УДК 69.624.01.624.9.692

© А. Л. Туккия, исполнительный директор
© А. О. Мамонов, инженер
(ООО «Инжиниринговая Компания «Город-А»)
E-mail: al@tukkiya.ru, aomamonov@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-3-109-116

© А. Л. Tukkiya, executive director
© А. О. Mamonov, engineer
(“Engineering company “Gorod-A” LLC)
E-mail: al@tukkiya.ru, aomamonov@mail.ru

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАДРОКОПТЕРОВ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

EXPERIENCE OF USING QUADCOPTERS FOR INSPECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Рассмотрен опыт применения беспилотных летательных аппаратов на примере квадрокоптера фирмы DJI (модель Phantom 3) для обследования и обмеров зданий, высотных и линейных сооружений, преимущества и ограничения такого способа. Полученный опыт позволяет судить о большом потенциале данной технологии и необходимости дальнейшего ее изучения. Разработана методика выполнения работ по обследованию и обмерам зданий и сооружений. Выполнен анализ результатов исследования.

Ключевые слова: обследование зданий и сооружений, методика, беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъемка, мультикоптеры, квадрокоптер, фотограмметрия, ортофотоплан, DJI.

The article presents the experience results of using unmanned aerial vehicles on the example of the DJI quadcopter (Phantom 3 model) for inspection and measurement of buildings, high-rise and line structures, as well as advantages and restrictions of this technique. The experience obtained allows forecasting a high potential of this technique and need for its further investigation. The method of performing work of inspection and measurement of buildings and structures is developed. An analysis of the research results is made.

Keywords: inspection of buildings and structures, methodology, unmanned aerial vehicle, aerial photography, multicopter, quadcopter, photographic survey, orthophoto plan, DJI.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (они же «беспилотники», дроны), изначально разработанные для решения военных задач, все чаще и чаще применяются в гражданских целях. В основном БПЛА востребованы на рынке перевозок, в картографии, для поиска и спасения людей и в последнее время все больше и больше для целей обследования зданий и сооружений. Одной из разновидностей БПЛА являются мультикоптеры. Мультикоптер — это беспилотный летательный аппарат, построенный по вертолетной схеме и имеющий от трех до двенадцати электродвигателей с воздушными винтами. Квадрокоптер — это мультикоптер с четырьмя несущими винтами, вращающимися диагонально в противоположных направлениях. Развитие техники позволило выполнить простую и надежную конструкцию минимального веса. Благодаря мультироторности аппараты получают возможность практически произволь-

ного перемещения в пространстве, а системы стабилизации и позиционирования позволяют понизить планку навыков управления данной техникой.

Стоимость профессиональных моделей на момент написания статьи начинается от нескольких сотен тысяч рублей и доходит до нескольких миллионов. Полупрофессиональные и бытовые модели можно приобрести за несколько десятков тысяч рублей, и их качество с каждым годом становится все выше, а спектр решаемых задач — все шире.

В данной статье представлен опыт использования квадрокоптеров для обследования и обмеров зданий и сооружений. Можно выделить две основные задачи, решаемые с применением квадрокоптера для обследования зданий и сооружений: первая — это визуальный осмотр объектов с их фотофиксацией, вторая — съемка для последующей фотограмметрии объекта, т. е. полу-

чения 3D-модели объекта и производных от нее материалов (проекций, планов, разрезов и т. п.).

Для решения данных задач авторами использовался квадрокоптер (далее — коптер) производства компании DJI модели Phantom 3. Аппарат имеет следующие основные технические характеристики: четыре несущих винта, размер несущей рамы — 350 мм, скорость подъема — 5 м/с и спуска — 3 м/с, максимальная скорость — 15 м/с, скорость ветра, допускаемая для запуска аппарата, — 10 м/с, матрица фотокамеры — 1/2,3" с разрешением 12,4 Мпикс., стабилизация по компасу, барометру и трехосевому гироскопу, позиционирование по спутникам навигационных систем GPS и ГЛОНАСС (заявленная точность 0,8...2 м), дальность связи в плотной городской застройке — около 100 м, в поле — до 1 км. Время в полете — около 20 мин, за это время аппарат может пролететь маршрут порядка 4...5 км.

В рамках решения первой задачи коптер применялся для визуального осмотра и фотофиксации состояния верхних частей дымовых труб и силосов в условиях действующего производства (рис. 1). Высота подъема — порядка 40...60 м, применение биноклей и фотоаппаратов с длиннофокусной оптикой в данном случае дало менее качественную картинку из-за сильного запыления территории. На другом объекте, приведенном на рис. 2, часть конструкции фронтона и сам отлив с земли не видны, так как скрыты выступающими архитектурными элементами фасада. На третьем объекте, приведенном на рис. 3, до-

Рис. 1. Осмотр поверхности высотных объектов (дымовые трубы, силосы, завод в г. Пикалево)

Рис. 2. Осмотр элементов здания, находящихся на высоте

ступ на кровлю был недоступен без применения альпинистского снаряжения. Во всех случаях работы по осмотру объектов при помощи коптера, включая его подготовку к полету, запуск и фотовидеосъемку, заняли не более 20 мин, в то время как на подъем и осмотр иными методами (при помощи инвентарных лесов, автовышки или методами промышленного альпинизма) ушло бы значительно больше времени и трудозатрат.

Одним из полезных аспектов фотосъемки, выявленным при визуальном обследовании линейных объектов (каналы, насыпи, дороги, ЛЭП), является сохранение в параметрах снимка информации о географических координатах, полученных по спутниковым данным. Таким образом, можно автоматически получить четкую геофиксацию снимков, что облегчает привязку и последующую обработку отснятых материалов. На рынке также встречаются фотоаппараты, имеющие встроенные или подключаемые GPS-приемники, однако в этом случае необходимо отдельно следить за качеством приема сигнала и количеством «видимых» спутников. Так, при холодном пуске ошибка определения координат может исчисляться километрами. На рис. 4 показано положение фотосъемки по данным с коптера и тот же маршрут с камеры iPhone 5s со встроенными датчиками GPS+ГЛОНАСС, отклонение позиций снимков с камеры iPhone 5s составило до 2 км от оси маршрута.

Решение второй задачи — фотосъемки объекта с применением методов фотограмметрии для воссоздания масштабной 3D-модели —

Рис. 3. Ортофотоплан кровли. Доступ на кровлю невозможен без специального альпинистского снаряжения

является одним из наиболее перспективных применений коптера. Фотограмметрия — это научно-техническая дисциплина, занимающаяся определением размеров, формы и положения объектов по их изображениям на фотоснимках. Для получения параметров объекта достаточно знать положение пары снимков и характеристики объектива — с помощью этих данных можно с определенной точностью произвести измерения изображенных на снимках объектов.

В результате работ получается масштабная 3D-модель объекта, из которой можно получить любые параметры и схемы, такие как развертки фасадов, план кровли, габаритные размеры и форму в плане на различных отметках, разрезы и сечения по любым плоскостям.

В настоящее время имеется широкий спектр как отечественного, так и иностранного программного обеспечения, позволяющего в автоматическом или полуавтоматическом режиме выполнять привязку снимков, вычисление координат точек снятого объекта и построение 3D-модели объекта. Примеры таких программ: AutoDESK ReCAP, Pix4Dmapper, Datugram 3D, PhotoSCAN и др.

Общий принцип работы данных программ следующий: пользователь выполняет ряд снимков измеряемого объекта, программа самостоятельно или при участии пользователя по данным об объективе камеры производит сопоставление и выравнивание относительного положения

снимков по выделяемым на них характерным точкам. Далее автоматически анализируются пары изображений, и для каждой пары определяются координаты всех точек, видимых на обоих ракурсах. В результате получается так называемое плотное облако точек. В среднем плотность такого облака отстает от плотности точек при лазерном сканировании объекта. Для проекта в 30...100 фотографий получаются облака на 10–50 млн точек. На данном этапе получается форма объекта с точностью до масштабного коэффициента. Для установления масштаба необходимо предварительно задать либо ряд координат положений фотоснимков, либо координаты опорных точек, изначально размечаемых на снимках. Опорные точки должны быть получены геодезическими методами, например, с применением электронного тахеометра или геодезических GPS-приемников. В ряде случаев полученного облака достаточно для дальнейшей работы, например, в качестве подложки при моделировании объекта, но зачастую производится дальнейшая обработка полученного облака: построение полигональной модели, текстурирование и построение ортофотопланов. Ортофотоплан представляет собой проекцию фотоизображений на заданную плоскость с учетом вычисленной геометрии объекта. Таким образом, получается трансформированная «фотография», на которой отсутствуют перспективные искажения.

Рис. 4. Положение мест съемки на Google-карте: а — по результатам наземной фотосъемки; б — съемка с коптера

Такая фотография имеет определенный масштаб и может быть использована для проведения измерений и выполнения обмеров конструкций и деталей.

Стоит отметить, что важным условием получения качественной модели является всесторонняя съемка измеряемого объекта. Из общих рекомендаций по съемке можно особо выделить следующие: снимки не должны выполняться из одной точки (такие снимки не образуют достаточной базы для стереопары), ось снимка желательно располагать перпендикулярно снимаемой поверхности, перекрытие соседних снимков должно составлять 60...80 %.

В целом данной технологией можно пользоваться и при отсутствии коптера, однако без выполнения воздушной съемки не получается удовлетворить первые два условия «правильной» съемки, при этом сильно страдает качество модели, в особенности высокорасположенные детали и текстуры объектов. На рис. 5 представлено сравнение ортофотопланов фрагмента фасада, полученного при использовании и без использования фотографий с коптера. Хорошо видно качественное различие полученных орто-

фотопланов при одинаковом разрешении изображения в 2 мм/пик.

Следующим важным преимуществом применения квадрокоптера является получение позиций съемки в глобальных географических координатах, что позволяет сократить время на компьютерную обработку с определением взаимного расположения снимков, а также в ряде случаев довольно точно получить масштаб снимаемого объекта. В качестве примера можно привести объект, изображенный на рис. 6. Были выполнены обмеры сложного по конфигурации монумента «Ладья» (г. Самара).

На объекте было отснято более 300 фотографий, в том числе 250 фотографий с воздуха. Для контроля точности была выполнена геодезическая съемка характерных точек объекта: низ щитов, крылья паруса, герб, нос ладьи, всего более 60 характерных точек по всему периметру модели. В первом приближении модель была создана без геодезической основы, ряд линейных размеров, снятых с полученной модели, был сопоставлен с размерами объекта, полученными геодезическим путем (с применением электронного тахеометра). Сравнение показало, что размеры, полученные

Рис. 5. Фрагменты ортофотопланов фасада в уровне пятого этажа. Сравнение результатов:
а — полученных наземной съемкой; б — с добавлением кадров с коптера

геодезическим и фотограмметрическим методами, отличаются друг от друга в пределах 5...20 мм.

Следует отметить, что точность полученных результатов зависит от многих факторов, в том числе от таких, как протяженность объекта съемки, качество и количество полученных снимков, количество «видимых» спутников. На рис. 7 показано отклонение моделей одного и того же фасада, отснятого с использованием коптера с интервалом в два дня, — из-за смены конфигурации «созвездия» видимых спутников систем навигации изменилось положение вычисляемой модели, при этом отклонение достаточно существенное, модели повернуты на угол около 5 градусов. Также в качестве побочных эффектов можно получить нелинейные искажения фасада, выгиб из плоскости, перекосы.

Для получения высокой точности результатов обмеров применяют лазерное сканирование объекта. Современные сканеры способны выдавать миллионы измерений в секунду с высокой точностью получаемых координат точек. Однако зачастую наземным сканированием сложно получить съемку кровли объектов, в частности из-за невозможности выбора нужных стоянок, пригодных для установки сканера. На помощь в этом случае также может прийти метод получения облака точек по фотограмметрической обработке воздушной съемки. На рис. 8 представлены несколько моделей, полученных данным методом.

К сожалению, использование мультикоптеров для обследования ограничено следующими негативными факторами:

Рис. 6. Мону́мент «Ла́дя», набережная р. Волги в Самаре, восстановленная модель

- недостаточно проработанная нормативно-правовая база для организации запусков аппаратов такого класса;
- нерешенный вопрос обеспечения безопасности использования беспилотных летательных средств в городском пространстве, так как существует возможность как повреждения самого летательного аппарата, так и угрозы здоровью людей и повреждения их имущества при неумелом использовании мультикоптеров;
- для бюджетных моделей БПЛА существует сильная зависимость качества приема-передачи видеосигнала и телеметрии в целом от наличия

Рис. 7. Профили сечения здания, выровненные автоматически по данным GPS/ГЛОНАСС в общей глобальной системе координат; отличаются датой получения спутникового навигационного сигнала; ошибка определения глобальных координат может быть выражена следующими величинами: смещение горизонтальное и по высоте до 1,5 м, отклонение по вертикальному углу в пределах 2 градусов

Рис. 8. Модели кровель, выполненные при фотограмметрической обработке воздушной съемки

электромагнитных помех в зоне запуска и качества приема сигнала спутников GPS+ГЛОНАСС. То есть возможна потеря сигнала от коптера с его последующей утратой при работе в зашумленном помехами городском пространстве.

Однако вышеперечисленные факторы не умаляют достоинств применения данной технологии при обследовании зданий и сооружений.

Мультикоптерная техника все больше становится незаменимым помощником при проведении обследовательских и изыскательских работ, при этом использование дорогостоящих моделей не является обязательным. При использовании мультикоптеров ускоряется проведение работ по визуальному осмотру фасадов и крыш зданий, а также повышается качество получаемой информации. Применение квадрокоптера незаменимо при визуальном обследовании высотных сооружений и осмотре труднодоступных мест.

Для получения более точных обмеров с применением фотограмметрической съемки необходимо включать фотографии, выполненные с квадрокоптера, после чего имеются широкие возможности построения масштабных 3D-моделей зданий и сооружений, а также их фрагментов. Устранение негативных факторов, указанных выше, позволит применять данную технологию практически повсеместно, что несомненно повысит качество результатов выполняемых работ.

Библиографический список

1. Макаренко С. А., Ломакин С. В., Лютоев М. А., Дудинская Н. В. Исследование возможностей квадрокоптера DJI PHANTOM 2, снабженного камерой GOPRO HERO 3, для выполнения аэрофотосъемки с целью решения различных научно-технических задач // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. С. 56–62.

2. Литвинов Д. В. Современные методы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов при обследовании и реставрации памятников архитектуры // Приволжский научный журнал. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 113–117.

3. Ламков И. М., Чермошенцев А. Ю., Арбузов С. А., Гук А. П. Исследование возможностей применения квадрокоптера для съемки береговой линии обводненного карьера с целью государственного кадастрового учета // Вестник Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий. 2015. № 1 (29). С. 200–209.

4. Gnera Volodimir A. Advantage of using quadcopters, for aero photo ancient of Old Rus towns // GARDARIKA. 2015. № 4 (5). С. 133–144.

5. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.2 // Agisoft LLC. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf (дата обращения: 12.04.2017).

References

1. Makarenko S. A., Lomakin S. V., Lyutoev M. A., Dudinskaya N. V. *Issledovanie vozmozhnostey kvadrokoptera*

ptera DJI PHANTOM 2, snabzhennogo kameroy GOPRO HERO 3, dlya vypolneniya aehrofotos'emki s tsel'yu resheniya razlichnykh nauchno-tekhnicheskikh zadach [Research of technical features of the DJI PHANTOM 2 quadcopter supplied with the GOPRO HERO 3 camera used for aerial photograph operations with the purpose of solving different scientific and technical tasks]. *Modeli i tekhnologii prirodobustroystva (regional'nyy aspekt)* [Models and technology of environmental engineering (regional aspect)]. Voronezh, Voronezh State Agricultural University named after the Emperor Peter the Great, 2016, pp. 56–62.

2. Litvinov D. V. *Sovremennye metody aehrofotos'emki s bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri obsledovanii i restavratsii pamyatnikov arkhitektury* [Modern methods of aerial photography from unmanned aerial vehicles in case of survey and restoration of monuments of architecture]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal – The Volga reion scientific journal*, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Architectural and Construction University Publ., 2015, pp. 113–117.

3. Lamkov I. M., Chermoshentsev A. Yu., Arbuзов S. A., Guk A. P. *Issledovanie vozmozhnostey primeneniya kvadrokoptera dlya s'emki beregovoy linii obvodnennogo kar'era s tsel'yu gosudarstvennogo kadaastrovogo ucheta* [Research of opportunities of using a quadcopter for photographing the coastline of the flooded mining pit for the purpose of the state cadastral registration]. *Vestnik Sibirskogo gos. un-ta geosistem i tekhnologiy – Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2015, no. 1 (29), pp. 200–209.

4. Gnera Volodimir A. Advantage of using quadcopters, for aero photo ancient of Old Russian towns. *GARDARIKA*, 2015, no. 4 (5), pp. 133–144.

5. *User guide for Agisoft PhotoScan. Professional Edition, version 1.2*. Available at: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf (accessed: 12.04.2017).