

А.С. КОСТЮК, ведущий инженер ООО «Лаборатория автоматизации геодезических и фотограмметрических работ», аспирант Сибирской автодорожной академии (СибАДА), г. Омск

Навигационное обеспечение аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов

Сверхлегкие беспилотные летательные аппараты взлетным весом до 5 килограммов обладают рядом преимуществ, основными из которых являются — высокая мобильность, низкая стоимость и способность быстро выполнять поставленные задачи. Одним из наиболее перспективных направлений их использования стала аэрофотосъемка небольших участков местности (площадью до 10 кв. км), на которых применение большой авиации нерентабельно или невозможно. Такие БПЛА могут оснащаться различным аэронавигационным оборудованием, состав которого зависит от их грузоподъемности, стоимости всего комплекса и состава решаемых задач.

Аэрофотосъемка с БПЛА имеет ряд существенных отличий от классической аэрофотосъемки:

- существенные отклонения маршрутов от прямолинейности и в связи с этим высокая вероятность уклонений их поперечного перекрытия от расчетного;
- значительные (до 10°) углы наклона снимков (ε), обусловленные нестабильностью носителя аппаратуры и невозможностью использования громоздкого оборудования для стабилизации фокальной плоскости съемочной камеры;
- существенное колебание высоты фотографирования (ΔH), что приводит к заметной разномасштабности смежных снимков (Δm).

Результатом совместного влияния перечисленных факторов может быть отсутствие тройного продольного, поперечного перекрытий некоторых смежных снимков и маршрутов, а в ряде случаев — и наличие разрывов в покрытии аэроснимками картографируемого участка.

Для локализации указанных факторов решающее значение приобретает

определение в полете параметров навигации, используемых как для управления полетом БПЛА, так и последующей фотограмметрической обработки аэрофотоснимков.

НЕОБХОДИМАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАВИГАЦИИ

В общем случае параметры навигации включают данные, используемые для пилотирования БПЛА и определяющие пространственное положение носителя, вектор его путевой скорости и их производные. Ниже рассмотрим способы и точность определения некоторых данных, используемых для целей навигации управления параметрами аэрофотосъемки и при фотограмметрической обработке снимков, и в частности — координат центров фотографирования и угла наклона фокальной плоскости съемочной камеры.

Решение фотограмметрических задач требует высокоточного определения координат центров фотографирования и углов наклона снимков средствами глобальных навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС и др.), инерциальных систем или комплексов GPS/IMU. Причем, точность спутниковых измерений (ΔX , ΔY , ΔZ) должна быть сопоставима с погрешностями измерения аэроснимков, а величина угла наклона снимка (ε) — с угловым размером пиксела цифрового изображения. Названные величины связаны с параметрами аэрофотосъемки соотношениями [2]:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta Y = m \times \Delta_d, \\ \Delta Z &= \frac{f}{b} m \times \Delta_d, \\ \varepsilon &= \frac{pix}{f} \rho, \end{aligned} \quad (1)$$

где m — знаменатель масштаба аэро-снимка,

f — фокусное расстояние съемочной камеры,

Δ_d — суммарная погрешность измерения снимков,

b — базис фотографирования в масштабе снимка и pix — размер пиксела съемочной камеры.

Приняв параметры аэрофотосъемки равными $m = 5000$ и $\Delta_d = 0,01$ мм (10 мкм), для случая использования малоформатной камеры Canon 5D ($f = 24$ мм, формат кадра 36×36 мм, $b = 15$ мм, $pix = 9$ мкм), получим: $\Delta_x = \Delta_y = 5$ см, $\Delta_z = 8$ см, $\varepsilon = 75''$.

Таким образом, необходимая для фотограмметрической обработки точность определения координат центров фотографирования и углов наклона снимков достигается лишь в режиме постобработки, при условии использования геодезических спутниковых приемников, постоянно действующих станций (или метода PPP) и профессионального съемочного оборудования.

Решение навигационных задач не требует столь высокой точности определений, поскольку связано с выполнением технических требований к аэрофотосъемке — расчетных перекрытий, масштаба снимков и углов их наклона. При этом для выполнения требований Основных положений [1] вполне достаточно, чтобы погрешность определения плановых координат центров не превышала 0,1 от величины базиса фотографирования, а углы наклона снимков — величин, установленных для плановой аэрофотосъемки. Отсюда следует, что искомые значения не должны превышать

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta Y = 0,1 \times B, \\ \Delta Z &= \frac{f}{b} \times \Delta''_X, \\ \varepsilon &= 3^\circ, \end{aligned} \quad (2)$$

где $B = b \times m$ базис фотографирования на местности.

Тогда с теми же данными получим: $V = 75$ м, $\Delta_x = \Delta_y = 7,5$ м и $\Delta_z = 12$ м. Достижение такой точности для случая использования малоформатных непрофессиональных камер и малогабаритных технических средств вполне реально.

СЪЕМКА В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ВЫСОТ

Известно, что масштаб аэроснимка равен отношению фокусного расстояния съемочной камеры к высоте фотографирования, а его колебания могут быть ограничены соответствующими рамками путем изменения высоты полета БПЛА. Основанием для использования такой схемы управления масштабом съемки являются следующие соображения:

- аэрофотосъемка с БПЛА в большинстве случаев выполняется с высот фотографирования 200–900 метров;
- в соответствии с требованиями действующих положений [1], при высоте полета над средней плоскостью съемочного участка до 1000 метров ее фактическое значение не должно отличаться от заданного более чем на 30 в равнинных районах и 50 метров в горных районах;
- установленная экспериментальным путем погрешность барометрического датчика высоты при спокойных погодных условиях составляет 10 метров, а временной дрейф и искажение измерений, связанные с изменением температуры, приводят к разности высот одной и той же точки до взлета БПЛА и после его приземления до 30 метров.

Поскольку суммарная погрешность барометрической высоты, вызванная влиянием дрейфа показаний прибора и температурными колебаниями, не превышает установленных [1] значений,

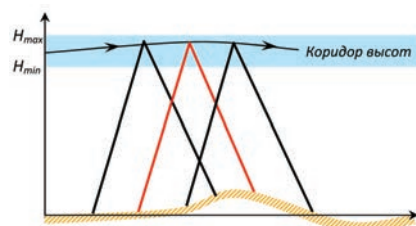


Рис. 1. Аэрофотосъемка в заданном диапазоне высот фотографирования

метод используется для определения фактической высоты съемки.

С этой целью на борт БПЛА размещают аппаратуру, передающую в реальном времени барометрическую высоту летательного аппарата H_B , и в случае приближения ее к максимальному (H_{max}) или минимальному (H_{min}) значениям вырабатывается соответствующий сигнал для автоматического, полуавтоматического или ручного изменения высоты полета БПЛА (рис. 1), причем

$$\left. \begin{aligned} H_{min} &= H - \Delta H \\ H_{max} &= H + \Delta H \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где ΔH — допустимая разность расчетной и фактической высот фотографирования, установленная согласно требованиям [1] (30 или 50 м для равнинных и горных районов соответственно).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРОВ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ И УГЛОВ НАКЛОНА СНИМКОВ

Следствием максимального уменьшения веса размещаемого на сверхлегком БПЛА оборудования является использование кодового GPS-навигатора с радиомодемом для передачи координат БПЛА на наземный сегмент управления. Непрерывная фиксация моментов экспозиции, координат центров фотографирования и показаний соответствующих датчиков обеспечивает отображение на мониторе в реальном времени траектории движения летательного аппарата и параметров полета состояния БПЛА (курса, скорости, высоты и др.). На основе этих данных специальная программа создает на картографической основе условные границы аэроснимков для визуальной оценки прямолинейности съемочных маршрутов, полноты покрытия территории аэрофотосъемкой и др. Может быть принято решение о необ-

ходимости выполнения дополнительных заходов БПЛА над проблемными участками и пр. [4].

Основным недостатком такой системы является:

- ориентация на ручное (неавтоматизированное) управление съемочным процессом;
- низкая точность определения координат кодовым GPS-навигатором, достигающая 10–20 метров, и углов ориентации носителя (тангажа, крена и рысканья), вычисляемых через вектор скорости GPS-измерений, достигающая 10°;
- наличие значительных по величине систематических ошибок координат центров и углов наклона, затрудняющих последующую фотограмметрическую обработку снимков.

В настоящее время производителями приемников ГЛОНАСС/GPS геодезического класса точности NovAtel Inc. и Trimble [5,6] создано несколько малогабаритных плат с представленными в таблице техническими характеристиками.

Габариты и масса приемников позволяют использовать их на сверхлегких БПЛА с взлетной массой до 5 килограммов, а точность позиционирования в режиме постобработки — для построения и уравнивания фотограмметрической сети.

Определение углов ориентации летательного аппарата в моменты фотографирования связано с использованием либо многоантенных спутниковых приемников, либо инерциальных датчиков IMU (Inertial Measurement Unit). Первые в настоящее время выпускаются компаниями Trimble (США), Javad (США), Septentrio (Бельгия) и др. и обеспечивают получение крена, тангажа и рысканья носителя аппаратуры с достаточной точностью, но габариты и масса таких систем не позволяют

Технические характеристики	Модель спутникового приемника	
	OEM615 (NovAtel)	BD920 (Trimble)
Конфигурация каналов (GPS/ГЛОНАСС)	L1, L2, L2C / L1, L2	
СКП позиционирования по результатам постобработки (мм)	$m_d = (10 + S_{км})$	$m_{x,y} = (8 + S_{км})$ $m_z = (15 + S_{км})$
Частота приема спутниковых сигналов, Гц	20	20
Энергопотребление, Вт	0,46	0,4
Габариты, мм	46×71×11	51×41×7
Масса, г	24	24
Рабочая температура, °С	-40°... +85	

установить их на БПЛА взлетной массой до 5 килограммов. Что же касается инерциальных датчиков, то при вполне приемлемых точностных характеристиках и габаритах их стоимость остается достаточно высокой, что служит серьезным препятствием для установки их на сверхлегких БПЛА. Альтернативой им является устройство ADIS16385 компании *Analog Devices* (США), использующее датчики ускорения и угловой скорости, однако его точность составляет около 30', что заметно превышает требуемое.

АЭРОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ БПЛА «ЭЛЬФ» ПП-45

Беспилотный летательный аппарат «Эльф» ПП-45 разработан ООО «Лаборатория автоматизации геодезических и фотограмметрических работ» совместно с ООО «ОКБ Малыш беспилотные аппараты» (г. Омск) и с 2001 года активно используется для выполнения аэрофотосъемки с целью создания топографической основы масштабов 1:500–1:2000. Полеты БПЛА обеспечиваются аэронавигационным комплексом, включающим бортовое и наземное оборудование [3].

Бортовая навигационная аппаратура представлена видеокамерой, кодовым спутниковым приемником, барометрическим высотомером, а также датчиками потребляемого тока и напряжения силового аккумулятора.

Наземное оборудование аэронавигационного комплекса включает направленные и всенаправленные антенны, обеспечивающие управление летательным аппаратом на удалении

до 5 километров, компьютер, монитор с нанесенным проектом аэрофотосъемки и видеоочки, разработанные компанией *FatShark* (Канада).

Видеоочки по функционалу аналогичны монитору компьютера — все, что отображается на экране ноутбука, может быть передано в три окна поля зрения видеоочков (рис. 2):

- ГИС Mapinfo (сверху) с запущенным тбх-приложением, позволяющим в реальном времени отображать траекторию полета и условные границы снимков;
- программа Eagle Tree (внизу слева и в центре) отображает состояние бортовых датчиков БПЛА;
- видеоизображение с носовой видеокамеры БПЛА (внизу справа).

В качестве недостатка видеоочков можно отметить низкое разрешение изображения (640 × 480), что накладывает дополнительные требования к размерам отображаемых значений показаний датчиков.

Управление полетом ведется с развернутого в поле пункта, размещенного на наиболее удобном для взлета и посадки месте. В этом пункте находятся пилот и оператор. При этом оператор осуществляет реализацию проекта с учетом изменения направления ветра и подачу команд на включение и выключение фотоаппарата при полете БПЛА по маршруту. Пилот, наблюдая изображение в видеоочках, выполняет те же задачи, что и пилот большой авиации — руководит полетом носителя аппаратуры, осуществляет контроль установленных на его борту датчиков и принимает решения, связанные с за-

ходом на очередной съемочный маршрут, корректировкой высоты фотографирования, заходом на посадку и др.

Благодаря управлению БПЛА по видеоизображению, транслирующемуся с летательного аппарата, снимается проблема управления в изометрии и, следовательно, появляется возможность полета по параллельным маршрутам.

Рассмотренный способ ручного управления полетом БПЛА по видеоинформации является весьма перспективным для сверхлегких беспилотников, так как оборудование для него относительно невысокой стоимости.

СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ СВЕРХЛЕГКИХ БПЛА

Для повышения качества материалов аэрофотосъемки необходима стабилизация полета летательного аппарата с помощью автопилота, позволяющего вести его по заданному маршруту и компенсировать возникающие углы крена и тангажа.

В настоящее время на рынке производителей автопилотов для БПЛА представлено несколько разработок со схожими характеристиками. В качестве примера рассмотрим бортовой комплекс навигации и управления, разработанный и производимый компанией ООО «ТеКнол» (Россия).

Функцию измерения состояния системы выполняет малогабаритная инерциальная интегрированная система (МИНС), включающая триады инерциальных датчиков (микромеханических гироскопов и акселерометров), барометрический высотомер и трехосный магнитометр. Объединяя данные этих датчиков с данными приемника GPS, система выработывает полное навигационное решение по координатам и углам ориентации. Таким образом, МИНС — это полная инерциальная система, в которой реализован алгоритм бесплатформенной ИНС, интегрированной с приемником системы спутниковой навигации. По сути одновременно работают три навигационные системы в одном вычислителе по одним и тем же данным. Каждая из платформ реализует свои принципы управления полетом БПЛА, а мастерфильтр выбирает оптимальный из них, в зависимости от характера движения. Этим обеспечивается устойчивость системы не только при прямоли-



Рис. 2. Информация, отображаемая в видеоочках пилота-оператора [4]

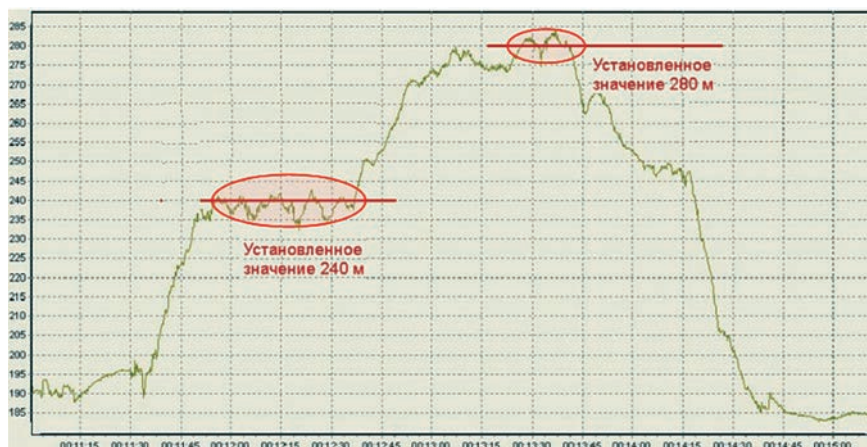


Рис. 3. Фрагменты траектории полета БПЛА на высотах 240 и 280 м [7]

нейном движении, но и на виражах, при разворотах, боковом порывистом ветре и пр. Система никогда не теряет горизонт, чем обеспечиваются правильные реакции автопилота на внешние возмущения и адекватное распределение воздействий между механизмами управления полетом БПЛА. Компания провела серию испытаний МИНС. Точностные характеристики МИНС аттестованы в ЛИИ им. М.М. Громова. При комплексном решении погрешность определения координат составила 6 метров, погрешность измерения высоты летательного аппарата — 2 метра, скорость рассчитывается с погрешностью 0,25 м/с, определение угловых элементов ориентирования осуществляется с погрешностью 0,5°.

Автопилот в составе бортового комплекса навигации и управления обеспечивает: автоматический взлет, по-

лет по заданному маршруту и заход на посадку; поддержание заданной высоты и скорости полета; стабилизацию углов ориентации; программное управление бортовыми системами.

При аэро съемке местности БПЛА совершает полет по линиям с интервалом 50–70 метров. Автопилот обеспечивает следование по маршруту с отклонением, не превышающим 10–15 метров при скорости ветра 7 м/с.

Поддержание заданной высоты полета также обеспечивается малогабаритной инерциальной интегрированной системой, которая вырабатывает комплексное решение по данным GPS, барометрического высотомера и инерциальных датчиков. При автоматическом полете по маршруту бортовой комплекс обеспечивает точность поддержания высоты в пределах 5 метров (рис. 3).

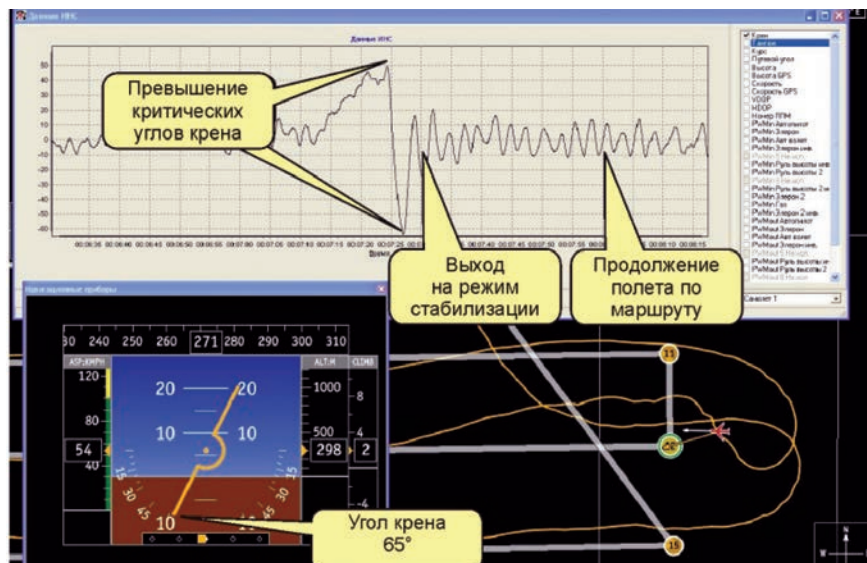


Рис. 4. Пример работы системы стабилизации БПЛА [7]

На рисунке (рис. 4) показано, как система автоматического управления полетом выводит БПЛА из критического крена в 65°, возникшего при совершении маневра под воздействием порыва бокового ветра.

Подобные разработки по созданию автопилота для беспилотного летательного аппарата ведутся в США, Германии, Франции и Великобритании.

Несмотря на большой выбор предлагаемых автопилотов для БПЛА, практические эксперименты и отзывы о работе систем стабилизации полета свидетельствуют о преднамеренном завышении показателей точности и правильности реакции автопилота на различные внештатные ситуации. В настоящее время разработанные автопилоты для малых БПЛА позволяют применять их для выполнения работ по видеомониторингу линейных объектов и осуществлять полет по одному маршруту. Попытки использовать автопилот при выполнении аэрофотосъемки площадных объектов приводят к разрывам между маршрутами.

Литература:

1. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов ГКИНПО93280. М., «Недра», 1982.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия. Пособие для студентов вузов. Мн., «Тетрасистемс», 2010.
3. Костюк А.С. Особенности аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов. Омск, Центр научно-технической информации. Информационный листок, 1997, №10197.
4. Костюк А.С. Использование малых летательных аппаратов и цифровой съемки для обновления плановых материалов и мониторинга объектов нефтегазового комплекса // Тезисы доклада. 10-я Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформатика в нефтегазовой и горной отраслях», Сургут, 2009.
5. Сайт компании «Глобальные навигационные спутниковые системы». Электронный ресурс: www.gnssplus.ru.
6. Сайт компании Trimble. Электронный ресурс: www.trimble.com.
7. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой — основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. Электронный ресурс: www.teknol.ru.