

М. С. Тутанова^{1✉}, С. П. Оленюк², Е. В. Кайгородова²

Анализ построения поверхностей по материалам БПЛА

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, г. Караганда
e-mail: mikochkat1984@mail.ru

Аннотация. Материалы аэрофотосъемки представляют собой один из ключевых источников информации о территории, которые используются для создания и обновления топографических карт и планов, а также для получения других пространственных данных. Характеристики и качество аэрофотосъемки напрямую влияют на качество конечной продукции, такой как цифровые топографические карты и планы, ортофотопланы, единая электронная картографическая основа, а также цифровые модели рельефа и местности и ориентированные аэроснимки. Цель данного исследования заключается в оценке данных аэросъемки, которые позволят достичь наибольшей достоверности в определении средних квадратических погрешностей (СКП) точек трехмерных моделей, полученных с использованием алгоритма масштабно-инвариантной трансформации признаков (SIFT) для автоматического распознавания точек. Также будет изучено влияние этих СКП с учётом пространственного направления.

Ключевые слова: СКП (средняя квадратическая погрешность), SIFT, БПЛА (беспилотные летательные аппараты)

M. S. Tutanova^{1✉}, S. P. Olenyuk², E. V. Kaigorodova²

Analysis of the construction of surfaces based on UAV materials

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Karaganda Republic of Kazakhstan
e-mail: mikochkat1984@mail.ru

Abstract. Aerial photography materials are one of the key sources of information about the territory, which are used to create and update topographic maps and plans, as well as to obtain other spatial data. The characteristics and quality of aerial photography directly affect the quality of the final products, such as digital topographic maps and plans, orthophotoplans, a single electronic cartographic framework, as well as digital terrain and terrain models and oriented aerial photographs. The purpose of this study is to evaluate aerial survey data, which will allow achieving the greatest reliability in determining the average square errors (UPR) of points in three-dimensional models obtained using the scale-invariant feature transformation (SIFT) algorithm for automatic point recognition. The influence of these UPCs will also be studied, taking into account the spatial direction.

Keywords: UPC (standard deviation), SIFT, UAVs (unmanned aerial vehicles)

Введение

Анализ формирования поверхностей на основе данных аэрофотосъемки является ключевым этапом в обработке и анализе информации, полученной с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или других аэросъе-

мочных средств. Перед тем как приступить к анализу созданных поверхностей, необходимо провести предварительную обработку данных. Этот этап включает в себя удаление шумов, коррекцию и выравнивание изображений, а также создание облака точек или трехмерной модели местности. На основании облака точек или трехмерной модели осуществляется построение поверхностей, что может быть выполнено различными методами, такими как триангуляция Делоне, сглаживание сетки или другие алгоритмы, в зависимости от конкретных требований и целей анализа [1].

После формирования поверхностей требуется оценить их качество. Это включает в себя проверку на наличие артефактов, таких как разрывы или изломы, а также оценку точности и разрешения. В зависимости от поставленных задач может возникнуть необходимость сегментировать поверхности на различные классы или категории (например, земля, растительность, водные объекты и т. д.) [2].

После создания и классификации поверхностей проводится их интерпретация и анализ. Это может включать изучение характеристик местности, выявление изменений или особенностей ландшафта, а также планирование дальнейших действий на основе полученных данных [3].

Статистический анализ среднеквадратических погрешностей (СКП) поверхностей может быть полезен для оценки качества и точности данных аэрофотосъемки. Рассмотрим, как можно провести такой анализ для трех различных случаев.

1. Поверхность на основе опорных точек. При построении поверхности на основе опорных точек используются заранее измеренные на местности точки, которые служат опорными для формирования поверхности. Проведение анализа СКП для данного метода позволяет оценить точность и надежность созданной поверхности. Большие значения СКП могут указывать на неоднородность или нестабильность поверхности, тогда как малые значения СКП свидетельствуют о высокой точности данных.

При этом выделяются опорные точки на поверхности, которые имеют известные координаты, и для каждой координаты (X, Y и Z) рассчитывается СКП.

2. Поверхность по центрам фотографирования. Данный метод основан на использовании координат центров фотографирования для формирования модели местности. Он особенно эффективен при анализе данных аэрофотосъемки, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или спутников. В этом случае координаты центров фотографирования применяются для создания облака точек, и для каждой координаты в этом облаке также рассчитывается СКП. Это позволяет оценить точность определения координат центров фотографирования и, соответственно, точность самого процесса аэрофотосъемки. Анализ СКП для поверхности, построенной по центрам фотографирования, дает возможность оценить точность геопозиционирования изображений и их соответствие реальной местности. Высокие значения СКП могут указывать на ошибки в геопозиционировании или калибровке камер.

3. Поверхность по опорным точкам и центрам фотографирования. Этот метод сочетает данные об опорных точках с информацией о центрах фотографирования для создания более точной модели местности. В данном случае данные об опорных точках и центрах фотографирования объединяются для формирования более полного облака точек, после чего рассчитывается СКП для каждой координаты в этом объединенном облаке. Проведение анализа СКП для данного метода позволяет оценить общую точность и надежность данных, принимая во внимание как информацию об опорных точках, так и данные о центрах фотографирования. Такой подход может обеспечить более высокую точность поверхности по сравнению с использованием каждого из методов по отдельности.

Методы и материалы

Для вычисления среднеквадратических погрешностей (СКП) координат каждой точки модели из программы MetaShape были извлечены «соответствия», представляющие собой координаты точек на снимках. Эти фотограмметрические координаты были уравнены с использованием строгого метода в программе аналитической фототриангуляции «DonetskFoto», разработанной профессором Могильным С.Г. Результаты уравнивания содержат СКП для каждой точки модели [4].

В каждом из этих случаев статистический анализ СКП поможет определить уровень точности и надежности данных аэрофотосъемки, а также может быть использован для корректировки и улучшения процесса съемки в будущем.

Для интерполяции поверхностей на основе данных съемки БПЛА карьера использовалась программа Surfer. Это позволило создать гладкую и непрерывную поверхность, отражающую геометрию местности или объектов.

Программа Surfer применяет методы интерполяции, такие как метод наименьших квадратов, для создания поверхностей погрешностей на основе имеющихся данных. Это позволяет заполнить промежутки между измеренными точками и сформировать непрерывную поверхность.

После интерполяции данных Surfer предоставляет возможность визуализировать полученные поверхности погрешностей в 3D и 2D форматах, что позволяет увидеть изменения высот и неровности на поверхности карьера.

После визуализации поверхностей погрешностей можно провести анализ данных для выявления особенностей рельефа, определения участков с наибольшими погрешностями и оценки общего характера поверхности карьера.

На основе визуализации и анализа поверхностей погрешностей можно сделать выводы о структуре, характере и точности определения поверхности карьера, а также принять обоснованные решения на основе полученных данных.

При подготовке исходных данных скаляры векторов погрешностей M_x , M_y и M_z были дополнены скаляром суммарного вектора Lin , вычисленным по формуле $\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$. Затем данные были загружены построчно в файл внутреннего формата программы Surfer, где методом линейной интерполяции для каждого показателя (M_x , M_y , M_z и Lin) они были преобразованы в соответствующие GRID-поверхности размерностью 1000x1000. Визуализация резуль-

тата осуществлялась в той же системе в виде цветовой карты в соответствии с заданной шкалой значений.

Таким образом, на поверхностях погрешностей наблюдается неравномерное распределение и различия в значениях СКП (Рисунок 1,2,3), при этом выделены зоны с наибольшими показателями СКП.

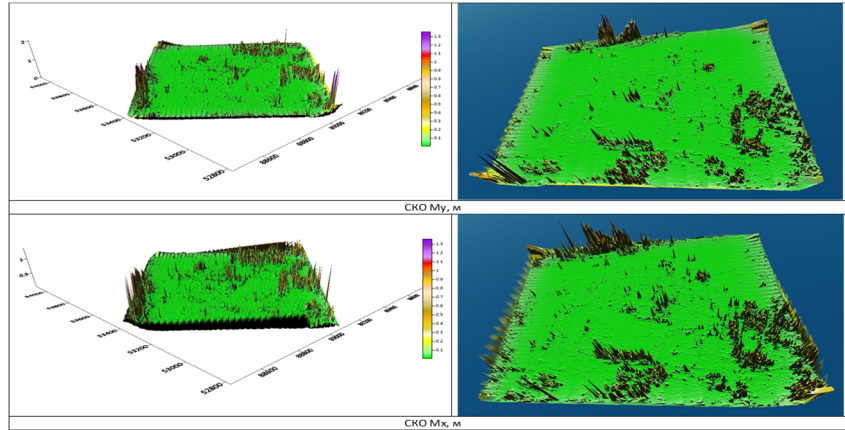


Рис. 1. Поверхность погрешностей M_x , M_y

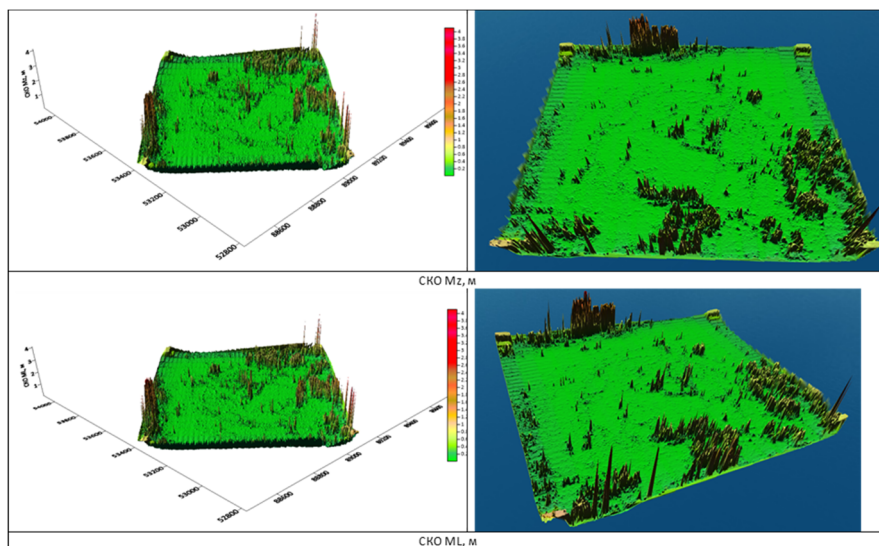


Рис. 2. Поверхность погрешностей M_z M_l

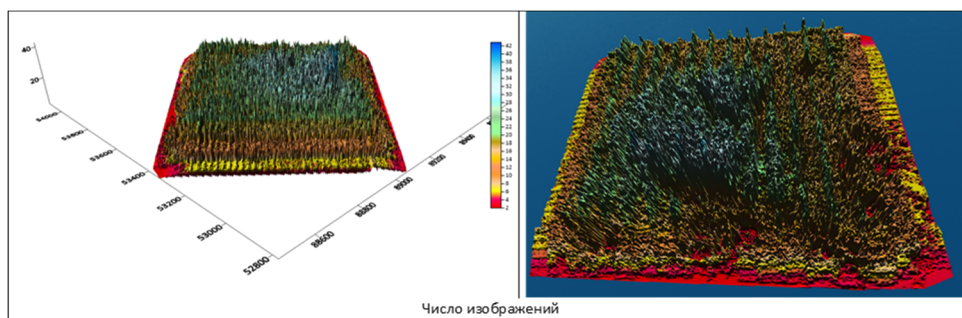


Рис. 3. Поверхность числа изображений

Нормированная частота распределения среднеквадратических погрешностей (СКП) является показателем того, как часто определенные значения СКП встречаются в наборе данных или в исследуемой выборке. Этот инструмент может быть полезен для анализа различных аспектов данных, таких как изменчивость или стабильность. Нормированная частота распределения СКП позволяет оценить вероятность того, что СКП будет находиться в определенных диапазонах значений. Например, при исследовании распределения СКП для данных, связанных с БПЛА, можно выявить, что большинство значений СКП сосредоточено в узком диапазоне, что свидетельствует о высокой степени стабильности или предсказуемости этих данных. Это также может указывать на то, что вероятность малых ошибок значительно превышает вероятность больших, что является важной информацией для оптимизации и улучшения процессов или систем, связанных с БПЛА. Результаты статистического анализа показали нормированную частоту распределения СКП по интервалам, из которых видно, что вероятность малых ошибок значительно выше, чем вероятность крупных (рисунок 4) [5,6].

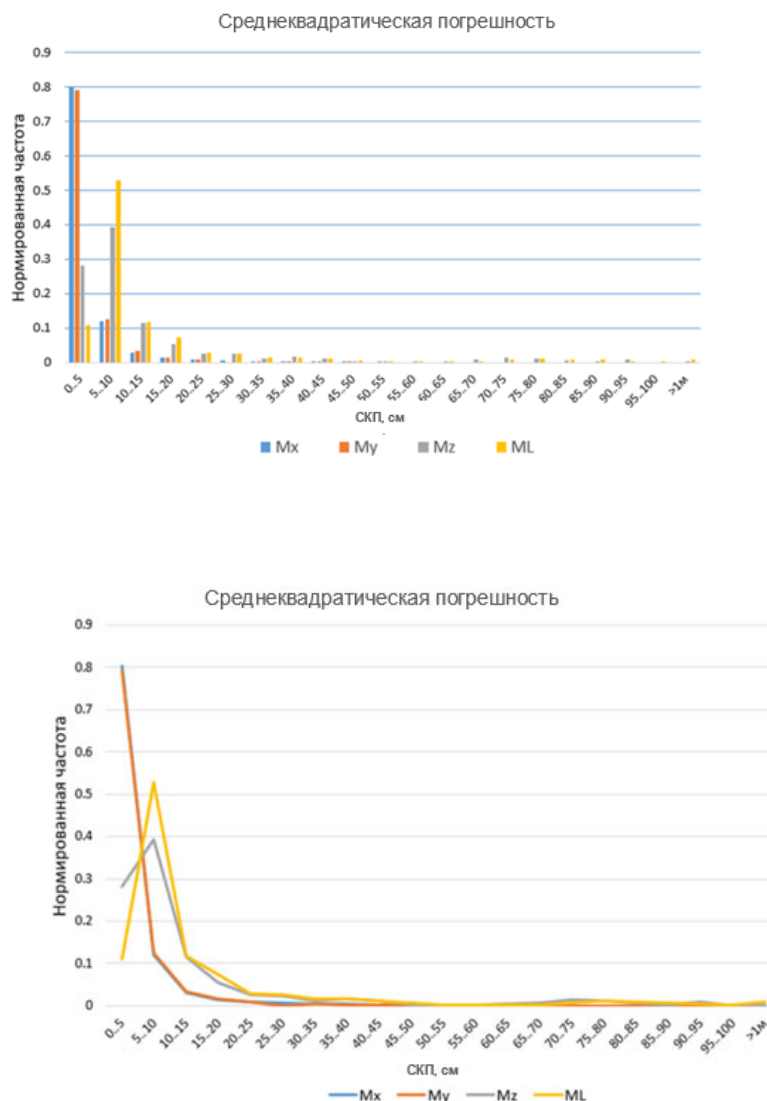


Рис. 4. Нормированная частота распределения СКП по интервалам

Результаты

Анализ данных о средней квадратической погрешности определения координат точек (СКП) для различных интервалов точности (до 20 см, до 15 см и до 10 см) в направлениях M_x , M_y , M_z и длине ML показывает следующее:

Наблюдается, что с увеличением точности (снижением СКП) значения СКП во всех направлениях и длине также уменьшаются. Это логично, поскольку более точные измерения должны иметь меньшие отклонения от истинного значения.

Например, для направления M_x снижение нормированной частоты СКП с 0.969 до 0.924 (при переходе от интервала точности до 20 см к интервалу до 10 см) демонстрирует значительное уменьшение погрешности.

Относительное влияние направлений M_x , M_y , M_z :

Можно заметить, что в различных интервалах точности, значения СКП для направлений M_x и M_y близки, в то время как M_z и ML имеют более высокие значения.

Это может свидетельствовать о специфике измерений или природе данных: например, если ось M_z соответствует вертикальной компоненте, то более высокое СКП может указывать на сложные условия съемки или повышенную чувствительность к изменениям высоты.

Интерпретация значений СКП:

Значения СКП ниже 1 указывают на относительно небольшие отклонения от среднего. Например, нормированная частота СКП 0.924 (при точности 10 см) вполне приемлемо для многих геодезических и картографических приложений.

Тем не менее, следует учитывать, что оптимальное значение СКП зависит от конкретного контекста и требований проекта, так как некоторые приложения могут требовать более высокой точности [7].

Обсуждение

Статистический анализ, включая распределение СКП, помогает не только оценить точность, но и выявить закономерности в данных, что важно для оптимизации процессов съемки и улучшения качества получаемых моделей.

Выявление подобных закономерностей наиболее наглядно с использованием 3D поверхностей погрешностей, являющихся важным инструментом для детального анализа и принятия решений.

Заключение

Повышение значения СКП или корреляция с другими факторами могут указывать на возможные ошибки в процессе съемки или в калибровке оборудования, что может быть учтено в будущих исследованиях.

Перспективным направлением дальнейших исследований может быть применение подобного анализа для данных, полученных с использованием оборудования с различными характеристиками в разных топографических и атмосферных условиях при исследовании влияния разнородных факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ессин, А. С. Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата / А. С. Ессин, С. С. Ессин // Сб. материалов науч. конф. «ГЕО-Сибирь – 2007». – Новосибирск : СГГА, 2007. – Т. 3. – С. 48–52.
2. Гафуров, А.М. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии // А.М. Гафуров// Ученые записки казанского университета. Серия естественные науки. 2017, Т. 159, кн. 4. С. 654–667
3. He Zhang, Emilien Aldana-Jague, François Clapuyt, Florian Wilken, Veerle Vanacker, and Kristof Van Oost Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure- from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection // European Geosciences Union. 2019, V.7, I. 3. P. 807-809
4. Могильний, С.Г. Теоретичні основи побудови цифрових квазізімків / С.Г. Могильний, А.О. Луньов // Вісник геодезії та картографії. – 2007. -№1. – С. 25-28.
5. Прокопенко, Е. В. Анализ погрешности при построении месторождений полезных ископаемых с использованием программного пакета SURFER / Е. В. Прокопенко, С. В. Масло // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2020) : Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции в рамках VI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики, Донецк, 27–28 мая 2020 года / Редколлегия: Ю.К. Орлов [и др.]. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 29-32. Кусаинова А. А. Сапар А.И.
6. Кусаинова, А.М. Особенности работы с картографическим редактором SURFER // А.М. Кусаинова // Геодезия, землеустройство и кадастр: наука и производство : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию высшего геодезического образования в Омском ГАУ, Омск, 30 марта 2018 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 64-68.
7. Мальцев, К.А. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer) / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова // : Учебное пособие. – Казань: Казанский университет, 2014. – С.103.

© М. С. Тутанова, С. П. Оленюк, Е. В. Кайгородова, 2025