

Современные вопросы геотехнического обеспечения строительного инжиниринга

МОНИТОРИНГ ЛАВИНООПАСНЫХ УЧАСТКОВ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С. В. Устюгов, А. В. Егоров

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань (Россия)

Техногенные и природные воздействия могут привести к развитию процессов разрушения эксплуатируемых инженерных сооружений. Поэтому в последние годы получают развитие различные системы мониторинга, включающие в себя организацию инструментальных наблюдений, применение математических методов обработки результатов, построение математической модели и прогнозирование на ее основе изменения состояния объектов природы и сооружений [1].

В исследовании [2] приведена классификация существующих методов мониторинга лавиноопасных участков линейных транспортных сооружений, представлен анализ космических методов, сделаны выводы о нецелесообразности их применения в специфичном виде мониторинга. В настоящей работе рассмотрена возможность применения воздушных методов.

К воздушным методам относят аэрофотосъемку и лазерное сканирование (альтиметрию), применяемые, как правило, в комплексе. Воздушные методы мониторинга объектов имеют ряд преимуществ перед космическими: высокая точность продукции, регулируемая используемой аппаратурой и параметрами съемки; частичное или полное исключение работ по геодезическому обоснованию; высокий уровень автоматизации; возможность технико-экономического планирования всего комплекса аэрофотосъемочных работ и др.

Необходимо выделить организационные и экономические аспекты использования пилотируемых авиационных аэрофотосъемочных комплексов при решении задачи мониторинга небольших участков линейных транспортных объектов.

1. Стоимость оборудования для комплексной аэросъемки и программ обработки данных достаточно высока и составляет от 1,5 до 2 млн долл. Приобретение и использование такого оборудования под силу только крупным организациям, специализирующимся на объемных поставках сведений о дистанционном зондировании.

2. Суммарный вес комплекта навигационного, аэрофотосъемочного локационного оборудования (лидара) составляет 200 кг и более, что требует адаптированного для съемки самолета (Ан-3, Cесна и др.) или вертолета (Ми-8Т и др.).

3. Использование пилотируемой техники предполагает наличие достаточно развитой полевой инфраструктуры: аэродрома, базы хранения и обслуживания техники, сертифицированных пилотов, диспетчера и обслуживающего персонала. Стоимость летного часа колеблется от 15 тыс. для вертолета Ми-8 и до 345 тыс. руб. для самолета Ил-76, включая время на подлет к объекту и уход на аэродром.

4. Получение и обработка больших массивов информации приводят к созданию отдельных структурных подразделений: аэросъемочной и геодезической бригад, группы камеральной обработки данных съемки, что также возможно только для крупных специализированных организаций.

Таким образом, экономические затраты на единицу отснятой площади узкой полосы лавиноопасных участков существенно превосходят затраты для больших площадей. Следовательно, применение пилотируемых авиационных комплексов нерентабельно при съемке малых территорий, особенно находящихся в значительном удалении от аэродрома.

Наиболее перспективными на сегодняшний день для оперативного мониторинга небольших участков являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Как правило, крупные производители предлагают на рынок беспилотные авиационные системы [3, 4], включающие в себя:

- БПЛА самолетного или вертолетного типа (рис. 1);
- бортовой комплекс управления (приемник спутниковой навигации или навигационно-инерциальную систему GPS/IMU, автопилот);
- полезную нагрузку – цифровую фото- или видеокамеру, ИК-камеру, тепловизор, лазерный дальномер и др. (рис. 2);
- наземный пункт управления (рис. 3);



Рис. 1. Предстартовая проверка БПЛА самолетного типа «Орлан-10»



Рис. 2. Цифровая фотокамера Canon EOS 5D Mark II



Рис. 3. Наземный пункт управления БПЛА «Птеро-СМ»

Основными достоинствами беспилотных систем являются:

1. Относительная дешевизна комплекта, полезной нагрузки и программ обработки материалов съемки. В зависимости от типа аппарата и установленного на нем оборудования стоимость БПЛА колеблется от 2,5 до 5 млн руб.

2. Рентабельность регулярного мониторинга небольших по площади территорий или линейных объектов (транспортные магистрали, ЛЭП и др.). Ориентировочная стоимость одного летного часа составляет 1500 руб.

3. Возможность использования в труднодоступных и опасных для жизни и здоровья человека зонах – лавиноопасных склонах, районах чрезвычайных ситуаций и др., работа в условиях низких температур – до -35°C .

4. Простота в эксплуатации, мобильность, отсутствие наземной инфраструктуры. Конструкция БПЛА модульная, аппарат умещается в транспортный кейс (рис. 4).

5. Оперативность проведения подготовительных и летно-съемочных работ. На развертывание комплекса и проверку оборудования уходит 30–40 мин, на аэросъемку – около 1 ч.

6. Маневренность и легкая управляемость БПЛА, возможность как автоматического пилотирования с помощью бортового комплекса управления, так и ручного с пульта дистанционного управления.

7. Простота создания проекта аэросъемки и возможность отслеживания положения БПЛА в режиме реального времени в специализированных программах (рис. 5).

8. Возможность съемки со сверхнизких высот (от нескольких метров для БПЛА вертолетного типа и от 90 м для самолетного) обеспечивает отсутствие облачности и равномерную освещенность, высокое пространственное разрешение и яркость снимков.

9. Высокий уровень автоматизации позволяет производить первичную обработку данных в полевых условиях в течение 2–3 ч после посадки.



Рис. 4. Транспортный кейс БПЛА «Птеро-Е»



Рис. 5. Программа проектирования аэрофотосъемки и навигации БПЛА – Gorizon

Таким образом, минимальные затраты на обслуживание при максимальной эффективности работ являются существенным преимуществом БПЛА по сравнению с пилотируемой аэрофотосъемкой.

В России разработано более 40 моделей беспилотных комплексов, позволяющих производить аэрофотосъемку [5]. Несмотря на разнообразие, немногие из них способны обеспечить топографическое качество материалов аэрофотосъемки. Предпочтительные модели аппаратов ближнего и среднего радиуса действия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики аэрофотосъемочных БПЛА

Модель БПЛА	ZALA 421-16E	«Птеро-СМ»	«Филин»	«Орлан-10»
Фирма-производитель	Группа компаний «Беспилотные системы Zala Aero», г. Ижевск	ООО «АФМ-Сервис», г. Москва	ЗАО «Гранзас», г. Санкт-Петербург	ООО «Специальный технологический центр», г. Санкт-Петербург
Максимальная взлетная масса, кг	10,5	20	60	18
Вес полезной нагрузки, кг	1,5	5	5	5
Тип двигателя	Электрический	Бензиновый	Бензиновый	Бензиновый
Время полета, ч	4	8	11	18
Макс. дальность полета, км	210	800	1230	600
Скорость полета, км/ч	60–110	85–145	до 170	80–150
Макс. высота полета, м	3600	3000	3500	5000

*Данные из открытых источников.

Основные типы любительских камер, применяемые при аэрофотосъемке с БПЛА, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики любительских камер БПЛА*

Характеристики камеры	Canon EOS 5D Mark II	Nikon D800 Body	Sony DSC-RX1**	Canon EOS 5D Mark III
Средняя цена, тыс. руб. (на 2013 г.)	80	90	110	110
Размер матрицы, мм	36 24	35,9 24	35,8 23,9	36 24
Число эффективных пикселей, Мрiх	21,1	36,3	24,3	22,3
Размер пикселя, мкм	6,4	4,9	6,0	6,2
Максимальное разрешение снимка	5616x3744	7360x4912	6000x4000	5760x3840

Возможные выдержки, с	30–1/8000	30–1/8000	30–1/4000	30–1/8000
Скорость серийной съемки, кадров/с	3,9	4,6	5	6
Размер ШХВХГ, мм	152x114x75	146x82x123	113x65x70	152x116x76
Вес камеры без объектива, г	810	1000	482	950

**Данные из открытых источников*

***Встроенный объектив с фиксированным фокусным расстоянием $f = 35$ мм*

Высокоточный мониторинг с использованием БПЛА предъявляет повышенные требования к выдерживанию геометрии съемки и характеристик используемой аппаратуры. При решении поставленной задачи необходимо учитывать следующие особенности:

1. Для большинства БПЛА вес полезной нагрузки составляет 3–6 кг, что не позволяет использовать фотограмметрические камеры или лидары.

2. Любительские камеры имеют низкое разрешение, небольшую полезную площадь кадра и отсутствие системы продольной компенсации смазывания изображения. При этом нелинейные искажения объектива могут составлять до нескольких десятков пикселей, что существенно снижает точность результатов обработки. Однако учет данных калибровки таких камер позволяет добиться точности результатов, сопоставимой с применением малоформатных фотограмметрических систем.

3. Отсутствие или невысокая точность навигационной системы GPS\IMU требует создания геодезической основы на участке.

4. Порывы ветра и несовершенство автопилота ведут к неустойчивому полету БПЛА и искажениям геометрии, таким как разрывы в фототриангуляционном блоке, большие углы разворота и разномасштабность соседних снимков. Нередко результаты полета имеют низкое фотограмметрическое качество. Необходима первичная полевая обработка материалов с целью принятия решений на досъемку или пересъемку сложных участков.

5. Небольшая высота полета приводит к увеличению количества обрабатываемых снимков, а установка коротких выдержек экспонирования снижает их радиометрические характеристики. Обработка снимков также осложнена малой контурностью снежного покрова. Как следствие – увеличение объемов ручной работы оператора при фототриангуляции и построении цифровой модели рельефа.

Рассмотрим принципиальную возможность применения БПЛА для целей мониторинга лавиноопасных участков с точностью определения плановых координат $V_s = 6$ см и высот точек $V_z = 5$ см. Рассчитаем основные параметры аэрофотосъемки участка размерами $L_x \times L_y = 500 \times 110$ м² камерой Sony DSC-RX1. Ввиду неустойчивого полета БПЛА запроектируем продольное перекрытие снимков $P_x = 70$ % и поперечное перекрытие между маршрутами $P_y = 40$ %.

Расположение камеры вдоль линии полета дает базис фотографирования на снимке, равный

$$b = l_x \left(1 - \frac{P_x}{100} \right) = 35,8 \left(1 - \frac{70}{100} \right) = 10,74 \text{ мм.} \quad (1)$$

Рассчитаем высоту фотографирования H относительно средней плоско-сти объекта $Z_{\text{ср.пл}}$, необходимую для обеспечения точности определения высот V_z при размере пикселя (*Pixel*) камеры $Pix = 6,0$ мкм по формуле

$$H = \frac{b}{Pix} V_z = \frac{1,074 \cdot 10^{-2}}{6 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,05 = 89,5 \text{ м.} \quad (2)$$

Исходя из выражения (2) масштаб аэрофотосъемки $1/M = f/H = 1/2560$, размер пикселя изображения на местности $GSD = Pix * M = 1,54$ см, базис фотографирования на местности $B_x = b M = 27,5$ м, а число снимков в маршруте $N_x = \frac{L_x}{B_x} + 2 = 20$.

Расстояние между маршрутами B_y вычисляется по формуле

$$B_y = l_y \left(1 - \frac{P_y}{100} \right) M = 23,9 \left(1 - \frac{40}{100} \right) 2560 = 36,7 \text{ м.} \quad (3)$$

Исходя из формулы (3) число маршрутов $K = \frac{L_y}{B_y} = 3$, а общее число снимков на участке $N = N_x K = 60$. Количество точек геодезической опоры на объекте составит 6–7 шт.

Рассчитаем максимально допустимый размер пикселя снимка P_s , необходимый для обеспечения точности определения плановых координат объекта V_s , по формуле

$$P_s = \frac{V_s}{2 \cdot M} = \frac{6 \cdot 10^4}{2 \cdot 2560} = 11,7 \text{ мкм.} \quad (4)$$

Так как $P_s > Pix$, то заданная точность V_s является достижимой.

Ввиду того, что для лавиноопасных склонов критерий допустимой разномасштабности $H \geq 5\Delta h$ (где h – максимальная разность высот на объекте) соблюдения невозможно, съемку следует проводить по высотным зонам, где абсолютная высота фотографирования $H_{\text{абс}} = Z_{\text{ср.пл}} + H$ устанавливается для каждого из проложенных вдоль склона маршрутов.

Рассчитаем время экспозиции T_3 , исходя из допустимой величины смазывания изображения $\delta = 6$ мкм при движении самолета по формуле

$$T_3 = \frac{\delta \cdot M}{V_{\text{пут}}} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 2560}{27,8} = 0,0006 \text{ с} \approx \frac{1}{1700} \text{ с,} \quad (5)$$

где $V_{\text{пут}}$ – путевая скорость БПЛА, равная 27,8 м/с, что соответствует 100 км/ч.

Широкий диапазон экспозиций и светочувствительности используемой камеры позволят производить съемку с соблюдением условия (5) при любой погоде.

Необходимый интервал времени τ между соседними экспозициями рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{B_x}{V_{\text{пут}}} = \frac{27,6}{27,8} = 1 \text{ с.} \quad (6)$$

Используемая камера позволяет обеспечить данный интервал фотографирования.

Таким образом, на основе приведенных выше параметров аэрофото съемки можно сделать вывод, что поставленная задача высокоточного мониторинга лавиноопасных участков линейных транспортных сооружений с применением БПЛА в принципе может быть решена. Необходимо практическое подтверждение расчетов.

В статье не рассмотрены вопросы эксплуатации беспилотных систем: сертификации и регистрации БПЛА, получения разрешительной документации на аэрофотосъемку, обеспечения безопасности и страхования полетов.

Список литературы

1. Лазарев В.М., Дусье В.Г. Разработка и исследование методов прогнозирования деформаций фундаментов и несущих конструкций инженерных сооружений на оползнеопасных территориях по результатам геодезических измерений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 2. С. 143–154.
2. Исаков А.Л., Юрченко В. И. Анализ космических методов мониторинга лавиноопасных участков транспортных магистралей // Транспортное строительство. 2014. № 1. С. 26–29.
3. Зинченко О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования (Часть 1). М. : Ракурс. Россия. 2011. URL: <http://www.racurs.ru/?page=681> (дата обращения: 04.12.2012).
4. Сечин А. Ю., Дракин М. А., Киселева А. С. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования (Часть 2). М. : Ракурс. Россия, 2011. URL: <http://www.racurs.ru/?page=699> (дата обращения: 05.08.2013).
5. Беспилотные летательные аппараты // Российские БПЛА. URL: <http://bp-la.ru/category/rossijskie-bpla/> (дата обращения: 08.10.2013).

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОГ

Т. Н. Кобзева, Л. Р. Бабаян

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань (Россия)

Активное использование транспортных магистралей требует внимательного отношения к проектированию и строительству автомобильных дорог разного класса эксплуатации.