

УДК 528.7

ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ГЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА ПРИ ОРИЕНТАЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

Гринблат Д. А., аспирант, группа ГМа-221, I курс
Научный руководитель: Михайлова Т. В., к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой маркшейдерского дела и геологии
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово

В настоящее время, когда глобальные тенденции всеобщей цифровизации общества направлены на максимальную автоматизацию рабочих процессов, вектор развития технологий направлен на повышение качества и скорости обработки данных с минимальным участием человека в нудные и монотонные процессы. Маркшейдерско-геодезическая отрасль, которая в сути своей представляет деятельность, направленную на производство большого количества измерений, расчётов и построений, во многом выигрывает от происходящих процессов. Развитие беспилотных летательных аппаратов и цифровых программно-аппаратных комплексов дало возможность автоматизировать фотограмметрический метод получения пространственной информации из аэрофотоснимков и в автоматическом режиме осуществить построения трёхмерной цифровой модели, являющейся на текущий момент основой для различного рода маркшейдерско-геодезических работ.

Для построения трёхмерной цифровой модели программно-аппаратный комплекс на основе данных с фотографии [1] о высоте, угле поворота камеры, о положении по широте и долготе находит общие точки на нескольких фотографиях. Для этого используются фотограмметрические технологии в сочетании с возможностями машинного зрения. Соответствующие точки закрепляются в пространстве в трёх координатах, также их положения корректируются при нахождении новых соответственных положений на соседних снимках. Затем происходит сгущение облака точек и программное вычисление карты глубины для каждой камеры. Пространственные координаты каждой точки вычисляются методом триангуляции: образуется сеть треугольников, на основе которой будут построены полигоны, совокупность которых и составляет трёхмерную цифровую модель, полученную при обработке аэрофотосъёмки.

Огромное значение имеет последующая привязка полученной трёхмерной цифровой модели. Наиболее распространённым и надёжным методом, обеспечивающим высокоточную привязку цифровой модели, является привязка по опорным пунктам. В этом случае указываются проекции опорных пунктов на фотографиях в ручном режиме [2] в количестве не менее 3, а также выделяется как минимум одна контрольная, которая не будет участвовать

в привязке модели, но будет осуществлять функцию контроля точности модели. В случае, если в наличии имеется полный список параметров калибровки камеры, включающий в себя фокусное расстояние, координаты главной точки (координаты пересечения оптической оси объектива с плоскостью сенсора), коэффициенты аффинности (преобразование связей, равное отношению фокусного расстояния проектирующей системы к фокусному расстоянию камеры) и скоса (коэффициент неортогональности системы координат снимка), коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии, а также осуществлено высокоточное позиционирование беспилотника в момент съёмки, можно осуществить привязку модели исключительно по данным координат центров фотографирования.

Высокоточное позиционирование представляет собой совокупность методов, определяющих пространственное положение объекта и изменение местоположения объекта со временем. В текущих реалиях представляется возможным осуществление высокоточного позиционирования БПЛА с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [3]. На борт БПЛА устанавливаются ГНСС антенна для приёма сигнала со спутниковых группировок и OEM-плата – компактная плата GNSS RTK с возможностью отслеживания всех существующих спутниковых группировок для обеспечения высокоточного позиционирования. Для определения параметров курса, тангаж и крен устанавливается бесплатформенной инерциальной навигационной системой.

ГНСС использует линейную обратную геодезическую засечку для определения пространственного положения пункта, для чего производятся измерения псевдодальностей от, как минимум, четырёх спутников, что даёт возможность рассчитать планово-высотное положение и произвести контроль. При количестве спутников больше трёх система становится переопределённой, возникают избыточные измерения, обработав которые методом наименьших квадратов, можно повысить точность определения координат и устранить влияние дополнительных параметров.

Есть возможность получить высокоточные координаты центров фотографирования в постобработке или в режиме RTK [4]. В случае получения высокоточных координат в режиме RTK необходимо обеспечивать дополнительный канал для передачи поправок, т.е. встраивать на борт дополнительные модули связи в виде УКВ и GSM-модемов. Ниже рассмотрим вариант постобработки для получения координат центров фотографирования при аэрофотосъёмке с БПЛА.

Для успешной постобработки необходимо иметь в наличии два набора измерений:

- в режиме «статика» – данные с базовой станции, наблюдаемые относительно спутников в течение длительного времени;
- в режиме «кинематика» – данные с метками событий ровера, установленного на борту БПЛА, полученные через равные промежутки времени в момент фотографирования.

Чтобы оценить возможности использования высокоточного позиционирования применительно к БПЛА для маркшейдерско-геодезического обеспечения, рассмотрим полный цикл камеральной обработки с итоговой оценкой погрешности ориентирования трёхмерной цифровой модели относительно контрольных опорных пунктов, закреплённых на местности. Для оценки использовалась камера с высоким разрешением, масштаб аэрофотосъёмки составил 1:10000. Камеральная обработка ГНСС измерений осуществлялась в программе Justin, совмещение данных высокоточной телеметрии с координатами центров фотографирования – в утилите AeroPhoto, построение трёхмерной цифровой модели выполнялось в программе AgiSoft Photoscan.

При обработке фотографий была возможность программной оценки спутникового покрытия над беспилотником при аэрофотосъёмки (рисунок 1), при этом часть данных, в случае необходимости, исключается при обработке.

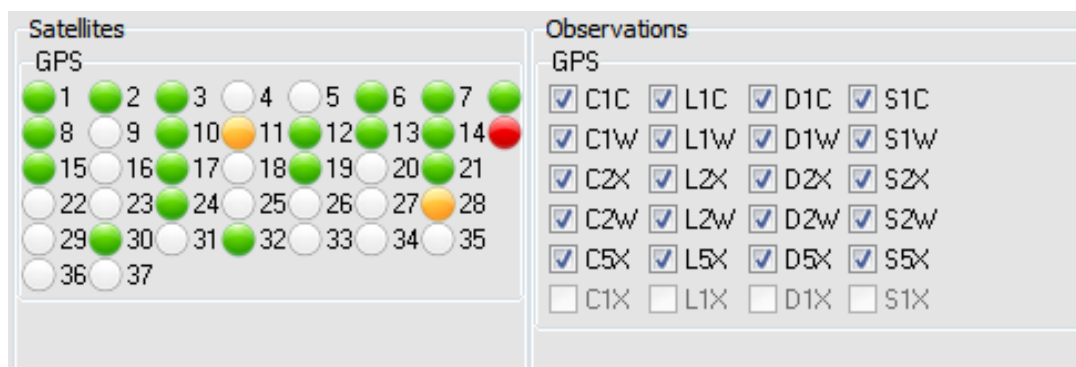


Рисунок 1 – Состав измерительной информации ГНСС

Суть обработки двух массивов данных, описанных выше (рисунок 1), заключается в определении приращений координат центров фотографирования относительно базовой станции, полученных при измерении в режиме «статика». Для этого построены кинематические векторы относительно «решённой» базовой станции, используя заданные параметры антенны БПЛА и статичного приёмника с учётом поправок за редуцицию. Итог обработки представлен на рисунке 2, обработанный маршрут – на рисунке 3.

Результаты обработки векторов были подвергнуты критерию Фишера (рисунок 2) с доверительным интервалом 95 % на основании контраста решения [5]. Полученные в ходе обработки данные уравнены на известный закреплённый «контрольный» пункт, на который была установлена базовая станция, производящая измерения в режиме «статика».

24.03.2023 16:26:21: Process started
 24.03.2023 16:27:25: log0426a - bort_2676_0426a: коэффициент 94.18%, измерений использовано: 45860 из 46319 (1% отбраковано)
 24.03.2023 16:27:27: Process finished

Рисунок 2 – Обработка векторов

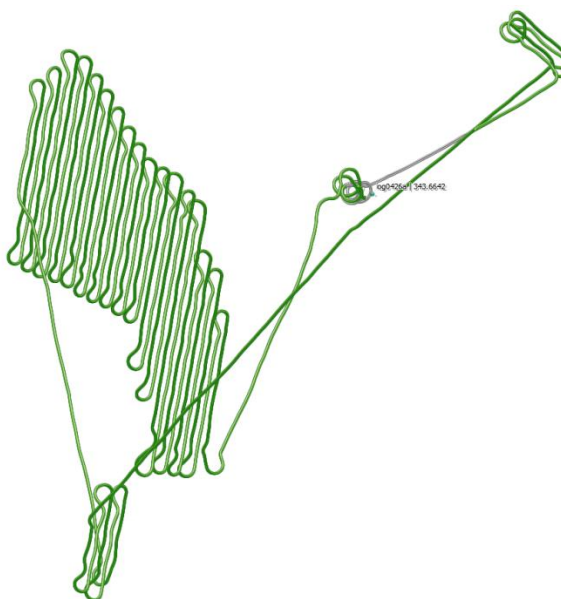


Рисунок 3 – Маршрут после обработки

Результаты обработки векторов были подвергнуты критерию Фишера (рисунок 2) с доверительным интервалом 95 % на основании контраста решения [5]. Полученные в ходе обработки данные уравниены на известный закреплённый «контрольный» пункт, на который была установлена базовая станция, производящая измерения в режиме «статика». Уравнивание произведено методом наименьших квадратов [6]. Результаты уравнивания представлены на рисунке 4.

Система координат:	СК-42 / Gauss-Kruger zone 15 - 84-90° E
Единицы:	метры
Тип высот:	Эллипсоидальная
Время	UTC время
Метод уравнивания:	Метод наименьших квадратов
Вне допуска:	Автоматическое удаление
Ограничения:	Свободная сеть
Режим:	NEU/3D
chi2:	0%
Доверительный интервал для плохих ребер:	0%

Пункты						

пункт	Север, м	Восток, м	Высота, м	СКО N, м	СКО E, м	СКО U, м
	СКО, м					

log0426a	6018650.9938	15496158.6510	348.9839	0.00000	0.00000	0.00000
height)						

Рисунок 4 – Результат уравнивания пункта базовой станции

После уравнивания кинематических векторов относительно закреплённого пункта наземной базовой станции, был сформирован файл событий, в котором, с учётом калиброванных данных камеры о смещении координат центра снимка, сформированы высокоточные позиционные координаты. Результаты обработки представлены на рисунках 5 и 6.

X смещение, м	0.013
Y смещение, м	0.001
Z смещение, м	-0.033
Фотокамера	
Интервал задержки, мс	0.000
Фокусное расстояние, мм	35.000
Расстояние до пленки, мм	0.000
<input type="checkbox"/> Гиросплатформа	

Рисунок 5 – Данные о камере

```

Самолет:
X смещение:      0.013
Y смещение:      0.001
Z смещение:     -0.033
Фотокамера:
Фокусное расстояние: 0.035
Расстояние до пленки, мм: 0
интервал задержки, мс: 0
    
```

Событие	UTC время	Север	Восток	Высота	СКО, м	Азимут
A00002	26.04.2022 05:06:52.373	6018596.4793	15495991.7359	345.7614	0.009	144.233
A00003	26.04.2022 05:07:01.678	6018596.4789	15495991.7583	345.7772	0.009	66.398
A00004	26.04.2022 05:07:03.081	6018596.4849	15495991.7298	345.7822	0.009	-49.668
A00005	26.04.2022 05:07:04.960	6018596.4821	15495991.7508	345.7809	0.009	40.545
A00006	26.04.2022 05:07:06.022	6018596.4775	15495991.7592	345.7928	0.009	23.772
A00007	26.04.2022 05:15:58.272	6013045.8212	15492692.7039	717.1026	0.011	-13.015
A00008	26.04.2022 05:16:00.372	6013091.8724	15492683.7880	721.6962	0.012	-10.206
A00009	26.04.2022 05:16:02.531	6013139.8079	15492675.7413	721.0048	0.012	-8.756
A00010	26.04.2022 05:16:04.654	6013188.4857	15492668.0100	720.9523	0.012	-10.394
A00011	26.04.2022 05:16:06.792	6013236.4175	15492655.1204	720.5220	0.013	-22.069
A00012	26.04.2022 05:16:08.812	6013280.7167	15492638.6410	720.0878	0.013	-14.415
A00013	26.04.2022 05:16:10.933	6013331.2072	15492637.1558	716.9352	0.012	11.463
A00014	26.04.2022 05:16:12.933	6013376.7797	15492655.1173	718.6072	0.013	28.186
A00015	26.04.2022 05:16:14.892	6013417.8754	15492678.9715	721.2502	0.012	30.481
A00016	26.04.2022 05:16:16.872	6013460.3301	15492701.7360	720.0090	0.012	25.227
A00017	26.04.2022 05:16:18.852	6013503.7268	15492718.7899	717.9178	0.012	16.860
A00018	26.04.2022 05:16:20.911	6013547.9351	15492727.9892	718.2373	0.012	8.448
A00019	26.04.2022 05:16:23.131	6013593.5312	15492733.4649	716.6780	0.012	5.734
A00020	26.04.2022 05:16:25.492	6013641.4370	15492738.4108	715.2296	0.012	6.437

Рисунок 6 – Сформированный файл событий (телеметрия)

Совмещение полученного файла телеметрии (рисунок 6) производилось с использованием утилиты AeroPhoto. В итоге был получен файл EXIF (Exchangeable image file format), содержащий информацию о высокоточной геопривязке трёх координат каждого снимка относительно его центра фотографирования (рисунок 7).

После формирования EXIF файла была произведена дальнейшая камеральная обработка, итогом которой стало создание трёхмерной цифровой модели карьера с помощью программы AgiSoft Metashape. Пример модели с размещением на ней в ручном режиме контрольных пунктов, которые не участвовали в привязке, но служили для оценки точности созданной модели, представлен на рисунке 8. На рисунке 9 показаны среднеквадратичные погрешности положения контрольных пунктов в пространстве, а также среднеквадратичные погрешности по пикселям в плане для пунктов 1, 3, 9, 12 и 13, хорошо определяемые на местности.

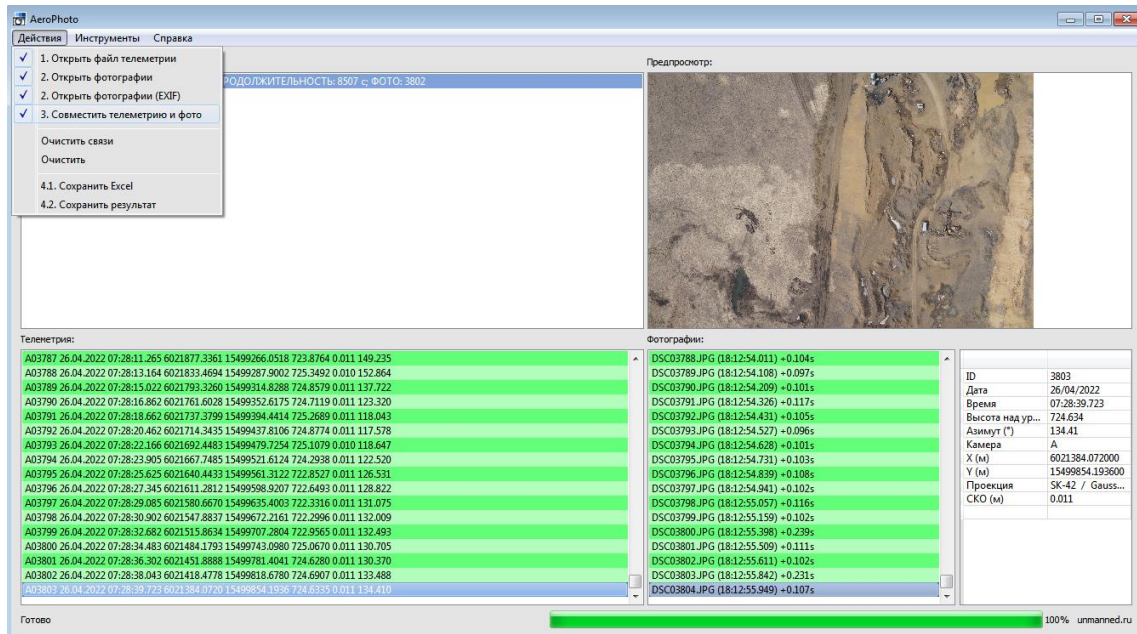


Рисунок 7 – Совмещение файлов фотографий с данными телеметрии



Рисунок 8 – Пример трёхмерной цифровой модели карьера

Маркеры	Восточное указа	Северное указан	Высота (м)	Точность (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
Pt1	15490742.822000	6016874.740000	364.775000	0.005000	0.048193	14	0.608
Pt2	15492721.213000	6015880.235000	309.992000	0.005000			
Pt3	15491481.581000	6017831.915000	342.232000	0.005000	0.006890	12	0.128
Pt5	15490421.842000	6018036.590000	265.842000	0.005000			
Pt6	15492167.443000	6014979.590000	297.122000	0.005000			
Pt7	15491742.863000	6013696.624000	320.248000	0.005000			
Pt8	15491326.468000	6015371.385000	340.083000	0.005000			
Pt9	15489673.473000	6018165.790000	248.718000	0.005000	0.026246	22	0.159
Pt12	15490117.779000	6019788.350000	288.573000	0.005000	0.031565	16	0.140
Pt13	15489824.431000	6019362.997000	312.274000	0.005000	0.139216	14	1.166
Pt14	15489433.695000	6017728.865000	328.806000	0.005000			
Общая ошибка							
Опорные то...							
Контрольны...					0.068464		0.569

Рисунок 9 – Результаты погрешностей положения контрольных пунктов

Согласно техническим требованиям к аэрофототопографической съёмке [7], среднее значение расхождений в плановом положении на контрольных пунктах не должно превышать 0,3 мм в масштабе плана и 0,2 мм – на опорных, что составляет 0,3 м и 0,2 м в масштабе плана 1:1000. Погрешность по высоте составляет 0,2 м при высоте сечения 1 м. Отсюда следует, что СКП пространственного положения пункта должна составлять не более 0,28 м для опорных пунктов и 0,36 м – для контрольных. Проанализировав полученные результаты (см. рисунок 9), СКП определения пространственного положения контрольных пунктов не выходит за пределы допуска, принятого для закреплённого на местности опорного пункта.

Таким образом, следует отметить, что система высокоточного позиционирования применительно к БПЛА методом постобработки аэрофотоснимков показала себя с наилучшей стороны, обеспечив точность, приемлемую для проведения большинства видов маркшейдерско-геодезических работ.

Список литературы

1. Трёхмерная фотограмметрия, или от фотографии к 3D-модели // Сапр – Дата доступа: 27.04.2023 – Режим доступа: <http://sapr.ru/article/25136>
2. Руководство пользователя AgiSoft Metashape
3. droneoperator.ru : сайт. – URL: <https://droneoperator.ru/drones-basics/> (дата обращения 27.03.2023) Текст : электронный
4. Orient systems : российский производитель ГНСС-оборудования : сайт. – Москва, 2022. – URL: <https://orsyst.ru/case/uav> (дата обращения 27.03.2023) Текст : электронный
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с. – Текст : непосредственный
6. Маркузе Ю. И. Уравнение по методу наименьших квадратов : учебное пособие / Московский государственный университет геодезии и картографии ; Ю. И. Маркузе, И. А. Клыпин. – Москва, 2017 г. 50 с. – Текст : непосредственный
7. ГОСТР 59562-2021. Аэрофотосъёмка аэрофототопографическая. Технические требования : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10.06.2021 г. № 542-ст : введён впервые / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»), Федеральным государственным бюджетным учреждением «Федеральный научно* технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД») и Обществом с ограниченной ответственностью «Геоскан». Москва : Стандартинформ, 2021. – 96 с. – (Национальный стандарт). – Текст : непосредственный