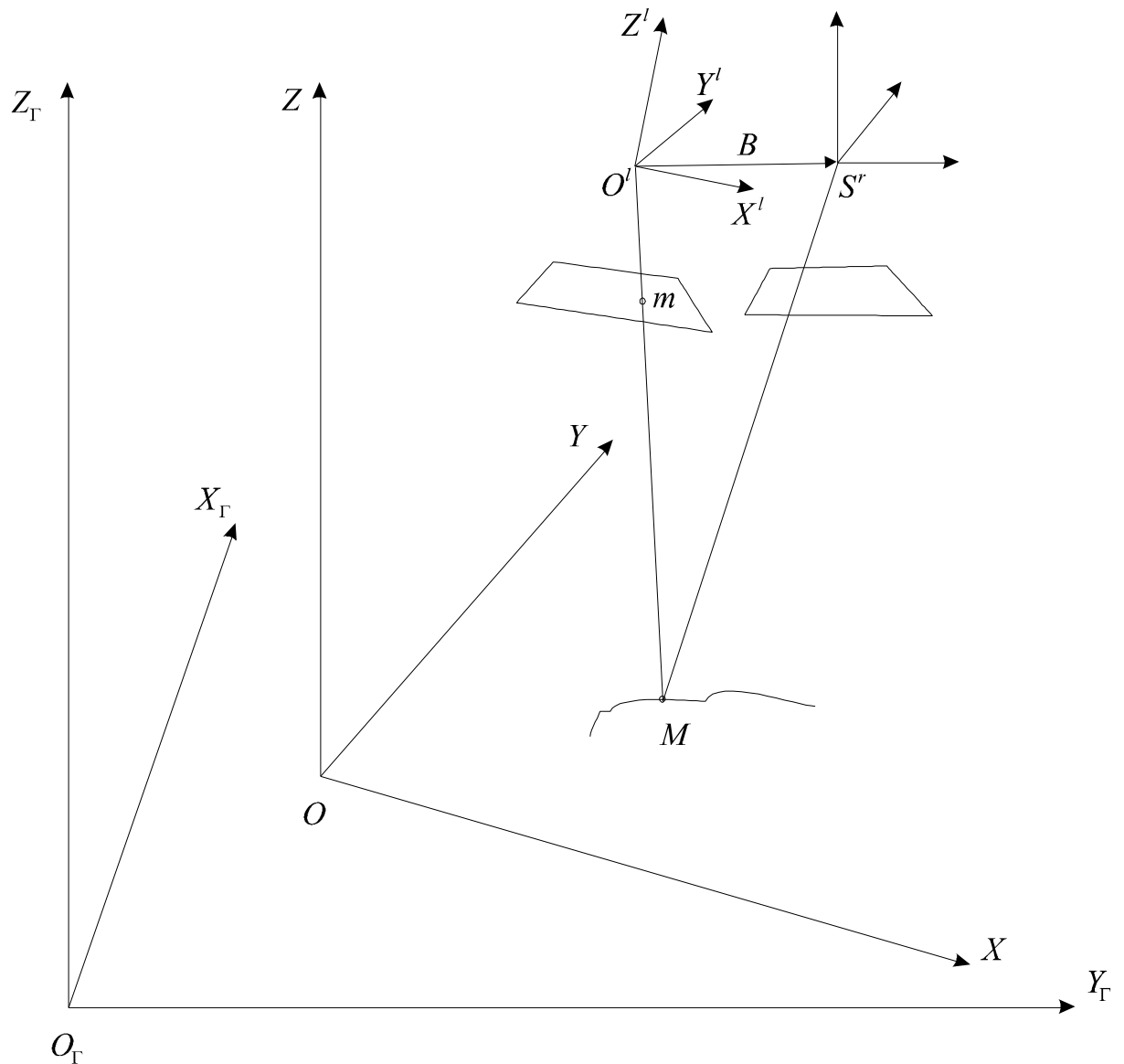


Рис 2.1. Условные обозначения пространственных систем координат, принятые в диссертации.

Отношение различных переменных к системам правого или левого снимков также будем обозначать верхними индексами «r» или «l». Если начало координат фотограмметрической системы связано с какой-либо точкой на местности, будем называть такую систему системой координат местности.

Точки местности, координаты которых задаются в масштабе объектного пространства в фотограмметрической или геодезической системах координат будем обозначать большими латинскими буквами, например,  $M, A$ . Соответствующие им точки на снимке обозначим малыми латинскими буквами, например  $m, a$ .

Для описания вращений в Евклидовом пространстве будем применять принятый в фотограмметрии набор направляющих косинусов:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_\alpha \mathbf{A}_\omega \mathbf{A}_\kappa = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix},$$

$$a_1 = \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa, \quad a_2 = -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa,$$

$$a_3 = -\sin \alpha \cos \omega, \quad b_1 = \cos \omega \sin \kappa, \quad b_2 = \cos \omega \cos \kappa,$$

$$b_3 = -\sin \omega, \quad c_1 = \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa,$$

$$c_2 = -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa, \quad c_3 = \cos \alpha \cos \omega. \quad (2.1.1)$$

Обозначения углов наклона и разворота снимка вводятся также, как в [5] и приводятся в таблице 2.1.

Наряду с пространственными системами координат в диссертации рассматриваются плоские системы, в которых определяется положение изображений объектов местности на снимке.

Системой координат *изображения*  $oxy$  или  $S_i$  будем называть прямоугольную систему координат, начало которой расположено в главной точке снимка (рис 2.2). Определение направлений осей этой системы выполняется на основе анализа положения изображений координатных меток прикладной рамки аэрофотоаппарата и представляет собой одну из задач, решаемых в процессе внутреннего ориентирования снимка. В зависимости от количества координатных меток возможны различные варианты задания системы координат  $S_i$ , но в любом случае её ось абсцисс

будем считать направленной от метки 1 к метке 2 и приблизительно параллельной прямой, соединяющей эти метки.

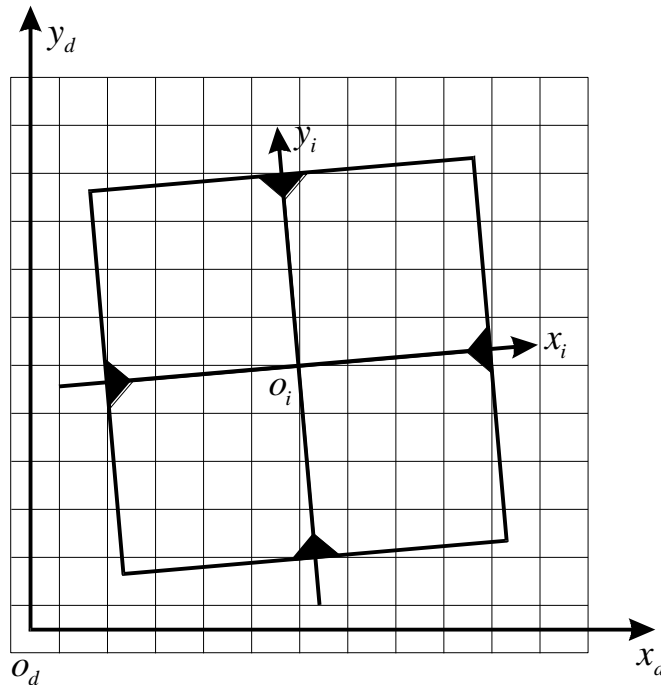


Рис 2.2 Системы координат изображения -  $O_i x_i y_i$   
и цифрового изображения -  $O_d x_d y_d$ .

При фотограмметрической обработке методом прямого сканирования непосредственные измерения по аэрофотоснимку выполнить невозможно. Вместо этого используется цифровое изображение снимка. Выходной ортоснимок также получается в виде цифрового изображения. Все алгоритмы машинной обработки этих изображений оперируют координатами пикселей, определенных в системе, которую мы назовем системой координат *цифрового изображения*  $O_d x_d y_d$  или  $S_d$ . Начало этой прямоугольной положительно определенной системы координат соответствует центру пиксела изображения, который мы условимся считать «левым» и «нижним». Последние два понятия определяются при разработке программ так, чтобы при выводе цифрового изображения на



экран или принтер ось  $x$  системы  $S_i$ , соответствующей данной системе  $S_d$  была направлена вправо, а ось  $y$  - вверх.

Такое детальное определение системы координат цифрового изображения необходимо потому, что в некоторых случаях для него возможно измерение координат с точностью, превышающей апертуру сканирования, так называемой подпиксельной точностью<sup>2</sup>. Кроме этого, разрабатывая быстрый алгоритм ортотрансформирования, мы получим зависимость между координатами ортоснимка и исходного снимка, определенную в системах цифровых изображений.

Отметим два важнейших свойства системы координат  $S_d$ .

1. Существует взаимно-однозначное соответствие между округленными до целых чисел координатами в системе  $S_d$  и адресом в оперативной памяти компьютера. Это соответствие задается также 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 пиксел изображения,  $l$  - количество пиксел 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. Хотя системы  $S_d$  и  $S_i$  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

---

<sup>2</sup> Измерения с такой точностью реализованы, например, в подпиксельном редакторе пакета программ OrthoPhoto-SDS (см. гл. 3).

превращается во второе в процессе химико-фотографической обработки, хранения и сканирования, испытывая при этом деформации, в общем случае, нелинейные. После сканирования снимок уже не подвергается никаким дальнейшим изменениям. В этом одно из важнейших преимуществ фотограмметрических методов прямого сканирования.

Наиболее часто встречающиеся в диссертации условные обозначения прочих величин сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 Условные обозначения, принятые в диссертации

Обозначение	Обозначаемая величина
$\alpha$	Продольный угол наклона снимка, заключенный между осью $Z$ системы снимка и проекцией главного луча на плоскость $XZ$
$\omega$	Поперечный угол наклона снимка, между главным лучом и плоскостью $XZ$
$\kappa$	Угол поворота снимка, находящийся в его плоскости, заключенный между осью $y_i$ системы координат изображения и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось $Y$ системы снимка на плоскости $x_i y_i$
$f$	Эквивалентное фокусное расстояние объектива АФА
$H_f$	Высота фотографирования, измеренная в системе координат местности
$X_s, Y_s$	Координаты точки фотографирования в системе координат местности. Считается, что величины $H_f, X_s, Y_s$ и величины превышений на местности измеряются в одной и той же системе координат, если не оговорено иное
$B, B_X, B_Y, B_Z$	Базис фотографирования и его проекции на оси фотограмметрической системы координат
$q, Q$	Остаточные параллаксы в масштабе снимка и в масштабе объектового пространства, соответственно.

## 2.2 Методы оптимизации вычислительного процесса цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков.

Вычислительный процесс обратного ортотрансформирования цифрового изображения сводится к определению координат  $(x_d, y_d)$  исходного цифрового изображения, соответствующих координатам  $(x_o, y_o)$  текущего пиксела выходного ортоснимка, и переносу значений яркости или цвета в точке  $(x_d, y_d)$  в точку  $(x_o, y_o)$ . Обе системы определены как системы координат *цифрового изображения*. Пусть связь между координатами ортоснимка и исходного снимка определяется влиянием  $n$  факторов, среди которых обычно выделяют элементы ориентирования, рельеф местности, дисторсию объектива, атмосферную рефракцию и т. д. Если известны математические модели влияния этих факторов, то можно записать оператор ортотрансформирования в виде  $\mathbf{T} = \mathbf{F}_1 \mathbf{F}_2 \dots \mathbf{F}_n$ , где  $\mathbf{F}_i$  - оператор поправки за влияние  $i$  фактора, при этом

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix}. \quad (2.1.1)$$

Поставим задачу сквозной оптимизации обратного цифрового ортотрансформирования как отыскание приближения  $\tilde{\mathbf{T}}$  оператора  $\mathbf{T}$ , удовлетворяющего условию минимального количества алгебраических операций при достаточной точности.

Так как цифровые изображения не являются аналитическими функциями, определим понятие достаточной точности цифрового трансформирования. Будем считать, что значения яркости или цвета определены для центров пикселей цифрового изображения. В других точках эти значения можно определить путем интерполяции, которая позволяет несколько улучшить качество выходного ортоснимка, но требует дополнительных вычислений. В дальнейшем мы покажем, что разработанная методика сквозной оптимизации цифрового ортотрансформирования дает настолько эффективный алгоритм, что применение интерполяции снизит производительность программы в

несколько раз. Поэтому при постановке задачи оптимизации ограничимся решением проблемы определения округленных до целых чисел координат  $x_d, y_d$ . Соответственно, не будем требовать непрерывности для оператора трансформирования  $\tilde{T}$ . Вполне достаточно, если  $\tilde{T}(x, y)$  будет определен для  $x, y \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ . Это важное допущение позволит нам быстро выполнять вычисления, используя задание функций в табличной форме.

При округлении координат неизбежно возникает ошибка величиной до  $\pm \frac{1}{2}$  пиксела. Поэтому, если алгоритм не вносит собственных ошибок, т.е. является точным, то цифровой ортоснимок, полученный трансформированием без интерполяции получается с «естественными» ошибками указанной величины.

Будем считать *достаточно точным* алгоритм трансформирования, собственные ошибки которого не превышают «естественной» ошибки. При этом суммарная ошибка выходного ортоснимка не превышает  $\pm 1$  пиксел.

Для решения задачи сквозной оптимизации процесса цифрового ортотрансформирования будем применять следующие 3 подхода.

1. *Сведение двумерной задачи к квазиодномерной задаче.* Этот способ широко применяется для оптимизации многих алгоритмов обработки изображений. Так как выходной массив данных обычно формируется построчно, в процессе обработки одной строки можно вместо оператора  $T(x, y)$  использовать его сокращенный вариант для  $y = \text{const}$   $T_x(x)$ , выполняя предвычисления величин, зависящих от  $y$  перед обработкой каждой строки. Пусть обрабатывается изображение размером  $p \times r$  пиксел, оператор  $T(x, y)$  содержит  $n$  операций, оператор  $T_x(x)$  -  $m < n$  операций, а для формирования оператора  $T_x = T_{y=\text{const}}$  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  $i$  пиксела  $j$  строки выходного ортоснимка:

$$\begin{pmatrix} x_d[i, j] \\ y_d[i, j] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d[i-1, j] \\ y_d[i-1, j] \end{pmatrix} + \frac{\partial \mathbf{T}_x(x_o[i, j], y_o[i, j])}{\partial x_o}. \quad (2.1.2)$$

В общем случае, такому подходу свойственно быстрое накопление ошибки по мере движения вдоль строки изображения, однако при алгоритмической реализации его всегда можно применить для частичного вычисления оператора трансформирования. В некоторых случаях накопления ошибки можно избежать, например, для аффинного преобразования

$$\mathbf{T}(x, y) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{\mathbf{x}}(x) = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_{12}y + a_{13} \\ a_{22}y + a_{23} \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{T}_{\mathbf{x}}}{\partial x} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix} = \text{const},$$

$$\begin{pmatrix} x_{d[i,j]} \\ y_{d[i,j]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{d[i-1,j]} \\ y_{d[i-1,j]} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{pmatrix}. \quad (2.1.3)$$

Рекуррентная формула (2.1.3) позволяет выполнять быстрое аффинное преобразование цифрового изображения, причем накопление ошибки обусловлено только машинным ограничением разрядной сетки. Так как вычисления по формуле (2.1.3) выполняются в пикселах цифрового изображения, то для реального цифрового аэрофотоснимка накопление ошибки не может привести к потере более чем четырех-пяти младших десятичных разрядов, при этом величина ошибки не превысит 0,1 пиксела для вычислений с одинарной точностью и  $10^{-7}$  пиксела - для вычислений с двойной точностью. Таким образом, рекуррентную формулу (2.1.3) можно считать практически точной, а ее применение в три раза сокращает количество вычислений (по сравнению с прямым применением аффинного преобразования).

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

$$\tilde{\mathbf{T}}(x, y) = A(x, y) + \mathbf{c}_{i,j}, \quad (2.1.4)$$

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

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

обобщенных поправок,  $k$  - масштаб матрицы обобщенных поправок,  $i, j, k$  - 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 матрице обобщенных поправок состоит из следующих операций:

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

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_d \\ \tilde{y}_d \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} \text{ по упрощенной формуле;}$$

- из матрицы обобщенных поправок выбирается соответствующий вектор

$$\text{поправки } \mathbf{c}_{i,j}, i = \frac{x_o}{k}, j = \frac{y_o}{k};$$

- приближенные значения координат пиксела 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 пикселу ортоснимка присваивается значение яркости или цвета найденного пиксела 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 (2.1.4) является точным. При этом трансформирование (с учетом времени построения матрицы поправок) выполняется в  $1 + \frac{2m}{n}$  раз медленнее, чем при прямом применении оператора  $\mathbf{T}$ . Но уже 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

$$\left. \begin{aligned} k(i - \frac{1}{2}) < x_o < k(i + \frac{1}{2}) \\ k(j - \frac{1}{2}) < y_o < k(j + \frac{1}{2}) \end{aligned} \right\},$$

при этом точное значение получается только для пиксела  $(x_o = ki, y_o = kj)$ .

Для остальных  $k^2 - 1$  пиксел значение 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  $C(x, y) = \mathbf{T}(x, y) - A(x, y)$ .

В дальнейшем мы покажем, что для реальных факторов влияния  $\mathbf{F}_i$  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 аэрофотоснимков в 25-100 раз.

Важным достоинством трансформирования по матрице обобщенных поправок является *возможность регулирования соотношения между точностью и производительностью процесса*, варьируя значение масштаба матрицы  $k$ . Если провести аналогию между принципом действия аналитического фототрансформатора Gestalt Photomapper II (см. раздел 1) и рассмотренным 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 ортотрансформирования обеспечивает значительно более высокую точность выходного ортоснимка, чем лучшие образцы оптико-механических приборов.

В разрабатываемой методике цифрового ортотрансформирования мы будем применять все три рассмотренных способа оптимизации. Для этого построим математические модели поправок  $F_i$ , оценим вклад факторов влияния и найдем аналитическое приближение  $A(x,y)$  таким образом, чтобы при минимальном количестве вычислительных операций оно учитывало бы наиболее значительные факторы. Затем построим оператор трансформирования  $T(x,y)$  и найдем функцию поправок  $C(x,y)$ .

Оптимизацию методами сведения двумерной задачи к квазиодномерной и применения дифференциальных операторов будем применять как при выводе формул, так и на этапе алгоритмической реализации.

### 2.3 Разработка методики формирования матрицы обобщенных поправок

Рассмотрим факторы, влияющие на взаимосвязь координат при цифровом ортотрансформировании с точки зрения предложенного метода трансформирования по матрице обобщенных поправок.

В качестве фотоматериала для аэрофотоснимков используется стекло или фотопленка.

Если для стекла характерно лишь незначительное тепловое расширение, то фотопленка меняет свои размеры в зависимости от температуры и влажности, а также с течением времени при стабильных параметрах окружающей среды. Особенно чувствительна к влажности желатиновая эмульсия. При изменении относительной влажности окружающего воздуха от 20 % до 70 % ее влажность изменяется приблизительно от 5 % до 12 %.

Современные аэрофотопленки выпускаются в основном на основе из терефталата полиэтилена. Величины деформаций, характерные для таких пленок представлены в таблице 2.2 [40]. Они характеризуют систематические деформации фотоматериала, которые можно представить линейной математической моделью.

За счет неравномерности характеристик материала основы пленка подвергается также нерегулярным деформациям, которые могут достигать 20 мкм. По данным зарубежных исследований типичная величина нерегулярных деформаций составляет около 5 мкм [41]. Так как эти деформации носят хаотический характер, для них нельзя построить математическую модель исходя из физических представлений.

Таблица 2.2 Показатели деформации основы аэрофотопленок

Наименование показателя	Толщина основы, мкм							
	38		64		102		178	
	Вид пленки							
	ч/б	цв.	ч/б	цв.	ч/б	цв.	ч/б	цв.
Температурный коэффициент линейного расширения, %/°C · 10 <sup>-3</sup>	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Коэффициент расширения от влажности, %/% RH · 10 <sup>-3</sup>	5,0	11,0	3,5	5,0	2,0	3,0	1,5	2,0
Деформация при фотографической обработке, % · 10 <sup>-3</sup>	-80 +40	-100 +40	-60 +30	-100 +30	-30 +20	-40 +30	-10 +20	-10 +20
Усадка при хранении в течение 1 недели при 50 °C и 20 % относительной влажности, % · 10 <sup>-3</sup>	90	120	80	100	30	60	20	20
Усадка при хранении в течение 1 года при 25 °C и 60 % относительной влажности, % · 10 <sup>-3</sup>	70	70	40	40	30	30	20	20

Деформации учитываются при внутреннем ориентировании снимка при помощи линейного, аффинного или даже более сложного преобразования. Для этого используются специальные контрольные метки на прикладной рамке АФА (рис 2.3) или кресты на его прижимном стекле. Точные координаты этих меток определяются при калибровке АФА и заносятся в его паспорт.

Систематическая деформация основы аэрофотоснимка приводит к смещению точки  $p$  изображения в точку  $p'$ . При этом коэффициент деформации  $k_d = \frac{d\mathbf{r}}{\mathbf{r}}$  - величина постоянная для всего снимка. Для

вычисления коэффициента систематической деформации достаточно выполнить измерения координат двух контрольных меток:

$$k_d = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{l_{12}}, \quad (2.3.1)$$

$$\mathbf{p}' = k_d \mathbf{p}, \quad (2.3.2)$$

где  $l_{12}$  - паспортное значение расстояния между метками  $m1$  и  $m2$ .

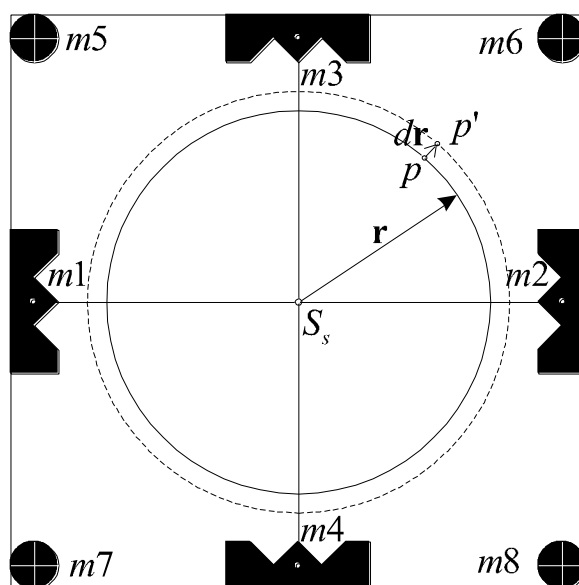


Рис 2.3 Влияние систематической деформации основы аэрофотоснимка.  $m1 - m8$  - контрольные метки на прикладной рамке АФА,  $S_s$  - начало системы координат аэрофотоснимка,  $dr$  - систематическая деформация основы, вызывающая перемещение изображения точки  $p$  в точку  $p'$ .

На практике пользуются более сложными математическими моделями. Это объясняется тем, что при фотограмметрической обработке методом прямого сканирования измерения непосредственно по снимку выполнить невозможно. В этом случае доступно только его цифровое изображение, в котором присутствуют искажения, внесенные в процессе сканирования. Измеряемые координаты получаются в системе координат

цифрового изображения снимка (см. рис 2.2). 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:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \mathbf{i} + \mathbf{d}^0, \quad (2.3.3)$$

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. Если подставить (2.3.2) в (2.3.3), то вид оператора (2.3.3) не изменится. Поэтому, искажения, вносимые сканером и систематической деформацией фотоматериала целесообразно учитывать при помощи одной математической модели.

В современных планшетных сканерах сканирование вдоль строки и вдоль столбца цифрового изображения технически реализовано по разному. Сканирование вдоль строки выполняется, в основном, электронным способом, - последовательным считыванием значений яркости с элементов фотодиодной или ПЗС линейки, а вдоль столбца - механическим перемещением линейки при помощи сервопривода. В любом случае линейка перемещается вдоль и поперек снимка при помощи разных механизмов. Поэтому масштабы по осям координат цифрового изображения обычно незначительно отличаются. В результате необходимо рассматривать как минимум два коэффициента деформации:  $k_x$  и  $k_y$ .

Конкретный вид математической модели деформаций зависит также и от типа АФА и имеющихся паспортных данных на его контрольные метки. Для многих широко распространенных АФА, например АФА-41 или АФА-ТЭ, в паспорте приводятся только расстояния между противоположными контрольными метками.

Построим линейную модель деформаций для этого случая. Обозначим паспортные расстояния между метками  $l_x$  и  $l_y$  паспортные значения смещения оптической оси фотоаппарата  $dM_x^0$  и  $dM_y^0$ . После ввода изображения в ЭВМ измерим координаты  $(x_j, y_j)$  контрольных меток в пикселах. Вычислим координаты места нуля  $M_x^0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i$ ,  $M_y^0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 y_i$  и расстояния между метками  $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ . Определим разворот системы координат снимка относительно системы координат цифрового изображения

$$\gamma = \frac{\arcsin \frac{y_1 - y_2}{l_{12}} + \arcsin \frac{x_3 - x_4}{l_{34}}}{2}.$$

Предположим что искажения за счет деформации основы и при сканировании снимка носят линейный характер и определим соответствующие коэффициенты деформации  $k_x = l_x / l_{12}$ ,  $k_y = l_y / l_{34}$ .

Теперь можно записать элементы оператора (2.3.3):

$$\begin{aligned} r_{11} &= \frac{\sin \gamma}{k_y (\sin^2 \gamma - \cos^2 \gamma)}, \quad r_{12} = -\frac{\cos \gamma}{k_x (\sin^2 \gamma - \cos^2 \gamma)}, \\ r_{21} &= \frac{\cos \gamma}{k_y (\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma)}, \quad r_{22} = -\frac{\sin \gamma}{k_x (\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma)}, \\ \mathbf{d}^0 &= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} M_x^0 \cdot k_y \sin \gamma + M_y^0 \cdot k_y \cos \gamma + dM_y^0 \\ M_x^0 \cdot k_x \cos \gamma + M_y^0 \cdot k_x \sin \gamma + dM_x^0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

Подстановка полученных значений в (2.3.3) дает математическую модель деформаций, связывающую координаты точки исходного изображения, существовавшего в момент съемки и цифрового изображения, получаемого после сканирования. Модель построена в предположении, что деформации фотоматериала и искажения, вносимые при сканировании, носят линейный характер.

Для этого же случая можно учесть неперпендикулярность осей системы координат снимка, задаваемой координатными метками. Если известны паспортные значения  $\mathbf{m}_k$  координат  $n \geq 3$  координатных меток, то коэффициенты  $r_{ij}$  и вектор  $\mathbf{d}^0$  можно найти, измерив координаты  $\mathbf{d}_k$  на цифровом изображении этих меток и решив систему линейных уравнений

$$\mathbf{R} \times \mathbf{m}_k + \mathbf{d}^0 = \mathbf{d}_k, \quad k=1,2,\dots,n.$$

В этом случае моделирующее преобразование будет аффинным, но аналитический вид выражения (2.3.3) сохраняется в силу того, что преобразование, представленное двумя последовательными аффинными преобразованиями также является аффинным. Поэтому, выбирая математическую модель поправок за деформацию основы фотоматериала и сканирование аэрофотоснимка, остановимся на преобразовании вида (2.3.3), в общем случае, аффинном.

Изображение аэрофотоснимка содержит целый ряд искажений, называемых также абберациями, обусловленных оптическими особенностями объектива АФА. Причины возникновения аббераций различны. Хроматическая абберация возникает вследствие неравенства коэффициентов преломления для лучей света с различной длиной волны, баротермооптическая - вследствие изменения геометрии оптической системы под влиянием изменения физических параметров внешней среды. Известно также пять видов аббераций, свойственных любой осесимметричной оптической системе: сферическая абберация, кома,

астигматизм, дисторсия и кривизна поля изображения [42,43]. Величины этих aberrаций выражаются членами первого порядка малости при разложении в степенной ряд аналитической формы для искажений осесимметричной оптической системы, полученной методом эйконала Шварцшильда. Такие aberrации называются первичными или aberrациями Зайделя.

Большая часть aberrаций оказывает влияние на параметры пятна рассеяния объектива. На ортоскопичность изображения влияет только дисторсия объектива и, в незначительной степени - кома и кривизна поля изображения [28].

Дисторсия объектива вызывается в основном тем, что проектирующий луч, проходящий от объекта к реальному объективу, не только не лежит на одной прямой с соответствующим ему лучом, проходящим от объектива к изображению, но и не параллелен ему. В результате возникает радиальная дисторсия, которую можно представить в виде [14]:

$$\sigma_p = r_p \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} - 1 \right),$$

где  $\sigma_p$  - величина радиальной дисторсии в точке изображения  $p$ ,  $r_p$  - расстояние от точки  $p$  до главной точки снимка,  $\alpha_1$  - угол между проектирующим лучом и оптической осью объектива внутри АФА,  $\alpha_2$  - угол между проектирующим лучом и оптической осью вне АФА.

Кроме радиальной дисторсии рассматривается также тангенциальная дисторсия, вызванная в основном непараллельностью оптических осей компонентов оптической системы объектива.

Искажения, вносимые дисторсией объектива сравнительно невелики по абсолютной величине. Типичные значения радиальной дисторсии лежат в диапазоне 5-20 мкм, а тангенциальной дисторсии - в 3-4 раза меньше.



Для обоих видов дисторсии характерна зависимость величины от расстояния до оптической оси объектива. В главной точке снимка дисторсия отсутствует и увеличивается к краю изображения.

Для моделирования дисторсии используются эмпирические формулы, обычно в виде многочленов третьего порядка:

$$\sigma_p = Er_p^3, \text{ или } \sigma_p = b_1r_p + b_2r_p^2 + b_3r_p^3.$$

Величину  $E$  в первом выражении называют коэффициентом дисторсии.

Учитывая малые абсолютные величины искажений, вызванных дисторсией, в соответствии с принципами оптимизации, изложенными в подразделе 2.1, внесем поправки за дисторсию объектива в матрицу обобщенных поправок  $c_{ij}$  и не будем их учитывать в аналитической аппроксимации  $A(x, y)$ , (2.1.4).

Плотность атмосферного воздуха различна на разных высотах. На ее величину влияет температура, атмосферное давление и, в меньшей степени, влажность. Соответственно, в зависимости от высоты изменяется скорость света в воздухе и показатель преломления. Такое явление называется атмосферной рефракцией и приводит к отклонению от прямой неперпендикулярных проектирующих лучей.

Полная математическая модель атмосферной рефракции должна учитывать ряд факторов, которые обычно неизвестны при обработке аэрофотоснимков. Поэтому в фотограмметрии используются упрощенные фотограмметрические модели рефракции. Наибольшее распространение получили формулы Ашенбреннера, Лейонхувуда и Куштина [44].

Наиболее простой аналитический вид имеет формула Ашенбреннера:

$$\lambda'' = 3,1L(1 - 0,035(3H_a - H)), \quad (2.3.5)$$

где  $H_a$  - абсолютная высота фотографирования, измеренная от уровня моря,  $H$  - высота фотографирования относительно точки местности, для которой

определяется атмосферная рефракция,  $L$ - расстояние в километрах от точки фотографирования до рассматриваемой точки местности,  $\lambda''$  - угол отклонения проектирующего луча вблизи центра проекции снимка в угловых секундах.

Для высот фотографирования 5-11 км лучшие результаты дает формула Куштина:

$$\lambda'' = \frac{481,3'' \operatorname{tg} \zeta}{H_a - H_g} \times \left( (1 - 0,02257 H_g)^{5,253} - \left( 1 + \frac{34,14(H_a - H_g)}{288 - 6,5 H_a} \right) \cdot (1 - 0,02257 H_a)^{5,253} \right), \quad (2.3.6)$$

где  $H_g$  - абсолютная высота точки местности,  $\zeta$  - угол между надирным и проектирующим лучами. Наилучшие результаты эта формула дает для стандартной атмосферы JCAN: давление на уровне моря 760 мм рт. ст., температура 15° С, градиент температуры минус 0,65° на 100 м до высоты 11 км, от 11 до 30 км температура постоянна и равна минус 56,5° С.

При фотографировании с высот от 11 до 70 км применяется другой вариант формулы Куштина:

$$\lambda'' = \operatorname{tg} \zeta \cdot \left( \frac{481,3}{H_a - H_g} (1 - 0,02257 H_g)^{5,253} - \left( \frac{108,0}{H_a - H_g} + \frac{3686}{T_S} \right) \cdot e^{-34,15 \frac{H_a - 11}{T}} \right), \quad (2.3.7)$$

где  $T$ - среднее значение температуры для слоя атмосферы от 11 км до точки фотографирования,  $T_S$ - температура в точке фотографирования,  $\zeta$  - зенитное расстояние.

Определим абсолютную величину погрешностей  $\Delta r$ , которые могут быть вызваны атмосферной рефракцией при ортотрансформировании

аэрофотоснимков для различных высот фотографирования и фокусных расстояний АФА. Допустим, что снимки горизонтальны,  $\operatorname{tg} \lambda \approx \sin \lambda \approx \lambda$ ,

тогда знаменатель масштаба  $m = \frac{H}{f} = \frac{H_a - H_g}{f}$ ,  $L = mr \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda = \frac{1}{206265} \lambda''$ ,

$\operatorname{tg} \zeta = \frac{r}{f}$ ,  $\Delta r = \lambda \left( f + \frac{r^2}{f} \right)$ . Искажения за счет рефракции увеличиваются от

центра к краям снимка, поэтому выполним их оценку для  $r=100$  мм.

Формула (2.3.5) принимает вид:

$$\Delta r = 0.0151 H r \left( 1 + \frac{r^2}{f^2} \right) (1 - 0.035(3H_a - H)), \quad (2.3.8)$$

формула (2.3.6):

$$\Delta r = 2.333 \cdot \left( 1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \frac{r}{H_a - H_g} \times \\ \times \left( (1 - 0.02257 H_g)^{5.253} - \left( 1 + \frac{34.14(H_a - H_g)}{288 - 6.5 H_a} \right) \cdot (1 - 0.02257 H_a)^{5.253} \right), \quad (2.3.9)$$

формула (2.3.7):

$$\Delta r = \frac{r}{206.265} \left( 1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \cdot \left( \frac{481.3''}{H_a - H_g} (1 - 0.02257 H_g)^{5.253} - \right. \\ \left. - \left( \frac{108.0}{H_a - H_g} + \frac{3686}{T_s} \right) \cdot e^{-34.15 \frac{H_a - 11}{T}} \right) \quad (2.3.10)$$

Коэффициенты в формулах (2.3.8), (2.3.9), (2.3.10) подобраны так, чтобы результат получался в мкм.

На графиках рис. 2.4 представлены зависимости абсолютной величины искажений в мкм, вызванных атмосферной рефракцией, рассчитанные по формулам (2.3.8), (2.3.9), (2.3.10) для стандартной атмосферы JCAN и фокусных расстояний объектива 50, 75, 100, 150 и 300 мм.

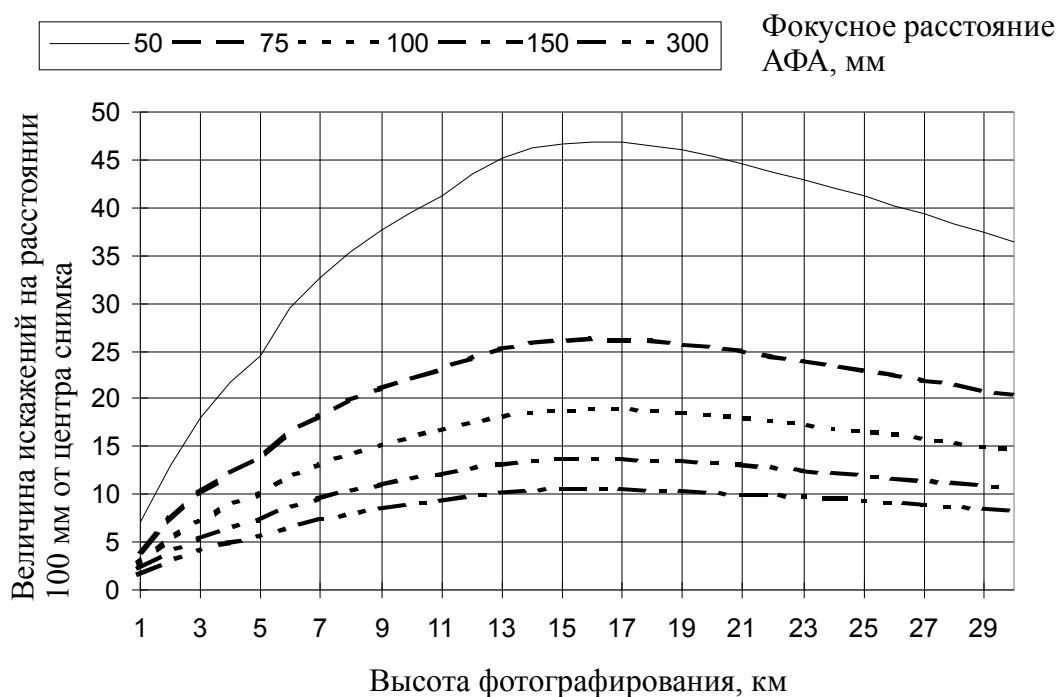


Рис. 2.4 Величина поправок за влияние атмосферной рефракции.

Расчеты выполнены для абсолютной высоты местности, равной уровню моря. Для высот фотографирования от 1 до 5 км значения рассчитаны по формуле Ашенбреннера, от 6 до 30 км - по формулам Куштина. Вблизи высоты 5 км наблюдается незначительное несовпадение значений рефракции, рассчитанных по разным формулам.

Из графиков видно, что при ортотрансформировании цифровых снимков, введенных с разрешением 600 dpi (40 мкм) и менее ошибки за счет атмосферной рефракции не превышают 0,5 пиксела для любых высот фотографирования, если фокусное расстояние объектива больше 100 мм. В то же время, при ортотрансформировании изображений высокого разрешения, введенных с разрешением 1200 dpi (20 мкм) искажения на значительных расстояниях от центра снимка превышают 0,5 пиксела при съемке с высот больше 2-3 км. Они могут быть учтены при помощи простейшей математической модели при формировании матрицы обобщенных поправок.

При съемке широкоугольными объективами с больших высот атмосферная рефракция приводит к ошибкам в несколько пиксел.

В любом случае искажения цифрового изображения, вызванные атмосферной рефракцией сравнительно невелики по абсолютной величине, и плавно увеличиваются от центра к краям планового аэрофотоснимка. Поэтому, как и поправки за дисторсию объектива, мы будем вносить поправки за атмосферную рефракцию в матрицу обобщенных поправок  $c_{ij}$  и не будем их учитывать в аналитической аппроксимации  $A(x, y)$  (формула 2.1.4).

Величина поправки за кривизну поверхности Земли прямо пропорциональна высоте фотографирования и для широкоугольных объективов может значительно превышать поправки за дисторсию объектива атмосферную рефракцию. Кроме того, для мелких масштабов съемки может потребоваться преобразование цифрового снимка в заданную картографическую проекцию.

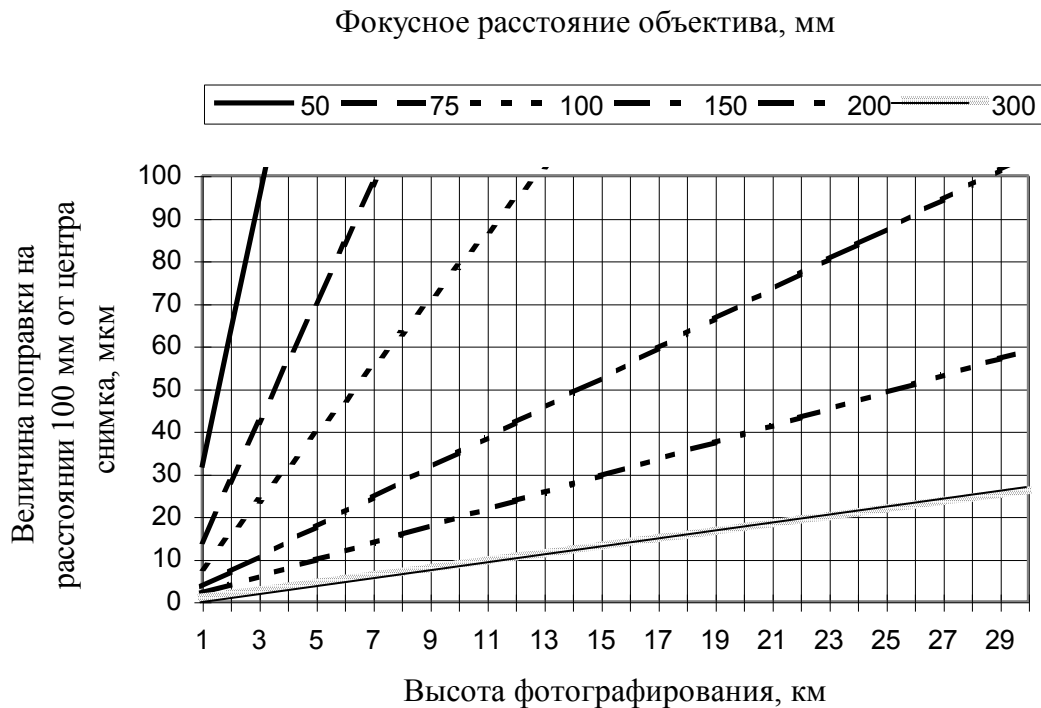


Рис. 2.5 Величина поправки за кривизну поверхности Земли в зависимости от фокусного расстояния объектива и высоты фотографирования.

Тем не менее, при цифровом ортотрансформировании для большинства видов практической аэрофототопографической съемки поправки этого вида не превосходят нескольких пиксел и могут быть внесены в матрицу обобщенных поправок без ущерба для точности ортоснимка. В специальных случаях высотной аэрофотосъемки может оказаться целесообразным частичный учет этого вида поправок в аналитическом приближении оператора трансформирования.

При ортотрансформировании снимков поверхностей других планет Солнечной системы поправки за кривизну могут быть значительно больше, чем для Земли, для Луны, например, в 4,5 раза.

Заметим, что для высот фотографирования менее 5 км поправки за атмосферную рефракцию и кривизну поверхности Земли имеют близкий аналитический вид, а расстояние  $r$  измеряется в обоих случаях от точки надира. Для быстрого формирования матрицы поправок можно получить обобщенную поправку за эти два фактора в виде:

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r. \quad (2.3.12)$$

Используем для этого формулу Ашенбреннера (2.3.8) и формулу (2.3.11):

$$\Delta r = \frac{r^3}{f^2} (1 - 0,2646 H_a + 0,035 H) + r (0,0151 H - 0,0016 H H_a + 0,0005 H^2).$$

Исключив члены, величины которых не могут превысить 5 мкм окончательно получим:

$$\Delta r = \frac{r^3}{f^2} (1 - 0,2646 H_a + 0,035 H) + 0,0151 r H. \quad (2.3.13)$$

Здесь высоты выражаются в километрах, фокусное расстояние и  $r$  - в миллиметрах. Предполагается, что углы наклона снимков малы.

До сих пор мы рассматривали факторы, оказывающие относительно небольшое влияние на результат оператора ортотрансформирования (2.1.1), определяющего взаимосвязь координат исходного снимка и ортоснимка. В рамках предложенного подхода соответствующие поправки в большинстве случаев можно было вносить в матрицу обобщенных поправок. Влияние рельефа местности может быть значительно более существенным. Для горизонтального снимка смещение, вызванное влиянием рельефа [44]

$$\delta r = \frac{h}{H_f} r, \text{ где } h - \text{высота на местности, } r - \text{расстояние от рассматриваемой}$$

точки до центра снимка. Для горной местности отношение  $\frac{h}{H_f}$  может достигать значений 0,3 - 0,4, а величина поправки за рельеф - нескольких миллиметров в масштабе снимка или десятков пиксел цифрового изображения.

Учет влияния рельефа местности представляет собой важнейшую проблему современной технологии цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков. Ее можно разделить на следующие составные части:

- 1) восстановление рельефа по стереоизображению местности или получение данных о нем из существующих карт и других источников;
- 2) формирование цифровой модели рельефа (ЦМР);
- 3) визуализация, монтаж и обновление ЦМР;
- 4) разработка эффективного алгоритма ортотрансформирования по ЦМР.

Рассмотрим первые три задачи в разделе диссертации, посвященном технологии ЦМР, а при разработке математической модели ортотрансформирования будем считать, что существует некоторая вычислительная процедура, позволяющая получить высоту рельефа для любой точки, изобразившейся на аэрофотоснимке.

В общем случае, поправку за влияние рельефа нельзя представить в достаточно простом аналитическом виде и учитывать в приближении  $A(x, y)$  (формула 2.1.4). Если внести ее в матрицу обобщенных поправок, то для достижения достаточной точности трансформирования в случае горной местности, понадобится матрица поправок высокого разрешения и ее построение потребует значительных вычислительных ресурсов.

Один из путей решения этой задачи заключается в том, чтобы учитывать генеральную тенденцию рельефа в аналитическом приближении  $A(x, y)$ , а его детали в матрице обобщенных поправок.



## 2.4 Математическая модель цифрового ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок

Рассмотрев в предыдущих разделах методику учета различных факторов влияния при цифровом ортотрансформировании аэрофотоснимков, перейдем к выводу расчетных формул для аналитической аппроксимации оператора ортотрансформирования и формирования матрицы обобщенных поправок.

Пусть системы координат исходного снимка и его цифрового изображения связаны аффинным преобразованием (2.3.3), а цифровой ортоснимок строится с разрешением  $k$  метров на местности в одном пикселе. При этом связь координат цифрового ортоснимка и местности выражается в виде:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} x^o \\ y^o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0^o \\ Y_0^o \end{pmatrix}, \quad (2.4.1)$$

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

Непосредственное применение уравнений коллинеарности [44] дает следующее соотношение между координатами ортоснимка и исходного снимка:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &\approx -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \\ y - y_0 &\approx -f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.2)$$

где  $(X_s, Y_s)$  - координаты точки фотографирования. Знаки приближенного равенства в (2.4.2) указывают на то, что здесь не учитываются поправки, рассмотренные в подразделе 2.3.

На практике при цифровом трансформировании возникает дополнительное условие. Изображение исходного снимка должно быть вписано в границы формируемого ортоснимка (рис 2.1).

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 пикселах.

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

$$\left. \begin{aligned} X_0^o &= \min(X_i) \\ Y_0^o &= \min(Y_i) \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} l^o &= \frac{\max(X_i) - X_0^o}{k} \\ h^o &= \frac{\max(Y_i) - Y_0^o}{k} \end{aligned} \right\}. \quad (2.4.4)$$

Возьмем за основу аналитической аппроксимации оператора ортотрансформирования преобразования (2.3.3) и (2.4.2) и найдем приближенную зависимость между координатами цифрового ортоснимка и координатами цифрового изображения исходного снимка.

Применяя оптимизацию методом сведения двумерной задачи к квазиодномерной (подраздел 2.2) 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 (2.4.1)

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

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

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

получим

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &\approx \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F} \\ y - y_0 &\approx \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F} \end{aligned} \right\}. \quad (2.4.5)$$

Подставляя (2.4.5) в (2.3.3)

$$\left. \begin{aligned} x_d &\approx r_{11} \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F} + r_{12} \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F} + x_d^0 \\ y_d &\approx r_{21} \frac{Ax^o + B}{Ex^o + F} + r_{22} \frac{Cx^o + D}{Ex^o + F} + y_d^0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.6)$$

где  $(x_d, y_d)$  - координаты пиксела цифрового изображения исходного снимка, соответствующего пикселу 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:

$$\left. \begin{aligned} x_d &\approx \frac{Mx^o + N}{Ex^o + F} \\ y_d &\approx \frac{Px^o + Q}{Ex^o + F} \end{aligned} \right\}. \quad (2.4.7)$$

В пределах строки адрес пиксела эквивалентен его абсциссе (см. подраздел 2.1, свойство 1 системы координат цифрового изображения), поэтому соотношение (2.4.7) 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  $10^4$  пиксел и более. Такая форма аналитической аппроксимации допускает исключительно эффективную реализацию алгоритма.

Преобразование (2.4.7) учитывает линейные деформации фотоматериала, смещение оптической оси фотоаппарата, элементы внутреннего, взаимного и абсолютного ориентирования снимка, линейные компоненты искажений сканирующего устройства.

Рассмотрим возможность учета генеральной тенденции рельефа местности в аналитической аппроксимации.

В тех случаях, когда местность, изобразившаяся на аэрофотоснимке, имеет преобладающий уклон в одну сторону, генеральную тенденцию рельефа можно моделировать наклонной плоскостью [44]. При этом форма аппроксимации (2.4.7) не изменится, соответственно не изменится и производительность трансформирования.

Наиболее общий метод моделирования состоит в том, чтобы перед трансформированием ввести поправки в элементы ориентирования снимка таким образом, чтобы эквивалентные значения превышений на местности были минимальны в смысле наименьших квадратов. Для этого нужно найти моделирующую плоскость рельефа и развернуть систему координат снимка так, чтобы эта плоскость приобрела горизонтальное положение (рис. 2.2). Если проводить аналогию с нецифровыми методами трансформирования, то можно отметить, что данный подход соответствует ортотрансформированию аэрофотоснимка, предварительно трансформированного на наклонную плоскость с помощью оптического фототрансформатора.

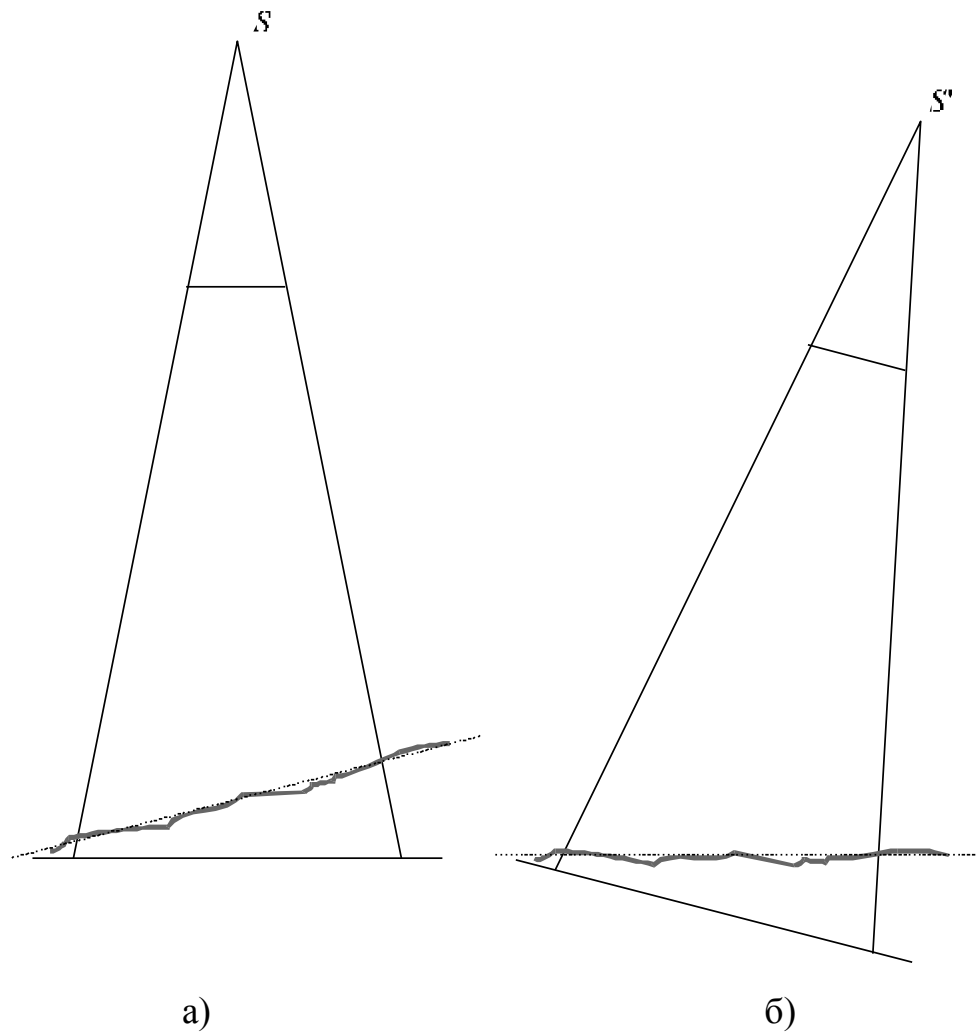


Рис 2.2 Моделирование генеральной тенденции рельефа наклонной плоскостью. а - исходное положение системы координат снимка, б- исправленное положение системы координат снимка.

Пусть из цифровой модели рельефа известны координаты  $n \geq 3$  точек местности  $(X_i, Y_i, Z_i)$ . Уравнение моделирующей плоскости можно найти, решая методом наименьших квадратов систему линейных уравнений

$$\left. \begin{array}{l} \xi X_1 + \eta Y_1 + \zeta Z_1 + 1 = 0 \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \xi X_n + \eta Y_n + \zeta Z_n + 1 = 0 \end{array} \right\} . \quad (2.4.8)$$

В результате вычисляются тангенциальные (плюккеровы) координаты искомой плоскости. Направляющие косинусы нормали к моделирующей плоскости в системе координат местности:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_x &= \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}} \\ \cos \alpha_y &= \frac{\eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}} \\ \cos \alpha_z &= \frac{\zeta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (2.4.9)$$

Для того чтобы привести моделирующую плоскость в горизонтальное положение, ее нужно, например, последовательно повернуть вокруг оси  $x$  на угол  $-\alpha_y$ , а затем вокруг оси  $y$  на угол  $-\alpha_x$ . Соответствующий оператор будет иметь вид:

$$A' = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x \end{pmatrix}. \quad (2.4.10)$$

Таким образом, для того, чтобы найти исправленные для построения аналитической аппроксимации элементы ориентирования, необходимо решить уравнения (2.4.8), найти углы наклона моделирующей плоскости используя (2.4.9), получить компенсирующий оператор  $A'$ , и развернуть систему координат снимка вычислив новые угловые элементы ориентирования  $\alpha', \omega', \kappa'$  из матрицы направляющих косинусов:

$$A' \times \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}. \quad (2.4.11)$$

Исправленное значение высоты фотографирования:

$$H'_f = H_f \cos \alpha_z. \quad (2.4.12)$$

Таким образом, при моделировании генеральной тенденции рельефа наклонной плоскостью форма аналитической аппроксимации оператора ортотрансформирования для строки ортоснимка не изменяется и имеет вид дробно-линейного преобразования (2.4.7). При алгоритмической реализации дифференциальной формы этого преобразования (метод оптимизации 2, подраздел 2.1) требуется лишь *две операции деления и три операций сложения* для формирования одного пиксела ортоснимка. При трансформировании снимков равнинной местности без учета рельефа полученная аналитическая аппроксимация может применяться самостоятельно, без формирования матрицы обобщенных поправок.

Аналитическая аппроксимация оператора ортотрансформирования позволяет быстро получить оценку координат пиксела исходного цифрового аэрофотоснимка, соответствующего текущему пикселу формируемого ортоснимка. Однако при этом не учитывается большинство факторов, влияющих на взаимосвязь этих координат. В разработанной технологии ортотрансформирования приближенные значения координат уточняются по разреженной матрице обобщенных поправок  $c_{ij}$  (формула (2.1.4)).

Для формирования матрицы обобщенных поправок необходимо построить математическую модель оператора ортотрансформирования (2.1.1) с требуемой точностью, включив в нее те или иные факторы влияния, в зависимости от условий съемки, типа АФА и рельефа местности. На практике нецелесообразно получать эту модель в аналитической форме, так как более эффективной оказывается реализация модели в виде вычислительной процедуры. Поэтому мы рассмотрим формирование матрицы обобщенных поправок аналитическим методом в качестве примера. Используем для этого модель деформаций (2.3.3, 2.3.4).

В этом случае аналитическая аппроксимация для произвольных координат имеет вид:

$$A(x_o, y_o) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \\ -f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2 H_f}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3 H_f} \end{pmatrix} + \mathbf{D}^0. \quad (2.4.11)$$

При  $y_o = \text{const}$   $A(x_o, y_o)$  принимает вид (2.4.7).

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:

$$\mathbf{T}(x^o, y^o) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -f \frac{a_1(kx^o + X_0^o - X_s) + b_1(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_1(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))} \\ -f \frac{a_2(kx^o + X_0^o - X_s) + b_2(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_2(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))}{a_3(kx^o + X_0^o - X_s) + b_3(ky^o + Y_0^o - Y_s) - c_3(H_f - Z(kx^o + X_0^o - X_s, ky^o + Y_0^o - Y_s))} \end{pmatrix} + \mathbf{D}^0. \quad (2.4.12)$$

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

$$\mathbf{c}(x^o, y^o) = \mathbf{T}(x^o, y^o) - A(x^o, y^o), \quad (2.4.13)$$

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \approx A(x^o, y^o) + \mathbf{c}(x^o, y^o). \quad (2.4.14)$$

Таким образом, матрица 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 пиксел ортоснимка. Если задаться коэффициентом разрежения матрицы поправок  $n$ , то элементы разреженной матрицы

$$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{T}(n(i + 1/2), n(j + 1/2)) - A(n(i + 1/2), n(j + 1/2)),$$

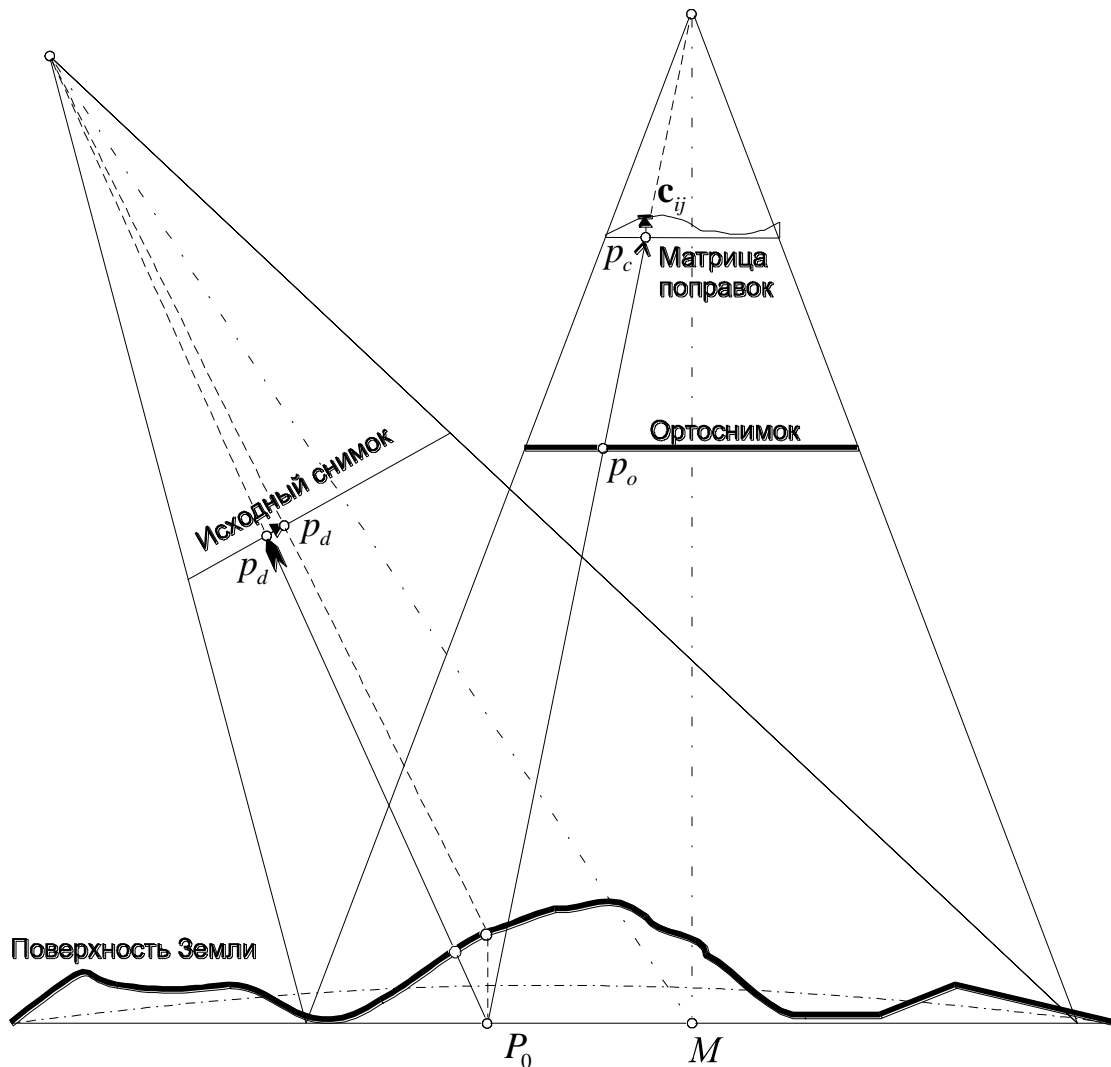
$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \approx A(x^o, y^o) + \mathbf{c}_{ij}. \quad (2.4.15)$$

Преобразование (2.4.15) при алгоритмической реализации требует лишь *два деления и четыре сложения* с плавающей запятой. 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  $n^2$ . Наибольший вклад в величины обобщенных поправок вносят поправки за рельеф местности. Поэтому точность ортотрансформирования уменьшается пропорционально первой степени  $n$  (см. п. 2.3.5).

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. 2.3).



Условные обозначения:

- > извлечение поправки из матрицы поправок
- > дробно-линейное преобразование координат
- > учет поправки

Рис 2.3. Схема движения данных в процессе ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок.

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 пиксел 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 пиксела цифрового ортоснимка  $p_o (x_o, y_o)$ . Этому пикселу необходимо присвоить значение яркости, содержащееся в пикселе  $p_d$  исходного снимка, в котором изобразилась точка местности  $P$ . Если подставить координаты пиксела  $p_o$  в аналитическую аппроксимацию, получим координаты пиксела  $\tilde{p}_d$ , близкого к искомому пикселу  $p_d$ . Вектор поправки  $\overline{\tilde{p}_d p_d}$  можно получить по формуле (2.4.12), но это потребует значительного количества вычислений. Так как величина этого вектора мала, то можно использовать один и тот же вектор поправки  $c_{ij}$  для нескольких пиксел в окрестностях  $\tilde{p}_d$ , взяв его из заранее рассчитанной по (2.4.12) разреженной матрицы обобщенных поправок.

Таким образом, в процессе ортотрансформирования оценка  $\tilde{p}_d$  положения искомого пиксела  $p_d$  уточняется по матрице обобщенных поправок:  $\overline{\tilde{p}_d p_d} = c_{ij}$ . 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 разработанным методом можно получить значительный выигрыш в быстродействии.

## 2.5 Формирование цифровой модели рельефа

При наличии точных значений элементов абсолютного ориентирования цифровая модель рельефа (ЦМР) может быть построена на основе непосредственных измерений по исходной стереопаре. Исходными данными для построения ЦМР могут служить также измерения высот по горизонталям существующих топографических карт или значения высот, полученные из других источников. В ЭВМ эти данные могут быть представлены в виде изолиний (горизонталей) в векторном формате или в виде матрицы высот, в общем случае, нерегулярной.

В результате обработки исходной информации ЦМР должна иметь такую структуру данных, которая позволяет быстро получать точные значения высоты рельефа для произвольных координат местности в пределах области ее определения. На практике применяются матричные и функциональные [45] ЦМР. Последние основаны на аппроксимации рельефа местности сплайнами или полиномами. Эти модели отличаются непрерывностью на всем участке моделирования, обеспечивают сжатие информации о рельефе и экономное использование ОЗУ ЭВМ. Недостатком таких моделей является относительная сложность вычисления высотной отметки, что не позволяет использовать этот метод в быстрых алгоритмах. Представление ЦМР в виде регулярной матрицы высот свободно от указанного недостатка, но требует значительно больше памяти для хранения модели. Так как при ортотрансформировании цифровых изображений быстродействие алгоритма исключительно важно, в разработанной методике применяются ЦМР в виде регулярных матриц рельефа.

Формирование ЦМР состоит из следующих этапов:

- измерение координат соответственных точек на правом и левом снимках стереопары;
- расчет превышений на местности по координатам соответственных точек и формирование нерегулярной матрицы высот;
- Интерполяция величин превышений и формирование регулярной матрицы высот.

Для того чтобы построить ЦМР с высокой точностью, необходимо измерить большое количество соответственных точек. В технологии OrthoPhoto-SDS для этого предусмотрены автоматические и полуавтоматические методы измерений, которые будут рассмотрены в подразделе 2.7.

В результате измерений соответствующих точек на левом и правом снимках стереопары образуется два массива координат. Для каждой пары таких точек можно определить высоту на местности относительно условной отметки, принятой за нулевую. Известен метод расчета, основанный на использовании условия коллинеарности проектирующих векторов. Это условие позволяет рассчитать по изображениям точки местности на снимках скалярный множитель  $N$  к пространственному вектору  $\mathbf{R}'$  координат изображения точки в системе координат этого изображения (Рис 2.4):

$$\mathbf{R} = N \cdot \mathbf{R}', \quad (2.5.1)$$

где  $\mathbf{R}$  - координатный вектор точки местности в системе координат снимка [44],

$$N = \frac{Y_0 Z_r' - Z_0 Y_r'}{Y_l' Z_r' - Z_l' Y_r'} = \frac{Z_0 X_r' - X_0 Z_r'}{Z_l' X_r' - X_l' Z_r'} = \frac{X_0 Y_r' - Y_0 X_r'}{X_l' Y_r' - Y_l' X_r'}. \quad (2.5.2)$$

Здесь  $X_0, Y_0, Z_0$  - пространственные координаты системы координат правого снимка  $S_r$  в системе координат левого снимка  $S_l$ ,  $X'_l, Y'_l, Z'_l$  - пространственные координаты точки левого снимка в его системе координат,  $X'_r, Y'_r, Z'_r$  - пространственные координаты соответствующей точки правого снимка в системе координат правого снимка:

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1x + a_2y - a_3f \\ Y' &= b_1x + b_2y - b_3f \\ Z' &= c_1x + c_2y - c_3f \\ X_0 &= X_S^r - X_S^l \\ Y_0 &= Y_S^r - Y_S^l \\ Z_0 &= H_f^r - H_f^l \end{aligned} \right\}. \quad (2.5.3)$$

Если теперь преобразовать вектор  $\mathbf{R}$  в систему координат местности, можно вычислить величину превышения на местности для исходной пары точек, например:

$$Z = H_f + NZ'. \quad (2.5.4)$$

Для идеального случая съемки, когда углы наклона и разворота аэрофотоснимков равны нулю, а ось  $X$  системы  $S_l$  направлена вдоль базиса фотографирования из (2.5.1) можно получить значение превышения в этой системе в виде

$$Z_{S_l} = -B \frac{f}{p}, \quad (2.5.5)$$

где  $B$  - базис фотографирования,  $f$  - фокусное расстояние фотоаппарата,  $p = x_l - x_r$  - измеренное по стереопаре значение параллакса.

На практике равенства (2.5.2) являются приближенными вследствие того, что из-за ошибок измерений и неточности элементов ориентирования стереопары условие компланарности проектирующих векторов выполняется не строго.

Другой недостаток этого метода состоит в том, что величины  $X_0$  и  $Z_0$ ,  $Y_0$  и  $Z_0$  могут быть попарно равны нулю, не исключены случаи обращения в нуль и знаменателей дробей (2.5.2). Поэтому любое из трех выражений для  $N$  может оказаться непригодным для расчета. Для стандартно расположенной стереопары обычно используется второе из трех выражений для  $N$  (2.5.2).

Автором предложена новая формула для расчета превышения на местности, дающая единственное значение высоты  $Z$ , при любых элементах ориентирования, если базис фотографирования не равен нулю.

Найдем величину превышения из условия минимума остаточного параллакса при данных элементах ориентирования снимков.

Пусть известно положение проекции точки местности в системах координат правого и левого снимков. Применяя проективное преобразование, запишем переход из системы координат снимка в систему координат местности с учетом рельефа:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s - (H_f - Z) \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y &= Y_s - (H_f - Z) \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{aligned} \right\}. \quad (2.5.6)$$

Обозначим:

$$\tilde{x} = \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}, \quad \tilde{y} = \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}. \quad (2.5.7)$$

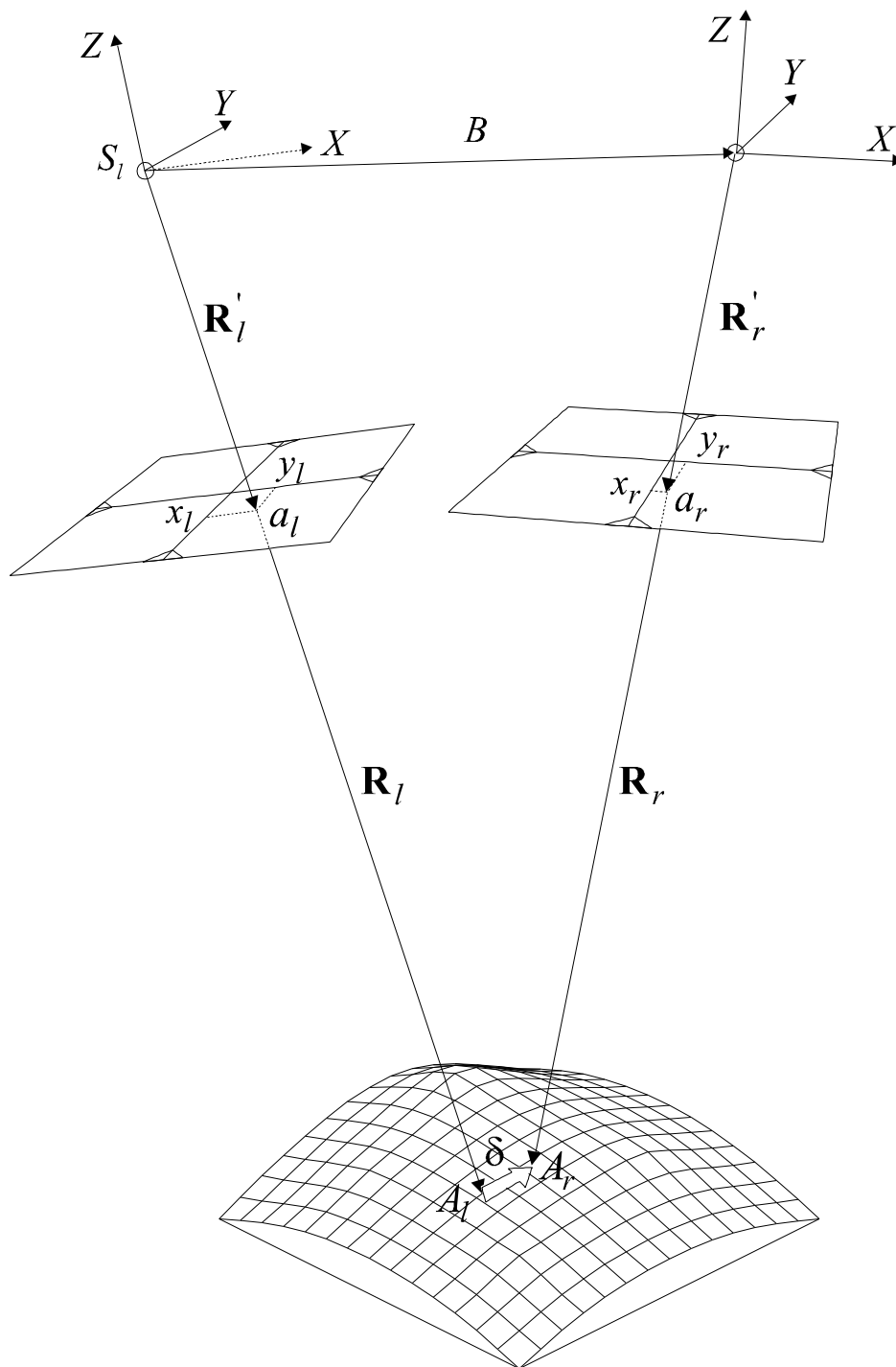


Рис 2.4 Расчет высоты на местности по изображениям  $a_l$  и  $a_r$  точки местности в условиях неточного определения элементов ориентирования аэрофотоснимков;  $\delta$  - остаточный параллакс в пространстве модели.



Определим остаточный параллакс, считая что высоты фотографирования обоих снимков и превышение  $Z$  измеряются от одного и того же уровня:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= X_s^l - (H_f^l - Z)\tilde{x}_l - X_s^r + (H_f^r - Z)\tilde{x}_r; \\ \delta_y &= Y_s^l - (H_f^l - Z)\tilde{y}_l - Y_s^r + (H_f^r - Z)\tilde{y}_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.5.8)$$

Будем считать элементы ориентирования заданными и запишем модуль остаточного параллакса в виде функции от  $Z$ :

$$\begin{aligned} \delta(Z) &= \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} = \\ &= \sqrt{(X_s^l - (H_f^l - Z)\tilde{x}_l - X_s^r + (H_f^r - Z)\tilde{x}_r)^2 + (Y_s^l - (H_f^l - Z)\tilde{y}_l - Y_s^r + (H_f^r - Z)\tilde{y}_r)^2} = \\ &= \sqrt{(Z(\tilde{x}_l - \tilde{x}_r) + X_{Z=0}^l - X_{Z=0}^r)^2 + (Z(\tilde{y}_l - \tilde{y}_r) + Y_{Z=0}^l - Y_{Z=0}^r)^2}, \quad (2.5.9) \end{aligned}$$

где  $X_{Z=0} = X_s - H_f \tilde{x}$ ,  $Y_{Z=0} = Y_s - H_f \tilde{y}$ . Заметим, что величины  $Z(\tilde{x}_l - \tilde{x}_r)$ ,  $Z(\tilde{y}_l - \tilde{y}_r)$  имеют геометрический смысл поправок за рельеф к координатам  $X_{Z=0}$ ,  $Y_{Z=0}$ .

Выражение для остаточного параллакса является строгим и при заданных элементах ориентирования стереопары зависит только от  $Z$ . Найдем такую величину превышения  $Z$ , для которой остаточный параллакс минимален, рассматривая формулу (2.5.9) как целевую функцию.

Покажем, что при ненулевом параллаксе стереопары целевая функция является всюду гладкой и для реальной пары снимков имеет единственный минимум.

Обозначим  $a = \tilde{x}_l - \tilde{x}_r$ ,  $b = X_{Z=0}^l - X_{Z=0}^r$ ,  $c = \tilde{y}_l - \tilde{y}_r$ ,  $d = X_{Z=0}^l - X_{Z=0}^r$ . Тогда

$$\begin{aligned} \delta(Z)^2 &= (aZ + b)^2 + (cZ + d)^2 = \\ &= (a^2 + b^2)Z^2 + 2(ba + cd)Z + b^2 + d^2. \end{aligned} \quad (2.5.10)$$

Поскольку выражение (2.5.10) неотрицательно,  $\delta(Z)^2$  имеет единственный минимум, совпадающий с минимумом целевой функции  $\delta(Z)$ . Найдём его, дифференцируя по  $Z$ :

$$\frac{\partial(\delta(Z)^2)}{\partial Z} = 2(a^2 + b^2)Z + 2(ba + cd);$$

приравняв частную производную нулю, окончательно получим:

$$Z = -\frac{ba + cd}{a^2 + c^2} = -\frac{(\tilde{x}_l - \tilde{x}_r) \cdot (X_{Z=0}^l - X_{Z=0}^r) + (\tilde{y}_l - \tilde{y}_r) \cdot (Y_{Z=0}^l - Y_{Z=0}^r)}{(\tilde{x}_l - \tilde{x}_r)^2 + (\tilde{y}_l - \tilde{y}_r)^2}. \quad (2.5.11)$$

Выражение (2.5.11) не определено при

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_l &= \tilde{x}_r; \\ \tilde{y}_l &= \tilde{y}_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.5.12)$$

Очевидно, что это условие выполняется при совпадающих элементах внешнего ориентирования обоих снимков стереопары и, соответственно, нулевом параллаксе. Если элементы ориентирования не совпадают, то для реальной пары аэрофотоснимков с небольшими углами наклона и разворота

$$\tilde{x} \approx \frac{x}{f}; \quad \tilde{y} \approx \frac{y}{f}.$$

В этом случае условия (2.5.12) могут выполняться только при

$$\left. \begin{aligned} x_l &\approx x_r; \\ y_l &\approx y_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.5.13)$$

Условие (2.5.13) это также условие совпадения обоих снимков. Таким образом, формула (2.5.11) даёт единственное значение превышения  $Z$ , если базис фотографирования отличен от нуля.

При нулевых углах наклона и разворота снимков  $\tilde{y}_l - \tilde{y}_r = 0$ ,  $\tilde{x}_l - \tilde{x}_r = \frac{p}{f}$ ,  $B = X_s^l - X_s^r$ ,  $X_{Z=0}^l - X_{Z=0}^r = -H_f \frac{p}{f} - B$ . В этом случае (2.5.11) принимает вид:

$$Z = -\frac{\frac{p}{f} \left( -H_f \frac{p}{f} - B \right)}{\left( \frac{p}{f} \right)^2} = \frac{H_f \frac{p}{f} + B}{\frac{p}{f}} = H_f + B \frac{f}{p}. \quad (2.5.14)$$

Но из (2.5.3)  $B \frac{f}{p} = -Z_{S_l}$ , тогда  $Z = H_f - Z_{S_l}$ , то есть в идеальном случае результаты расчета превышений по традиционным методом по формулам (2.5.1) и (2.5.2) и разработанным методом минимальных остаточных параллаксов полностью совпадают.

Для проверки предложенной методики были выполнены вычислительные эксперименты, которые показали, что точность расчета превышений методом минимальных остаточных параллаксов для  $|\delta| \leq 200$  мкм не отличается от точности расчета по формулам (2.5.1 - 2.5.4). Формула (2.5.11) является строгой и дает значение превышения на местности, даже если погрешности определения элементов ориентирования снимков велики.

Для того чтобы преобразовать нерегулярную матрицу рельефа в регулярную, необходимо выполнить интерполяцию значений высот в узлах регулярной сетки. Для этого предложен целый ряд подходов, которые можно разделить на следующие группы:

- Интерполяция с весом, обратным расстоянию или радиометрическая интерполяция [44]. Идея этой группы методов состоит в том, что высоты в узлах регулярной сетки рассчитываются как сумма взвешенных значений высот нерегулярной матрицы рельефа. При этом весовые коэффициенты

находятся в обратной зависимости от расстояния между данным узлом сетки и координатами данного отсчета нерегулярной модели. Весовой коэффициент может быть обратно пропорционален расстоянию, или выражаться более сложными формулами. Сумма весовых коэффициентов нормируется к единице. К достоинствам этой группы методов можно отнести простоту реализации и высокую эффективность, а также совпадение регулярной и нерегулярной моделей рельефа в точках измеренной высоты. Последнее свойство обусловлено тем, что в таких точках вес ближайшего отсчета стремится к бесконечности, а его нормированное значение к единице. Методы обладают также сглаживающим эффектом и являются неитерационными, т.е. значения в узлах сетки вычисляются за один проход матрицы. Основным недостатком этой группы методов состоит в образовании локальных экстремумов модели рельефа вокруг точек исходной нерегулярной матрицы, так называемых «бычьих глаз». Для устранения этого эффекта применяются сглаживающие фильтры или так называемый метод Шепарда, специально разработанный для этой цели.

- Методы поверхностей минимальной кривизны (сплайнов) относятся к итерационным способам интерполяции и широко применяются для построения моделей рельефа. В основе этих методов лежит моделирование поверхности с ограниченной кривизной, аналогичной эластичной пластине, проходящей через узлы нерегулярной модели. Достоинствами такого подхода являются сравнительно высокая эффективность и получение максимально гладких моделей рельефа. Основным недостатком состоит в том, что методы поверхностей минимальной кривизны в общем случае не обеспечивают сохранения значений нерегулярной модели в выходной матрице, так как при наличии резких перепадов рельефа

проведение поверхности с ограниченной кривизной через все отсчеты не всегда возможно.

- Методы полиномиальной регрессии относятся к функциональным способам моделирования рельефа. Форма поверхности аппроксимируется порождающими полиномами, обычно до третьего порядка. Для этих методов характерны потери мелких подробностей рельефа и точное моделирование крупных его форм. При увеличении порядка порождающих полиномов наблюдается появление артефактов, несвойственных исходной нерегулярной модели.

- Метод линейной триангуляции заключается в построении треугольных ячеек на узлах исходной модели. Он эффективен для умеренного количества отсчетов высот, но его производительность быстро падает с увеличением объема исходной модели. Основное достоинство таких методов состоит в том, что при достаточно подробных исходных данных они точно передают крутые обрывы и даже вертикальные участки рельефа. В ряде случаев, например при исходной модели в виде профилей рельефа, триангуляция становится неэффективной из-за неоднозначности формирования треугольников.

- Методы вариограмм (Kriging) - группа наиболее гибких и точных методов интерполяции. Эти методы лежат в основе большинства пакетов программ построения моделей рельефа ведущих фирм. Для них характерна тенденция к учету генеральных свойств рельефа и, в то же время, сохранение мелких его подробностей. Влияние отсчетов исходной модели на значения высот в узлах регулярной сетки определяется при помощи вариограмм. При этом применяются квадратические, сферические, линейные, экспоненциальные и другие вариограммы. Единственным, пожалуй, недостатком этой группы методов является алгоритмическая сложность их реализации и, соответственно, низкое быстродействие.

- Комбинированные методы основаны на использовании различных способов интерполяции, в зависимости от характера исходных данных.

В последнее время разработан ряд методов интерполяции, специально предназначенных для геоинформационных систем. Особенностью регулярных матриц рельефа для таких систем является то, что эти матрицы используются в них для автоматического построения горизонталей. Согласно общепринятым требованиям к содержанию топографических карт, горизонтали должны наглядно отражать геоморфологические особенности строения рельефа местности. Поэтому проведение горизонталей - это, в известной степени, творческая задача, требующая от оператора специальных знаний в области геологии и, в некоторых случаях, дополнительной информации о районе картографирования [29]. В результате специально проведенных исследований выяснилось, что горизонтали проводятся различными способами не только при помощи разных алгоритмов, но и вручную, разными исполнителями - картографами.

Хотя в настоящей работе не ставится задача автоматического проведения горизонталей, выходная модель рельефа должна быть пригодна для этой цели и не содержать артефактов, порождающих ложные горизонтали.

Одним из наиболее интересных методов построения регулярных матриц рельефа представляется метод концентрической интерполяции (convergent gridding), разработанный фирмой Radian Corporation специально для ГИС - приложений.

Процесс интерполяции начинается с построения начального приближения. При этом значения превышений в измеренных точках распространяются на соседние 16 узлов регулярной сетки. Если какой-либо из этих узлов подвергается влиянию нескольких исходных отсчетов, то эти

влияния учитываются с нормированным весом, обратно пропорциональным расстоянию от узла до измеренной точки. Шаг сетки для начального приближения выбирается крупным, в несколько раз меньше, чем характерное расстояние между исходными отсчетами высот.

Затем полученная сетка экстраполируется на узлы, для которых значения не были вычислены на первой стадии процесса. При этом учитывается величина градиента в направлении экстраполяции. Если эта величина не поставляется вместе с исходными отсчетами, она рассчитывается из значений высот в узлах сетки начального приближения.

После этого повторяется процесс распространения свойств исходных точек на соседние узлы сетки, но уже с учетом второй производной в направлении экстраполяции. Далее выполняется сгущение регулярной сетки методом биквадратической интерполяции. Затем снова выполняются процедуры экстраполяции свойств на узлы сгущенной сетки. Последние две операции повторяются до тех пор, пока сетка не достигнет необходимой точности и разрешения.

Теоретическое обоснование этого метода можно найти, используя формулу Тейлора. Если функция имеет все производные в некоторой точке  $a$ , то, зная поведение функции в этой точке, можно предсказать ее значение в произвольной точке  $x$ . По существу, метод концентрической интерполяции основан на этом принципе. Предполагается, что вычислив первую и вторую производные в узлах исходной нерегулярной матрицы, можно достаточно точно предсказать значения превышений в узлах регулярной сетки.

Разнообразие методов построения матриц высот обусловлено противоречивостью требований к свойствам таких матриц. Поэтому при разработке методики ортотрансформирования цифровых изображений необходимо обеспечить возможность выбора алгоритма интерполяции в

зависимости от свойств исходных данных или предусмотреть экспорт нерегулярной матрицы высот в распространенных форматах обмена данными, например: DBF, Autocad DXF, Microsoft Excel XLS, WinSurf GRD и т.д. Последнее решение позволит выполнять интерполяцию матриц рельефа при помощи недорогого программного обеспечения широкого применения.

При разработке технологии OrthoPhoto-SDS для формирования регулярной матрицы рельефа был выбран метод концентрической интерполяции.

## 2.6 Автоматизация фотограмметрических измерений

В процессе фотограмметрической обработки пары цифровых аэрофотоснимков выполняются измерения координат меток на прикладной рамке АФА, соответственных точек для взаимного и внешнего ориентирования, а также для построения цифровой модели рельефа. От точности этих измерений непосредственно зависит точность всех картографических материалов, которые могут быть получены в процессе дальнейшей обработки аэрофотоснимков. Поэтому современная фотограмметрическая технология должна предусматривать возможность выполнения измерений с подпиксельной точностью. Выполнение таких измерений вручную требует высокой концентрации внимания оператора и приводит к быстрой его утомляемости.

В то же время для полной обработки пары снимков требуется значительное количество точных измерений: для внутреннего ориентирования - 8-16, для взаимного ориентирования - 24 и более, для



внешнего ориентирования - 8 и более. Таким образом, только для ориентирования пары снимков необходимо выполнить более 40 измерений точек с подпиксельной точностью. Для формирования ЦМР требуется еще большее количество измерений. При практических испытаниях OrthoPhoto-SDS на аэрофотоснимках масштаба 1:2000 плоскоравнинной местности Ярковского района Новосибирской области было экспериментально установлено, что для формирования ЦМР необходимо не менее 100 пар измерений, в противном случае при монтаже ортоснимков несовпадение объектов становится заметным, особенно вдоль берегов рек и ручьев. Для всхолмленной и горной местности число измерений должно быть значительно большим. В современных ЦФС на базе рабочих станций ЦМР строятся по результатам 50000 и более измерений [4]. Ясно, что такое количество измерений можно выполнить только при наличии развитых средств автоматизации.

Наряду с измерением точек при обработке снимков выполняется контроль качества измерений, отбраковка и переизмерение точек. В современной технологии цифрового ортотрансформирования эти процессы должны быть также автоматизированы.

Для поиска соответственных точек на цифровых изображениях применяются два подхода. Один из них основан на вычислении коэффициента корреляции между участками цифровых изображений или их свойств, а другой на предварительном выделении контуров объектов, изобразившихся на снимках.

При разработке OrthoPhoto-SDS в основном использовались методы автоматизации, описанные в литературе. Исследования выполнялись лишь с целью проверки эффективности известных алгоритмов. В процессе этих исследований были получены следующие результаты:

- разработаны алгоритмы машинной интерпретации цветных изображений [24];

- получен эффективный критерий сходства двух фрагментов цифровых изображений;
- разработана методика автоматического поиска измерительных марок на прикладной рамке АФА.

Методика автоматизированного контроля и переизмерения пар точек для взаимного ориентирования будет рассмотрена в разделе 3, посвященной реализации программного обеспечения OrthoPhoto-SDS.

Проблема алгоритмического восприятия цветных изображений порождается тем, что сложнейшая зрительная система человека до сих пор не изучена до конца. Исследования в этой области приобрели особую актуальность со времени изобретения цветного телевидения и продолжают до сих пор. Известно большое количество публикаций, посвященных этому вопросу как в традиционной [46,47,48], так и в электронной форме [49,50]. В последние годы разработаны международные стандарты, определяющие типовые характеристики цветовой чувствительности человеческого глаза [51,52]. Для измерения этих характеристик требуются дорогостоящие широкомасштабные эксперименты, поэтому достоверные результаты были получены сравнительно недавно.

Если цветовая чувствительность алгоритма не соответствует чувствительности человеческого глаза, то алгоритм будет воспринимать невидимые человеком особенности изображения и не будет воспринимать отличия, заметные на глаз. В то же время, производители фотоматериалов стремятся получить хорошее качество цветного изображения именно для визуального восприятия и не стремятся устранять «невидимые» дефекты. Этот эффект хорошо известен и проявляется при использовании для машинной обработки значений яркости красной (R), зеленой (G), и синей (B) цветных компонент, в виде которых обычно представлен пиксел цифрового изображения в ЭВМ.

Для машинного анализа цветных цифровых изображений необходимо преобразовать значения  $R$ ,  $G$ , и  $B$  в другие, более информативные количественные характеристики, отфильтровав при этом невидимые глазу шумы. Для решения этой задачи были предложены системы кодирования цвета HLS (Hue, Lightness, Saturation) и HSB (Hue, Saturation, Brightness), основанные на определении цветного пиксела тремя характеристиками: яркостью, насыщенностью (или «разбавленностью белой краской»), и собственно цветом. Хотя эти системы получили широкое распространение в пакетах машинной графики, для алгоритмического анализа изображений они подходят не лучше, чем система RGB, так как преобразования RGB-HLS и RGB-HSB не основаны на достоверных данных о чувствительности человеческого глаза. Например, в преобразовании RGB-HLS яркость  $L = \frac{R + G + B}{3}$ , в то же время известно, что чувствительность глаза к синей компоненте  $B$  почти в 10 раз (!) ниже, чем к зеленой компоненте  $G$ . Стандарт [51], например, рекомендует следующую формулу для яркости:

$$L = 0,212671 \cdot R + 0,715160 \cdot G + 0,072169 \cdot B. \quad (2.6.1)$$

Для надежности подобных вычислений понятия значений цветных компонент  $R$ ,  $G$  и  $B$  должны быть определены сами по себе и стандартизованы. Стандарт [52] определяет их как координаты  $(x, y)$  на стандартном локусе цветов:  $R$  - (0,64, 0,33),  $G$  - (0,30, 0,60),  $B$  - (0,15, 0,06). Белый цвет соответствует координатам (0,3127, 0,3290). Любой цвет на локусе внутри треугольника с вершинами в точках первичных цветов можно представить путем смешения этих цветов, т.е. менее 60% всех цветов, различимых глазом. В литературе этот треугольник обозначают термином gamut. Таким образом, при сканировании цветного аэрофотоснимка более 40% информации теряется только за счет несовершенства моделирования цвета в виде комбинации  $R$ ,  $G$ , и  $B$  цветных компонент.

Современные сканеры, как правило, удовлетворяют упомянутым стандартам, поэтому программное обеспечение OrthoPhoto-SDS разработано в расчете на применение таких сканеров. Устаревшие модели сканеров требуют колориметрической калибровки, которая на наш взгляд, не вписывается в технологию настольной фотограмметрической системы. Разработанные алгоритмы работают менее надежно на изображениях, оцифрованных при помощи нестандартных сканеров.

В соответствии со стандартом CIE [52] в OrthoPhoto-SDS используются линейная модель восприятия цвета CIE XYZ и нелинейная модель CIE  $L^*u^*v^*$ <sup>3</sup>. Линейная модель по сравнению с моделью RGB обеспечивает при вычислениях выигрыш около 6:1. Применение нелинейной модели требует гораздо большего количества вычислений, но при этом достигается выигрыш 80:1.

Цветовые координаты XYZ называются трехстимульными величинами (tristimul values). Величина Y имеет физический смысл субъективной яркости, а величины X и Z - дополнительными координатами, определяющими цвет отдельно от яркости. В отличие от модели RGB модель XYZ определяет любой цвет, доступный для восприятия глазу человека. Преобразование RGB-XYZ выполняется линейным оператором:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,412453 & 0,35758 & 0,180423 \\ 0,212671 & 0,71516 & 0,072169 \\ 0,019334 & 0,119193 & 0,950227 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2.6.2)$$

Обратное преобразование

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,240479 & -1,53715 & -0,498535 \\ -0,969256 & 1,875991 & 0,041556 \\ 0,055648 & -0,204043 & 1,057311 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.6.3)$$

---

<sup>3</sup> По-английски произносится l-star, u-star, v-star, по-русски, видимо, следует произносить l, u, v со звездочкой.

содержит отрицательные и превышающие единицу коэффициенты, что может привести к отрицательным или превышающим предельную величину значениям RGB. Это будет означать, что данный цвет XYZ лежит за пределами gamut и не может быть представлен в виде модели RGB.

Модель  $L^*u^*v^*$  обеспечивает эквивалентное восприятие (perceptual uniform) цвета. Это означает, что, например, малое изменение любого из трех компонент модели соответствует визуально малому изменению цвета, независимо от значений других двух компонент. Для перехода от значений RGB к значениям  $L^*u^*v^*$  необходимо выполнить вначале переход к модели XYZ (2.6.2) и задаться стандартным трехстимульным значением белого цвета ( $X_n, Y_n, Z_n$ ), которое в литературе также называется точкой белого (white point). CIE рекомендует следующую процедуру вычисления значений  $L^*u^*v^*$ :

- вычислить

$$L^* = -16 + 116 \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3}; \quad (2.6.4)$$

- определить промежуточные значения:

$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} u'_n &= \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \\ v'_n &= \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \end{aligned} \right\} \quad (2.6.5)$$

- вычислить значения  $u^*$  и  $v^*$ :

$$\left. \begin{aligned} u^* &= 13L^* (u' - u'_n) \\ v^* &= 13L^* (v' - v'_n) \end{aligned} \right\}. \quad (2.6.6)$$

Преобразование XYZ -  $L^*u^*v^*$  подобрано таким образом, чтобы его можно было эффективно реализовать алгоритмически, с максимальным использованием целочисленной арифметики.

Если не требуется высокая скорость вычислений, то можно применять модель CIE  $L^*a^*b^*$ :

$$\left. \begin{aligned} a^* &= 500 \cdot \left( \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \\ b^* &= 200 \cdot \left( \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.6.7)$$

значение  $L^*$  вычисляется по формуле (2.6.4), как и в предыдущем случае. Эффективность применения модели  $L^*a^*b^*$  примерно такая же, как модели  $L^*u^*v^*$ .

Величины  $L^*$ ,  $u^*$  и  $v^*$  являются информативными характеристиками цветного цифрового изображения. В разработанной методике автоматизации измерений они применяются для вычисления критерия сходства фрагментов изображений стереопары.

Проблеме критерия сходства участков цифровых изображений посвящено значительное количество исследований [53,54,55 и др.]. Как уже отмечалось, коэффициент корреляции двух участков цифровых изображений является малоэффективным критерием сходства, особенно для цветных снимков. Прежде, чем вычислять критерий сходства фрагментов изображений (КСФИ), необходимо выделить их информативные свойства. В общем случае, независимых информативных свойств может быть несколько. Поэтому КСФИ должен формироваться на основе анализа произвольного количества функций двух фрагментов исходных изображений. В разработанной технологии для этого используется нормированная сумма взвешенных коэффициентов сходства фрагментов:

$$K_{\text{СФИ}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i k_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (2.6.8)$$

где  $k_i$  - частный коэффициент сходства фрагментов по  $i$  свойству,  $w_i$  - вес, характеризующий информативность  $i$  свойства,  $n$  - число принимаемых во внимание независимых информативных свойств фрагментов изображения.

Частные коэффициенты сходства  $k_i$  вычисляются как среднеквадратичный коэффициент корреляции между функциями, выражающими  $i$  свойство  $F_i(x)$  двух фрагментов изображения  $x_1$ ,  $x_2$  и шаблоном  $T_i(x_1, x_2)$ , который формируется из свойств обоих фрагментов:

$$k_i = \sqrt{\frac{1}{2D(T_i(x_1, x_2))} \left( \frac{\text{cov}\{F_i(x_1), T_i(x_1, x_2)\}^2}{D(F_i(x_1))} + \frac{\text{cov}\{F_i(x_2), T_i(x_1, x_2)\}^2}{D(F_i(x_2))} \right)}, \quad (2.6.9)$$

где  $D(x)$  - дисперсия величины  $x$ .

В простейшем случае шаблон может формироваться как усредненное  $i$  свойство двух фрагментов изображения:

$$T_i(x_1, x_2) = \frac{F_i(x_1) + F_i(x_2)}{2}. \quad (2.6.10)$$

Значения весовых коэффициентов  $w_i$  могут быть вычислены экспериментально, по статистически значимому количеству измеренных вручную соответственных точек из условия максимума коэффициента  $K_{\text{сфи}}$ . При этом автомат поиска соответственных точек будет настроен на работу с конкретными снимками. Для этого при реализации OrthoPhoto-SDS, был предусмотрен экспорт данных в пакет Microsoft Excel. Задача определения оптимальных весовых коэффициентов решалась с использованием функции нелинейной множественной оптимизации этого пакета.

Анализ в качестве информативных свойств фрагментов изображения эквивалентных величин  $L^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$  увеличивает эффективность подбора соответственных точек на основе корреляционного анализа, но не устраняет основные недостатки этого подхода. Эти недостатки хорошо известны и проявляются при анализе изображений вертикальных объектов, городской застройки, лесных массивов и рельефа с крутыми склонами, а также при

значительном взаимном развороте снимков. Для этих случаев в OrthoPhoto-SDS предусмотрена возможность ручного измерения координат соответственных точек и уточнения результатов работы автомата при помощи подпиксельного редактора (см. раздел 3).

Автоматизации фотограмметрических измерений применяется также на этапе внутреннего ориентирования цифровых аэрофотоснимков.

Разворот аэрофотоснимков при установке их в сканирующее устройство обычно не превышает нескольких градусов, поэтому для автоматического обнаружения координатных меток в разработанной технологии применяется корреляционный критерий сходства фрагмента изображения с шаблоном:

$$K_C = \frac{\text{cov}\{x_t, x\}}{\sqrt{D(x_t) D(x)}}, \quad (2.6.11)$$

где  $x_t$  - цифровое изображение шаблона,  $x$  - анализируемый фрагмент изображения. Изображения шаблонов порождаются генератором шаблонов на основе формального описания координатной метки.

Как правило, на аэрофотоснимках присутствуют изображения одного или двух типов меток. Каждый из этих типов представлен четырьмя изображениями координатной метки, развернутыми на 90 градусов друг относительно друга. Если метка имеет размер 1-2 см, то при сканировании с растром 800 dpi цифровое изображение ее окрестностей будет представлено массивом размером свыше 500 КБайт. Прямое применение корреляционных критериев сходства в таком объеме цифрового изображения потребует неприемлемо длительных вычислений. Поэтому поиск меток выполняется по принципу пирамиды. При этом последовательно анализируются изображения метки, уменьшенные в 5, 4, 3, и 2 раза, с последовательным уточнением измеряемых координат. Генератор шаблонов синтезирует изображения меток с заданным масштабом и углом разворота.

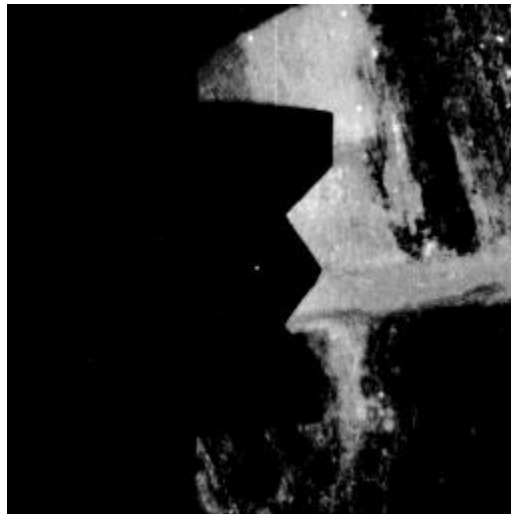
На рис. 2.5 приводится изображение левой координатной метки аэрофотоснимка, введенное растром 600 dpi в масштабе 1:5 (а) и в масштабе



1:1 (б). На рис. 2.6. изображение рис. 2.5 (а) сильно увеличено, так чтобы была видна пиксельная структура. Точные координаты метки соответствуют светлой точке на изображении метки рис. 2.5 (б). Для автоматического поиска метки используются два ее свойства: наличие темного угла - «острия» и светлой точки. В соответствии с этим генератор шаблонов порождает соответствующие шаблоны рис. 2.7 (а) и (б).



а)



б)

Рис 2.5 а - изображение левой координатной метки, уменьшенное в 5 раз для поиска начального приближения; б - изображение этой же метки в масштабе 1:1 (растр сканирования 600 dpi).

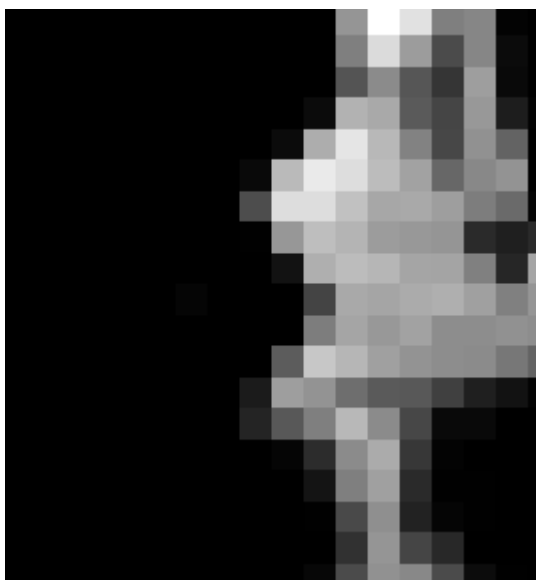
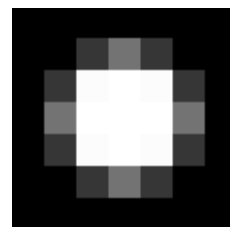


Рис. 2.6 Пиксельная структура изображения координатной метки для поиска начального приближения. Визуальное сравнение шаблона 2.7а и этого изображения позволяет предположить, что в данном случае «острие» координатной метки может быть уверенно обнаружено.



а)



б)

Рис 2.7 Шаблоны, генерируемые для поиска «острия» координатной метки - (а), и светлой точки (б). Сильно увеличены.

На уменьшенных изображениях координатной метки светлая точка теряется, поэтому для поиска начальных приближений используется только шаблон рис. 2.7а. Окончательно координаты уточняются при помощи шаблона рис. 2.7б, так как положение «острия» не нормируется с высокой точностью.

Алгоритм работает быстро, так как размеры шаблонов невелики, всего 9х9 (а) и 7х7 (б) пиксел.

Несмотря на простоту, разработанный алгоритм уверенно обнаруживал координатные метки, если они проектировались на относительно светлом фоне.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

При разработке OrthoPhoto-SDS предполагалась реализация новых и экспериментальная проверка известных алгоритмов, поэтому в программное обеспечение был включен модуль, обеспечивающий экспорт для анализа разнообразной информации в пакет Microsoft Excel, а также экспорт двумерных массивов данных различной природы в виде псевдоокрашенных цифровых изображений. В подразделе 3.1 приводятся избранные экспериментальные данные, характеризующие принятые технические решения, в подразделе 3.2 - технические характеристики и результаты испытаний пакета программ OrthoPhoto-SDS

#### 3.1 Результаты вычислительных экспериментов

##### 3.1.1 Результаты испытаний автомата-коррелятора.

В технологии OrthoPhoto-SDS предусмотрено два режима поиска соответственных точек. *Полуавтоматический режим* реализует двумерный поиск. Необходимость в двумерном поиске возникает только в тех случаях, когда элементы взаимного ориентирования стереопары неизвестны. При этом необходимо измерить сравнительно небольшое количество координат, - обычно для взаимного ориентирования измеряются координаты 12 пар соответственных точек. Поэтому для двумерного поиска в полуавтоматическом режиме OrthoPhoto-SDS используется приближение, задаваемое оператором вручную. Для этого он приближенно указывает

положение точки на правом и левом снимке, а автомат уточняет соответствие координат.

На рис. 3.1 - 3.5 приводятся результаты двумерного поиска соответственных точек в полуавтоматическом режиме. На фрагменте левого снимка (рис. 3.1а) оператором отмечены четыре точки. Будем считать, что они пронумерованы сверху вниз цифрами от 1 до 4. На соответствующем фрагменте правого снимка (рис. 3.1б) соответственные точки установлены в полуавтоматическом режиме, в результате двумерного поиска в диапазоне  $\pm 16$  пиксел.

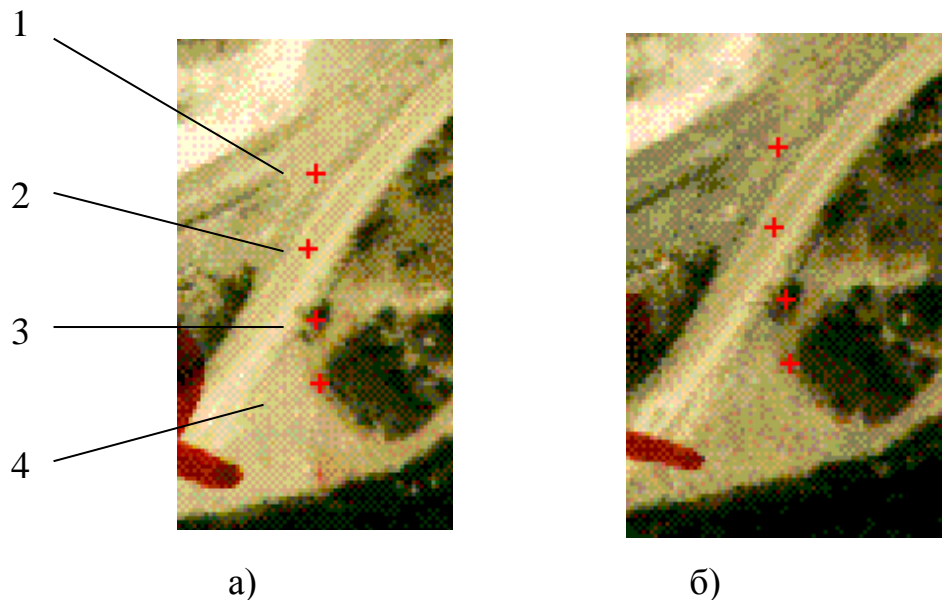


Рис. 3.1 Результаты двумерного полуавтоматического поиска соответственных точек. а - фрагмент левого снимка, точки отмечены оператором. Точки 1 и 2 не являются контурными (нумерация точек сверху вниз). б - фрагмент правого снимка, точки найдены автоматически в диапазоне  $\pm 16$  пиксел. Начальное приближение указано оператором для всех точек справа от их точного положения.

Точки 1 и 2 расположены вдали от ярко выраженных деталей изображения. Градиент яркости изображения вдоль направления дороги

почти равен нулю. Таким образом, точки 1 и 2, в отличие от точек 3 и 4, являются «неудобными» для автоматического подбора. Тем не менее, автомат-коррелятор OrthoPhoto-SDS уверенно находит соответственные точки во всех четырех случаях.

Надежность подбора иллюстрируют графики рис. 3.2 - 3.5. На этих графиках вдоль вертикальной оси отложена величина меры сходства в процентах, а по горизонтальным осям относительные координаты пикселей цифрового изображения фрагмента правого снимка, рассматривавшихся в процессе подбора (ось Y на всех графиках направлена вглубь диаграммы).

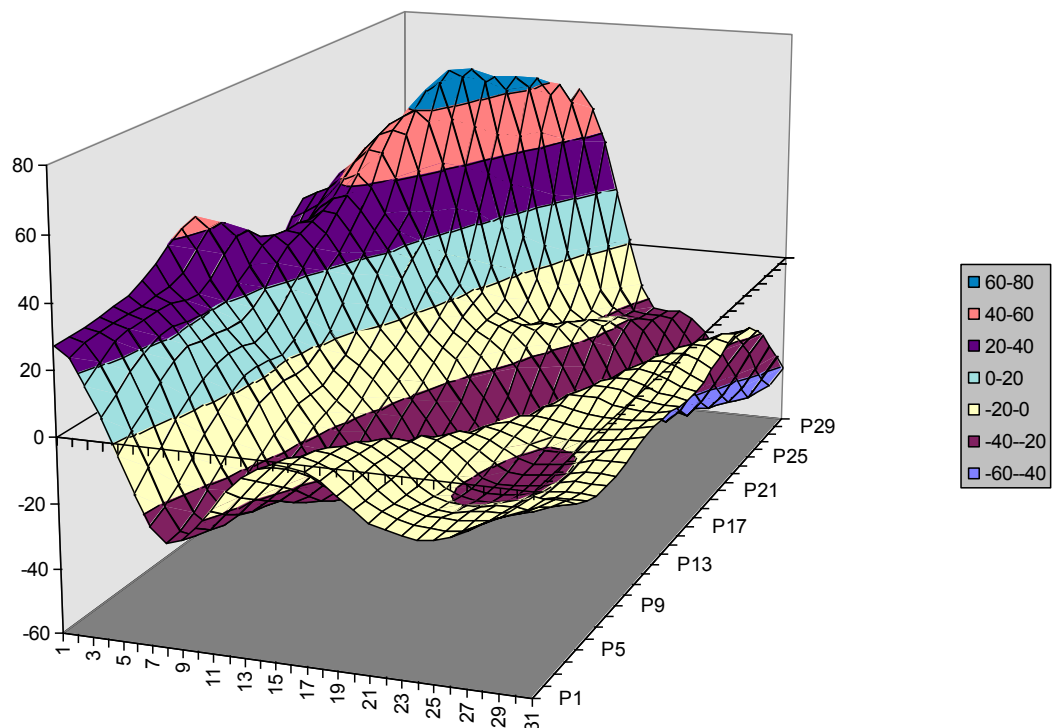


Рис 3.2 Изменение величины меры сходства в процессе двумерного поиска для точки 1 (рис. 3.1). Вдоль дороги, изобразившейся на снимках, модуль градиента меры сходства минимален, однако вполне достаточен для уверенного определения положения соответственной точки на правом снимке. Максимальная величина меры сходства 70,5 %.

Без использования автомата-коррелятора точки, расположенные подобно точкам 1 и 2, не могут применяться для взаимного ориентирования или формирования модели рельефа, так как «на глаз» в таких местах

измерить координаты очень сложно. В то же время для всех четырех случаев максимум меры сходства достаточно ярко выражен для надежного измерения координат в полуавтоматическом режиме.

В качестве исходных материалов здесь и далее использованы цветные аэрофотоснимки масштаба 1:6000, фокусное расстояние 153 мм, базис фотографирования 426 м, растр сканирования 600 dpi. Взаимный разворот снимков  $\Delta\kappa \approx 1,7^\circ$ ,  $\Delta\omega \approx 1,5^\circ$ , то есть условия съемки являются вполне типичными для производственных материалов.

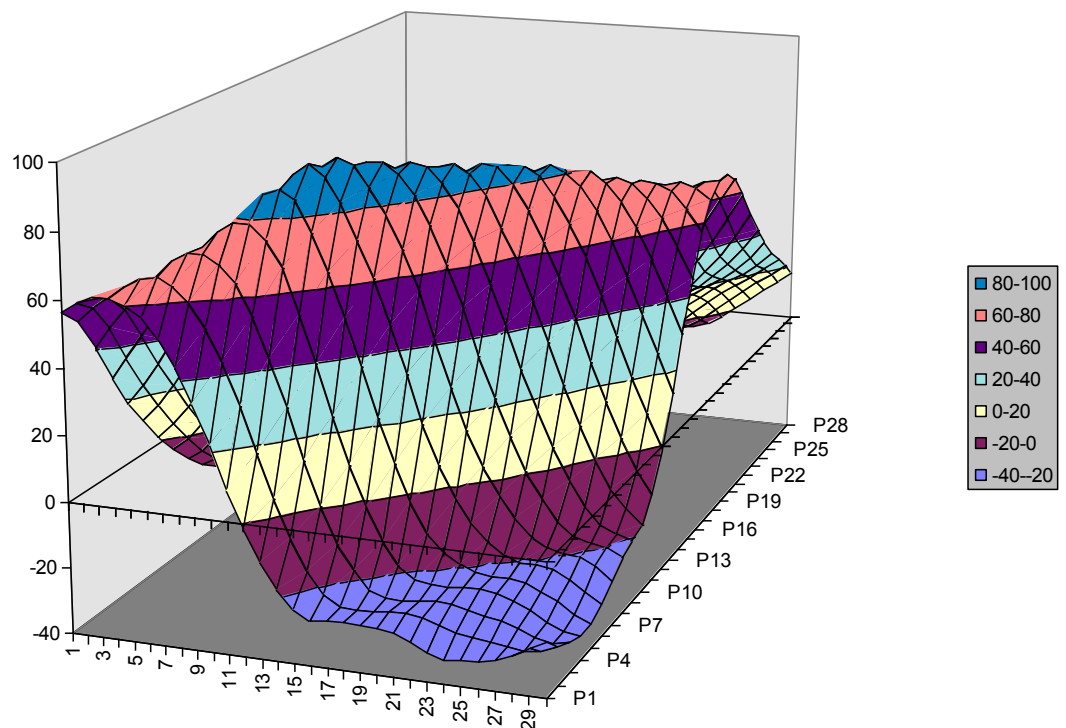


Рис. 3.3 Величина меры сходства при двумерном поиске неконтурной точки 2 (рис. 3.1). Максимальная величина меры сходства 93,2 %, что на 1,7 % больше, чем второе по величине ее значение.

После взаимного ориентирования снимков поиск соответственных точек можно выполнять вдоль прямой, проходящей через данную точку левого снимка и параллельной базису фотографирования. Положение точки правого снимка на этой прямой определяется величиной превышения на местности. В технологии OrthoPhoto-SDS автоматический подбор соответственных точек применяется, в основном, для формирования цифровых моделей рельефа. Диапазон подбора задается в форме значений минимального и максимального превышения на местности.

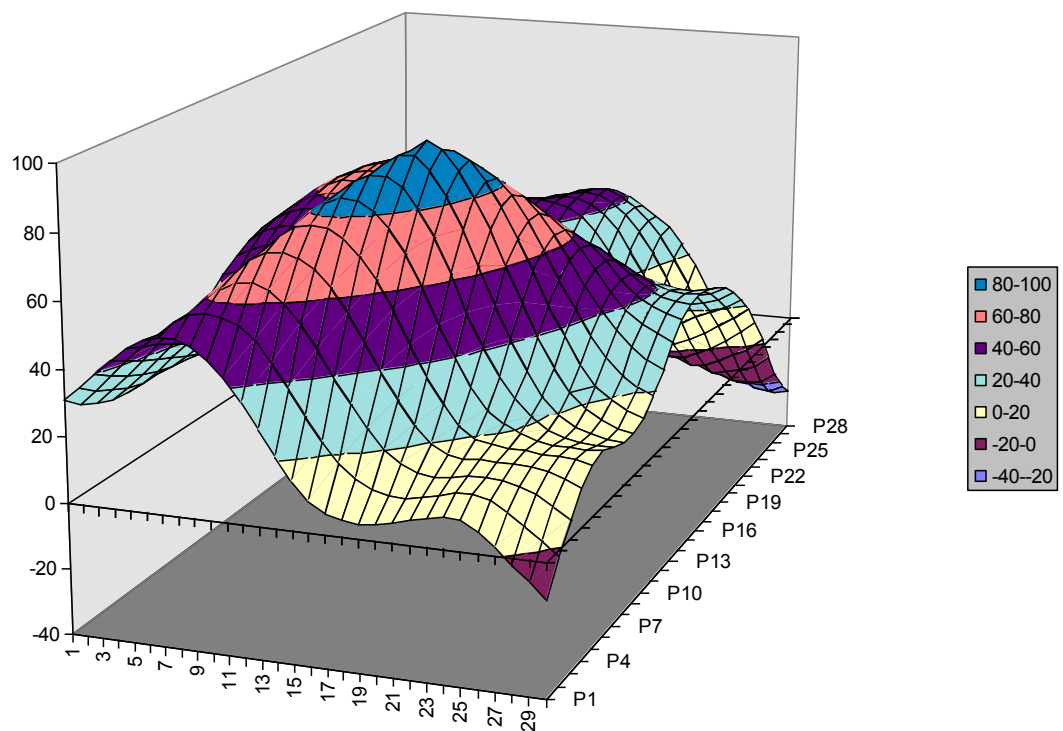


Рис. 3.4 Величина меры сходства при двумерном поиске точки 3 (рис. 3.1). Максимум, соответствующий точному подбору пары, выражен более ярко, чем в двух предыдущих случаях. Значение меры сходства в точке максимума 96,2 %.



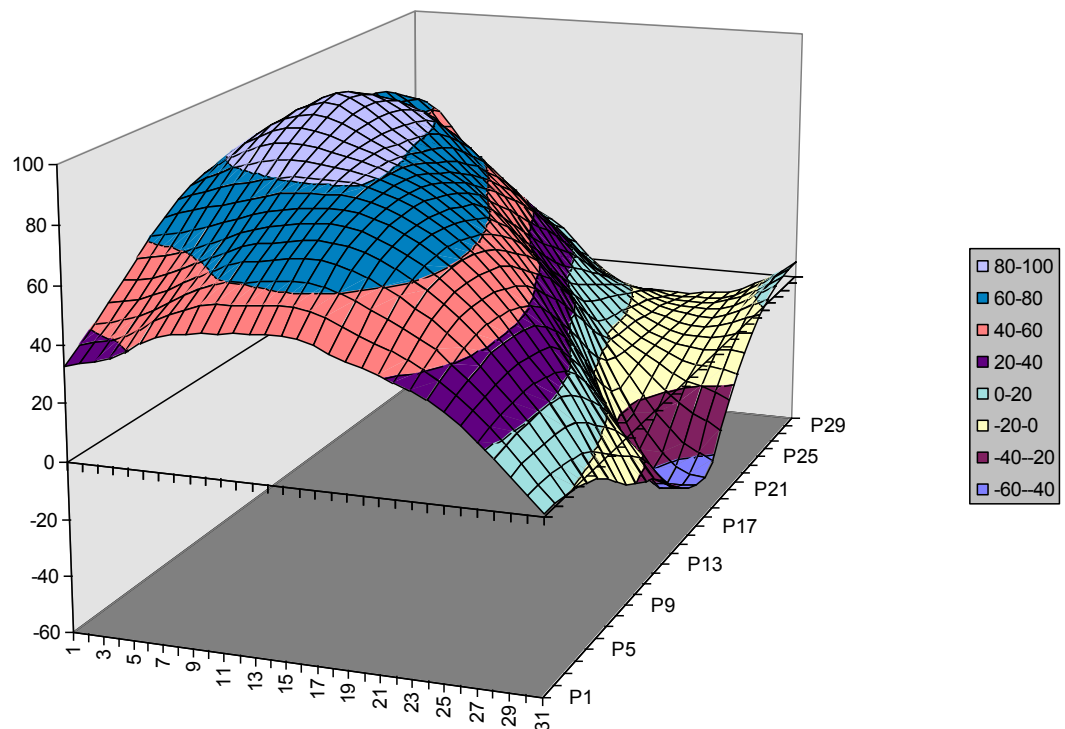
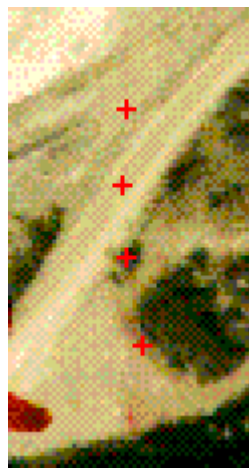
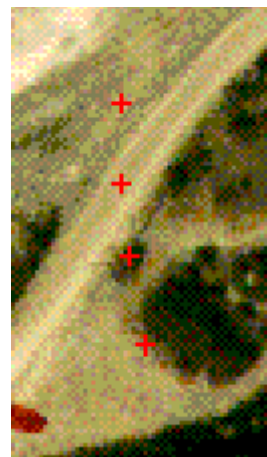


Рис. 3.5 Поведение меры сходства при подборе соответствия для контурной точки 4 (рис. 3.1). График имеет ярко выраженный симметричный максимум величиной 96,0 %.



а)



б)

Рис. 3.6 Результат одномерного поиска соответственных точек в автоматическом режиме. На левом снимке (а) точки указаны оператором, на правом снимке (б) - обнаружены автоматом-коррелятором в процессе поиска вдоль прямой, лежащей в базисной плоскости. Пределы поиска соответствуют диапазону превышений от -15 до +30 м в масштабе местности.

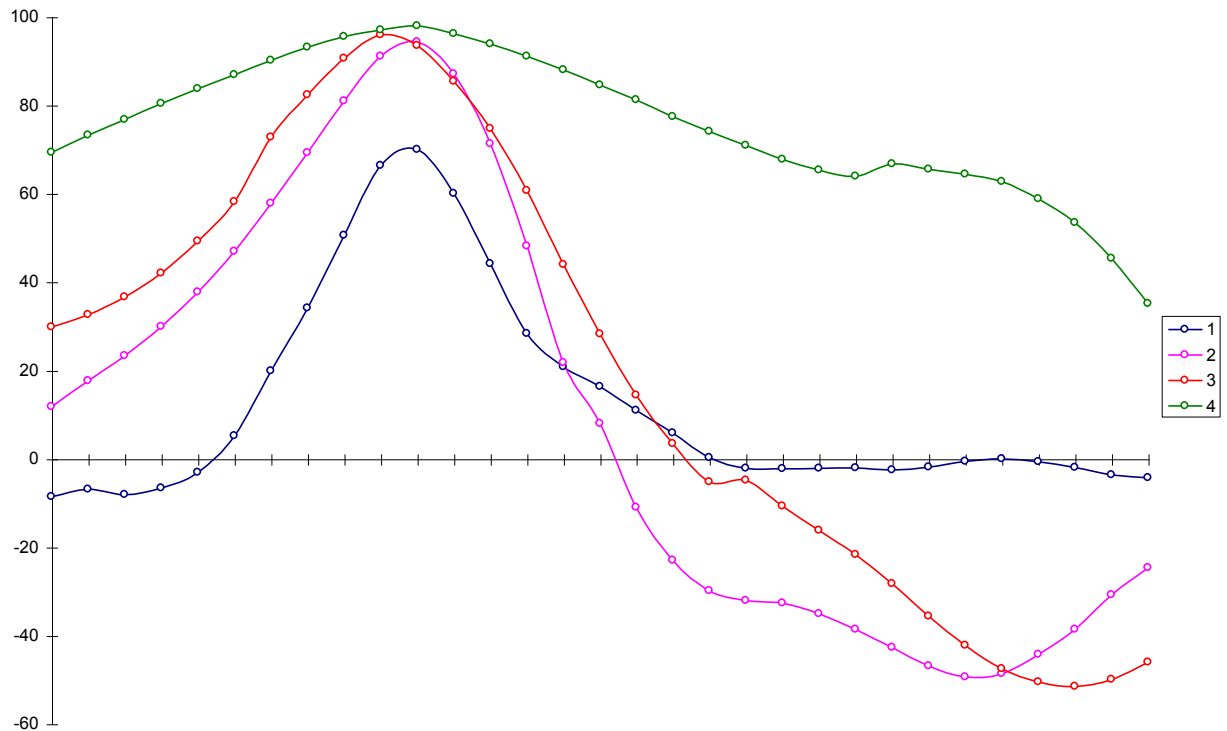


Рис. 3.7 Поведение меры сходства при одномерном автоматическом поиске соответственных точек 1-4 (рис. 3.6).

На рис. 3.6 представлены те же фрагменты аэрофотоснимков, что и на рис. 3.1, но подбор соответственных точек выполнен в автоматическом режиме. На рис. 3.7 приводятся соответствующие графики зависимости величины меры сходства от высоты на местности. Диапазон поиска соответственной точки от -15 до +30 м, что соответствует приблизительно 90 пикселям цифрового изображения. Дорога, изобразившаяся на снимках, пересекает базисную плоскость под значительным углом, поэтому неконтурные точки 1 и 2 в данном случае обнаруживаются увереннее, чем при двумерном поиске. В то же время для контурной точки 4 поведение меры сходства более плавное. Это обусловлено отсутствием мелких деталей изображения в ее окрестностях. Во всех случаях мера сходства имеет единственный, ярко выраженный симметричный максимум, соответствующий точным координатам соответственной точки правого снимка.

На крупномасштабных аэрофотоснимках нередко изображаются объекты, для которых автоматический подбор соответственных точек вызывает особые трудности. К ним относятся здания, крутые склоны, обрывы, лесные массивы, состоящие из крупных деревьев. На рис. 3.8 приводится результат автоматического одномерного поиска соответственных точек на изображении здания. На левом снимке (а) все точки указаны оператором на одной вертикальной прямой. На правом снимке (б) точки найдены автоматом-коррелятором OrthoPhoto-SDS в процессе одномерного поиска.



а)



б)

Рис. 3.8 Результаты одномерного автоматического поиска соответственных точек вдоль профиля, проходящего через здание высотой 22 м. На фрагменте левого снимка (а) изобразились участки стен, которых нет на фрагменте правого снимка (б) и наоборот. Это привело к ошибочному определению координат автоматом-коррелятором OrthoPhoto-SDS для некоторых точек. Надежно определены координаты точек 1, 5, 9 и 10 (нумерация точек сверху вниз).

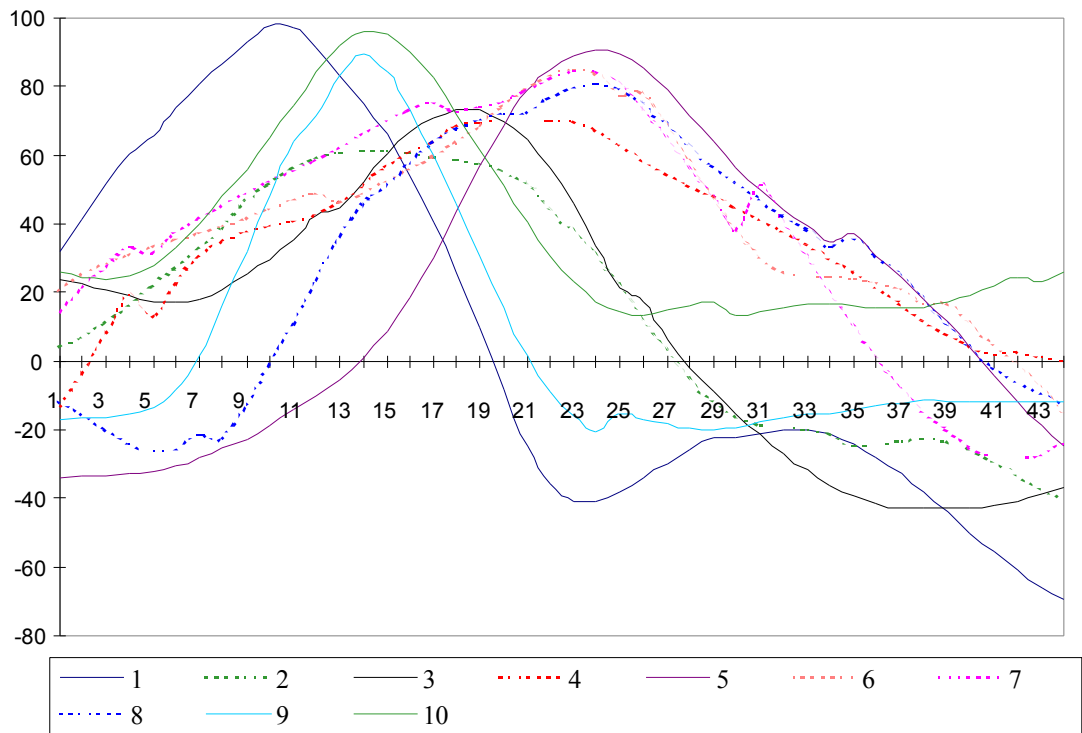


Рис 3.9 Поведение меры сходства при одномерном поиске десяти соответственных точек на стереоизображении здания (рис 3.8). Профили, не имеющие ярко выраженного максимума, отмечены пунктиром. Профиль 3 имеет симметричный максимум, хотя координаты в данном случае определены ошибочно. Ошибку можно диагностировать по величине максимума меры сходства, не превышающей 70%.

### 3.1.2 Результаты испытаний алгоритма ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок.

Алгоритм цифрового ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок является одним из основных предметов разработки в настоящей диссертации. Для его испытаний было написано специальное программное обеспечение, позволяющее визуализировать матрицы поправок и оценивать точность трансформирования.

На рис. 3.10 представлен фрагмент исходного аэрофотоснимка, на котором изобразилась зона перекрытия обработанной стереопары.



Рис. 3.10 Фрагмент левого снимка исходной стереопары. (зона перекрытия).

Для этого фрагмента при помощи программы OrthoPhoto-SDS была сформирована цифровая модель рельефа по результатам измерений координат 200 соответственных точек на исходной стереопаре (Рис. 3.11). Для визуализации ЦМР экспортирована в пакет WinSurfer.



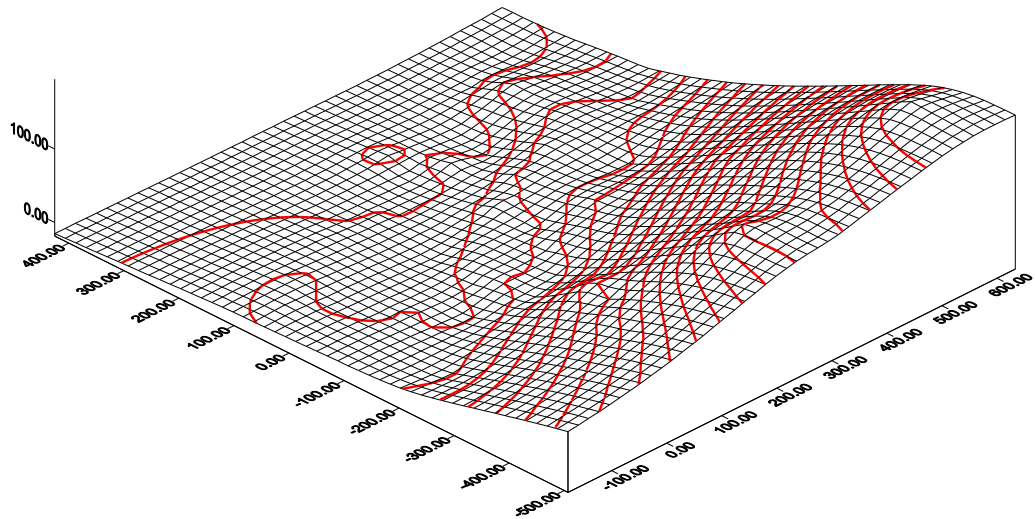


Рис. 3.11 Цифровая модель рельефа, сформированная при помощи программы OrthoPhoto-SDS. ЦМР визуализирована средствами программного обеспечения WinSurfer.

Матрицы обобщенных поправок по координатам  $X$  и  $Y$  были экспортированы в пакеты программ Microsoft Excel и Winsurfer для оценки точности метода трансформирования. На рис 3.12 а) визуализирована матрица обобщенных поправок по координате  $X$ , а на рис 3.12 б) матрица обобщенных поправок по координате  $Y$ . В соответствии с представленной в гл. 2 методикой формирования этих матриц, масштабы по осям абсцисс и ординат на рисунке кратны масштабу формируемого ортоснимка, а величина поправок задана в пикселах исходного цифрового аэрофотоснимка рис. 3.10.

В результате ортотрансформирования исходного снимка получен цифровой ортоснимок (рис. 3.13). В правом нижнем углу снимка превышения достигают 150 м, поэтому здесь хорошо заметен эффект от его исправления за рельеф местности.

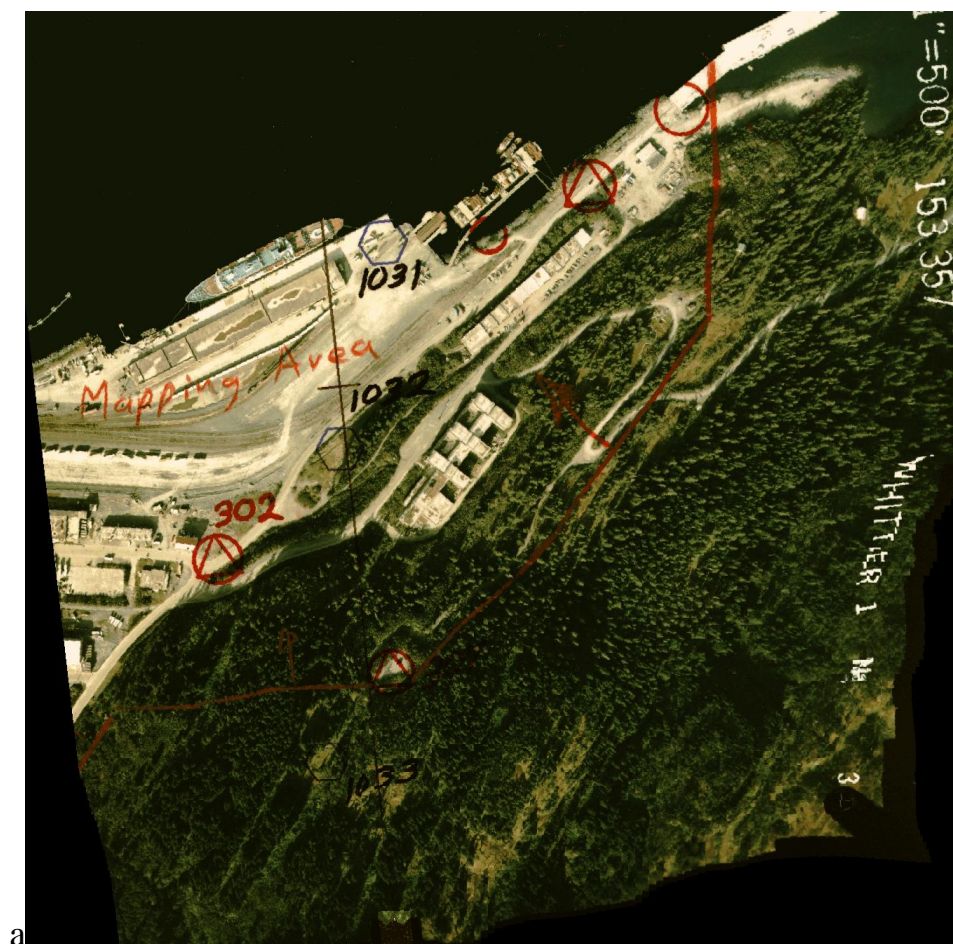


Рис. 3.13 Результат ортотрансформирования фрагмента аэрофотоснимка рис. 3.10 по цифровой модели рельефа рис. 3.11.

### 3.1.3 Результаты тестирования точности ортотрансформирования методом МОП.

Для исследования точности ортотрансформирования методом МОП были выполнены вычислительные эксперименты с высококачественным цветным аэрофотоснимкам масштаба 1:6000. Характеристики этих материалов сведены в таблицу 2. Измерения выполнялись в следующем порядке:

- из фототриангуляции были получены контрольные координаты множества точек в области перекрытия опытной стереопары (табл. 2)
- контрольные точки были опознаны на исходных цифровых снимках и отмечены при помощи растрового графического редактора

Таблица 1. Условия тестирования пакета программ OrthoPhoto-SDS

1	АФА	RMK A 15/23
2	Объектив	PLEOGON A2
3	Фокусное расстояние, мм	151,153
4	Дисторсия объектива, мкм не более	4
5	Высота фотографирования, М	900
6	Характер рельефа	побережье
7	Диапазон превышений на местности, М	0..170
8	Сканер	UMAX PowerLook 1000
9	Растр сканирования, мкм	31,75
10	Информационный объем исходных снимков, Мбайт	50,0
11	Процессор	Pentium 120
12	Жесткий диск	Quantum 4500 об/мин
13	ОЗУ	EDO RAM 32 Мб, 60 нс
14	Операционная система	Windows 95
15	Коэффициент разрежения МОП	5
16	Средний объем МОП, Мбайт	4,80
17	Время ортотрансформирования одного снимка	2 мин 41 с
18	Скорость трансформирования, Мбайт/мин	18,6

- при помощи пакета программ OrthoPhoto-SDS был выполнен полный технологический цикл фотограмметрической обработки снимков, включающий в себя внутреннее, взаимное и внешнее ориентирование, формирование ЦМР и ортотрансформирование снимков.
- на цифровом ортоснимке были измерены координаты отмеченных точек в масштабе снимка и местности. Измерения выполнялись с использованием



текстового сертификата ортоснимка, сформированного программой OrthoPhoto-SDS.

- Результаты измерений по цифровому ортоснимку сравнивались с контрольными координатами, полученными из фототриангуляции.

В описанном эксперименте точность измерений не могла превышать 0,5 пиксел, или, приблизительно 16 мкм, так как на цифровом изображении практически невозможно опознать точки с большей точностью.

В процессе испытаний было установлено, что при цифровом трансформировании по МОП с коэффициентом разрежения 5 искажения, и шумы вносимые самим методом трансформирования обнаружить практически не удастся, если уклон на местности не превышает 35-40 градусов. Там где на снимках изобразились участки местности с развитым рельефом (выходы скального грунта, точки 361, 349, 365) можно было наблюдать незначительные искажения выходных ортоснимков в виде регулярной сетки с шагом, равным коэффициенту разрежения МОП (5x5 пиксел).

Результаты выполненных измерений сведены в таблицу 2.

Таблица 2 Результаты контроля точности ортотрансформирования

Результаты измерений при помощи OrthoPhoto-SDS						Контрольные координаты		Погрешность измерений		
№ точки	$x, мм$	$y, мм$	$X, м$	$Y, м$	$q, мкм$	$X, м$	$Y, м$	$dX, м$	$dY, м$	$dS, м$
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 $dS$ , М					0,563

### 3.2 Пакет программ OrthoPhoto-SDS

Пакет программ OrthoPhoto-SDS разработан на основе исследований, выполненных в диссертации. Полное описание его работы приводится в документации к нему [56] и выходит за рамки рассмотрения в этом разделе. Поэтому мы ограничимся тем, что приведем ниже краткую характеристику этого пакета.

В таблице 1 представлен набор операций технологии ГИС, которые реализованы в OrthoPhoto-SDS.

Пакет программ испытан на производственных материалах аэрофотосъемки в процессе выполнения работ по составлению земельного кадастра с. Ярково Новосибирской области, а также на зарубежных черно-белых материалах теста OEEPE-ISPRS [57] и цветных аэрофотоснимках побережья Аляски. Во время испытаний основные технические характеристики пакета программ измерялись для расчетной платформы.

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%.

Обзор технологии реализованной в OrthoPhoto-SDS, а также дизайн пользовательского интерфейса можно найти в статье [12].

#### 4. 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 ортотрансформирования, 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  $\pm 1$  пиксел цифрового изображения. С использованием комплекса программ OrthoPhoto-SDS выполнены производственные работы по созданию цифровой карты земельного кадастра масштаба 1:2000.

На основе полученных результатов можно оценить перспективы дальнейших исследований. Так, в диссертации за основу аналитической

аппроксимации при формировании матрицы обобщенных поправок взято дробно-линейное преобразование, что естественным образом следует из дробно-линейного вида уравнений коллинеарности. Однако, метод ортотрансформирования по матрице обобщенных поправок можно с успехом применять и для других аналитических аппроксимаций. Так, проф. А. П. Гуком предложено применить в разработанной методике аффинное преобразование, что позволит увеличить скорость обработки снимков более чем в два раза, исключив по две операции деления с плавающей запятой на каждый пиксел ортоснимка. Можно ожидать, что для плановых аэрофотоснимков точность ортоснимков при этом почти не изменится.

Другим перспективным направлением исследований можно считать разработку методики и алгоритмов формирования матриц обобщенных поправок новой природы. Так, в предложенной методике поправки рассчитываются к результату аналитического приближения (см., например, формулу 2.4.15). Но это не единственный возможный подход. Поправки могут быть рассчитаны и к элементам аналитического приближения. В этом случае ожидается увеличение точности выходных ортоснимков, особенно на границах областей действия соседних элементов матрицы поправок, при незначительном снижении производительности.

Автор надеется, что изложенные в диссертации теоретические положения, методики, алгоритмы и результаты экспериментов будут иметь практическое значение для решения в ближайшем будущем задачи широкого внедрения цифровых технологий ГИС в различных отраслях производства и управления.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 
1. Лобанов А. Н., Журкин И. Г. Автоматизация фотограмметрических измерений. М., 1987, - 182с.
  2. Гук А. П. Цифровая обработка снимков. Новосибирск, НИИГАиК, 1986, - 81с.
  3. Малыхин А. Е. Трансформирование фотоснимков в проекцию Гаусса-Крюгера с учетом рельефа местности. - В кн.: Математические и технические проблемы обработки изображений. Новосибирск, ВЦ СО АН, 1986, с. 63-73.
  4. Малыхин А. Е. Геометрические преобразования и манипуляции с цифровыми изображениями. - В кн.: Обработка изображений и дистанционные исследования: Тез. докл. Всесоюз. конф.: ч. 1. Новосибирск, 1984, с. 15-17.
  5. Малыхин А. Е. Линейные и нелинейные геометрические преобразования цифровых изображений. - В кн.: Методы статистической обработки изображений и полей. Новосибирск, 1985, с. 72-76.
  6. Белошапкин М. А., Губин А. В. Перспективные инструментальные средства цифровой фотограмметрической системы. В сб. Автоматизированная обработка визуальной информации. Новосибирск, ВЦ СО АН, 1989г, с. 93-101.
  7. Белошапкин М. А. Комплекс программ для автоматизированного дешифрирования цифровых аэрокосмических снимков. в сб. Труды конференции молодых ученых, Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1995г, с. 17-26.
  8. Белошапкин М. А. 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.

- 
9. Гук А. П., Коркин В. С., Белошапкин М. А. и др. Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт.-М.: Геодезия и картография, 1996г. № 12., - с. 52-61.
  10. Белошапкин М. А., Гук А. П. Эффективный алгоритм ортотрансформирования цифровых аэрофотоснимков. Вестник СГГА, Новосибирск, 1997, вып. 2.
  11. Guk A. P. Beloshapkin M. A. Digital Orthophoto Generation in SDS Technology. Workshop ISPRS, Commision V, Workgroup 4, Haifa, 1997, presented paper.
  12. Белошапкин М. А. OrthoPhoto-SDS: фотограмметрический модуль настольной ГИС.-М., САПР и графика, N 11, 1997, с. 37-41.
  13. Guk A. P. Siberian Digital Stereoplotter. ISPRS Congress 19<sup>th</sup>, Vienna, 1996. Presented paper.
  14. Manual of Photogrammetry. Under edition Chester C. Slama. American Society of Photogrammetry, 1980, 1056 p.
  15. Алексапольский Н. М. Фотограмметрия. Ч. 1.-М.: Геоиздат, 1956. 256 с.
  16. Анисимов М. М., Белошапкин М. А, Губин А. В. и др. Адаптивная информационно-программная среда интерпретатора цифровых карт местности. Препринт ВЦ СО РАН №1006, Новосибирск, 1993.-51 с.
  17. Гук А. П. Цифровые фотограмметрические технологии: проблемы и перспективы. В сб. Математические и технические проблемы обработки визуальной информации, Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1988, с. 69-73.
  18. U.S. Patent № 3,166,555, dated January 7, 1964.
  19. Алексеев А. С., Белошапкин М. А., Пяткин В. П. Региональная интегрированная распределенная система обработки аэрокосмической информации. В сб. Математические и технические проблемы обработки визуальной информации, Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1992, с. 3-16.

- 
20. Алексеев А. С., Большаков В. Д., Гук А. П., Журкин И. Г., Пяткин В., П. Цифровая измерительная картографическая система обработки аэрокосмических снимков. Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции «Обработка изображений и дистанционные исследования» Новосибирск, 1984.
21. Keating Terrence J., Dennis R. Boston. Digital Orthophoto Production Using Scanning Microdensitometers. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol 45, No. 6, 1978, pp. 735-740.
22. <http://www.ingr.com/iis/products/mapping/photogrammetry/isir.html>
23. <http://www.virtuozo.com.au/manuscript/techsprc.html>
24. Guk A. P., Beloshapkin M. A., Korkin V. S. et al. 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.
25. DVP User Guide. Version 3.41. Leica AG, Heerbrugg, Switzerland, 1993. (страницы не пронумерованы).
26. Вендровский К. В. Информационная емкость фотографических слоев. Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии, 1973, т. 18, вып. 5, с. 331-340.
27. Вендеровский К. В., Вейцман А. И. Фотографическая структурометрия. М.: Исскуство, 1982 - 270 с.
28. Кучко А. С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования.— М.: Недра, 1988. – 236 с.
29. Welch, R. Quality and Applications of Aerospace Imagery. Photogrammetric Engineering, 1972, No 38, pp. 379-398.
30. Konecny, G, Methods and possibilities for digital differential rectification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 45, No. 6, 1978, pp. 727-734.

- 
31. Tian-Yuan Shih, D. Fraser, E. Derenyi. Orthoimage Generation in a GIS Environment. Proceedings of XVII ISPRS Congress, Comission IV, Washington, 1996.
32. Белошапкин М. А., Гук А. П. Эффективный алгоритм ортотрансформирования цифровых аэрокосмических изображений. Вестник СГГА, Новосибирск, 1997, вып. 2, с. 28-37.
33. Гук А. П. Цифровая обработка снимков. Учебное пособие. Новосибирск, 1986, 72 с.
34. Гук А. П., Коркин В. С. Цифровое моделирование рельефа с использованием ортонормированного полинома Чебышева и автоматизированной фотограмметрической системы. В сб. Математические и технические проблемы обработки изображений, Новосибирск, ВЦСО РАН, 1988, с. 69-73.
35. Дуда Р., Харт П. Распознавание объектов и анализ сцен. М., «Мир», 1976, 511 с.
36. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. – М., «Мир», 1989 г. 487с.
37. Журкин И. Г. Автоматизация фотограмметрических процессов при составлении карт по аэрокосмическим снимкам. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 1975.
38. Bernstein C. A., Kanfl L. N., Lavine D., Olson E. C. A Geometric Approach to Subpixel Registration Accuracy. Computer Vision, Graphics and Image Processing. Vol 40, 1987, pp. 334-360.
39. Зотов Г. А. Автоматизация в фотограмметрических приборах. Итоги науки и техники. Геодезия и аэрофотосъемка, т. 11, 1975.
40. Properties of KODAK Materials for Aerial Photographic Systems. Vol III: Physical and Chemical Behavior of KODAK Aerial Films. Kodak Publication M-63, Eastman Kodak Company, Rochester, New-York. 1972.

- 
41. Jaksic, Z., Deformation of ESTAR-Base Aerial Films. Photogrammetric Engineering No 38, 1972. pp. 285-296.
42. Гук А. П., Смердов Н. Е. и др. Разработка теории и технологии полной калибровки устройств ввода-вывода изображений для систем цифровой обработки снимков. Промежуточный отчет по теме № 2-В-81 «Фотограмметрическая обработка сканерных снимков». № госрегистрации 81050738 24.02.86 № 0186.0016982.
43. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ., М., «Наука», 1970.- 856 с.
44. Лобанов А. Н. Аэрофототопография. Изд. 2 доп. М., «Недра», 1978. 575 с.
45. Гук А.П., Коркин В.С. Цифровое моделирование рельефа с использованием ортонормированных полиномов Чебышева и автоматизированной фотограмметрической системы. В сб. Математические и технические проблемы обработки изображений. Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1988г., с. 69-73.
46. LeRoy E. DeMarsh and Edward J. Giorgianni. Color Science for Imaging Systems. Physics Today, September 1989, p. 44-52.
47. W.F. Schreiber. Fundamentals of Electronic Imaging Systems. Second Edition. Springer-Verlag, 1991, ISBN 0-387-53272-2.
48. Bruce J. Lindbloom. Accurate Color Reproduction for Computer Graphics Applications. Computer Graphics, Vol. 23, No. 3 (July 1989), p. 117-126 (proceedings of SIGGRAPH '89).
49. Charles A. Poynton, "Gamma on the Apple Macintosh", <<ftp://ftp.inforamp.net/pub/users/poynton/doc/Mac/>>.
50. Color management systems: Getting reliable color from start to finish, Aldus Corporation, <<ftp://www.adobe.com/PDFs/FaxYI/500301.pdf>>.
51. ITU-R Recommendation BT.709, Basic Parameter Values for the HDTV Standard for the Studio and for International Programme Exchange (1990), [formerly CCIR Rec. 709], ITU, 1211 Geneva 20, Switzerland.

- 
52. Publication CIE No 15.2, Colorimetry, Second Edition (1986), Central Bureau of the Commission Internationale de L'Eclairage, Vienna, Austria.
53. Levine M. D., O'Handley D. A. Yagi G M., Computer Determination of Depth Maps. Computer Graphics and Image Processing, vol. 2, N 2, 1973, pp. 131-150.
54. Mori K., Kidode M., Asada H. An Iterative Prediction and Correction Method for Automatic Stereocomparison. Computer Graphics and Image Processing, vol. 2, No 3, 1973, pp. 393-401.
55. Gruen A. W. Adaptive Least Squares Correlation - A powerful Image Matching Technique. Proceedings of ACSM-ASP Convention, Washington, 1985.
56. OrthoPhoto-SDS v1.0 beta. Программа цифрового ортотрансформирования аэрофотоснимков. Руководство пользователя. Новосибирск, InterMap - НИИГАИК, 1997г., 56 с.
57. Christian Heipke, Konrad Eder. Performance of tie point extraction in automatic aerial triangulation. Description of the OEEPE/ISPRS Test. Technical University Munich, Germany. 1997, 14 p.