

**ЦИФРОВЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ
АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ
И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

*Назаров А.С.
(СП «Кредо-Диалог», Минск)*

К наиболее значимым достижениям двух последних десятилетий, оказавшим заметное влияние на теорию и практику фотограмметрии, можно отнести:

- уверенный переход на использование цифровых съемочных камер, базирующихся на новых принципах построения изображений;
- использование результатов инерциальных и спутниковых измерений. Их внедрение наполнило основные этапы съемочных работ новым содержанием и потребовало широчайшего внедрения вычислительных средств, которые сегодня стали неотъемлемой частью всех без исключения этапов получения и обработки снимков;
- совершенствование отдельных процессов и операций имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговыми и упрощает дальнейшую обработку снимков.

Вспомогательное оборудование

Внедрение методов инерциальной и спутниковой навигации позволило отказаться от использования целого ряда одних вспомогательных приборов (*статоскопа, радиовысотомера и др.*), изменить функции других (например, *гиростабилизирующих установок*), ввести третьи (*инерциальные измерительные приборы, спутниковые приемники, средства управления полетом и камерой и др.*).

Однако целый ряд решаемых при аэрофотосъемке задач остался неизменным: по-прежнему актуальны меры по компенсации сдвига изображения (смаза), стабилизации положения фокальной плоскости объектива, определению пространственного и взаимного положения аэроснимков и пр.

Аппаратура и стабилизация аэрокамеры

Прежде всего нужно отметить, что задача стабилизации сегодня упростилась, так как малые по величине остаточные углы наклона определяются с помощью инерциальных приборов и учитываются При последующей фотограмметрической обработке.

Новые гиروطформы оснащены микрогироскопами, активными контрольными компонентами, пассивными демпферами для компенсации

вибрации и имеют цифровой вход. Они функционируют в автоматическом режиме, а необходимые для управления ими данные определяются системой прямого позиционирования (например, POS AV) с точностью до 0,0003⁰ (около 1") и частотой порядка 300 Гц, преобразуются в аналоговую форму и передаются на соответствующий вход платформы.

Сегодня выпускается несколько моделей гироскопов, среди которых наиболее известны **PAV 10/20/30** (Wild/Leica); **M1000**, **CM2000**, **GSM3000** (Somag AG Jena); **T-AS** (ZI Imaging); и некоторые другие с примерно одинаковыми техническими характеристиками. Близкие к ним характеристики имеет **ГУТ-9** (РБ).

Эксплуатации гироскопов требует стабильности основных нагрузок - общей массы, положения центра тяжести и момента инерции. Поэтому при использовании гироскопов с какой-либо камерой используется так называемый «компенсатор масс», с помощью которого эти параметры удерживаются в заданном диапазоне.

Компенсация сдвига изображения

В большинстве цифровых камерах компенсация смаза осуществляется электронным способом, с помощью устройств FMC и с использованием данных спутниковых и инерциальных определений. Наиболее распространен режим *отложенной интеграции TDI*.

Смещение строк изображения выполняется в процессе считывания зарядов ПЗС-элементов с помощью специальной платы, *по завершению экспозиции*, причем строки матрицы ПЗС должны быть ориентированы по направлению полета. Расчет величины смещения выполняется по данным ИНС и СНС и округляется до целого пиксела.

Максимальная величина смещения достигает 50 пикселей.

В некоторых устройствах компенсация выполняется путем непрерывного смещения матрицы ПЗС.

Средства геопозиционирования

К концу 1980-х годов была завершена разработка теории использования гироскопов и акселерометров для определения пространственного положения объектов, скорости, ускорения и направления их перемещения. К этому времени были разработаны методы кинематических GPS-измерений, разрешения неоднозначности фазовых измерений в процессе движения (OTF), GPS-поддержки инерциальных измерений и их совместной обработки с помощью фильтра Калмана. В результате появились **системы прямого позиционирования (комплексы GPS/IMU)**, позволяющие определять пространственное положение, скорости и ускорения с частотой до 500 Гц.

Основными компонентами комплексов GPS/IMU являются:

- спутниковые приемники (**СК WGS-84, ПЗ-90.02**);
- блоки инерциальных измерений (**СК определяется датчиками**)

масса 1,0-4,5 кг;

- вычислительные блоки, выполняющие обработку спутниковых измерений и согласование данных СНС и ИНС на основе фильтра Калмана (масса до 8 кг).

Использование СНС и ИНС требует определение параметров связи их СК с СК снимка и уточнения этих параметров при КАЛИБРОВКЕ.

Эксплуатация системы GPS/IMU требует дифференциальной поддержки с помощью постоянно действующей EХРS или переносной базовой GPS-станции.

В настоящее время используется три таких системы.

Система POS AV (Position&Orientation System Airborne Vehicles) выпускается компанией Applanix с 1991; на конец 2006 года таких систем уже более 1000. Сейчас разработано 5 моделей системы POS AV, различающиеся типами гироскопов и акселерометров (микромеханические, волоконно-оптические, кольцевые лазерные), частотой и точностью определения положения и параметров ориентации.

Система AEROcontrol с 1996 года выпускается германской компании IGI mbH, которая с 1982 года специализируется на разработке аэрофотосъемочного оборудования. В 2000 году этой компанией был разработан новый блок инерциальных данных на базе волоконно-оптического гироскопа, предназначенный для получения высокоточных данных при выполнении аэрофотосъемки.

Система IPAS компании Leica Geosystems может использоваться как автономно, так и в составе съемочной аппаратуры (цифровых кадровых и сканирующих камер, лидаров и др.). Система IPAS использует измерительный блок POS AV с частотой измерений до 500 Гц и пакет обработки инерциальных данных, разработанный компанией NovAtel, реализующий оригинальную технологию точного позиционирования точек «PPP» (Precise Point Positioning) в кинематическом режиме и без базовых станций.

Точность позиционирования этими системами зависит от режима (C/A-код, DGPS, RTK, PP), но остается примерно одинаковой, поскольку все они используют один и тот же алгоритм, и характеризуется представленными данными.

Стоимость интегральных комплексов колеблется от \$30 тыс. (с МЭМС гироскопом) до \$200 тыс. (с кольцевым лазерным гироскопом).

Немного о точности прямого геопозиционирования

и возможности его использования без сгущения по опорным точкам

Инструкция по фотограмметрическим работам определяет СКП статочной невязки в условии коллинеарности в свободной маршрутной сети равной $m_{00} = 10$ мкм в масштабе снимка. Эта величина определяется остаточными погрешностями угловых, линейных элементов внешнего ориентирования снимков и измерений координат точек снимков:

- ошибка измерения координат на снимке равна 3 мкм (1/5 от размера пиксела);

- неточное определение углов наклона снимка приводит к перспективному смещению. Примем $f=150$ мм, $g = 100$ мм, $\Delta_a = 15''$.

Поэтому погрешность позиционирования должна быть $\sqrt{710^2 - 5^2 - 3^2} = \sqrt{6} = 8,1$ мкм.

Вывод: прямое геопозиционирование по данным инерциальных и спутниковых измерений возможно в случаях, когда погрешность определения координат центров фотографирования не превышает **8,1 мкм** в масштабе снимка. Это составит 8 см в масштабе 1:10000 - меньше, чем ожидаемая точность (5 - 30 см), так что говорить о широком применении геопозиционирования пока рано - фотограмметрическое сгущение и привязка снимков пока останется.

Средства управления полетом и камерой

Основными компонентами систем управления являются *центральный компьютер с* вмонтированным в него *спутниковым приемником*, работающим в дифференциальном режиме, *мониторы оператора и пилота*.

К их основным задачам можно отнести:

-управление полетом на основе отображаемой на мониторе пилота в реальном времени информации, содержащей запрограммированный маршрут, реальную трассу полета самолета и его фактическое положение по данным GPS-измерений;

- управление аэрокамерой путем изменения ее ориентации по азимуту (с учетом проектного, фактического направления курса и сноса);

-расчет поправок к элементам редуциции фазового центра антенны GPS в зависимости от углов наклона камеры по данным IMU;

- ведение базы данных, отражающих ход выполнения проекта, фактических параметров съемки, сведений о необходимости повторной аэросъемки отдельных участков и пр.;

- анализ выполненных аэрофотосъемочных работ и подготовка текущих и заключительного отчета.

Имеется несколько таких систем.

Система CCNS (Computer Controlled Navigation) германской компании IGI mbH популярна среди специалистов, и в настоящее время при выполнении аэросъемочных работ используется более 250 экземпляров системы.

Система FCMS (Flight & Sensor Control Management System) компании Leica Systems предназначена для управления полетом самолета и сенсором (камерой), причем интерфейс, реализующий соответствующие управляющие функции, зависит от области использования системы и ее функций. Частью этой системы является ПО планирования и оценки полета FPES (Flight Planning and Evaluation Software), используемой для планирования полета.

Известны и другие системы: **FMC** (ZL Imaging), **TRACK'AIR** и др.

Внедрение новых камер и средств позиционирования не ограничилось заменой одних средств, приборов или устройств другими, более совершенными, а повлекло за собой другие изменения.

Так, цифровое изображение, «открывая путь» к совершенствованию отдельных процессов и операций, имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговым и упрощает дальнейшую обработку снимков.

Классификация цифровых аэрокамер

При выборе основания классификации важно иметь в виду, что существующие аэрокамеры различаются используемым принципом, числом объективов, форматом изображения и пр. Предлагается использовать для этой цели некий набор базовых показателей (фотографическое и фотограмметрическое качество, производительность и технологичность использования и пр.).

В литературе широко используется деление камер - система, в которой в качестве основания используется геометрический принцип формируемого изображения и его объем.

Можно привести характерные особенности выделенных классификационных группировок.

Кадровые съемочные системы. Результатом съемки кадровой аэрокамерой является снимок, построенный по законам центрального проектирования.

Объем информации, получаемой при сканировании аналогового аэронегатива формата 23×23 или 18×18 см с разрешением не хуже 15 мкм, составляет 150 - 230 Мр.

Максимальный размер светочувствительных матриц КМОП или ПЗС редко превышает 20 Мр, поэтому конструирование цифровых камер большого формата требует применения специальных приемов, обеспечивающих формирование единого выходного изображения с помощью нескольких матриц меньшего размера.

Малоформатные съемочные камеры представляют собой обычные, серийно выпускаемые промышленностью со сменными цифровыми задниками и относительно дешевые потребительские (бытовые) или профессиональные цифровые фотоаппараты, рассчитанные на широкий круг пользователей (например, **Rollei**, **Canon**, **Hasselblad** и др.). Обычно они используют одну **матрицу ПЗС** с геометрическим разрешением 9-11 мкм и формируют изображение объемом не менее 16 Мр.

Камеры не имеют приспособлений для аэрофотосъемки, устройств и принадлежностей для крепления на гиростабилизирующей платформе, интерфейса для интеграции с навигационными комплексами и не всегда обеспечивают получение метрически точного изображения. Их применение требует выполнения калибровки с определением фокусного расстояния, положения главной точки и значений фотограмметрической дисторсии.

Большое число покрываемых участков снимков и большой объем фотограмметрических работ ограничивают их использования для топографической аэрофотосъемки. Большой угол изображения, достигающий 90° , делает их перспективными для использования в ближней (наземной) фотограмметрии, архитектуре, автомобилестроении, археологии, судостроении, при съемке дорожных ситуаций и пр.

Уже выпускается 39-мегапиксельная цифровая камера Hasselblad H2D-39 с автоматической коррекцией цветовой палитры. Осенью 2008 года на рынке ожидается 50-мегапиксельная камера Hasselblad H3DII-50 с размером кадра 36×48 мм.

Аэрокамеры среднего формата полностью адаптированы к аэрофотосъемочным работам, могут быть *интегрированы* в современные системы планирования аэрофотосъемки, *геопозиционирования, управления полетом*, контроля качества съемки. Эти камеры позволяют получать снимки в **В** видимой и ближней инфракрасной зонах спектра, могут быть оснащены компенсатором смаза изображения и пр. Некоторые из них формируют результирующее изображение из двух и более кадров.

Наибольшую известность получили 4 камеры среднего формата.

Аэрокамера DSS (Digital Sensor System) выпускается канадской компанией Applanix с 2002 года; в 2006 году эксплуатировалось более 90 таких камер. Модели камеры (слайд) различаются геометрическим разрешением снимка, размером ПЗС-матрицы, конструкцией объектива, его параметрами и пр. *Затвор камеры* установлен перед фокальной плоскостью и обеспечивает возможность сверхскоростной съемки с выдержкой от 1/125 до 1/4000 с. Встроенный герметизированный *твердый диск* используется для сохранения снимков при съемке на высотах более 3 500 м, а *два съемных диска* объемом по 500 GByte (по 12000 снимков) используются при съемках с более низких высот.

Программное обеспечение включает три модуля, позволяющих производить организацию данных и их визуализацию (*MissionView*), обработку изображений (*IntageHew*), а также GPS/IMU поддержку аэрофотосъемки и фотограмметрическую обработку снимков (*POSPACAir*).

Камера DSS эффективна в случаях, когда снимки используются спектрального анализа цветных и окрашенных инфракрасных (спектрозональных) калиброванных изображения естественно-природных объектов.

DigiCAM - цифровая модульная камера, выпускаемая немецкой компанией (IGI mbH). Широко используются две ее модели (H/22 и H/39), которые различаются минимальным интервалом между экспозициями (1,9 и 2,5 с) и объемом памяти, резервируемой для хранения снимков (850 и 3700). Обе камеры снабжены межлинзовым электронным затвором, сменными цифровыми «задниками», объективами и светофильтрами для съемки в цветном (RGB) и цветном инфракрасном (CIR) диапазонах.

Основными компонентами системы DigiCAM являются: *камера* со сменными объективами и цифровым «задником»; *система Digicontrol*, предназначенная для управления камерой (камерами) в процессе полета; 8-дюймовый *сенсорный экран TFT* (Thin-Film Transistor) и модули памяти для хранения данных.

С камерой поставляются: *адаптер крепления* для установки на гироскопах до четырех камер, системы: *WinMP* (планирования полетов), *AEROcontrol* (геопозиционирование), *CCNS* (управления полетом) и программное обеспечение компании, выполняющее создание ортоизображений, их геометрическую коррекцию, цветовую балансировку и др.

DiMAC компании Dimac Systems (Люксембург) имеет блочную структуру и выпускается в трех модификациях, различающихся возможностями расширения функций, размера выходного изображения и одновременной съемки в двух спектральных диапазонах VIS и CIR: DiMAC^{UltraLight}, DiMAC^{wiDE} и DiMAC^{light}.

Первые две модели способны формировать как кадровые снимки, так и композитные изображения, состоящие из четырех одиночных кадров.

DIMAC^{www} может получать изображения большого формата (10500 × 7200 пикселей, или 75 Мр) с помощью двух камер, мультиспектральные снимки и др. Создание композитного изображения выполняется программой компании *DiMerge*.

DIMAC^{ught} использует единственный модуль камеры, но модернизируется до камеры большого формата путем установки второго модуля камеры и замены контроллера.

DIMAC^{ltvalight} имеет минимальную конфигурацию, ее модернизация невозможна.

Все модели создаются путем комбинацией трех основных компонентов: модуля камеры, цилиндрической камеры и интегрированного терминального контроллера.

Модуль камеры представляет собой независимый блок, выполняющий формирование цветного изображения. Он включает: ПЗС-матрицу размером 7216 × 5412 пикселей с фильтром Байера; компенсатор смаза изображения; блок объектива ($f=$ 55, 80 и 120 мм) с электромеханическим затвором (ирисовая диафрагма, выдержки от 1/125 до 1/500 с) и оптические фильтры (RGB и CIR).

Цилиндрическая камера диаметром 40 см предназначена для размещения от одной до четырех модулей камеры; внутри камеры обеспечивается оптимальная операционная среда. При аэрофотосъемке она устанавливается на гирустанровку, а на ее верхнюю часть - инерциальный блок UML. Имеются полноразмерная камера (45 кг) и облегченной конструкции (7,5 кг), различающиеся возможностями.

Интегрированный контроллер представляет собой систему контроля и хранения данных, управляющую всеми операциями и обеспечивающую прямой интерфейс пользователя, в том числе получение и хранение изображений. В системе два контроллера, различающиеся своими возможностями и поставяемые с разными моделями. Важнейшие особенности системы DiMAC:

- первичные изображения имеют радиометрическое разрешение 16 бит/пиксел, которое может быть уменьшено до 8 - 12 бит;
- компенсатор смаза изображения непрерывно перемещает ПЗС-матрицу в течение экспозиции с учетом скорости полета, достигающей 550 км/ч;

- цветные изображения формируются в полете; возможен их визуальный просмотр и, если нужно, коррекция параметров съемки;
- изображения сохраняются на жестких сменных дисках объемом по 500 гигабитов, эксплуатируемых на высотах до 25 км;
- синхронные цветные изображения и изображения в ближней инфракрасной зоне создаются двумя модулями камеры со светофильтрами, установленными в одной цилиндрической камере.

Камера AIC (Aerial Industrial Camera) разработана немецкой компанией RolleiMetrics на базе 6-мегапиксельной камеры Polleiflex 6008 для использования при аэрофотосъемке и решении инженерных задач. Она снабжена профессиональным объективом Zeiss и быстродействующим электронным затвором с минимальной выдержкой 1/1000 секунды.

В первой половине 2007 года появилась информация о совместной разработке компаниями Гео ЛИ ДАР (Россия) и Rollei Metrix (Германия) новой камеры RolleiMetric AIC×2 (в России - TWIN Mapper). Новая камера представляет собой две синхронно работающих камеры Rollei AIC с цифровым задником P45 (39 Мб), занимающих любое из трех фиксированных положений. Специальное ПО обеспечивает получение синтезированного изображения объемом 78 Мр.

В 2008 году этими компаниями завершается разработка новой камеры Rollei AICx4 (в России - QUADRA Mapper) с четырьмя синхронно работающими камерами Rollei AIC, устанавливаемыми в специальном боксе. Единое синтезированное изображение будет иметь объем 135 Мр.

Аэрокамеры большого формата ориентированы на решение топографических задач и потому снабжены средствами компенсации сдвига изображения и обеспечения стабильности метрологических характеристик (элементов внутреннего ориентирования, температурного режима и пр.), GPS/IMU и пр. Их конструкции, кроме того, обеспечивают возможность синхронной съемки в панхроматическом (PAN), красном, зеленом, голубом (RGB) и ближнем инфракрасном (NIR) спектральных каналах.

Для получения снимка большого формата используется запатентованная в 2000 году **идея Маура и Тофтхерга** (Maug - Teuchert), заключающаяся в объединении перекрывающихся снимков малого размера в одно большое (синтезированное, композитное) изображения путем трансформирования их в одну, определенным образом выбранную систему. Необходимые для этого параметры преобразования определяются по связующим точкам зоны перекрытия.

Известные сегодня камеры большого формата объединяют в единое синтезированное изображение от четырех (DMC) до девяти (UltraCam) малых. В ближайшие годы можно ожидать новую модель UltraCam, объединяющую пятнадцать малых снимков.

Обе камеры могут эксплуатироваться с системой планирования **WinMP**, **СНС**, **ИНС**, управления полетом **CCNS**, ПО постобработки **AEROoffice** и пр.

Для получения **цветных изображений** используется технология **pan-sharpening**.

По состоянию на середину 2006 года стоимость камеры DMC составляла около 1 млн., а камеры UltraCam-D - не менее 700 тыс. долларов США.

DMC (Digital Modular Camera или Digital Mapping Camera) - первая полноформатная цифровая аэрокамера, о создании которой компания Zeiss/Intergraph Imaging (*ZI Imaging*, Германия/США) объявила в 1999 году, а в 2000 году представила ее на XIX Международном фотограмметрическом конгрессе в Амстердаме. В ней впервые для увеличения размера кадра используется несколько модулей камеры, каждый из которых снабжен собственным объективом и формирует изображение соответствующего участка местности по законам центрального проектирования.

Технические характеристики сенсорного блока на слайде

Камера представляет собой набор оптических и электронных блоков; возможно подключение новых блоков с дополнительными функциями.

Оптический блок камеры содержит восемь модулей, снабженных объективами, затворами и пр. Для получения перекрывающихся снимков оптические оси *панхроматических модулей 1 — 4* наклонены. Оптические оси *мультиспектральных модулей 5 — 8* занимают отвесное положение, поэтому снимки R, G, B и NIR покрывают площадь, что и 4 панхроматических.

Электромеханические центральные затворы всех восьми модулей синхронизируются с точностью до 0,01 миллисекунды. Все модули снабжены электронными устройствами компенсации сдвига изображения, функционирующими в режиме отложенной интеграции TDI.

Блок хранения данных представлен тремя модулями памяти **FDS** (Flight Data Storage) объемом по 576 Гб, связанными тремя параллельными высокоскоростными каналами. Общего объема 1,7 Тб достаточно для хранения 4400 изображений с радиометрическим разрешением 12 бит, полученных по четырем каналам. Кроме того, система снабжена жестким диском SSD (Solid State Disk), вмещающим до 1000 изображений. Из сообра-

жений безопасности данных ежедневно после завершения съемочных полетов, полученные изображения переносятся на двоянные магнитные диски системы хранения RAID, общая емкость которых превышает 100 Тб.

Электронный блок размещен над оптическим блоком; его основными функциями являются управление восьмью модулями камеры, формирование изображений и связь с блоком управления.

Блок управления осуществляет контроль потока данных, сохранение их на жестком или сменном диске и связь с внешними системами.

Бесперебойная работа камеры при отсутствии герметизации самолета возможна на высотах, не превышающих 8000 м. Общая масса съемочной системы в зависимости от набора оборудования составляет 171 - 255 кг.

UltraCam. Полноформатная цифровая камера семейства UltraCam-D была впервые представлена в 2004 году на XX фотограмметрическом конгрессе в Стамбуле компанией Vexcel Imaging (ныне Microsoft Austria). В 2006 году появилась усовершенствованная модель UltraCam-X, а в августе 2008 года объявлено о создании новых моделей UltraCam-Xp и UltraCam-L. Все камеры объединяет общая концепция формирования изображения, единая архитектура и внешнее сходство.

К наиболее существенным различиям камер UltraCam-Xp и UltraCam-X, от UltraCam-D следует отнести (**слайд**):

- изменение геометрического разрешения с 9,0 до 6,0 мкм при сохранении размера главной фокальной плоскости;

- использование новой оптической системы с фокусным расстоянием 100 мм для панхроматических модулей и 33 мм для мультиспектральных, разработанной совместно с компанией LINOS/Rodenstock;

- замену встроенных накопителей данных на сменные с одновременным увеличением их емкости более чем в два раза.

Камера UltraCam-L является уменьшенной и облегченной модификацией и ориентирована на выполнение небольших проектов, когда требуется получить результат в течение короткого времени. UltraCam включает сенсорный блок, блок обработки данных с системой хранения, панель связи пилота (оператора) и программное обеспечение.

Сенсорный блок включает восемь независимых модулей с тринадцатью ПЗС-матрицами, размещенными в фокальных плоскостях объективов. Каждый модуль снабжен электронным устройством компенсации сдвига изображения.

Четыре вытянутых в линию объектива с девятью ПЗС-матрицами предназначены для получения панхроматических снимков, а соответ-

вующие световые лучи образуют четыре оптических конуса 1 - 4 с одинаковыми полями зрения, параллельными главными оптическими осями и с различным положением ПЗС-матриц в их фокальных плоскостях. Конус 2 имеет четыре ПЗС-матрицы, называется главным (Master Cone) и определяет координатную систему композитного изображения. В фокальных плоскостях трех оставшихся конусов, называемых подчиненными (Slave Cone), размещены одна-две ПЗС-матрицы.

Еще четыре объектива используются для получения мультиспектрального изображения (MS) в зонах R, G, B и NIR и имеют меньшее пространственное разрешение.

К важнейшим особенностям сенсорного блока камер семейства Ultra-Cam, определяющим технологию производства аэрофотосъемки, можно отнести следующие:

- композитный кадр создается из девяти перекрывающихся исходных изображений, полученных девятью ПЗС-матрицами четырех оптических конусов;

- панхроматические снимки формируются оптическими конусами из одного центра, в моменты, когда в ней оказывается узловая точка соответствующего конуса: из точки 1 - центральный фрагмент снимка (конус 1); из точки 2 - четыре фрагмента (главный конус 2); из точек 2 и 3 - по два фрагмента (конусы 3 и 4).

Такой режим съемки называется «syntopic» (от греч. «topos» - «место»). В этом режиме интервал между экспозициями зависит от скорости полета самолета и расстояния между объективами панхроматических модулей с учетом перекрытия между кадрами. Так, при скорости полета 252 км/ч (70 м/с) и расстоянии между головками объективов 7 см интервал между экспозициями должен быть равен 1 мс (7 см / 7000 см/с). Так что все девять изображений формируются строго из единого центра фотографирования и в соответствии с законами центрального проектирования.

Компания планирует создать новую модель камеры, позволяющую создать кадр из пятнадцати фрагментов, получаемых через четыре объектива.

Блок обработки и система хранения включает собственно вычислительный блок с 15-ю центральными процессорами и два сменных модуля данных с зеркальными (сдвоенными) дисками. Замена модулей позволяет накапливать на борту самолета неограниченный объем изображений.

Сканирующая съёмочная система работает как сканер с тремя линейками ПЗС, ориентированными по направлениям вперед, в надир и на-

зад, постоянно осуществляющими запись изображений по мере перемещения носителя аппаратуры. Объединение отдельных строк, получаемых каждой линейкой, образует полосу изображения или захвата (сцену); три линейки ПЗС формируют три таких полосы (сцены).

Такая схема позволяет получить изображение узкой полосы местности поперек направления маршрута; совокупностью полос создает полное изображение местности. Для создания стереоскопического изображения используются отдельные каналы для съемки местности под разными углами.

Эта концепция съемки была предложена доктором Отто Хофманом еще в 1970-е годы и использовалась немецким аэрокосмическим центром DLR в ряде разработок цифровых съемочных системах космического базирования.

В настоящее время имеется целый ряд камер авиационного базирования с линейными датчиками изображения: HRSC-A, -AX и -AXW (DLR); ADS (Leica GeoSystems); JAS 150 (Jena Optronik); 3-DAS-1 и 3-OC-1 (Werhli and Associates, Геосистема) и др.

К основным **особенностям сканерного изображения** можно отнести:

1. *Радиометрическое качество изображений* ПЗС-линеек, как и их динамический диапазон, в 2 - 3 раза выше, чем ПЗС-матриц (где он не более 12 бит). Это обеспечивает высокое фотометрическое качество снимков сканирующих аэрокамер и их преимущества перед кадровыми.

Кроме того, для сканирования могут использоваться несколько ПЗС-линеек, чувствительных к панхроматическому, синему, зеленому, красному и ближнему инфракрасному диапазонам, что позволяет избежать интерполяции цветов по схеме Байера и получить «истинные» цвета максимального разрешения и получить изображения одинакового пространственного разрешения.

2. *Обеспечение стереоскопических измерений.* При использовании кадровых камер возможности стереоскопических измерений обеспечиваются за счет продольного перекрытия снимков.

Съемка **сканирующей** камерой выполняется через три канала непрерывно, и каждая точка местности изображается трижды. Поэтому стереоизмерения могут быть выполнены по любой из трех стереопар (N-F, N-B или F-B), что особенно важно при съемке застроенной территории, и повышает степень автоматизации работ при создании ЦМР за счет ее двукратного автоматического построения по изображениям разных каналов с последующей браковкой недостоверных измерений.

3. *Геометрические параметры линейного сканирования* - пространственное разрешение в направлении полета и перпендикулярно к нему - связаны с масштабом аэрофотосъемки m , геометрическим разрешением ПЗС-линейки Δ (мкм), фокусным расстоянием камеры, частотой считывания зарядов ПЗС-линейки и в итоге определяют скоростью полета w (км/ч). Фактическая скорость может отличаться от расчетной на $\pm 20\%$, что соответственно изменит пространственное разрешение в направлении полета. При $m = 10000$, $S_{\text{пзс}} = 750$ Гц и $\Delta = 10$ мкм: $L_f = 10$ см и $w = 243$ км/ч; фактическая скорость может изменяться от 194 до 291 км/ч.

4. *Геометрические свойства изображений* таковы, что строки линейного сканирования создаются с частотой 200 - 800 Гц; каждая является результатом центрального проектирования и характеризуется своими элементами внешнего ориентирования.

Объединение строк в единое изображение можно выполнить путем их трансформирования по элементам внешнего ориентирования. Однако вычисление ЭВО по результатам построения сети пространственной фототриангуляции по десяткам и сотням тысяч строк не реально, а линейная их интерполяция невозможна из-за беспорядочности их изменения под влиянием атмосферных условий. Поэтому единственная возможность определения ЭВО - использование данных GPS/IMU, совместная обработка которых позволяет воссоздать точную траекторию полета и определить элементы внешнего ориентирования строк изображений с частотой не реже 200 Гц.

5. *Обязательное использование базовых станций GPS* (расстояния через 50 км) или метода ТТТ (Precise Point Positioning) компании NovAtel, основанного на использовании точных эфемерид спутников, доступных через сеть IGS (The International GNSS Service) без базовых станций.

ADS40 (Airborne Digital Systems). Первая цифровая сканирующая камера ADS40 была представлена фирмой Leica Geosystem на XIX Международном фотограмметрическом конгрессе, в Амстердаме (2000 г.). За истекший период выпущены три модели камеры одинаковой архитектуры, различающиеся техническими параметрами.

Основными компонентами съемочной системы ADS являются: головная часть с телецентрическим объективом, устройство управления, блок памяти, интерфейс оператора и программное обеспечение.

Головная часть включает телецентрическую оптику, фокальную плоскость с ПЗС-элементами, систему охлаждения, инерциальный измерительный блок IMU и др.

Объектив (DO) с полем зрения 64° имеет телецентрические свойства, благодаря которым световые лучи пересекаются с фокальной плоскостью под прямыми углами, что обеспечивает оптимальное функционирование интерференционных фильтров, а также получение изображений с разрешением около 130 линий/мм.

Расщепление светового потока на составляющие - одна из отличительных особенностей аэрокамер ADS. С этой целью между объективом и фокальной плоскостью устанавливается трихричное устройство, обеспечивающее разделение потока на три (Pan, R, G, B) или четыре (Pan, R, G, B, NIR) составляющих с помощью многослойных интерференционных фильтров.

Фокальная плоскость содержит линейки ПЗС, установленные так, что падающие на них световые лучи формируют изображения строк по направлениям «вперед», «назад» и «в надир». Расщепление светового потока на составляющие позволяет получить как панхроматические, так и мультиспектральные (одиночные или двойные) изображения; в двух моделях ADS возможно получение цветных стереоскопических изображений.

Все линейки ПЗС панхроматического канала сдвоены и сдвинуты одна относительно другой на половину пиксела (3,25 мкм). Этот прием увеличения детальности создаваемого изображения достаточно широко используется в съемочных системах авиационного и космического базирования (например, режим SuperMode спутника Spot).

Углы наклона фокальной плоскости фиксируются жестко связанным с ней измерительным блоком IMU инерциальной системы POS AV.

Устройство управления представляет собой компьютер типа IBM PC, связанный с другими компонентами ADS40 с помощью оптических кабелей. Поступающая по ним информация объемом более 100 Гб за час полета распределяется для длительного хранения или использования для управления полетом и оборудованием.

Блок памяти представляет собой герметичный съемный блок повышенной прочности, жестко связанный с устройством управления. Он способен вместить от 540 до 900 Гб и более информации, представленной в специальном формате, блоками с синхронно полученными строками, чередующимися от разных датчиков.

Интерфейс оператора предназначен для взаимодействия пользователя с системой управления полетом и аэрокамерой FCMS через сенсорный экран, размещенный на вибропоглощающей стойке и представляю-

щий собой высококонтрастный цветной жидкокристаллический монитор с разрешением 1024×768 .

Общая масса оборудования последней модели аэрокамеры ADS80 составляет 193 - 197 кг, в зависимости от массы измерительного блока IMU.

Аппаратура ADS, масса которой составляет 193 - 197 кг, может эксплуатироваться на высотах до 7,6 км при температуре от -20 до $+55$ °C и влажности, не превышающей 95 %.

Программное обеспечение ADS40 представлено несколькими сегментами, используемыми на этапе предполетной подготовки и планирования аэрофотосъемки, управления полетом (FCMS) и послеполетной обработки (GPro для камеры ADS40 и XPro для ADS80).

Камера 3-DAS выпускается ННУ «Геосистема» (Geosystem, Украина) совместно с компанией Wehrli and Associates (США). В ней используется тот же принцип линейного сканирования, что и в ADS.

В начале 2006 года теми же компаниями была завершена разработка новой камеры 3-OC-1, которая отличается от 3-DAS-1 только углами наклона переднего и заднего каналов (которые равны по 45°) и предназначена для создания 3D-моделей городов.

Технические характеристики камеры приведены на слайде.

Камера 3-DAS-1 включает сканирующий модуль, стабилизирующую платформу, управляющий компьютер, систему управления полетом, и программное обеспечение. Приведенный перечень расширяется средствами прямого геопозиционирования, GPS-измерений и др.

Модуль сканирования представляет собой оптико-электронное устройство, предназначенное для получения изображений по направлениям вперед, в надир и назад. В фокальных плоскостях трех объективов размещены по три «цветных» линейки ПЗС, чувствительные к красному, синему и зеленому цветам, что позволяет получать цветные стереопары максимального пространственного разрешения, минуя интерполяцию цветов.

Стабилизация сканирующего модуля в полете выполняется при помощи платформы PAV30 с компенсатором масс, либо специальной платформы ASP-I, выполняющей компенсацию углов наклона и сноса с погрешностью $0,2^\circ$. Необходимые для этого данные определяются инерциальными датчиками IMU, установленными на поверхность модуля.

Управляющий компьютер интегрирован в специальную стойку оснащенный монитором с сенсорным экраном и дисковым накопителем ем-

костью 2 Тб, что обеспечивает съемку в течение 48 часов без замены носителя. К его *основным функциям* относятся:

- ввод и регистрация навигационных данных и цветных изображений;
- восстановление траектории полета и параметров ориентации по данным GPS/IMU;
- определение ориентации каждой строки изображения;
- калибровка камеры;
- коррекция изображений;
- визуализация необработанных изображений неограниченного размера и др.

Все программы за исключением постобработки данных GPS/IMU разработаны специалистами компании Геосистема.

Системы 3-DAS и 3-OC находят применение в Украине, США и Мексике; их навигационное обеспечение может быть осуществлено с помощью средств, разработанных компаниями Applanix (POS AV), IGI mbH (AEROControl, CCNS) или NovAtel.

Послеполетная обработка цифровых снимков

Состав аэрофотосъемочных работ при использовании цифровых камер в общем случае включает предполетную подготовку, собственно аэрофотосъемку и послеполетную обработку. Однако их содержание существенно отличается от традиционных в силу специфичности цифровых изображений, возможностей их исправления и особенности построения композитных изображений. Это и отражает таблица (**слайд**).

Полученные цифровыми камерами изображения принято делить по **уровням обработки**:

0 - первичные изображения, прошедшие предварительный контроль и не требующие для хранения дополнительной (избыточной) памяти магнитных дисков;

1 - изображения, прошедшие геометрическую и радиометрическую коррекцию;

2 - композитные панхроматические и мультиспектральные снимки, сформированные из изображений уровня 1 ;

3 - конечное цветное композитное изображение снимки, полученные камерой UltraCam, имеют уровень обработки 00, к которому относятся необработанные изображения, сохраняемые на зеркальных магнитных дисках.

Содержание геометрической и радиометрической коррекции (уровень 1) стандартно и включает операции, связанные с исправлением пиксельной решетки изображения и улучшением его фотометрических параметров.

Построение композитных изображений, как и обработка материалов сканирования, требует не только предварительной их калибровки, но и учета конструктивных особенностей цифровых аэрокамер.

Так, архитектура камер UltraCam базируется на использовании одного «основного кадра», определяющего координатную систему синтезированного изображения, и трех вспомогательных (подчиненных). Это позволяет формировать единое изображение путем трансформирования вспомогательных изображений к основному, что существенно упрощает все преобразования.

Таких возможности не предусматриваются конструкциями камер DiMAC, DigiCAM, DMC, AIC и др., потому для них используется иная математическая модель, принципиальным элементом которой является определение положения каждого модуля относительно общей платформы.

Композитный снимок DMC формируется из четырех перекрывающихся снимков с полями зрения $23^{\circ} \times 39^{\circ}$, имеющих практически одинаковый масштаб и наклоненных на углы $\pm 10^{\circ}$ в продольном и $\pm 20^{\circ}$ в поперечном направлении. Масштаб четырех мультиспектральных изображений также одинаков, но он в четыре раза мельче, чем панхроматических, что обеспечивает покрытие каждым из них всей площади композитного снимка.

Формирование композитного снимка включает несколько операций: выбор связующих точек, измерение их координат, калибровка платформы, а также создание панхроматического и цветного композитных снимков.

1. *Связующие точки* генерируются в зонах перекрытий панхроматических снимков; в измеренные координаты этих точек вводятся поправки, учитывающие выявленные при геометрической калибровке камеры погрешности систематического характера.

2. *Калибровка платформы* выполняется для каждого снимка и заключается в определении параметров, определяющих положение снимков 2, 3 и 4 относительно снимка 1. Она выполняется путем совместного уравнивания координат связующих точек методом наименьших квадратов, для чего по всем связующим точкам составляются и решаются методом наименьших квадратов уравнения, содержащие поправки к угловым элементам ориентирования камеры относительно первой.

3. *Выбор параметров композитного снимка* сводится к моделированию некой виртуальной камеры, у которой:

- центр проекции размещен в центре прямоугольника, образованного головками панхроматических модулей (расстояние между которыми равны 80 и 170 мм);
- главная оптическая ось соответствует среднему ее положению для четырех панхроматических модулей;
- фокусное расстояние близко к реальному (120 мм), но в принципе может быть и любым.

4. *Создание композитного изображения* выполняется путем трансформирования реальных снимков в систему некоторой виртуальной камеры.

Для построения выходного изображения используются результаты калибровки платформы, а положение пикселей корректируется с учетом информации о дисторсии объектива конкретного модуля.

Для расчета положения пикселей исходных снимков на композитном используются процедуры растровых преобразований и аппарат рациональных функций; коэффициенты соответствующих уравнений определяются методом наименьших квадратов по связующим точкам в зонах перекрытий.

5. *Формирование цветного композитного изображения* выполняется по технологии *pan-sharpening* и выполняется с помощью программы *BLUH*, разработанной в институте фотограмметрии Штуттгартского университета.

Специальными исследованиями, выполненными в Институте фотограмметрии Штуттгартского университета, установлено, что погрешность формирования композитного изображения не превышает 2 мкм, или 1/6 пиксела DMC.

Композитный снимок VUraCam формируется из девяти изображений. Относительная простота его формирования связана с наличием главного конуса, определяющего параметры и координатную систему результирующего изображения, и совпадением центров проекции всех участвующих в обработке снимков. Однако условием высокоточного объединения исходных снимков является наличие данных геометрической калибровки всех восьми оптических конусов.

В целом модель создания композитного снимка *UltraCam* достаточно близка к используемой для камеры DMC, но предполагает трансформирование подчиненных изображений в систему снимка, полученного главным конусом. Необходимость преобразования изображения подчиненных изо-

бражений при объединении их с основным объясняется возможными несовпадениями положений центров проектирования, из которых они получены, и изменениями углов наклона платформы в течение интервала между экспозициями (т.е. за 1 - 2 микросекунды).

Процедура создания композитного снимка включает [26]:

1) автоматический выбор точек связи в зонах перекрытий основного фрагмента снимка (конуса 2) с каждым из смежных (алгоритм Томаси) и коррекция их координат по данным калибровки;

2) составление уравнений поправок и определение по МНК параметров проективного преобразования: линейных смещений, углов наклона и изменение масштаба;

3) преобразование подчиненного снимка в систему основного (с учетом подориентированных ранее);

Последовательность преобразования очевидна и начинается с четырех фрагментов главного конуса 2, размещенных по периметру поля зрения. Далее к нему последовательно подориентируются два фрагмента конусов 3, 4 и центральный фрагмент конуса 1.

1) фотометрическая коррекция сформированного снимка;

2) создание цветного композитного снимка по технологии **рaв-аharpening**.

Операции 1 - 3 повторяются для каждого фрагмента.

Внутренняя точность композитного снимка UltraCam оценивается на уровне 1 мкм, т.е. аналогично снимку DMC.

О точности композитного снимка. Модель формирования композитного снимка **DMC** содержит методические погрешности:

1. Параметры преобразования снимков 1 - 4 определяются по связующим точкам, расположенным в узких полосах их перекрытия, потому справедливы только для этих зон. Тем не менее они распространяются на все изображения, что означает некую их экстраполяцию и должно сопровождаться ошибками.

Однако исследования института фотограмметрии Штуттгартского университета не подтверждают этого: остаточные СКП по 1000 точкам составили 0,82 мкм (максимальная невязка 3,0 мкм) и случайном их характере. Примерно та же картина получена при уравнивании реального блока.

Те же исследования утверждают, что для надежного определения параметров преобразования порядка 30 - 50 оптимально размещенных связующих точек.

2. Корректное преобразование изображений трехмерных объектов местности требует наличия цифровой модели рельефа, в то время как фактически происходит преобразование плоского снимка, без учета высот точек. Оценку возникающих из-за этого погрешностей на местности можно выполнить по формулам, связывающим расстояния между узловыми точками панхроматических камер с параметрами аэрофотосъемки. Как показывают расчеты, эти погрешности крайне незначительны и при съемке масштаба 1:10000 не превышают **2 мкм в плане и 10 см по высоте**.

Снимок UltraCam свободен от этих ошибок:

- он однороден по точности, так как размещение связующих точек исключает возможность экстраполяции параметров преобразования;
- все снимки получены из одной точки (с погрешностью 1 мм на местности), и необходимости в пространственных преобразованиях нет.

Многочисленные исследования подтверждают, что использование снимков DMC и UttniCani дает одинаковые результаты: внутренняя точность композитных снимков не менее 1—2 мкм, т.е. менее 1/3 пиксела.

Обработка материалов линейного сканирования связана с объединением строк с учетом их пространственного положения, что и составляет основную трудность.

Вычислительная обработка выполняется с помощью программы GPro (ADS40) или XPro (ADS80): обе они входят в комплект поставки камеры.

Преобразования выполняются в послеполетный период и включают ряд операций.

При переносе информации из бортовой памяти в системы наземной обработки она разделяется на три потока: **измерения GPS/INS, метаданные** (сведения о проекте, маршрутах и пр.) и изображения уровня 0, представляющие собой почти квадратные неперекрывающиеся блоки изображений (строки).

Обработка траекторных измерений выполняются с помощью одного из следующих пакетов специализированных программ, в зависимости от используемой INS: POSPas (Applanix), IPAS Pro(Leica Geosystems) или GrafNav (NovAtel).

Результатом совместной обработки результатов GPS/INS измерений на борту самолета и на базовых станциях являются элементы внешнего ориентирования для каждой группы INS-измерений: X, Y, Z - в системе WGS-84, угол (ω) - в плоскости истинного меридиана, угол (ϕ) - в перпен-

дикулярной ему плоскости, угол разворота (κ) - относительно следа плоскости истинного меридиана.

Хаотичные, непредсказуемые изменения ЭВО строк линейного сканирования приводят к существенным геометрическим искажениям формируемых сканером изображений, которые практически полностью исключают возможность их измерения в стереоскопическом режиме. Их дальнейшей обработке предшествует создание нового изображения путем проектирования изображений уровня 0 на *плоскость ректификации*.

Изображение уровня 1 создается по технологии, описание которой отсутствует и, по-видимому, является коммерческой тайной компаний, выпускающих сканирующие съемочные системы и соответствующее программное обеспечение.

Частота спутниковых измерений обычно составляет 2 Гц, инерциальных измерений лежит в диапазоне 200 - 500 Гц, а частота сканирования 800 - 1000 Гц. Этих данных достаточно для согласования инерциальных и спутниковых измерений на основе фильтра Каймана, но в двух-трех случаях из четырех центры проектирования, из которых получены сканерные изображения, не совпадают с точками ни инерциальных, ни спутниковых измерений. Поэтому элементы внешнего ориентирования соответствующих строк непосредственно не измеряются и должны быть определены косвенным путем.

Имеющаяся в публикациях косвенная информация о снимках уровня 1 позволяет с достаточной степенью уверенности восстановить следующий порядок их формирования.

1. Выбор LSR с началом в центре обрабатываемого участка, осью X, совпадающей с направлением истинного меридиана, осью Z, совпадающей с продолжением нормали к поверхности эллипсоида, и осью Y, дополняющей систему до правой.

2. Перевычисление координат точек, полученных по инерциальным измерениям, из системы WGS-84 в локальную систему LSR.

3. Определение ЭВО строк сканирования путем их линейной интерполяции между ближайшими точками инерциальных измерений, идентифицируемыми по времени получения соответствующих данных, и приведение их к центральному меридиану LSR.

4. Создание промежуточного растрового изображения путем трансформирования элементов строк на плоскость ректификации. ¹

5. Создание изображения уровня 1 путем аффинного преобразования промежуточного изображения с билинейным или бикубическим преобразованием яркостей.

Аффинные преобразования и билинейные или бикубические преобразования яркостей позволяют устранить артефакты (перекрывающиеся строки и разрывы), появление которых связано, в том числе, с отличием на 20 % фактической скорости полета от расчетной. Это в свою очередь вызывает наложения и разрывы в пределах 20 % от размера пиксела (без учета углов наклона строки и ее разворота). Тем не менее при значительных углах поворота снимка (χ) эти артефакты могут сохраниться, что и подтверждается пользователями камеры.

Изображения уровня 1 свободны от большинства недостатков первичного изображения уровня 0, имеют геодезическую привязку и могут рассматриваться в монокулярном и стереоскопическом режимах с целью отождествления отдельных точек и иных элементов. Однако они содержат ошибки, так как при их создании использованы приближенные значения элементов внешнего ориентирования, не учтено влияние рельефа местности и пр., и выполненные по ним измерения могут сопровождаться ошибками, многократно превышающими пространственное разрешение первичных («сырых») изображений.

Все это вынуждает использовать некий **алгоритм дальнейшей фотограмметрической обработки**, при котором выполняется визуализация изображения уровня 1, а выполняемые при этом измерения относятся к изображениям уровня 0.

Реализация такого алгоритма требует создания одного или нескольких метафайлов изображения уровня I, содержащих:

- параметры привязки локальной системы координат LSR и плоскости ректификации к мировой системе координат;
- данные об использованных элементах внешнего ориентирования строк линейного сканирования;
- параметры аффинного преобразования промежуточного изображения и пр.