

Жиленко Андрей Васильевич,
магистрант, КарТУ им. А. Сагинова

РАЗМЕЩЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ПРИ БПЛА-ФОТОГРАММЕТРИИ ДЛЯ УЧАСТКОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Аннотация. В статье анализируется влияние количества и пространственного распределения GCP на точность БПЛА-фотограмметрии. Показано, что рациональная схема опорных точек зависит от площади, формы участка и требуемой точности. Для линейных объектов особое значение имеет распределение GCP вдоль коридора и контроль его концов.

Ключевые слова: БПЛА-фотограмметрия, GCP, CP DSM, RMSE; коридорная съёмка.

БПЛА-фотограмметрия используется для получения ортофотопланов, цифровых моделей поверхности (Digital Surface Model, далее DSM), облаков точек и 3D-моделей, применяемых в инженерно-геодезических задачах. Для их применения важна не только пространственная детализация, но и точность координат и высот.

Точность результатов зависит от параметров съёмки и обработки: высоты полёта, размера пикселя на местности (Ground Sampling Distance, далее GSD), перекрытия снимков, калибровки камеры, морфологии поверхности, способа геопривязки, а также количества и размещения наземных опорных точек (Ground Control Points, далее GCP). GCP связывают фотограмметрическую модель с принятой системой координат, но их установка увеличивает объём полевых и камеральных работ. В связи с этим практическая задача состоит в выборе рационального числа GCP и схемы их размещения с учётом площади, формы участка и требуемой точности.

Цель статьи – проанализировать результаты трёх исследований, отражающих разные условия размещения наземных опорных точек при БПЛА-фотограмметрии: малый городской участок, территории различной площади и коридорный объект, а также обобщить влияние количества и схемы пространственного распределения GCP на точность формируемых фотограмметрических моделей.

Обобщённая характеристика рассмотренных исследований приведена в таблице 1.

Таблица 1

Роль рассмотренных исследований в анализе размещения GCP

Источник	Условия исследования	Что анализировалось	Значение для данной статьи
Oniga et al [1]	Малый городской участок около 1 га	Количество GCP и два варианта их пространственного распределения	Показывает, что увеличение числа GCP эффективно только до определённого предела; в условиях эксперимента основной прирост точности наблюдался при переходе к 20 GCP
Yu et al [2]	Три участка разной площади: 7, 39 и 342 га	Влияние числа GCP на точность 3D-облаков точек и DSM	Показывает, что рациональное число GCP зависит от площади участка: для малых и средних участков авторы выделяют 12 GCP, для крупного – 18 GCP
Ferrer-González et al [3]	Дорожный коридор 2100 м на 190 м	Количество и пространственное распределение GCP при коридорной съёмке	Показывает, что для линейных объектов важна схема распределения GCP вдоль коридора; рациональными оказались варианты с 9 и 11 GCP по обеим сторонам дороги

Данные таблицы 1 показывают, что выбранные исследования не являются прямыми аналогами, однако раскрывают разные аспекты одной задачи: влияние количества GCP, площади участка и геометрии объекта на точность БПЛА-фотограмметрии.



Базовый подход к этой проблеме представлен в статье «Determining the Suitable Number of Ground Control Points for UAS Images Georeferencing by Varying Number and Spatial Distribution» [1]. В ней оценивалось влияние количества и пространственного распределения GCP на точность геопривязки снимков, полученных с БПЛА, обработанных методом Structure-from-Motion. Исследование выполнено на малом городском участке площадью около 1 га. Для эксперимента была создана локальная геодезическая сеть и заложено 300 равномерно распределённых точек, часть которых использовалась как GCP, а часть – как независимые контрольные точки (Check Points, далее CP). Проверялись сценарии с 4, 8, 20, 25, 50, 75, 100, 125 и 150 GCP; при этом число контрольных точек во всех сценариях оставалось постоянным – 150 CP.

Точность оценивалась по среднеквадратической ошибке (Root Mean Square Error, далее RMSE) в плановой, высотной и общей составляющих. Дополнительно облака точек и полигональные модели сравнивались с данными наземного лазерного сканирования. Наиболее заметное снижение ошибки наблюдалось при увеличении числа GCP до 20: при систематическом распределении общая RMSE уменьшилась с 29,5 см при 8 GCP до 9,3 см при 20 GCP, при стратифицированном случайном распределении – с 19,6 см до 8,7 см. Дальнейшее увеличение числа точек снижало ошибку значительно медленнее.

При интерпретации этих результатов важно учитывать особенности экспериментального участка. Несмотря на большое число измеренных точек, точность ограничивалась не только количеством GCP. На общий RMSE существенно влияла высотная составляющая: при 20 GCP плановая точность была выше, чем высотная. Повышенные ошибки сохранялись на краях крыши и фасаде здания, что связано с резкими изменениями поверхности, слабой текстурой и радиометрической однородностью отдельных участков. Кроме того, точность снижалась в зонах, выходящих за пределы области, надёжно охваченной GCP. Следовательно, данная статья показывает не только эффект увеличения числа опорных точек, но и ограниченность такого подхода: даже значительное количество GCP не компенсирует полностью сложную геометрию объекта, слабую текстуру и неудачное пространственное охватывание участка.

Следующий уровень анализа представлен в статье «Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models» [2]. В отличие от предыдущей работы, здесь рассматриваются три участка разной площади: малый участок 7 га, средний участок 39 га и крупный участок 342 га. Средний участок имел вытянутую форму, а крупный требовал съёмки БПЛА с фиксированным крылом из-за большой площади. Для малого участка использовались 3, 6, 9, 12 и 14 GCP; для среднего и крупного – 3, 6, 9, 12, 15 и 18 GCP.

В качестве результатов обработки анализировались 3D-облака точек и DSM. Точность оценивалась по контрольным точкам и RMSE в плановой, высотной и общей составляющих. Результаты показали, что на малом участке изменение числа GCP почти не влияло на плановую ошибку 3D-облака точек, тогда как на среднем и крупном участках увеличение количества GCP снижало горизонтальную ошибку. Более выраженное влияние наблюдалось по высотной и общей точности: при использовании 3 GCP ошибки были наибольшими, а при увеличении числа точек снижались.

Для DSM получена аналогичная зависимость: вертикальная ошибка уменьшалась при увеличении количества GCP. Для малого участка вертикальная RMSE DSM снизилась до 0,039 м при 14 GCP, для среднего – до 0,037 м при 18 GCP, для крупного – до 0,069 м при 18 GCP. В обобщающем сравнении авторы делают вывод, что для малых и средних участков оптимальным является 12 GCP, а для крупного участка – 18 GCP.

Эта статья показывает, что универсального числа GCP не существует. Количество опорных точек должно назначаться с учётом площади участка, требуемой точности и вида формируемых фотограмметрических моделей. Вытянутая форма среднего участка показывает, что при выборе GCP важна не только площадь, но и геометрия территории.



Особенности размещения GCP на вытянутых объектах рассмотрены в статье «UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points» [3]. В ней рассматривается дорожный коридор размером 2100 м на 190 м. Для таких объектов схема наземного опорного обоснования имеет особое значение, поскольку одна размерность значительно превышает другую, а ошибки могут распределяться вдоль направления съёмки. На участке было измерено 47 точек с сантиметровой точностью GPS; часть использовалась как GCP, часть – как CP. Всего было сформировано 13 фотограмметрических проектов с разным количеством и распределением GCP.

Точность оценивалась по RMSE при геопривязке и методом МЗС2, основанным на сравнении облаков точек. Для всех рассмотренных схем увеличение числа GCP улучшало плановую и высотную точность, однако решающим оказалось их пространственное распределение. Наихудшие результаты были получены при размещении точек только с одной стороны дороги. Более точные результаты дали схемы, где GCP располагались по обеим сторонам коридора.

Оптимальными по соотношению точности и трудозатрат оказались конфигурации с 9 и 11 GCP, что соответствует 4,3 и 5,2 GCP/км. Эти точки размещались по обеим сторонам дороги в смещённой схеме с дополнительными парами на концах коридора. Для таких вариантов средние значения RMSE составили 0,029 и 0,028 м в плане и 0,057 и 0,055 м по высоте. Близкие значения были получены и при использовании 18 GCP, однако такой вариант требовал большего объёма полевых работ. Сравнение методом МЗС2 подтвердило выводы, полученные по RMSE.

Анализ трёх исследований [1, 2, 3] показывает, что точность БПЛА-фотограмметрии нельзя обеспечить простым увеличением числа наземных опорных точек. На малом городском участке основной прирост точности был достигнут при увеличении числа GCP до 20 точек: после этого дальнейшее добавление опорных точек давало меньший эффект. При этом точность ограничивалась не только числом GCP, но и высотной составляющей ошибки, сложной геометрией объекта, слабой текстурой отдельных поверхностей и тем, насколько хорошо участок был охвачен опорными точками. На участках разной площади рациональное число GCP также менялось: для малых и средних площадок оптимальным оказалось 12 GCP, тогда как крупная территория потребовала 18 GCP.

Для коридорных объектов главным фактором стала не численность GCP сама по себе, а их размещение вдоль вытянутой формы участка. Одностороннее расположение точек ухудшало результат, а более устойчивую точность обеспечивали схемы с размещением GCP по обеим сторонам дороги и усилением концов коридора. Следовательно, при БПЛА-фотограмметрии схема наземного опорного обоснования должна выбираться с учётом площади, формы участка, характера поверхности и требуемой планово-высотной точности. Оптимальная схема – это не максимальное количество GCP, а такое их число и расположение, при котором достигается требуемая точность без избыточного увеличения объёма полевых работ.

Список литературы:

1. Oniga V.-E., Breaban A.-I., Pfeifer N., Chirila C. Determining the Suitable Number of Ground Control Points for UAS Images Georeferencing by Varying Number and Spatial Distribution // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, №5. Art. 876. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/5/876>
2. Yu J. J., Kim D. W., Lee E. J., Son S. W. Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models // Drones. 2020. Vol. 4, №3. Art. 49. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/49>
3. Ferrer-González E., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, №15. Art. 2447. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2447>

