

УДК 621.397.6

И. А. ГЕРГЕЛЬ, В. И. КОРТУНОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АНАЛИЗ ПОЛЕТА МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Статья посвящена особенностям применения малых беспилотных летательных аппаратов для проведения аэрофотосъемки в целях картографирования. Рассмотрены условия получения кондиционного материала для дальнейшей фотограмметрической постобработки, даны рекомендации по проведению полета, аэрофотосъемки, установке основного и дополнительного оборудования на борту. Приведен обзор характеристик аэрофотосистемы, необходимых и достаточных для достижения заданного качества снимков, допустимых к дальнейшему использованию в процессе реконструкции ортофотоплана местности.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, малый БпЛА, автопилот, органы управления БпЛА, размер пикселя на местности (*GSD*), аэрофотосистема, светочувствительность (*ISO*), фотоматрица, время выдержки, фокусное расстояние, гиросtabilизация, глубина резкости, экспозиция, размер диафрагмы.

Введение

Перспективными и заслужившими большой интерес применения БпЛА являются сферы, которые связаны с охраной, контролем и мониторингом объектов, ликвидацией чрезвычайных ситуаций; предприятия топливно-энергетического комплекса, а также направления, работа которых связана с получением пространственных данных [1].

Существует множество областей применения материалов, снимаемых с БпЛА:

1. Оперативная аэрофотосъемка и контроль протяженных объектов - линий электропередачи, трубопроводов, автодорог [2].

2. Картографирование и инвентаризация лесной растительности [3].

3. Плановая съемка - это основа обновления топопланов и фотопланов городов и сельской застройки [4].

4. Ортофотопланы для нужд проектирования и застройки, включая труднодоступные районы, горная местность [5].

5. Землеустройство и мониторинг [6].

6. Обследование карьеров и отвалов добычи полезных ископаемых, построение цифровых моделей местности [5].

7. Фотоплан стал популярен для застройщиков загородной недвижимости, т.к. служит подложкой для генплана [5].

С технической точки зрения наиболее востребованным является ортофотоплан для территорий, не охваченных доступной спутниковой плановой съемкой, либо где необходимо получить оператив-

ную информацию об обследуемой территории. Ортофотоплан имеет четкую координатную привязку в соответствии с местной системой координат, а также известные данные масштаба и разрешения на местности. Фотоплан является набором снимков плановой аэрофотосъемки без привязки по координатам и определения масштаба, так как является обзорным оперативным материалом. В случае необходимости фотоплан можно привязать к требуемой системе координат и проекции.

В представленных сферах применения малых БпЛА накладывается множество различных ограничений как на аэрофотосъемочную и позиционирующую аппаратуру, так и на летательный аппарат (ЛА), на борт которого устанавливается аппаратура. Далее приведены наиболее важные из характеристик малых БпЛА и произведен обзор минимально допустимых внутренних параметров системы, которая должна быть установлена в аэрофотосистеме для получения качественных снимков. Цель данной статьи - по проведенному обзору сформировать обязательные требования для аэрофотосистемы, без которых материал аэрофотосъемки не будет достаточно хорошим для использования в целях картографирования.

Особенности данных аэрофотосъемки с малых БпЛА

Аэрофотосъемка с малых БпЛА принципиально не отличается от съемки с пилотируемых самолетов, но имеет определенные особенности, которые будут рассмотрены ниже. Полет БпЛА, как правило,

производится с крейсерской скоростью 20-40км/ч (6-11м/с) в диапазоне высот 50-150м – для БпЛА типа мультикоптер – и 60-90км/ч (16-25м/с) в диапазоне высот 100-500м – для БпЛА типа монокрыло. Следует заметить, что на таких высотах на легких и сверхлегких беспилотниках наблюдается огромное влияние турбулентных потоков. Это влияние можно проследить из рисунков 1 и 2, где прямой линией заданы высота полета и продольная скорость ЛА соответственно, а кривыми описано поведение беспилотника в результате воздействия турбулентности, воздушных потоков, реакции автопилота и органов управления.

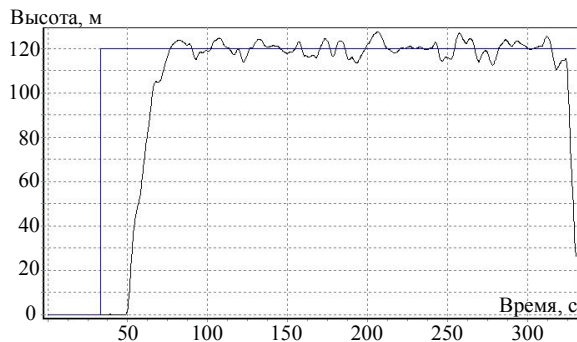


Рис. 1. График изменения заданной и текущей высоты БпЛА

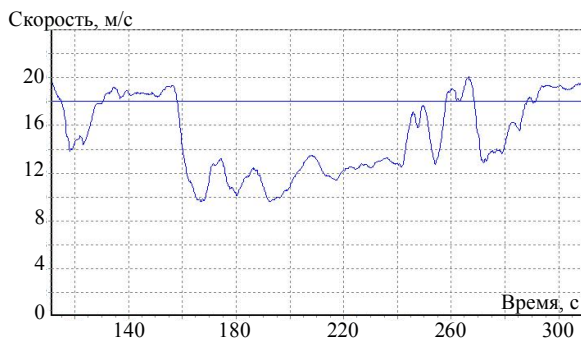


Рис. 2. График изменения заданной и текущей продольной скорости БпЛА

Автопилот, представляющий собой систему с обратной связью, способен с помощью органов управления компенсировать подобное воздействие неоднородности окружающего пространства [11, 12]. Однако реакция на возмущение у системы «датчик-автопилот-органы управления» также занимает определенное время (0,01-0,1с). Этого момента достаточно для того, чтобы значительно изменить положение или ориентацию БпЛА в пространстве. В таблице 1 приводятся модели нескольких наиболее распространенных неконтролируемых изменений параметров полета малых БпЛА и вероятные причины, способные привести к нестабильности подобно-

го рода. Каждая из приведенных нестабильностей негативно влияет на получаемый материал съемки, что накладывает определенные ограничения на параметры настройки фотокамеры, которые максимально компенсируют влияние атмосферы на полет носителя.

Таблица 1

Влияние турбулентных потоков на БпЛА

Параметры полета БпЛА	Изменения	Причины изменения параметров полета
Высота	1-7м	Порывы воздушных потоков против курса или по курсу БпЛА, изменения плотности атмосферы.
Курсовой угол и угол крена	5-15°	Воздушные потоки, перпендикулярные курсу БпЛА
Угол тангажа	5-15°	Воздушные потоки, продольные курсу БпЛА
Скорость	1-3м/с	Воздушные потоки продольные курсу БпЛА

Для съемки с малых БпЛА обычно используются неметрические бытовые камеры с разрешением матрицы 10-20 мегапикселей и размером фотоматрицы с кропфактором 1-3 единицы. Фокусное расстояние камер обычно имеет большой диапазон настройки, что позволяет пользователю тем самым менять приближение объектов на кадре. Разработчиками эта величина ограничена от расстояния, приблизительно соответствующего размеру диагонали фотоматрицы фотокамеры (составляет около 50мм в 35-миллиметровом эквиваленте) и может быть увеличена в 5-10 раз. Оптимальным считается использование минимального фокусного расстояния, что соответствует размеру пикселя на местности (GSD) от 7 до 35см. Это можно объяснить оптимизацией выбора между большей глубиной резкости (при малом фокусном расстоянии) и минимальным проявлением дисторсии (при большом фокусном расстоянии).

Часто аэроснимки обрабатываются простыми нестрогими методами (аффинное преобразование снимков на плоскость). В результате, пользователь получает накладки, которые помимо низкой точности могут содержать разрывы контуров на стыках соседних снимков. При рассмотрении особенностей съемки с БпЛА и составлении рекомендаций по ее проведению мы будем исходить из строгой фотограмметрической обработки данных, в

результате которой можно ожидать точность получаемых результатов (как правило, ортофотомозаики) порядка одного GSD. При значениях параметров съемки, указанных выше, результаты соответствуют по точности ортофотопланам масштабов от 1:500 до 1:2000 в зависимости от высоты съемки.

Для строгой фотограмметрической обработки данных аэросъемки и получения максимально точных результатов необходимо, чтобы снимки в одном маршруте имели тройное перекрытие, а перекрытие между снимками соседних маршрутов при площадной съемке составляло не менее 20%. На практике, при аэросъемке эти параметры выдерживаются далеко не всегда. Полет БпЛА нестабилен, на него влияют порывы ветра, турбулентность и другие возмущающие факторы. Если съемку с пилотируемых самолетов планируют с перекрытием вдоль маршрута 60%, а между маршрутами 20%, то проектировать съемку с беспилотных ЛА следует с перекрытием вдоль маршрутов 70%, а между маршрутами – 30%, чтобы по возможности исключить разрывы в фототриангуляционном блоке.

На БпЛА, как правило, устанавливаются цифровые камеры Canon [7,8] или более близкие к полноформатным Sony [8]. Это связано с легкостью электронного управления камерами этих фирм [9]. Использование бытовых камер имеет как преимущества (невысокая стоимость, легкость ремонта и замены в случае повреждения, малый вес), так и недостатки (некалиброванность, избыточное количество настроек).

Основным недостатком является то, что бытовые камеры изначально не откалиброваны – неизвестны их точные фокусные расстояния, главная точка, дисторсия. При этом нелинейные искажения оптики (дисторсия), допустимые при бытовой съемке, могут составлять до нескольких десятков пикселей, что на порядок снижает точность результатов обработки. Однако такие камеры могут быть откалиброваны в лабораторных условиях, что позволяет получать точности обработки, практически такие же, как и для профессиональных малоформатных фотограмметрических камер.

Предпочтительней устанавливать на такие камеры объективы с фиксированным фокусным расстоянием. При съемке следует выставлять фокусировку на бесконечность и отключать функцию «автофокуса».

Второй недостаток используемых камер относится конкретно к камерам Canon и Sony – в них, в отличие от профессиональных фотограмметрических камер, используется щелевой затвор, в результате чего экспозиция разных частей изображения производится в разные моменты времени и соответствует разным положениям носителя. Так, если вы-

держка при съемке составляет 1/250с, то при скорости БпЛА в 20м/с смещение камеры при съемке кадра составляет 8см, что сравнимо с разрешением съемки на малых высотах и вызывает дополнительную систематическую ошибку в снимке. Такие ошибки могут накапливаться в процессе фотограмметрического сгущения (уравнивания) при съемке протяженных территорий. Для того чтобы уменьшить влияние этого эффекта и для ликвидации «смаза» снимков, следует осуществлять аэросъемку с наименьшими возможными выдержками (не длиннее 1/800 – 1/2000с, максимальная выдержка зависит от высоты). Частично проблему щелевого затвора могли бы решить камеры с центральным затвором, имеющие сравнимое с камерами Canon качество объектива и матриц. Тем не менее, чтобы избежать «смаза» выдержки все равно следует ограничивать.

Снимки цифровых камер, как любительских, так и профессиональных, имеют прямоугольную форму. «Выгоднее» располагать камеру так, чтобы длинная сторона снимка располагалась поперек полета – это позволяет снимать большую площадь при той же длине маршрута. Съемку следует производить с максимальным качеством – с наименьшим jpeg сжатием или в RAW, если последнее возможно.

Современный уровень развития навигационных средств позволяет производить измерения элементов внешнего ориентирования (ЭВО) непосредственно в процессе съемки. Типичные точности таких измерений достигают единиц сантиметров по пространственным координатам X, Y и Z и 0,005 градуса по углам крена, тангажа и рысканья для самых точных систем, устанавливаемых на пилотируемые самолеты [10]. Часто этого достаточно, чтобы производить обработку без использования опорных точек. В любом случае, наличие таких данных значительно упрощает обработку и позволяет выполнять некоторые этапы обработки полностью в автоматическом режиме.

Если при съемке использовался двухчастотный GPS приемник в дифференциальном режиме (или PPP (метод уточнения точки позиционирования) обработка данных GPS), то требуется минимальное число опорных точек для получения наиболее точных результатов обработки, обычно достаточно 1-2 точки на 100 снимков, в ряде случаев обработку можно проводить без опорных точек. В случае, когда нет точных центров проекции, требования к плано-высотному обоснованию стандартные: одна плано-высотная точка на 6-10 базисов съемки.

Для выявления зависимостей и разработки рекомендаций для съемки площадных объектов с БпЛА более детально рассмотрим каждый параметр, влияющий на качество аэроснимков, как внутри аэрофотосистемы, так и вне. На рисунке 3 можно

видеть, от каких основных групп параметров зависит качество получаемых с борта аэроснимков.

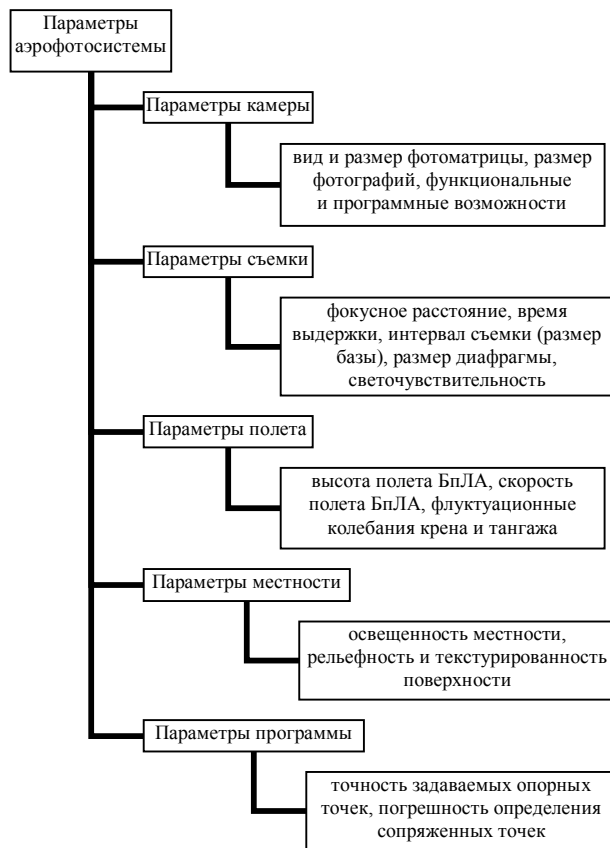


Рис. 3. Структура внешних и внутренних параметров аэрофотосистемы

Рекомендации по обеспечению параметров полета, аэрофотосистемы и выбору подходящего фотоаппарата

Согласно анализу параметров полета малых БПЛА для выполнения аэрофотосъемки площадных объектов были сформулированы основные рекомендации по настройке параметров полета, правилам выполнения полета, выбору фототехники, принципам синхронизации съемки и захвата полетных данных.

Исходя из того, что установка малых БПЛА гиростабилизирующей платформы недопустима из-за массогабаритной избыточности полезной нагрузки, возникают жесткие требования по погодным условиям, при которых возможно проведение аэрофотосъемки и получения кондиционного материала:

1) во избежание сильных затенений в безоблачную погоду съемку можно вести лишь в период времени с 11 до 15 часов дня, а в облачную погоду в таких ограничениях надобность отпадает;

2) во избежание значительных отклонений

курсового угла аппарата или сноса с линии пути скорость ветра во время выполнения аэросъемки не должна превышать порога в 5м/с;

3) чтобы не допустить значительных отклонений угла по тангажу и крену, а также для сохранения стабильной высоты, аэросъемку следует производить при условиях, когда порывы ветра не превышают 2-3м/с.

Что касается принципов полета и синхронизации съемки в полете:

1) поскольку перекрытие от снимка к снимку вдоль маршрута должно быть около 70%, а отклонение от этой цифры не может быть более 3%, то аэрофотосъемка не может быть привязана к периоду времени, а должна быть синхронизирована с пройденным путем согласно данным GPS;

2) для соблюдения неизменности курсового угла при аэрофотосъемке, снимки, выполненные на развороте с завершеного маршрута и маневре по заходу на соседний, должны быть отсеяны из выборки, поскольку имеют сильные погрешности. Либо съемка не должна вестись до выхода на прямой маршрут с постоянным значением высоты и курсового угла;

3) построение маршрута следует совершать параллельно изолиниям местности. То есть местность, зафиксированная аэрофотосъемкой вдоль одного маршрута, должна иметь наименьший перепад высот.

Максимально допустимые отклонения параметров полета БПЛА:

- а) высота $\pm 3\%$;
- б) угол по крену и курсу $\pm 7^\circ$;
- в) угол по тангажу $\pm 4^\circ$;
- г) перекрытие снимков вдоль маршрута – 75% $\pm 5\%$, между маршрутами – 30% $\pm 5\%$;

Параметры фотоаппарата, обязательные для получения кондиционных аэроснимков:

- а) разрешение съемки $\geq 14\text{Mpix}$;
- б) размер фотоматрицы: полнокадровая или полукадровая;
- в) объектив: с фиксированным фокусным расстоянием приблизительно равным диагонали фотоматрицы;
- г) наличие регулируемой диафрагмы;
- д) возможность настройки удаленного управления;
- е) скорость серийной съемки не ниже 1 кадра за секунду.

Литература

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природы среды [Текст] / Ю. А. Израэль. – Л. : Гидрометиздат, 1979. – 376 с.

2. Филипов, Д. В. Состояние автомобильных дорог изучает БпЛА [Текст] / Д. В. Филипов, К. Ю. Великжанина // Дороги. – 2012. – № 7. – С. 74-78.

3. Дмитриев, И. Д. Лесная авиация и аэрофотосъемка [Текст] / И. Д. Дмитриев, Е. С. Мурахтанов, В. И. Сухих. – М. : Агрпромиздат, 1989. – 336 с.

4. Аэрофотосъемка местности при помощи БпЛА – Совзонд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sovzond.ru/services/aerophotography/>. – 01.02.2015.

5. Воздушная технология Teamnet International [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.teamnet.ro/ru/resheniya/vozdushnaya-tehnologiya/>. – 08.09.2001.

6. Геоинформационные системы и электронные карты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geointer.ru.host1366118.serv38.hostland.pro/uslugi/geoinformacionnyie-sistemy-i-elektronnyie-kartyi>. – 02.06.2013.

7. Canon EOS 5D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpreview.com/reviews/>

CanonEOS5D/. – 13.04.1998.

8. Костюк, А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БпЛА [Текст] / А. С. Костюк // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 4, № 9. – С. 53-59.

9. CHDK – альтернативная прошивка. Параметры пульта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chdk.clan.su/blog/2009-01-27-140>. – 24.07.2007.

10. Точность измерений GPS. Параметры пульта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gps-shadow.ru/tochnost-gps-izmereniy.htm>. – 15.11.2010.

11. Barton, J. D. Fundamentals of Small Unmanned Aircraft Flight [Text] / J. D. Barton // Johns Hopkins APL Technical Digest. – 2012. – V. 31, № 2. – С. 132-149.

12. MP2128g autopilot integration and verification for stabilization and control of mini-UAV aircraft in autonomous flight [Text] / A. Olejnik, R. Rogolski, T. Moisej, G. Chmaj // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2013. – № 2. – С. 313-320.

Поступила в редакцию 2.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

АНАЛІЗ ПОЛЬОТУ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ АЕРОФОТОЗЙОМКИ ПЛОЩАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

І. А. Гергель, В. І. Кортунів

Стаття присвячена особливостям застосування малих БпЛА для проведення аерофотозйомки в цілях картографування. Розглянуто умови отримання кондиційного матеріалу для подальшої фотограмметричної постобробки, дано рекомендації з проведення польоту, аерофотозйомки, що до установки основного і додаткового устаткування на борт. Наведено огляд характеристик аерофотосистеми, необхідних і достатніх для досягнення заданої якості знімків, допустимих до подальшого використання.

Ключові слова: аерофотозйомка, малий БпЛА, автопілот, органи управління БпЛА, розмір пікселя на місцевості (GSD), аерофотосистема, світлочутливість (ISO), фотоматриця, час витримки, фокусна відстань, гіростабілізація, глибина різкості, експозиція, розмір діафрагми.

ANALYSIS OF THE FLIGHT OF SMALL UNMANNED AIRCRAFTS FOR PERFORMANCE AERIAL PHOTOGRAPHY OF AREA OBJECTS

I. A. Gergel, V. I. Kortunov

The article is devoted to the peculiarities of application of small UAVs for commercial overhead imagery for mapping. The conditions for obtaining the conditioned material was considered for further photogrammetric post-processing, recommendations for the flight, aerial photography, installation of the main and auxiliary equipment aboard was given. A review of the characteristics of aerial systems were conducting, necessary and sufficient to achieve the desired quality of shots allowed for further use.

Key words: aerial photography, Small UAV, autopilot, controls of the UAV, ground sample distance (GSD), aerophotosystem, photosensitivity (ISO), photomatrix, the exposure time, focus distance, gyroscopic stabilization, the depth of field, exposure, the aperture size.

Гергель Игорь Андреевич – аспирант каф. производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: igor.ok1@inbox.ru.

Кортунів Вячеслав Іванович – д-р техн. наук, професор, зав. каф. производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vkortunov@yandex.ru.