Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

УДК 004.021, 004.932

ШПАКОВСКИЙ

Евгений Александрович

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Автореферат
На соискание степени магистра
По специальности 7-06-0611-06 Системы и сети инфокоммуникаций

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
ЦВЕТКОВ Виктор Юрьевич

Минск 2026

Нормоконтролер

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сфера дистанционного зондирования Земли активно развивается. Быстро увеличивается количество космических аппаратов, позволяющих проводить съемку поверхности планеты. Также увеличиваются и качественные характеристики таких аппаратов.

Однако необработанные снимки не могут использоваться для вычисления каких-либо геометрических параметров, попавших на него объектов, так как снимок сам по себе показывает искаженную картинку. Исправить данный недостаток и устранить геометрические искажения способна операция ортотрансформации. При этом, для точного исправления изображения, данному процессу необходимо знать высоту над уровнем моря снятой подстилающей поверхности для каждого пикселя изображения.

Набор таких данных высот называется цифровой моделью рельефа или местности (ЦМР/ЦММ). Существуют различные открытые модели, доступные для использования, однако часто такие модели могут не удовлетворять по части разрешения на местности, точности и попросту иметь устаревшую информацию. Кроме того, модели имеющие высокое разрешение являются закрытыми. Поэтому часто возникает необходимость в получении более качественных и независимых данных о высоте снимаемой местности.

Одним из способов получить такую качественную модель поверхности, является космическая стереосъемка высокого (1-10 м/пикс) и сверхвысокого (менее 1 м/пикс) пространственного разрешения.

Кроме высокоточного ортотрансформирования, цифровые модели местности могут использоваться для создания топографических карт и 3D-моделей городов. Помогает градостроительстве, планировании и освоении территорий, а также для прочих геодезических услуг.

Поэтому, целью данной работы является создание цифровой модели местности на основе разноракурсной космической стереосъемки.

Для этого необходимо будет решить задачи:

– Изучить понятие цифровой модели рельефа, ее классификация и способы представления;

– Провести анализ различных алгоритмов стереоотождествления, необходимых для получения модели высот;

– Получить по исходным снимкам цифровую модель местности и применить для ортокоррекции исходных снимков.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 6 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №156 от 7 мая 2020 г. «Аэрокосмические и геоинформационные технологии» и научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2026–2030 гг. утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №135 от 1 апреля 2025 г. «Космические и авиационные технологии». Работа выполнялась в рамках производственной деятельности по развитию цифровых методов обработки космических снимков в ОАО «Пеленг».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование возможности получения и применения модели рельефа по разноракурсным снимкам ДЗЗ из космоса.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Изучено понятие цифровой модели рельефа, ее классификация и способы представления;
2. Изучены возможности создания таких моделей по снимкам ДЗЗ;
3. Проведен анализ различных способов создания и представления моделей рельефа;
4. Получена и применена рассчитанная по исходным снимкам цифровая модель местности.

Личный вклад соискателя ученей степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. В данной работе был реализован алгоритм для обработки пары стереоизображений ДЗЗ и расчета на их основе цифровой модели местности. Так же было показано как полученная модель применяется системе обработки целевой информации.

Основные результаты были получены автором самостоятельно. Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем

д.т.н., профессором В.Ю. Цветковым, а также с к.т.н., ведущим инженером-исследователем Н.О. Старосотниковым предприятия ОАО «Пеленг».

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IV Совместной международной научно-технической конференции «ЦИФРОВАЯ РЕАНОСТЬ: космические и пространственные данные, технологии обработки», (Минск, Республика Беларусь, 16-19 сентября 2024 г.) и XXIV Международной научно-технической конференции «ЦИФРОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ: космические и пространственные данные, технологии обработки», (Екатеринбург, Российская Федерация, 22-25 сентября 2025 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представляемых в диссертации, опубликовано 2 печатных работы, включающие: 2 статьи в сборнике материалов международно-технической конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, одного приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 93 страницы, из них 53 страницы текста, 45 рисунков на 26 страницах, 8 таблиц на 4 страницах, список использованных библиографических источников (34 наименований на 3 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (2 наименования на 1 странице), 1 приложения на 6 страницах.

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации Шпаковского Евгения Александровича «Цифровая модель местности на основе стереоизображений космической съемки» на корректность использования заимствованных материалов с применением сетевого ресурса «Антиплагиат» (адрес доступа: https://antiplagiat.ru) в on-line режиме __.__.____ г. В результате проверки установлена корректность использования заимствованных материалов (оригинальность диссертационной работы составляет ___ %).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор концепции цифровой модели рельефа (ЦМР) и её места в геоинформационных системах (ГИС). Рассмотрены ключевые методы построения и оценки качества таких моделей.

ЦМР является фундаментальным элементом ГИС и расширяет традиционные географические координаты (широту и долготу) за счёт включения высотной составляющей. Это позволяет работать с сотнями тысяч высотных отметок, что было недостижимо при использовании классических картографических методов. Благодаря развитию вычислительных технологий и возможности обработки больших данных, создание высокодетализированных цифровых моделей, адекватно отражающих реальный рельеф, стало технически выполнимой задачей.

Наряду с ЦМР существует близкое понятие цифровой модели местности (ЦММ) – цифрового представления топографических данных для конкретной территории. ЦММ может иметь векторную или растровую структуру. В растровом виде она представляет собой матрицу высот (GRID), где каждая ячейка содержит значение высоты, и обычно хранится в форматах типа GeoTIFF. В векторном виде модель чаще всего реализуется как триангуляционная нерегулярная сеть (TIN).

Структурной основой цифровых моделей могут служить иерархические, реляционные, сетевые или комплексные модели данных. Хранение осуществляется либо в базах данных, либо в виде файловых структур.

При создании растровой ЦМР (GRID) пространство разбивается на равные ячейки, формируя матрицу высот. Критически важным параметром является шаг сетки (плотность), который определяет пространственное разрешение модели. Уменьшение шага повышает детализацию и точность, но ведёт к экспоненциальному росту объёма данных и вычислительных затрат.

Наиболее распространённым типом нерегулярной сетки является модель TIN (Triangulated Irregular Network), разработанная в 1970-х гг. для построения поверхностей по неравномерно распределённым точкам. Основу её построения составляет триангуляция Делоне, которая обеспечивает оптимальные для моделирования рельефа свойства: минимальную гармоничность, максимальный минимальный угол в треугольниках и минимальную площадь формируемой поверхности.

Во второй главе были проанализированы различные методы стереоотождествления, которые необходимы для получения значений параллаксов, необходимой для создания ЦММ фотограмметрическим методом.

Главная идея, лежащая в основе этого метода, это построение карты диспарантности (несоответствия). Такая карта представляет собой изображение, на котором каждый пиксель представляет величину расстояния между соответствующими точками на паре стереоизображений.

Для каждой точки на одном изображении выполняется поиск парной ей точки на другом изображении. А по паре соответствующих точек можно выполнить триангуляцию и определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве.

Высота местности в этом случае будет прямо пропорциональна величине смещения на карте диспарантности.

Традиционная информационная технология построения ЦММ состоит в последовательной реализации следующих этапов: ректификация стереоизображений, нахождение соответственных точек, построение карты диспарантности.

Для улучшения качества и упрощения поиска соответствующих точек, изображения предварительно подготавливают, выравнивая так что бы все эпиполярные линии были параллельны сторонам изображения. Такой процесс выравнивания изображений называют ректификацией. Обычно ректификацию совершают путем преобразования изображения и ее совмещают с избавлением от дисторсии камеры.

Ректификация состоит в «выравнивании» изображений таким образом, что соответствующие точки оказываются на параллельных строках, ориентированных в одном направлении.

Пример ректифицированных изображений приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Ректифицированная пара тестовый стереоизображений

А соответствующая левому изображению карта диспарантности представлена на рисунке 2.

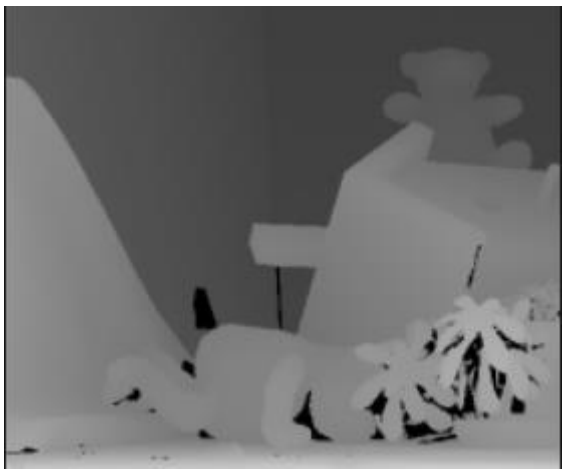

Рисунок 2 – Соответствующая карта диспарантности

В целом, все алгоритмы стереоотождествления основываются на четырех этапах:

1) Вычисление стоимости соответствия для каждого пикселя;
2) Агрегация этих стоимостей;
3) Вычисление или оптимизация диспарантности;
4) Уточнение диспарантности (фильтрация).

Хотя фактическая последовательность шагов зависит от конкретного алгоритма. Выделяется несколько видом алгоритмов стереоотождествления – это локальные алгоритмы, глобальные и полуглобальные.

Локальные методы стереосопоставления определяют параллакс для каждого пикселя на основе оценки сходства, рассчитанной исключительно для его непосредственного окружения. Для этого используется перемещаемое по изображению окно фиксированной формы и размера (чаще всего квадратное), в пределах которого вычисляется локальная стоимостная функция.

В отличие от них, глобальные методы ставят задачу иначе, рассматривая построение всей карты диспарантности как единую оптимизационную проблему. Они минимизируют глобальную целевую функцию энергии E(d), которая объединяет член данных (точность соответствия) и член сглаживания (пространственную согласованность), часто опуская явный этап локальной агрегации стоимостей.

Полуглобальный метод (SGM) занимает промежуточное положение. Он сохраняет классическую трёхэтапную схему локальных методов (расчёт стоимости, агрегация, выбор диспарантности), но заимствует у глобальных подходов математическую формулировку. Агрегация стоимостей в SGM выполняется путём минимизации энергии вдоль множества одномерных путей, что приближает решение к глобально оптимальному, сохраняя при этом сравнительно высокую вычислительную эффективность

В ходе исследования было выяснено, что для задач построения ЦМР по стереоснимкам ДЗЗ лучше всего подходит полуглобальный метод.

В третьем разделе даны краткие сведения о задаче ортокоррекции снимков ДЗЗ.

Изображения, полученные с помощью аппаратов дистанционного зондирования Земли, всегда содержат искажения, вызванные ориентацией датчика, изменениями рельефа и кривизной Земли. Искажения проявляются в виде различных масштабов объектов на изображении, смещения или даже кривизны этих объектов. Операция ортокоррекции, являющиеся частью любой обработки изображений, предназначены для исправления этих искажений. Приведены основные методы данной операции.

В ходе экспериментальной части были получены 2 цифровые модели местности на основе стереоизображений Земли из космоса. Каждая модель это 2 разные сцены: г. Сюнан, Япония и г. Хобарт, Австралия. Часть такой карты приведена на рисунке 3.

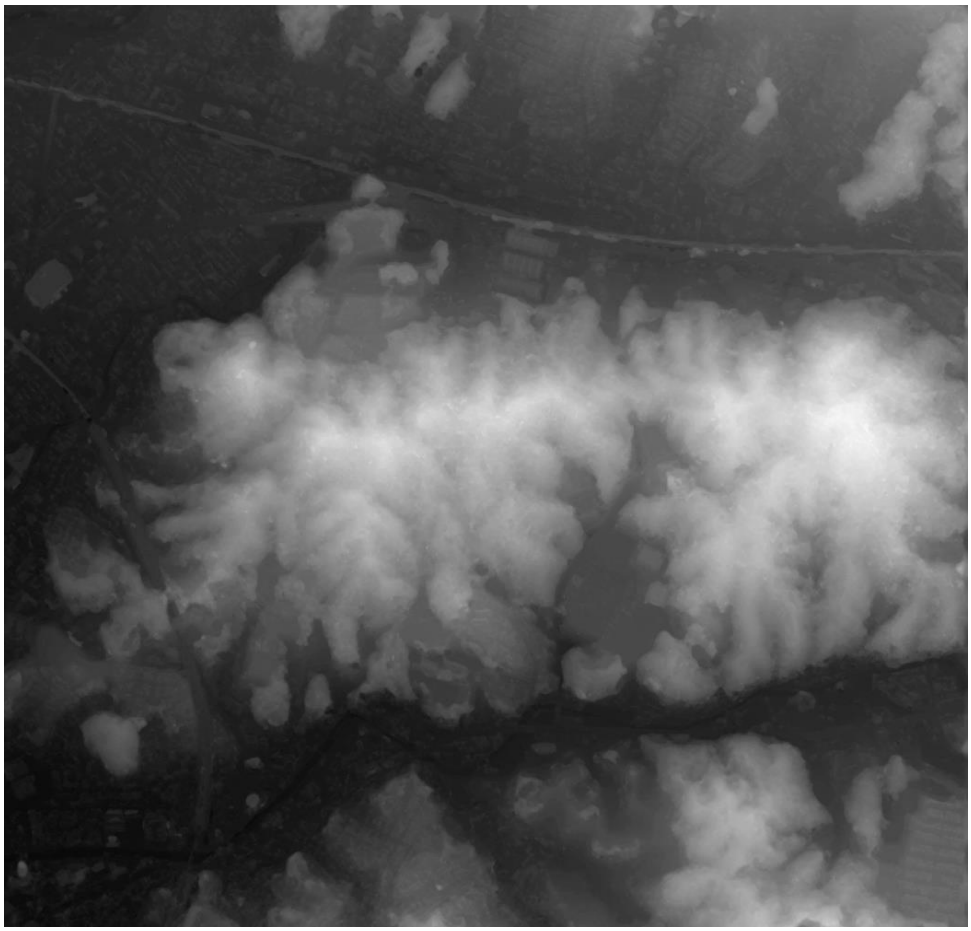

Рисунок 3 – Регион полученной модели местности

Был проведен анализ точности полученных высот. Для этого была построена карта разностных высот между полученной и опорной ЦМР. В

качестве опорной ЦМР была взята FABDEM с разрешением в 1 угловую секунду или 30 м/пикс.

На первом маршруте полученная точность составила 2.3 м для пологих областей и 9 метров для всего кадра. На другом 5.31 м и 21.4 соответственно.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что полученные цифровые модели местности имеют достаточно высокую точность по высоте. Особенно на равнинной местности, что указывает на то, что проводить оценку высот на горной местности, с большим количеством перепадов, довольно сложно. Что бы провести более качественный анализ необходима и более точная геопривязка.

В ходе экспериментальной части затронуты вопросы производительности. Был сделан вывод о том, что в текущей реализации время выполнения алгоритма достаточно велико. В дальнейшем планируется проводить улучшения в части оптимизации алгоритмов.

Достигнутая точность в целом позволяет использовать данные модели как конкретно для корректной ортотрансформации снимков, так и для других задач, в которых могут применятся подобные модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе было проведено исследование по созданию цифровой модели местности на основе космических стереоизображений. Для достижения цели диссертации, в работе были решены ее основные задачи.

Была изучена сфера понятий цифровой модели рельефа, способы их получения и область их применения. Для расчета ЦММ с помощью стереоизображений применяется фотограмметрический метод. Неотъемлемой частью данного метода являются алгоритмы стереоотождествления.

В ходе работы было проведено исследование различных алгоритмов стереоотождествления. В результате выяснилось, что для задач решения, поставленных задач лучше всего, подойдет метод полуглобального стереосопоставления. Он является сравнительно производительным и при этом практически не уступает методам глобальной оптимизации в качестве.

В результате данного исследования была получена цифровая модель местности для двух сцен по космическим стереоизображениям, полученным целевой аппаратурой, разработанной белорусским предприятием ОАО «Пеленг».

У полученных цифровых моделей местности была проведена оценка точности по высоте и в целом анализ качества получившихся карт высот

местности. Данные модели представлены в растровом виде регулярной сети высот в формате GeoTIFF.

В целом достигнута высокая точность, однако были обнаружены недостатки и некоторые ошибки модели. Данные ошибки скорее всего являются следствием некачественно выполненной ректификации. Также к недостаткам можно отнести вопросам производительности алгоритма. Для повышения точности расчета координат, необходимы более точные данных о внутренних элементах ориентирования космического аппарата.

Полученная модель была применена в процессе ортотрансформации исходных снимков. В результате был получен истинный, геометрически корректный и геопривязанный снимок местности.

Обнаруженные недостатки и проблемы полученных цифровых моделей поверхности, как и их дальнейшее качественное улучшение, будет являться частью дальнейших исследований.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Шпаковский, Е.А., Старосотников Н.О. Геометрические модели съёмочных оптико-электронных аппаратов дистанционного зондирования / Е.А.Шпаковский, Н.О.Старосотников // Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки: Материалы IV Совместной международной научно-технической конференции, Минск, 16 – 19 сентября 2024 года. — Москва: Межрегиональная общественная организация «Российское общество геодезии, картографии и землеустройства", 2024. – С. 40–46.

2. Старосотников Н.О., Шпаковский Е.А. Геометрические съёмочные оптико-электронные аппараты для группировок миниспутников / Н.О.Старосотников, Е.А.Шпаковский // Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки: Материалы XXIV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 22–25 сентября 2025г. С. 78–79.