

О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

МИРОНОВ В.И., МИРОНОВ Ю.В., ПРИЩЕПА Ю.В.

УДК 528.7

Миронов В.И., Миронов Ю.В., Прищепка Ю.В. О некоторых способах улучшения точностных характеристик координатной привязки изображений, получаемых беспилотными летательными аппаратами.

Аннотация. Рассматриваются вопросы повышения точности обработки видеоизмерений, связанные с организацией интегрированной обработки навигационных измерений беспилотных летательных аппаратов в наземном комплексе управления, а также с разработкой методов координатной привязки изображений по навигационным данным и опорным точкам.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, навигационные измерения, координатная привязка изображений, опорные точки.

Mironov V.I., Mironov Y.V., Prishchepa Y.V. About some ways of improvement of accuracy enhance of a co-ordinate binding of images getting by UAV.

Abstract. One considers the questions of increase of accuracy of processing of the video measurements, connected with the organization of the integrated processing of navigating measurements of unmanned aerial vehicles in a land complex of management, and also with working out of methods of a co-ordinate binding of images under the navigating data and reference points.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, navigating measurements, images co-ordinate binding, reference points.

1. Введение. Беспилотные летательные аппараты (БЛА) находят широкое применение в решении задач дистанционного наблюдения земной поверхности и расположенных на ней объектов естественного или искусственного происхождения. Одной из основных задач систем дистанционного мониторинга является определение картографических координат объектов, обнаруженных на изображении, т. е. координатная привязка изображений. Требования к ее точности в таких системах достаточно высоки. Кроме того, во многих важных случаях обработка видеоизмерений должна проводиться в реальном масштабе времени. Все это свидетельствует о сложности задачи.

Координатная привязка является ключевой технологией в анализе изображений, получаемых в результате обработки больших потоков видовой информации, так как качество и полезность получаемых по ним данным критически зависит от возможности и точности коорди-

натной привязки. В свою очередь качество получаемых видеоизображений и точность координатной привязки наблюдаемых объектов зависит от большого числа действующих факторов, многие из которых имеют случайный и неопределенный характер. Поэтому, несмотря на большое число опубликованных работ, посвященных этой проблематике, вопросы повышения точности координатной привязки изображений БЛА видеонаблюдения остаются актуальными.

В статье рассматриваются некоторые пути повышения точности обработки видеоизмерений в наземных комплексах управления и обработки информации (НКУ). Они связаны с организацией интегрированной обработки бортовых навигационных измерений БЛА, а также с разработкой методов координатной привязки изображений по навигационным данным и опорным точкам с учетом сложной реальной динамики регулярных составляющих ошибок определения параметров углового движения объекта.

2. Использование бортовых навигационных измерений и оценок в наземных комплексах обработки видеоизмерений. Качество и точность обработки видеоинформации, полученной при наблюдении во многом определяются и ограничиваются динамикой управляемого движения БЛА, точностными характеристиками бортовых навигационных определений, а также программными значениями высоты и скорости полета. В значительно большей мере это относится к малогабаритным БЛА, которые создаются в условиях жестких ограничений на стоимость их разработки и производства. Они оснащаются навигационными приборами сравнительно низкой точности, имеют малые массово-инерционные характеристики и в большей степени подвержены влиянию возмущений в полете. Поэтому изображения, получаемые с таких БЛА, обычно имеют повышенные геометрические искажения.

Аппаратура видеонаблюдений жестко установлена на корпусе БЛА. Поэтому в полете она вместе с БЛА совершает все эволюции его поступательно-вращательного движения. Это обстоятельство даже при идеальной привязке каждого пиксела измерений приводит к значительной деформации границ программной области видеонаблюдений и отклонениям параметров, характеризующих разрешающие свойства видеоизображений исходной сцены во всей области наблюдения, от их расчетных значений.

Построение видеоизображений имеет существенные особенности в зависимости от типа бортовой аппаратуры наблюдения. В современных БЛА чаще всего используются цифровые кадровые и строчные (сканирующие) камеры, работающие в оптическом, инфракрасном

и ультрафиолетовом диапазонах (в зависимости от решаемой задачи). Технологически менее сложной является обработка информации при ведении съемки видеокамерой. Получаемые видеокadres охватывают значительные области наблюдаемой поверхности. Геометрическая привязка всех точек кадра осуществляется по одним навигационным данным. Их случайные ошибки являются систематическими для всех точек видеокадра. Это создает благоприятные условия для коррекции привязки изображения при попадании в кадр объектов с хорошо известными координатами. При обработке чередующихся кадров, которые частично накладываются друг на друга, можно осуществить взаимную привязку и смежных кадров, и всей их последовательности. Все это позволяет проводить коррекцию по опорным точкам, разнесенным по отдельным кадрам.

В том случае, когда съемка осуществляется аппаратурой сканерного типа, кадром является строка видеонаблюдений. Площадной кадр как бы сжимается в строку. Привязка каждой строки осуществляется по своим значениям навигационных параметров. В условиях полета, близких к номинальным, строки с заданной частотой следуют друг за другом и не имеют общих точек. Однако при повышенных угловых эволюциях БЛА и высоких уровнях навигационных ошибок могут возникать:

- перекосы строк и их пересечение,
- нарушение интервалов следования строк и их относительные смещения,
- образование зон «сгущения» и «разряжения»,
- появление участков «смаза» изображений.

Указанные эффекты достаточно регулярно наблюдаются в практике летных испытаний БЛА. Все это усложняет и ограничивает возможности построения качественных видеоизображений и их коррекцию.

Особое значение при обработке больших потоков видовой информации имеют точностные характеристики бортовых навигационных определений параметров поступательно-вращательного движения БЛА. Навигационные данные по каналам телеметрической связи передаются в наземный пункт обработки информации и используются далее в качестве исходных при построении изображений в режиме реального времени. Предварительно они подвергаются фильтрации с целью отбраковки аномальных измерений, сглаживания и временной привязки.

Поступающая с борта в НКУ видеoinформация предварительно

подвергается корреляционному анализу для компенсации искажений, вызванных эффектом «джиттера», обусловленного влиянием нерегулярных высокочастотных вибраций корпуса БЛА и самой аппаратуры при видеосъемке и других факторов. Кроме того, выполняется ряд других операций по повышению качества изображений: увеличение контрастности, удаление шума, устранение размытия изображений вследствие движения и т. п.

В состав навигационных систем современных БЛА наблюдения входят блоки акселерометров и датчиков угловых скоростей (ДУС), навигационная аппаратура потребителей (НАП), работающая по навигационным системам ГЛОНАСС и GPS, а также высотомер. На основе блоков акселерометров и ДУС формируется бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Они позволяют определять полный вектор параметров поступательно-вращательного движения БЛА. Эти данные имеют двойное назначение. С одной стороны, они используются для управления движением БЛА (наведение и стабилизация), а с другой — для обработки видеоизмерений в НКУ.

Существующие системы навигации малобаритных БЛА обеспечивают требуемое качество управления полетом. Однако они не в полной мере отвечают возрастающим требованиям к точностным характеристикам обработки видеоизмерений, что приводит к необходимости повышения точности навигационных определений. При заданных составах и характеристиках измерительных приборов эта цель может быть достигнута только за счет совершенствования навигационных алгоритмов.

В настоящее время определяющей тенденцией в развитии навигационных систем БЛА является переход к интегрированным системам [1, 2]. Задача построения таких систем заключается в рациональной алгоритмической организации совместной обработки данных, получаемых от БИНС, НАП и высотомера. Возможны различные варианты интеграции, основные из которых рассмотрены в [2]. Ядро алгоритмической структуры таких систем составляют алгоритмы БИНС и динамической фильтрации. Оснащение БЛА интегрированными навигационными системами, несомненно, способствовало бы повышению качества обработки видеоизмерений, однако для этого необходима глубокая модернизация их бортовой СУ. В этой ситуации представляется целесообразным разработка альтернативного варианта, в котором наиболее трудоемкая часть алгоритмов интегрированной системы реализуется в НКУ, который обладает значительными вычислительными мощностями. При таком подходе с точки зрения задач обработки

видеоизмерений формируется распределенная интегрированная навигационная система, в которой измерительная часть и часть алгоритмов обработки, необходимых для управления полетом, реализуется на борту БЛА, а собственно интеграция навигационных данных производится в НКУ. Для информационного обеспечения выполнения данных функций необходимо предусмотреть передачу с БЛА расширенного состава результатов навигационных измерений и оценок по каналам телеметрической связи.

3. Координатная привязка изображения по навигационным данным и информации об опорных точках. Анализ проведенных исследований показывает, что в некоторых случаях даже в рамках интегрированных систем получаемая точность навигационных определений оказывается приемлемой по параметрам движения центра масс БЛА, но недостаточной по параметрам углового движения. В этих условиях необходимо рассмотреть возможность уточнения регулярной составляющей ошибок определения углов ориентации по системе опорных точек. Задача такого рода рассматривалась в [3], однако полученное здесь решение имеет ограниченную область применения, поскольку динамика углового движения БЛА на временном интервале коррекции представлена упрощенно в виде линейной аппроксимационной модели. Более предпочтительны постановка и решение задачи с использованием строгой модели динамики углового движения, адекватной условиям реального возмущенного полета. Такую модель зададим системой кинематических уравнений [4], описывающих поведение углов Эйлера в зависимости от измеряемых датчиками угловых скоростей объекта. Предлагаемый способ базируется на идентификации регулярной составляющей ошибок определения углового положения БЛА $\Delta\alpha(t)$ по системе опорных точек и введения поправок в процессе обработки видеоизмерений.

При постановке и решении задачи используем традиционные модели преобразования координат из системы координат снимка в систему координат снимаемой поверхности, которую представим в обобщенном виде

$$\bar{X} = \bar{F}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{\alpha}), \quad (1)$$

где $\bar{x} = (x, y)^T$ — координаты точки в системе координат изображения; $\bar{X} = (X, Y)^T$ — координаты изображаемой точки в картографической системе; $\bar{r} = (X^{JLA}, Y^{JLA}, H)^T$ — вектор положения центра

масс БЛА: $X^{ЛА}, Y^{ЛА}$ — плановые координаты БЛА, H — высота полета; $\mathbf{a} = (J, \psi, \gamma)^T$ — вектор параметров углового движения БЛА, J, ψ, γ — текущие значения углов тангажа, рыскания (гироскопического курса) и крена соответственно.

Вид оператора (1) конкретизируется с использованием правил динамической фотограмметрии [5, 6].

Пусть определен вектор из N опорных точек

$$\mathbf{P} = (\mathbf{X}_{P_1}, \mathbf{x}_{P_1}, \dots, \mathbf{X}_{P_N}, \mathbf{x}_{P_N})^T$$

с известными координатами $\mathbf{X}_{P_i} = (X_{P_i}, Y_{P_i})^T$ в картографической системе и $\mathbf{x}_{P_i} = (x_{P_i}, y_{P_i})^T$ — в системе координат изображения для моментов времени $t_i \in [t_1, t_N]$, $i = 1(1)N$. Эти данные рассматриваются в качестве дополнительных измерений при решении задачи оценивания.

Представим модель изменения углов ориентации в виде

$$\bar{\mathbf{a}}(t) = \tilde{\mathbf{a}}(t) + \Delta \bar{\mathbf{a}}(t) + \delta \bar{\mathbf{a}}(t),$$

где $\tilde{\mathbf{a}}(t)$ — значения параметров углового движения, определенные по навигационным данным; $\bar{\mathbf{a}}(t)$ — подлежащая оценке регулярная составляющая ошибок определения углового положения; $\delta \bar{\mathbf{a}}(t)$ — вектор случайных ошибок.

Для решения используем линеаризованные кинематические уравнения

$$\Delta \dot{\bar{\mathbf{a}}} = \frac{\partial \bar{F}(\bar{\mathbf{a}}, \bar{\boldsymbol{\omega}}, t)}{\partial \bar{\mathbf{a}}} \Delta \bar{\mathbf{a}}; \quad (2)$$

$$\bar{F} = (F_\psi, F_\vartheta, F_\gamma)^T; \quad \bar{\boldsymbol{\omega}} = (\omega_{x_1}, \omega_{y_1}, \omega_{z_1})^T;$$

$$F_\psi = (\omega_{y_1} \cos \gamma - \omega_{z_1} \sin \gamma) \sec \vartheta; \quad F_\vartheta = (\omega_{y_1} \sin \gamma + \omega_{z_1} \cos \gamma);$$

$$F_\gamma = \omega_{x_1} - (\omega_{y_1} \cos \gamma - \omega_{z_1} \sin \gamma) \tan \vartheta,$$

где $\omega_{x_1}, \omega_{y_1}, \omega_{z_1}$ — измеренные ДУС проекции вектора угловой скорости вращения на оси связанной системы координат.

Кроме того, будем использовать линеаризованную модель измерений.

$$\Delta \bar{X}_{P_i} = \bar{X}_{P_i} - \bar{F}(\bar{x}_i, \bar{r}_i, \tilde{\mathbf{a}}_i) = \frac{\partial \bar{F}_i}{\partial \bar{\mathbf{a}}_i} \Delta \bar{\mathbf{a}}_i + \delta \bar{X}_{P_i},$$

где $\delta\bar{X}_{P_i}$ — суммарная ошибка оценки координат опорных точек.

В зависимости от располагаемой информации о параметрах законов распределения ошибок измерений и наличия надежной априорной информации в качестве критериев оптимального оценивания можно использовать известные критерии методов наименьших квадратов (МНК), максимального правдоподобия и максимума апостериорной вероятности. Для оценивания могут привлекаться способы обработки и по полной выборке, и по выборке нарастающего объема. В частности, при использовании МНК решение задачи имеет следующий вид

$$\Delta\bar{\alpha}(t) = U(t, t_1)\Delta\tilde{\alpha}(t_1),$$

где $\Delta\tilde{\alpha}(t)$ — оценка начального значения вектора $\Delta\bar{\alpha}(t)$ на начальный момент t_1 , соответствующий определению первой опорной точки; $U(t, t_1)$ — фундаментальная матрица решения однородной системы (2).

При обработке по полной выборке $\Delta\tilde{\alpha}(t_1)$ определяется по формуле

$$\Delta\tilde{\alpha}(t_1) = \left(\sum_{i=1}^N A_i^T A_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N A_i^T \Delta\bar{X}_{P_i}; \quad A_i = \frac{\partial \bar{F}_i}{\partial \bar{\alpha}_i} U(t_i, t_1).$$

Значения фундаментальной матрицы $U(t_i, t_1)$ можно вычислить методом конечных разностей путем интегрирования системы (2).

Полученная таким образом функция $\Delta\bar{\alpha}(t)$ используется в качестве поправок при обработке видеоизмерений.

4. Заключение. Реализация изложенных предложений, связанных с организацией интегрированной обработки навигационных измерений БЛА в наземном комплексе управления, а также с разработкой методов координатной привязки изображений по навигационным данным и опорным точкам, будет способствовать повышению точности координатной привязки изображений алгоритмическими методами без увеличения аппаратной сложности и модернизации бортовой СУ БЛА. Отработку и оптимизацию алгоритмов целесообразно проводить на основе создания соответствующих моделирующих комплексов.

Литература

1. Интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы / Под ред. В. Г. Пешехонова. – СПб., 2001. 235 с.
2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.

3. *Haala N., Stallmann D., Cramer.* Geometric Processing of High Resolution Airborne Scanner Imagery Using GPS-INS and Ground Control Points // Proc. of 3rd Intern. Airborn Remote Sensing Conference and Exhibition. 1997. Vol. 1. P. 371–378.
4. *Горбатенко С. А., Макашов Э. М., Полушкин Ю.Ф., Шефтель Л.Ф.* Механика полета. М.: Машиностроение, 1969. 420 с.
5. *Родионов Б. Н.* Динамическая фотограмметрия. М.: Недра, 1983. 310 с.
6. *Добрынин Н. Ф., Двигалов В. Н.* Определение пространственных координат точек местности по одиночному снимку и цифровой модели объекта // Вопросы повышения точности и автоматизации аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ. М., 1988. С. 88–95.

Мионов Вячеслав Иванович — д-р техн. наук, проф.; ведущий науч. сотр., лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: фундаментальные и прикладные исследования проблем комплексного моделирования, теории оптимального наблюдения и управления динамическими процессами, вычислительной математики, баллистики космических полетов, статистического анализа характеристик сложных технических систем. Число научных публикаций — 250. Адрес: vi-mironov@yandex.ru; СПИИРАН, 14-я линия В. О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; раб. тел. +7(812)328-3337, факс +7(812)328-4450.

Mironov Vyacheslav Ivanovich — doctor of technical science, professor, laboratory of information technology in the system analysis and modeling, St Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: fundamental and applied researches of problems of complex modelling, the theory of optimum supervision and management of dynamic processes, calculus mathematics, ballistics of space flights, the statistical analysis of characteristics of difficult technical systems. The number of publications — 250. Address: vi-mironov@yandex.ru; SPIIRAS, 39, 14th Line V. O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-3337, fax +7(812)328-4450.

Мионов Юрий Вячеславович — д-р техн. наук, доцент; ст. науч. сотр., лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: фундаментальные и прикладные исследования проблем комплексного моделирования, теории оптимального наблюдения и управления динамическими процессами, вычислительной математики, баллистики космических полетов, статистического анализа характеристик сложных технических систем. Число научных публикаций — 80. Адрес: mironuv@yandex.ru; СПИИРАН, 14-я линия В. О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; раб. тел. +7(812)328-3337, факс +7(812)328-4450.

Mironov Yuri Vyacheslavovich — doctor of technical science, the senior scientific employee, laboratory of information technology in the system analysis and modeling, St Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: fundamental and applied researches of problems of complex modelling, the theory of optimum supervision and management of dynamic processes, calculus mathematics, ballistics of space flights, the statistical analysis of characteristics of difficult technical systems. The number of publications — 80. Address: vi-mironov@yandex.ru; SPIIRAS, 39, 14th Line V. O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-3337, fax +7(812)328-4450.

Прищепя Юрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент, директор, Филиал ОАО «Концерн радиостроения "Вега"» в Санкт-Петербурге. Область научных интересов: системы и технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли, системы и технологии разработки и применения трехмерных моделей местности. Число научных публикаций — 75. Адрес: vegaspbf@rambler.ru; ул. Академика Павлова, д. 14-А, Санкт-Петербург, 197022, РФ; раб. тел. +7(812)234-7653, факс +7(812)234-7654.

Prishepa Yuri Vladimirovich — Cand. Tech. Sci, the senior scientific employee, director, Branch of open joint-stock company «Concern of a radio structure of "Vega"» in St.-Petersburg. Research interests: Systems and technologies of data processing of remote sounding of the Earth, system and technology of working out and application of three-dimensional models of district. The number of publications — 80. Address: vegaspbf@rambler.ru; Academician Pavlov's St., 14-A, St. Petersburg, 197022, Russia; office phone +7(812)234-7653, fax +7(812)234-7654.

Поддержка исследований. В публикации представлены результаты исследований, поддержанные грантом РФФИ №09-08-00259, рук. В. И. Миронов.