

На правах рукописи

КОЗЛОВ Евгений Павлович

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ КООРДИНАТНОЙ
ПРИВЯЗКИ СНИМКОВ ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ КАРТАМ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена в Рязанском государственном
радиотехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Еремеев Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Бехтин Юрий Станиславович

кандидат технических наук
Новиков Геннадий Александрович

Ведущая организация: **Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии «Планета»**

Защита состоится **11 ноября 2009 года в 12 ч** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан 30 сентября 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
канд. техн. наук, доцент

Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В практике дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в последние годы стали внедряться геостационарные космические системы: MeteoSat (Европа), GOES (США), FY (Китай) и др. В настоящее время готовится к запуску российский геостационарный спутник «Электро-Л», который планируется включить в международную космическую систему наблюдения всей земной поверхности.

Геостационарные спутники выводятся на орбиту, находящуюся в плоскости экватора, на высоту порядка 35000 км. При этих условиях спутник «зависает» на заданной долготе и обеспечивает периодическую съемку одной и той же поверхности всего земного диска на фоне окружающего космоса. Одной из важнейших характеристик космических изображений является точность координатной привязки объектов наблюдаемой сцены, т.е. точность определения их геодезических координат (широты и долготы). Основными причинами неудовлетворительной координатной привязки объектов снимков являются погрешности измерения пространственного положения и углов ориентации спутника в процессе съемки земной поверхности, что приводит, главным образом, к смещению, повороту и изменению масштаба изображения диска Земли.

Традиционно используемые технологии уточнения координатной привязки по звездному небу и наземным ориентирам не обеспечивают необходимой точности, оперативности и надежности решения рассматриваемой задачи. В последние годы появились векторные электронные карты местности самого различного масштаба и делаются активные попытки их использования для координатной привязки данных ДЗЗ, полученных от полярно-орбитальных космических аппаратов, которые осуществляют съемку Земли, вращаясь вокруг нее. Но полностью автоматических технологий решения этой задачи еще не создано. Основная трудность состоит в постоянном изменении географического района съемки, условий наблюдения, в выборе устойчивых во времени наземных ориентиров.

Задача координатной привязки изображений от геостационарных спутников значительно упрощается: они осуществляют съемку одного и того же района в виде диска Земли, контрастно отображающегося на фоне космоса; на снимках четко отображаются береговые линии морей, крупных озер и островов, которые устойчивы во времени и представлены в соответствующих электронных картах. Все это создает предпосылки для проектирования полностью автоматической технологии высокоточной привязки снимков по электронным картам. Решение этой задачи составляет основное содержание настоящей диссертационной работы.

Степень разработанности темы. В настоящее время имеется значительный теоретический задел в области координатной привязки изображений, в создание которого внесли вклад отечественные и зарубежные ученые Арманд Н.А., Асмус В.В., Бочкарев А.М., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Урличич Ю.М.,

Фурман Я.А., Mather P.M., Mostafavi H., Smith F.W., Ruskone R., Dowman I.J., Steger C., Mayer H., Radig, B. Muller J., Cheng P., Ramachandran R. и др.

Один из подходов к решению поставленной задачи, который многие годы исследовался, – это координатная привязка снимков по звездному небу. В данном случае требуется установка на космический аппарат датчика звездного неба с высоким угловым разрешением, чувствительностью и широкой полосой обзора, что технически трудно реализуемо. При этом могут быть уточнены только углы ориентации спутника, а его пространственное положение определить не представляется возможным.

В ряде работ для решения задач координатной привязки космических снимков предлагается использовать устойчивые наземные ориентиры в виде эталонных опорных пиктограмм. Такой подход требует создания высокоинформативной базы опорных фрагментов, предварительной обработки снимков с целью приведения их к форме представления пиктограмм, что не позволяет организовать оперативную технологию координатной привязки. Наличие даже незначительных содержательных различий между снимком и пиктограммами приводит к резкому снижению надежности решения задачи.

В последние годы предпринимаются активные попытки координатной привязки космических снимков от полярно-орбитальных систем ДЗЗ по электронным картам. В данном случае карта и снимок приводятся к единой форме представления, после чего осуществляется идентификация одноименных объектов. Однако из-за действия различных мешающих факторов, сопровождающих процесс съемки, и содержательных различий между картой и снимком полностью автоматических надежных технологий координатной привязки построить не удалось.

Что касается координатной привязки снимков от геостационарных спутников по электронным картам, то публикации по этому вопросу практически отсутствуют. Лишь в отдельных работах упоминается об эффективности и возможности практического решения этой задачи. То есть возникает острая необходимость в разработке такой технологии, чему и посвящена настоящая диссертация.

Цель диссертации состоит в разработке алгоритмов и полностью автоматической технологии высокоточной координатной привязки снимков от геостационарных космических систем наблюдения Земли по электронным картам.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- провести сравнительный анализ различных технологий координатной привязки изображений Земли по точности, надежности и уровню автоматизации; обосновать целесообразность создания технологии координатной привязки снимков от геостационарных систем по электронным картам;
- разработать комплексную технологию координатной привязки изображений от геостационарных спутников, основанную на использовании дан-

ных навигационных измерений, контурных точек диска Земли и электронных карт;

- разработать алгоритмы координатной привязки изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли и электронным картам;
- разработать алгоритмы повышения эксплуатационных характеристик технологии координатной привязки снимков от геостационарных спутников (точности, надежности и скорости);
- осуществить практическую реализацию технологии координатной привязки изображений от геостационарных спутников.

Научная новизна диссертационной работы в целом определяется тем, что впервые в практике ДЗЗ разработана комплексная технология высокоточной автоматической координатной привязки снимков от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли и электронным картам.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- технология высокоточной оперативной координатной привязки изображений от геостационарных спутников, основанная на выделении контура диска Земли и уникальных фрагментов береговых линий и их автоматическом совмещении с одноименными объектами электронной карты;
- алгоритм поиска одноименных сюжетов на космическом снимке и электронной карте, основанный на представлении уникальных фрагментов карты в виде бинарных масок;
- алгоритм оценки степени уникальности опорных фрагментов карты, основанный на анализе автокорреляционной функции по различным направлениям и позволяющий значительно повысить точность и надежность координатной привязки;
- алгоритмы учета степени несовпадения фрагментов береговых линий на снимке и карте, позволяющие повысить точность их совмещения;
- алгоритмы анализа наличия облачности в зонах поиска опорных фрагментов на основе геометрического описания береговых линий, позволяющие восстановить или исключить области, закрытые облаками, и тем самым повысить надежность процесса координатной привязки.

Практическая ценность работы состоит в том, что на базе разработанных математических моделей и алгоритмов создан программный комплекс высокоточной координатной привязки космических изображений от геостационарных спутников по электронным картам, обеспечивающий полную автоматизацию и высокую надежность координатной привязки спутниковой видеoinформации. Данный комплекс включен в состав наземных средств приема и обработки снимков от российского геостационарного спутника "Электро-Л".

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках НИР 7-06Г, ОКР 10-07, ОКР 23-06 (космические проекты «Электро-Л» и «Тепло»). Резуль-

таты работы в виде алгоритмов и технологий координатной привязки данных ДЗЗ внедрены в Российском НИИ космического приборостроения и НПО им. С.А. Лавочкина.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 3-х международных и 8-и всероссийских конференциях и семинарах: 13-й и 15-й международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань-2005, 2008); 5-й международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань-2007); 11-й, 12-й и 13-й всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань-2006, 2007 – 2 доклада, 2008 – 2 доклада); 18-й всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» (Нижний Новгород - 2006); 1-й и 2-й всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва-2007, 2009); 6-й всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва-2008); всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула-2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ: 8 статей (в том числе 4 статьи по списку ВАК) и 11 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит документы о внедрении и практическом использовании результатов. Основной текст работы содержит 144 с., 30 рисунков и 18 таблиц. Список литературы на 12 с. включает 114 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен системный анализ существующих технологий координатной привязки изображений земной поверхности, выявлены их узкие места. Сформулированы направления научных исследований по созданию комплексной технологии координатной привязки изображений от геостационарных спутников по электронным картам и контурным точкам диска Земли.

Рассмотрен традиционный подход координатной привязки изображений по измерениям параметров орбиты и углов ориентации спутника на примере геостационарного космического аппарата «Электро-Л». Исследованы основные искажающие факторы – погрешности измерений углов ориентации и параметров орбиты. Показано, что для координатной привязки снимков от геостационарных спутников с точностью порядка 4 км (что соответствует разрешающей способности) необходимо измерять углы ориентации космического аппарата с точностью 10 угл. с, что на сегодняшний день практически недостижимо. Возникает необходимость в поиске альтернативных технологий.

Исследованы возможности координатной привязки изображений от гео-

стационарных спутников по сигналам космических навигационных систем «ГЛОНАСС» и GPS. В последние годы с этой целью разрабатывается соответствующая бортовая аппаратура для работы на геостационарной орбите, однако ее практическая реализация планируется через несколько лет. Кроме этого, системы «ГЛОНАСС» и GPS не позволяют измерить углы ориентации спутника.

Координатную привязку изображений от геостационарных спутников можно выполнить по звездному небу, на фоне которого отображается диск Земли. Исследование такой технологии показало, что ее реализация представляет собой сложную научно-техническую проблему. Прежде всего, необходим датчик с высокой чувствительностью, широкими динамическим диапазоном и полосой обзора, поскольку он должен регистрировать слабые сигналы от звезд и яркие сигналы от земной поверхности. Кроме этого, в ходе формирования изображения одного и того же участка Земли звездное небо значительно смещается и этот процесс необходимо описать с высокой точностью.

Исследована технология координатной привязки снимков земной поверхности по опорным точкам местности (ОТМ), основанная на установлении геометрического соответствия между одноименными точками изображения и картографической основы. В качестве последней могут быть использованы устойчивые наземные ориентиры, предварительно сформированные в виде небольших фрагментов изображений (пиктограмм). Такой подход требует создания высокоинформативной базы опорных снимков и не обеспечивает оперативности обработки и надежности поиска ОТМ при наличии содержательных различий между реальным изображением и пиктограммами. В качестве картографической основы могут быть использованы и электронные карты (ЭК), которые активно внедряются в последние годы. В данном случае можно выполнить координатную привязку изображений практически с точностью, определяемой разрешающей способностью снимка и точностью карты. Вместе с тем, по данным отечественной и зарубежной печати, полностью автоматизировать процесс поиска одноименных точек на карте и изображении пока не удалось.

Снимки от геостационарных спутников (по отношению к полярно-орбитальным) предоставляют уникальную возможность их координатной привязки по контурным точкам диска Земли, которые контрастно и неизменно (по отношению к звездам) отображаются на фоне окружающего космоса. Вопросы, связанные с разработкой такой технологии, в зарубежной и отечественной литературе не раскрыты. Контурные точки образуют фигуру в виде эллипса, очень близкого к окружности, поэтому априори, без проведения соответствующих исследований, нельзя оценить возможность определения угловой ориентации его осей. Этот вопрос требует изучения.

Выполненный анализ показал, что наиболее перспективным направлением координатной привязки снимков от геостационарных систем наблюдения Земли является реализация этого процесса с использованием электронных карт. Такой подход определяет необходимость проведения научных исследований по ряду направлений.

Во-первых, существующие технологии координатной привязки изображений по электронным картам не учитывают особенностей формирования снимков от геостационарных спутников: съемка одного и того же района земной поверхности; отображение диска Земли на фоне окружающего космоса; наличие на изображении устойчивых во времени береговых линий и др. С учетом этих особенностей обосновано *первое направление научных исследований*, связанное с разработкой базовых алгоритмов координатной привязки по электронным картам. Решению этих вопросов посвящена вторая глава.

Во-вторых, известные технологии не обеспечивают требуемого качества координатной привязки данных ДЗЗ по картам при полном или частичном закрытии облаками береговых линий, при геометрическом несовпадении объектов снимка и карты, при отсутствии уникальных опорных объектов на значительной части наблюдаемой сцены. Это обуславливает необходимость проведения *исследований по второму направлению*, которое связано с разработкой алгоритмов повышения в таких условиях точности и надежности процесса координатной привязки. Эти вопросы рассмотрены в третьей главе.

В-третьих, существующие технологии не позволяют полностью автоматизировать процесс координатной привязки и не обеспечивают оперативности решения этой задачи. В связи с этим определено *третье направление исследований*, касающееся реализации полностью автоматической технологии высокоточной координатной привязки снимков от геостационарных спутников и исследования ее эксплуатационных характеристик.

В главе 2 разработаны базовые алгоритмы и комплексная технология координатной привязки космических изображений от геостационарных спутников по электронным картам и контурным точкам диска Земли, выполнены их теоретические исследования.

Центральное место при координатной привязке изображений от геостационарных спутников занимают вопросы совмещения одноименных объектов снимка и электронной карты. Предложена и исследована технология решения этой задачи, основу которой составляют четыре процесса: выделение на карте опорных объектов, устойчивых во времени и имеющих уникальную геометрическую форму; формирование для этих объектов бинарных масок, соответствующих по яркости и геометрической форме аналогичным объектам снимка; корреляционное совмещение бинарных масок с одноименными объектами снимка; определение функций геометрического соответствия снимка и карты.

Разработан алгоритм формирования по ЭК опорных бинарных масок. Вначале на наблюдаемую часть земного диска из электронной карты отбираются уникальные опорные объекты в виде изломов береговых линий и преобразуются из векторного формата в растровый. Степень уникальности опорных фрагментов $E_i = \{ (x_j, y_j); j = \overline{1, J} \}, i = \overline{1, I}$, определяется среднеквадратичным отклонением $\sigma_i, i = \overline{1, I}$, береговой линии (рис. 1, а), содержащей точки $(x_j, y_j), j = \overline{1, J}$, от прямой $y = k_i x + b_i$:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J ((y_j - (b_i + k_i x_j))^2 + (x_j - (b_i + k_i y_j))^2)}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где k_i , b_i находятся из условий $\sum_j (b_i + k_i y_j - x_j)^2 = \min$ и $\sum_j (b_i + k_i x_j - y_j)^2 = \min$.

Эталонное положение фрагментов определяется их центрами $(x_{0i}, y_{0i}), i = \overline{1, I}$. Для каждого $E_i, i = \overline{1, I}$, формируется бинарная маска $A_i(x, y), i = \overline{1, I}$, в виде двух областей с нулевой и единичной яркостью, линия соприкосновения которых совпадает с участком ЭК, а яркость областей соответствует расположению водной и земной поверхностей на снимке (рис.1, б). Затем для всех $E_i, i = \overline{1, I}$, по заданным $(x_{0i}, y_{0i}), i = \overline{1, I}$, в системе координат ЭК формируются расширенные фрагменты снимка $B_i(x, y), i = \overline{1, I}$, (зоны поиска) с очертаниями береговых линий E_{Bi} (рис. 1, в).

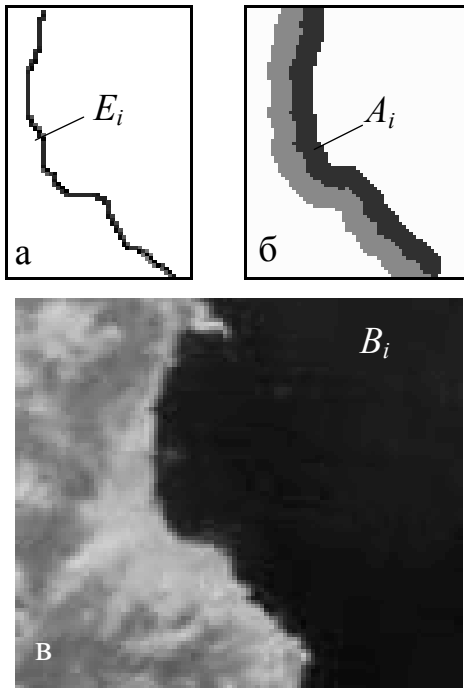


Рис. 1. Фрагмент ЭК (а), бинарная маска (б) и зона поиска (в)

Разработан высокоскоростной алгоритм корреляционного совмещения объектов снимка и карты, основанный на бинарном представлении опорных фрагментов. В данном случае вычисление коэффициента корреляции

$$\rho = (\overline{BA} - \overline{B} \overline{A}) / \sqrt{D_B D_A} \quad (2)$$

свелось к подсчету средних значений яркостей снимка под единичной \overline{B}_1 и нулевой \overline{B}_0 областями маски

$$\rho = 0.5(\overline{B}_1 - \overline{B}_0) / \sqrt{D_B}, \quad (3)$$

где \overline{BA} - среднее значение произведений одноименных элементов изображения и маски; \overline{A} , \overline{B} и D_A , D_B - соответственно средние яркости и оценки дисперсий, найденные по элементам маски и изображения. Индекс i в (2) и ниже для простоты опущен.

Выполнены исследования поведения ρ в окрестности области совпадения фрагмента снимка с маской при различной степени их геометрического сходства. Показано, что в этом случае

$$\rho = \frac{1 - (\alpha + \beta)}{\sqrt{1 + 2(D_0 + D_1) / (\overline{B}_1 - \overline{B}_0) + 2(\alpha - \beta)(D_1 - D_0) / (\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2 - (\alpha - \beta)^2}}, \quad (4)$$

где α и β - доля элементов суши под нулевой областью маски и доля элементов водной поверхности под единичной областью («чужие» элементы), D_0 и D_1 - выборочные дисперсии изображения под нулевой и единичной областями бинарной маски.

Из (2) и (4) следуют два важных вывода. Во-первых, ρ зависит как от общего уровня «чужих» элементов, доля которых равна $(\alpha + \beta)$, так и от соот-

ношения между α и β , определяемого в знаменателе членами с разностью $(\alpha - \beta)$. Во-вторых, член \overline{BA} в (2), который должен определять меру сходства фрагмента снимка и маски, зависит только от β . \overline{BA} достигает максимального значения $0,5\overline{B}_1$ при $\overline{B}_1 > \overline{B}_0$ и $\beta = 0$, когда элементы водной поверхности полностью отсутствуют под единичной областью маски. В результате центрирования и нормирования \overline{BA} формируется коэффициент корреляции, числитель которого уже зависит от суммы $(\alpha + \beta)$, а знаменатель – от разности $(\alpha - \beta)$, в результате точка наилучшего сходства в общем случае смещается.

Для устранения подобного рода систематических ошибок предложено использование асимметричных бинарных масок. Установлено, что если γ - доля нулевой, а $(1 - \gamma)$ - единичной областей бинарной маски, то

$$\rho = \frac{\sqrt{\gamma(1-\gamma)} (1 - \alpha - \beta)}{\sqrt{\pi(1-\pi) + \pi D_0 / (\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2 + (1-\pi) D_1 / (\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}}, \quad (5)$$

где $\pi = \beta + \gamma(1 - \alpha - \beta)$. В этом случае ρ принимает максимальное значение при

$$\gamma = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{D_0 + \alpha(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}{D_1 + \beta(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}}}. \quad (6)$$

Только при полном совпадении E с E_B , т.е. при $\alpha = \beta = 0$, систематическая ошибка отсутствует. В этом случае равенство $\rho = \rho_{\max}$ достигается либо путем конструирования несимметричной маски с параметром $\gamma = \sqrt{D_1} / (\sqrt{D_0} + \sqrt{D_1})$, либо при равенстве дисперсий $D_0 = D_1$ для симметричной маски ($\gamma = 0,5$).

В результате совмещения карты и снимка формируется исходный набор координат опорных точек $OTM_{и}$. На основе анализа $OTM_{и}$ осуществляется отбраковка результатов ложной идентификации. Оставшиеся точки образуют множество $OTM_{к} = \{(x_j, y_j), (x_j^*, y_j^*); j = \overline{1, J}\}$. По $OTM_{к}$ с помощью МНК определяются полиномы координатной привязки $P_x = a_0 + a_1x + a_2y - x^*$ и $P_y = b_0 + b_1x + b_2y - y^*$, устанавливающие геометрическое соответствие одноименных точек снимка и карты. Коэффициенты a_0, b_0 определяют смещение диска Земли по отношению к карте, а a_1, a_2 и b_1, b_2 – масштабы по двум осям и поворот.

Одним из устойчивых объектов снимков от геостационарных спутников является контур диска Земли, который полностью или частично (при затемнении) может быть использован для координатной привязки. Эталонное представление контура диска рассматривается в работе как дополнительный элемент электронной карты, его использование существенно уменьшает зону поиска опорных объектов береговых линий, что значительно повышает скорость и точность совмещения ЭК со снимком. В связи с этим в работе предложен и исследован алгоритм координатной привязки снимков, основанный на эталон-

ном описании контура диска Земли в специально введенной плоскости и сопоставлении этого описания с реально наблюдаемым контуром.

Установлено, что в идеальном случае краевые точки диска Земли образуют эллипс в плоскости $\check{X}\check{Y}$, которая перпендикулярна к линии, соединяющей центр Земли и центр масс спутника, а в реальных условиях фигуру, близкую к нему. Можно показать, что эталонный эллипс с использованием номинальных параметров съемки определяется как

$$\check{X}^2 / a^2 + \check{Y}^2 / b^2 = 1, \quad (7)$$

$$\text{где } a = a_3 \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}, \quad b = \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^4 + Y_0^2 b_3^4 + Z_0^2 a_3^4}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}};$$

X_0, Y_0, Z_0 – координаты спутника; a_3, b_3 – экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида. Для реального эллипса оцениваются координаты центра $X_{ц}, Y_{ц}$, размеры полуосей $a_{д}, b_{д}$ и угол их наклона φ . Затем устанавливается геометрическое соответствие одноименных точек реального и эталонного эллипсов:

$$\check{X} = [(X - X_{ц}) \cos \varphi + (Y - Y_{ц}) \sin \varphi] a / a_{д}, \quad \check{Y} = [(Y - Y_{ц}) \cos \varphi - (X - X_{ц}) \sin \varphi] b / b_{д}. \quad (8)$$

В работе предложены две технологии комплексирования ОТМ, найденных по контурным точкам диска Земли и по объектам береговых линий. В первом случае контурные точки диска используются для предварительной координатной привязки с целью уменьшения зоны поиска объектов береговых линий. Во втором случае контур диска Земли выступает как опорный объект, дополняющий электронную карту береговых линий.

В главе 3 разработаны и исследованы алгоритмы повышения точности и надежности координатной привязки снимков от геостационарных спутников по электронным картам.

Установлено, что надежной и точной координатной привязке космических изображений мешают три фактора: наличие облачности, частично или полностью закрывающей опорные фрагменты береговых линий; неполное соответствие геометрии береговой линии на снимке и электронной карте; неравномерное распределение уникальных фрагментов по полю изображения.

Предложен алгоритм компенсации систематических ошибок, обусловленных несовпадением береговых линий на снимке и карте. Алгоритм основан на внесении в опорные фрагменты снимка вполне определенных искажений и последующей оценке по серии изображений систематических ошибок. Экспериментально установлено, что СКО оценки систематических ошибок не превышает 0.2 пикселя.

Разработан алгоритм идентификации облачности на водных участках зон поиска, основанный на геометрическом описании береговых линий в опорных фрагментах. Алгоритм базируется на двух предпосылках. Во-первых, зоны поиска содержат единственную береговую линию, разделяющую воду и сушу, которая от сеанса к сеансу съемки может смещаться в двух направлениях. Во-

вторых, облачные образования представляют собой связанные области, яркость которых всегда выше яркости пикселей водной поверхности.

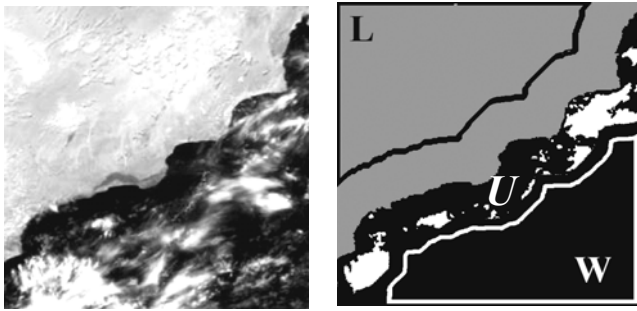


Рис. 2. Зона поиска, покрытая облаками (слева), участки воды и суши (справа)

В зоне поиска (рис. 2, слева) определяются три области: L – область гарантированного участка суши; W – область гарантированного участка водной поверхности; U – область, непосредственно прилегающая к береговой линии и содержащая как участки суши, так и участки воды. Области строятся на основе знаний о допустимых диапазонах смещения береговой

линии вдоль координатных осей (рис. 2, справа). На основе анализа гистограммы в области U решается задача сегментации на две подобласти: U_0 – элементы водной поверхности и U_1 – элементы суши. Далее формируется объединенная область элементов водной поверхности $W^* = W \cup U_0$ (область черных элементов) и находятся элементы, принадлежащие облачным образованиям (области белых элементов) и окруженные элементами W^* . Экспериментально установлено, что алгоритм позволяет на 30 % снизить число ложных совмещений, вызванных частичным закрытием облаками водных участков опорных фрагментов.

Предложен и исследован алгоритм отбраковки участков береговых линий, закрытых облаками. Алгоритм основан на использовании изменяющегося порога сегментации облачных образований в зависимости от положения бинарной маски в зоне поиска. Опорная точка, найденная в процессе совмещения фрагментов, отбраковывается, если $q_{обл,0} / q_0 > K_{обл}$, где $q_{обл,0}$ – число облачных точек, q_0 – число нулевых точек бинарной маски, $K_{обл}$ – пороговое значение доли облачности. Алгоритм позволяет выполнить надежную идентификацию опорных фрагментов, в которых береговые линии закрыты облаками, и исключить их из рассмотрения.

Разработан алгоритм отбраковки отдельных участков совмещаемых фрагментов, на которых береговые линии снимка и карты частично не совпадают (рис. 3, слева). Алгоритм основан на многокритериальном анализе наличия облачных образований и несовпадений береговых линий снимка и карты на отдельных участках опорного фрагмента и принятии решения об использовании или отбраковке этих участков. Бинарная маска фрагмента разбивается на L участков $A_i = \{ A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^L \}$, $i = \overline{1, I}$, (рис. 3, справа). В процессе совмещения

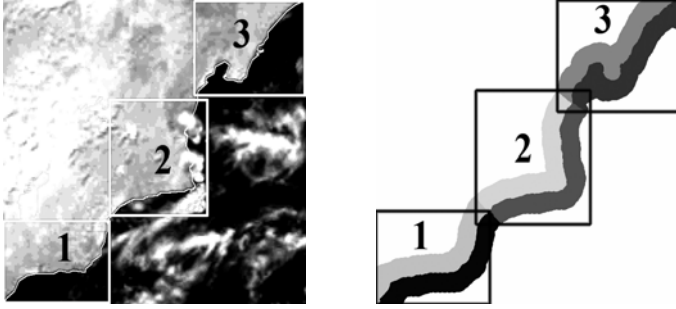


Рис. 3. Разбиение фрагмента снимка (слева) и бинарной маски (справа) на подфрагменты

участка бинарной маски A_i^l , $i = \overline{1, I}$, $l = \overline{1, L}$, с соответствующим участком снимка B_i^l , $i = \overline{1, I}$, $l = \overline{1, L}$, рассчитываются критерии отбраковки K_i , $i = \overline{1, I}$. Если участок не удовлетворяет одному из критериев K_i , $i = \overline{1, I}$, то он отбраковывается. На основе (3) с использованием не отбракованных участков с номерами $s = \overline{1, S}$ формируется новая мера сходства:

$$\rho^* = 0.5 \sum_{j=1}^J (\overline{B}_{1j} - \overline{B}_{0j}) / \sum_{j=1}^J \sqrt{D_{Bj}}. \quad (9)$$

Экспериментально установлено, что этот алгоритм позволяет увеличить до 40 % общее число опорных фрагментов и повысить тем самым точность координатной привязки.

Предложен алгоритм оценки степени уникальности опорных фрагментов вдоль различных направлений с целью использования для координатной привязки фрагментов с линейными участками береговых линий (рис. 4, слева). В

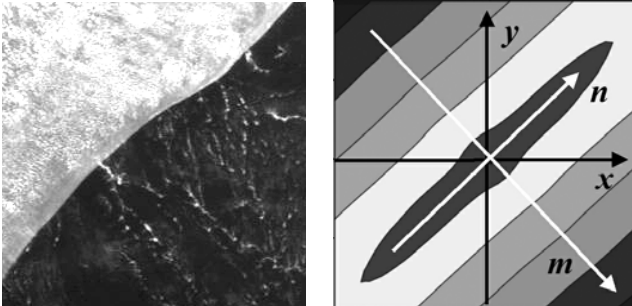


Рис. 4. Линейный участок береговой линии (слева) и изолиния АКФ (справа)

этом случае из-за неопределенности положения точки максимума автокорреляционной функции (АКФ) вдоль линейного участка береговой линии возникают ошибки в оценке положения ОТМ. Установлено, что изолинии АКФ опорных фрагментов имеют форму, близкую к эллипсу, направления осей m и n которого определяются ориентацией береговой линии (рис. 4, справа). Предлагается учитывать направления наилучшего (ось m) и наихудшего (ось n) совмещения для всех опорных фрагментов и к найденным ОТМ относиться с разной степенью доверия по осям m и n . В этом случае геометрическое соответствие снимка и карты определяется из условий:

$$\sum_{i=1}^I (K_{ni} \Delta n_i^2) = \min, \quad \sum_{i=1}^I (K_{mi} \Delta m_i^2) = \min, \quad (10)$$

где K_{mi} и K_{ni} - весовые коэффициенты по осям m и n для i -го фрагмента,

$$\Delta n_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \cos \alpha_i - [P_y(x_i, y_i) - y_i] \sin \alpha_i,$$

$$\Delta m_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \sin \alpha_i + [P_y(x_i, y_i) - y_i] \cos \alpha_i,$$

α_i - угол между системами координат xu и mn , $i = \overline{1, I}$.

Этот алгоритм дает возможность использовать для координатной привязки фрагменты, содержащие линейные участки береговых линий. Экспериментально установлено, что за счет этого набор опорных фрагментов расширяется примерно на 30 %, что позволяет более плотно покрыть всю область определения снимка и снизить погрешность привязки до 0.4 пикселя.

Разработан алгоритм отбраковки краевых точек изображения диска Земли, основанный на учете факта их пространственной связности и близости к некоторой линии, образующей эллипс. Для этого используются три критерия.

Краевые точки отбраковываются, если не удовлетворяют условию:

$$R_{\min} - R_{\text{ц}} \leq r \leq R_{\max} + R_{\text{ц}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{ц}}$ – радиус круга с центром $(0, 0)$, определяющий допустимую область расположения центра эллипса, $[R_{\min}, R_{\max}]$ – допустимый диапазон изменения радиуса круга, r – расстояние до контурной точки.

Далее исключаются участки контура, заведомо не имеющие отношения к краям диска, при

$$|\vartheta - \bar{\vartheta}| > 3\sigma_{\vartheta}, \quad |R - \bar{R}| > 3\sigma_R, \quad (12)$$

где ϑ – направление участка контура, R – радиус кривизны окружности, рассчитанный по окрестности рассматриваемой точки, $\bar{\vartheta}$, \bar{R} и σ_{ϑ} , σ_R – соответственно средние значения и СКО для ϑ и R .

Наконец, оставшиеся краевые точки бракуются, если

$$|d(\varphi)| > \bar{d} + 3\sigma_d, \quad (13)$$

где $d(\varphi) = r(\varphi) - \tilde{r}(\varphi)$ – разность эталонной и аппроксимируемой функций, описывающих контурные точки диска в полярной системе координат (r, φ) ; \bar{d} и σ_d – среднее значение и СКО, найденные по множеству отчетов $d(\varphi)$.

Использование этого алгоритма позволяет построить более точную модель контура диска Земли.

В главе 4 рассмотрены вопросы практической реализации технологии высокоточной координатной привязки и выполнены ее экспериментальные исследования.

Предложенные во второй и третьей главах технологии и алгоритмы положены в основу практической реализации программного комплекса координатной привязки изображений от геостационарных спутников (ПК MapMatching). Комплекс включает:

- программу координатной привязки по данным систем навигации и ориентации;
- программу координатной привязки снимков по диску Земли;
- электронные карты на заданный район съемки;
- программу преобразования электронных карт;
- программу формирования опорных фрагментов изображений;
- программу определения параметров координатной привязки снимков по электронной карте;

- программу комплексирования результатов координатной привязки по данным, полученным средствами систем навигации и ориентации, по диску Земли и электронным картам;

- программу организации процесса координатной привязки.

Перечисленные программы включают программные средства повышения точности и надежности координатной привязки, алгоритмы которых рассмотрены в главе 3.

Разработка ПК MapMatching выполнена в среде программирования Visual C++ версии 6.0 на базе Windows API 32 и библиотек MFC и функционирует в виде 32-разрядного приложения в среде MS Windows XP/2000/2003. Комплекс включает в себя более 20 файлов (около 25 000 программных строк) с определениями различных классов и функций.

Выполнены исследования точности и быстродействия ПК MapMatching, в ходе которых получены следующие результаты.

- Технология координатной привязки изображений по электронным картам обеспечивает:

- СКО координатной привязки составляет порядка 0.4 пикселя;

- предельная погрешность координатной привязки центральной точки диска Земли 0.7 пикселя;

- при более чем 50%-м затенении изображения Земли погрешности оценки параметров координатной привязки начинают возрастать и уже при 70% -м затенении становятся недопустимо большими;

- точность координатной привязки по ЭК практически не зависит от действия одного либо группы искажающих факторов.

Эксперименты проводились с привлечением 62-х снимков от КА «MeteoSat-5» и «MeteoSat-8», в каждом из которых использовалось по 53 ОТМ.

- Алгоритм координатной привязки изображений по контурным точкам диска Земли обеспечивает точность оценивания углов крена и тангажа порядка 3 угл. с и угла рысканья порядка 200 угл. с. Такие точности оценки параметров координатной привязки обеспечиваются при 80%-м затенении диска Земли.

Эксперименты проводились с привлечением на 120 изображений спутника «MeteoSat-8» с имитацией характерных искажений.

- Время координатной привязки изображений по 53 опорным фрагментам составило 15 секунд, а по контурным точкам диска Земли - 10 секунд. Эксперименты выполнялись на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz, обладающей оперативной памятью 8 Гбайт.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ информационных технологий координатной привязки изображений земной поверхности по данным систем ориентации и навигации, по звездному небу, по опорным точкам местности (пиктограммам и электронным картам). Показано, что известные технологии не учитывают специфические особенности геостационарных систем наблюдения Земли и не обеспечивают необходимой точности и надежности координатной привязки, полной автоматизации процесса и решения задачи в реальном масштабе времени. Обоснована целесообразность решения этой задачи с использованием электронных карт береговых линий.

2. Исследованы особенности изображений от геостационарных систем наблюдения Земли, с учетом чего разработана комплексная технология координатной привязки космических изображений от геостационарных спутников на основе использования данных систем навигации и ориентации, контурных точек диска Земли и электронных карт. Разработаны и исследованы базовые алгоритмы этой технологии, а именно:

- алгоритмы формирования по ЭК опорных фрагментов в виде бинарных масок, представляющих собой две области, линия соприкосновения которых соответствует опорному участку карты, а содержание областей учитывает расположение водной и земной поверхностей снимка;

- алгоритм автоматического совмещения объектов береговых линий с бинарными масками, обеспечивающий высокоточную координатную привязку снимков (СКО привязки составляет 0.5 пикселя);

- алгоритм координатной привязки изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли, позволяющий оценить смещение центра изображения с точностью порядка 0.5 пикселя и тем самым значительно сузить зону поиска для технологии привязки по картам.

3. Разработаны и исследованы алгоритмы повышения точности и надежности координатной привязки снимков от геостационарных спутников по электронным картам, а именно:

- алгоритм компенсации систематических ошибок, обусловленных несовпадением береговых линий на снимке и карте, основанный на внесении в опорные фрагменты снимка определенных искажений и их последующей оценке по серии изображений; экспериментально установлено, что СКО оценки систематических ошибок составляет 0.2 пикселя;

- алгоритмы идентификации облачности в зонах поиска опорных фрагментов на основе геометрического описания береговых линий, которые позволяют восстановить или отбраковать области, частично или полностью закрытые облаками, и до 30 % сократить число ложных совмещений;

- алгоритм оценки степени уникальности опорных фрагментов карты, основанный на анализе автокорреляционной функции по различным направлениям, который позволил использовать опорные фрагменты с линейными участками береговых линий, увеличить число опорных фрагментов примерно на 30 % и снизить СКО привязки до 0.4 пикселя;

- алгоритм отбраковки отдельных участков совмещаемых фрагментов, на которых береговые линии снимка и карты не совпадают либо закрыты облаками, что позволило увеличить примерно на 40 % общее число опорных фрагментов и повысить тем самым точность координатной привязки.

4. Разработан программный комплекс координатной привязки видеоинформации с геостационарного спутника ПК MapMatching, который испытан и подготовлен для обработки информации с проектируемого в настоящее время геостационарного спутника «Электро-Л». Комплекс функционирует на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 МГц. Выполнены экспериментальные исследования алгоритмов координатной привязки снимков от геостационарных спутников. Установлено, что СКО привязки составляет 0.4 пикселя, а время решения этой задачи для входного потока видеоданных в 1.5 Гбайт составило 25 секунд.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Козлов Е.П., Пресняков О.А. Автоматическое выделение водных объектов на растровых картах // Тез. докл. 14-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 215.

2. Козлов Е.П. Информационные технологии совмещения одноименных объектов растровой карты и аэрокосмических изображений // Тез. докл. XI всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ, 2006. С. 154-155.

3. Козлов Е.П. Алгоритм идентификации одноименных объектов на космическом снимке и электронной растровой карте // Тез. докл. XVIII всероссийск. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке, проектировании, производстве». Нижний Новгород, 2006. С. 20.

4. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Выделение изображений водных объектов на космических снимках и картах // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. трудов. РГУ им. С.А. Есенина. Рязань, 2006. С. 65-68.

5. Козлов Е.П. Технология совмещения изображений от геостационарных спутников с электронными картами // Тез. докл. XII всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 320-321.

6. Каплин А.В., Козлов Е.П., Пресняков О.А. Определение установочных параметров ПЗС-линеек в многоэлементных сканирующих устройствах // Тез. докл. XII всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 318-320.

7. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Технология уточнения геодезической привязки изображений от геостационарных спутников по электронным картам // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. трудов. РГУ им. С.А. Есенина. Рязань, 2007. С. 41-44.

8. Козлов Е.П. Программное обеспечение автоматической геодезической привязки космических изображений по электронным картам // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 336-339.

9. Козлов Е.П. Автоматическое совмещение электронных карт с изображениями от геостационарных спутников с целью их высокоточной геодезической привязки // Тез. докл. всероссийск. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы». Тула, 2007. С. 107-108.

10. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Технология уточнения геодезической привязки изображений, полученных с геостационарных спутников, с использованием электронных карт // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сб. научн. статей. М.: Физматлит, 2008. С. 244–247.

11. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Автоматическая координатная привязка изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. №23. С. 14-20.

12. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Повышение точности и надежности совмещения электронных карт с изображениями от геостационарных спутников // Материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 110-111.

13. Козлов Е.П. Повышение точности и надежности идентификации объектов на космических изображениях // Тез. докл. XIII всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 56-58.

14. Козлов Е.П. Об одном подходе к решению задачи совмещения космических изображений Земли с электронными картами // Тез. докл. XIII всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 132-133.

15. Еремеев В.В., Егoшкин Н.А., Козлов Е.П. Повышение точности и надежности координатной привязки космических изображений по электронным картам // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. трудов. РГУ им. С.А. Есенина. Рязань, 2008. С. 55-59.

16. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Повышение эксплуатационных характеристик технологии геодезической привязки по электронным картам снимков от КА «Электро-Л» // Тез. докл. II всероссийск. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва: РНИИ КП, 2009. С. 83-84.

17. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Повышение точности и надежности координатной привязки снимков от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. №28. С. 6-12.

18. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П. Нормализация космических изображений Земли на основе их сопоставления с электронными картами // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 14-21.

19. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москатиньев И.В., Москвитин А.Э. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. научн. статей. Вып. 6. М.: Азбука-2000, 2009. С. 62-66.

Козлов Евгений Павлович

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ КООРДИНАТНОЙ
ПРИВЯЗКИ СНИМКОВ ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ КАРТАМ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.09.09 Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.