

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ЦИФРОВЫХ АЭРОСЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ. КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ И ОЦЕНКИ*

С.И. Хмелевской (Филиал Intergraph Z/I Imaging)

В 1985 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «аэрофотогеодезия». После окончания института работал в Госцентре «Природа», с 1989 г. — в ЦНИИГАиК, с 1994 г. — в РосНИЦ «Земля», с 1996 г. — в Центре реализации проекта ЛАРИС, с 2002 г. — в ФГУП «Госземкадастръемка» — ВИСХАГИ, с 2005 г. — в ООО «Геокосмос». С 2008 г. работает в филиале Intergraph Z/I Imaging, в настоящее время — главный специалист.

Влияние конструктивных особенностей камеры на разрешение изображения актуально для многокамерных систем, таких как DMC и UltraCam, в которых изображения разных частей кадра формируются разными матрицами и затем «сшиваются» в результирующий кадр, а также связано с падением разрешающей способности объектива от центра к краю кадра. Если каждая матрица экспонируется через свой объектив, то все составные части кадра формируются примерно в одних условиях, и большая часть матрицы использует близкие к центру кадра области поля зрения. Результирующее составное изображение будет иметь более однородное разрешение, чем при использовании одного объектива, экспонирующего несколько матриц, формирующих различные части кадра, так как в этом случае одни части кадра формируются в заведомо худших условиях (освещенность, разрешение), чем другие.

Из сказанного выше следует, что простое уменьшение размера пикселя и увеличение их количества в матрице не ведет автоматически к пропорциональному увеличению разрешения изображения на местности. То есть фактическое разрешение

изображения на местности, обеспечиваемое цифровой камерой как системой, не будет соответствовать номинальному разрешению, рассчитанному по формуле (2).

Поэтому в последнее время в обиход входят понятия «эффективный размер пикселя» или «эффективное количество пикселей изображения» цифровой камеры. Этому посвящен ряд исследований и статей [3–5]. Эффективный размер пикселя определяется с помощью анализа ширины границы тоновых переходов и построения точечных функций рассеяния для контрастных объектов изображения (edge analysis). В результате получается коэффициент, показывающий, насколько эффективный размер пикселя отличается от номинального. Соответственно можно вычислить и эффективное количество пикселей изображения, поделив количество пикселей изображения по осям X и Y на этот коэффициент. Полученные результаты следует учитывать при планировании полетов, чтобы обеспечить требуемое качество съемки.

Исследования, выполненные К. Jacobsen и приведенные в [3] (табл. 3), показали, что рассчитанные коэффициенты перехода зависят от расстояния от

центра кадра (в соответствии с кривыми MTF) и высоты солнца над горизонтом.

Полученные значения были подтверждены путем сравнения результатов съемки объектов местности по тем же самым снимкам (сравнение велось по количеству неидентифицированных объектов и длине оцифрованных векторов).

▼ Влияние «смаза изображения»

Помимо рассмотренных характеристик и свойств на разрешение и качество получаемых снимков оказывает влияние «смаз изображения» (продольный и угловой), возникающий из-за движения и угловых колебаний носителя. Здесь важна возможность компенсации смаза (forward motion compensation — FMC).

Влияние смаза наиболее актуально для среднеформатных камер по следующим причинам:

- 1) использование цветных матриц с Байеровским фильтром не позволяет выполнять так называемую электронную компенсацию продольного смаза (TDI);
- 2) в большинстве случаев среднеформатные камеры используются без специальной гиросплатформы, в результате чего на качество изображения

* Окончание. Начало в № 1-2011.

Результаты исследований для полноформатных камер, выполненные К. Jacobsen

Таблица 3

Модель камеры	Высота солнца, °	Тип изображения	Коэффициент перехода к эффективному размеру пикселя
DMC	43	Панхроматическое	0,92
UltraCamD	27	Pan-sharpened*	1,16
UltraCamX	27	Pan-sharpened*	1,23
UltraCamX, центр кадра	27	Панхроматическое	1,03
UltraCamX, углы кадра	27	Панхроматическое	1,24
RC30	46	Цветное RGB	1,43
ADS40	46	Панхроматическое, угол наклона вперед 2°	0,99
ADS40	46	Панхроматическое, угол наклона назад 14°	0,95
ADS40	46	Панхроматическое, угол наклона вперед 27°	1,11

Примечание. * Панхроматическое, «расцветченное» спектральными изображениями.

значительное влияние оказывает угловой смаз, возникающий при колебаниях носителя.

Большинство среднеформатных камер не имеют механизма компенсации сдвига. В некоторых камерах (DiMAC) используется электронно-механическая компенсация. В других (Arplanix DSS, Leica RCD) — доступны очень короткие выдержки (<1/3000 с), правда, за счет использования шторно-щелевого затвора, что ведет, строго говоря, к получению изображений нецентральной проекции, и при таких малых выдержках предъявляются повышенные требования к условиям освещенности. В камере Leica RCD30 анонсировано использование компенсации смаза в двух направлениях.

В полноформатных камерах (за исключением ADS40/80, где это конструктивно невозможно) и в супер-среднеформатных камерах UCL и RMK-D(x) используется электронная компенсация продольного смаза. С учетом того, что полноформатные камеры обычно устанавливаются на специальные гиросtabilизированные платформы, влияние углового смаза практически исключается.

Принцип функционирования системы электронной компенса-

ции смаза состоит в том, что заряд, накопленный пикселями строки изображения, переносится на пиксели соседней строки синхронно с перемещением изображения в плоскости матрицы, затем к следующей строке, и так далее в течение всего времени экспозиции. Пиксели каждой строки (в пределах диапазона перемещения изображения за время экспозиции) продолжают накапливать заряд, освещаясь лучами, приходящими от тех же

самых точек объекта. Это позволяет избежать смаза и работать при более низких уровнях освещенности. Работа системы электронной компенсации смаза проиллюстрирована на рис. 8.

▼ **Геометрическая точность изображений**

Следующий важный параметр, на котором хотелось бы остановиться, — это геометрическая точность получаемых изображений.

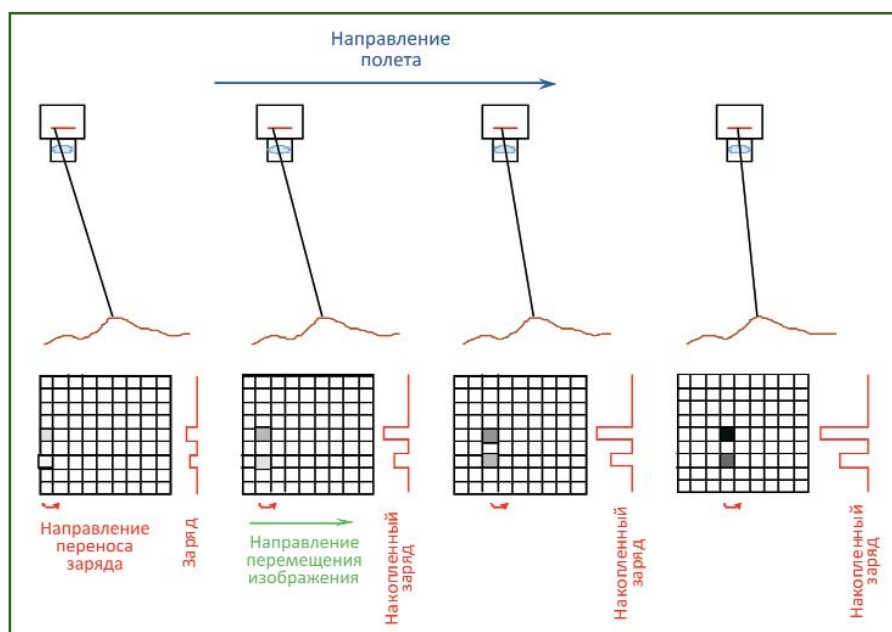


Рис. 8
Принцип работы системы электронной компенсации «смаза изображения»

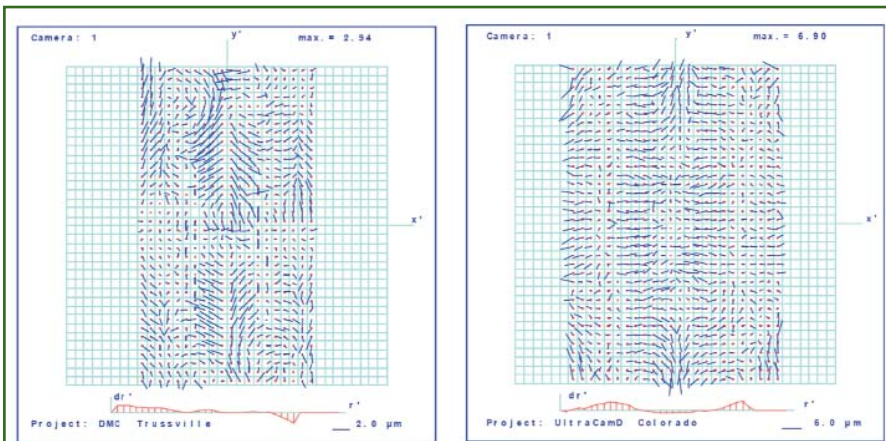


Рис. 9

Примеры систематических деформаций изображений, получаемых камерами DMC (слева) и UltraCam (справа)

На геометрическую точность большое влияние оказывают конструкция камеры и принцип формирования изображения, используемые материалы и компоненты, обеспечивающие стабильность характеристик, качество калибровки, условия эксплуатации и т. д.

Как правило, среднеформатные камеры сопровождаются набором калибровочных параметров, которые позволяют учесть деформацию (радиальную, а иногда — тангенциальную дисторсию) изображений при обработке в прикладном ПО (например, при ортотрансформировании или стереосъемке), поскольку сами изображения после регистрации не корректируются геометрически. Основные проблемы возникают со стабильностью параметров внутреннего ориентирования, так как в конструкции таких камер, как правило, используются не специально разработанные компоненты, а доступные, которые подвержены температурным деформациям и влиянию вибрации.

Поскольку наивысший уровень точности обеспечивается полноформатными цифровыми камерами, остановимся на некоторых особенностях изображений, получаемых с их помощью.

Камера ADS40/80 формирует изображения нецентральной проекции в виде полос, состоящих из отдельных строк, зарегистрированных ПЗС-линейками. Точность взаимного положения строк зависит от точности элементов ориентирования камеры, определяемых с помощью бортовых GPS/IMU-систем. Эта точность может быть увеличена с помощью процесса фототриангуляции.

Рассмотрим более подробно семейство камер DMC, DMC-II и UltraCam, формирующих изображения центральной проекции. Для полноформатных камер DMC и UltraCam набор калибровочных параметров поставляется в виде файлов, содержащих данные как геометрической, так и радиометрической калибровки. Эти параметры применяются специальным ПО на этапе постобработки зарегистрированных «сырых» изображений. В результате получают цветные или панхроматические изображения, свободные от влияния дисторсии, и приведенные к фиксированным виртуальным значениям фокусного расстояния и координат главной точки. Геометрическая точность таких изображений составляет ~2 мкм.

Однако в результате специальных исследований выясни-

лось, что изображения этих камер имеют небольшие систематические деформации. Характер деформаций показан на рис. 9. Здесь четко видно, что деформации распределены по полю кадра в соответствии с исходными составными кадрами, из которых формируется общее изображение (4 фрагмента для DMC и 9 фрагментов для UltraCam).

Максимальная величина ошибок может составлять несколько микрон. Такие ошибки практически не будут оказывать влияние на точность при создании ортофотопланов с использованием технологии прямого геопозиционирования, т. е. с применением элементов ориентирования, полученных в поле с помощью GPS/IMU-систем. Также они будут иметь незначительное влияние на определение высот объектов по снимкам отдельной стереопары (хотя его желательно учитывать). Однако при выполнении триангуляции для блока снимков воздействие рассматриваемых ошибок будет накапливаться, и это может вызывать деформации фотограмметрической сети (особенно по высоте).

Степень влияния ошибок также зависит от размера пикселя. Например, величина ошибки 2 мкм составляет только 1/6 пикселя для матрицы с размером пикселя 12 мкм, и уже 1/3 — для матрицы с пикселем 6 мкм, что превышает величину случайной ошибки измерений.

Наличие таких ошибок связано с воздействием остаточных и находящихся в пределах заявленной точности ошибок калибровки на процесс сшивки исходных кадров, а также конструктивных особенностей камеры, используемых материалов и внешней среды, например, температурными деформациями и перепадами давления.

Влияние конструктивных особенностей для камеры DMC

связано с несовпадением центров проекций четырех панхроматических камер. Однако это несовпадение является постоянным и практически не воздействует на геометрическую точность изображений (вносимая ошибка не превышает 0,2 пикселя для высоты фотографирования 500 м и при отношении перепада высот рельефа в пределах кадра к высоте фотографирования $\sim 0,1$).

В моделях камер UltraCam влияние конструктивных особенностей связано с тем, что различные части кадра формируются не одновременно. Теоретически задержка срабатывания затворов согласуется со скоростью полета для обеспечения срабатывания затворов объективов в одной точке. Однако в реальной ситуации будут иметь место ошибки вычисления задержки срабатывания затворов, ошибки срабатывания затворов, локальные изменения скорости полета. Все это будет влиять на взаимное положение центров проекций комбинируемых частей кадра. Скорее всего, расстояние между центрами проекций будет меньше, чем в камере DMC, но оно не будет равно нулю. Кроме того, расстояния между центрами проекций для камеры UltraCam не будут постоянными, а в условиях турбулентной атмосферы, за счет разновременного срабатывания затворов, взаимное угловое положение матриц может меняться в процессе экспонирования одного кадра.

Для компенсации систематических ошибок предлагаются различные способы.

Например, компания Microsoft/Vexcel ввела в новые версии ПО постобработки алгоритм учета температурных деформаций камеры UltraCam (temperature dependent model — TDM), что позволяет уменьшить влияние систематических ошибок. Но для полного исклю-

чения их воздействия при триангуляции необходимо использовать вычисления с самокалибровкой. При этом могут определяться как стандартные параметры самокалибровки, так и специфические (если позволяет ПО триангуляции) для UltraCam дополнительные параметры самокалибровки (до 32 дополнительных параметров). Отрицательным моментом является то, что большое количество дополнительных параметров может привести к неустойчивости решения.

При работе с камерой DMC, выполненной из термически стабильных материалов, и имеющей специальную оптику, рассчитанную для работы в условиях перепадов давления, не используется специальный алгоритм компенсации температурных деформаций, а исключение систематических ошибок предлагается осуществлять с помощью так называемых collocation grids (или post correction grids) — табличных значений поправок, рассчитываемых по данным калибровочного залета. Это более надежный и простой способ. Collocation grids могут использоваться во время постобработки при построении результирующих кадров, либо в процессе фототриангуляции. Кроме того, при отсутствии collocation grids может применяться уравнивание с самокалибровкой, также с определением стандартных или специфических для камеры параметров (до 14 параметров; обычно достаточно двух). Пользователь может рассчитать и собственные collocation grids.

В камерах семейства DMC-II результирующие кадры формируются на основе единого несоставного изображения, полученного одной панхроматической матрицей. Поэтому рассмотренные выше систематические ошибки не присутствуют в таких изображениях, что под-

тверждается проведенными исследованиями [6]. Оценка систематических ошибок изображений, полученных камерой DMC-II₁₄₀, показала, что они пренебрежимо малы (десятые доли микрона).

▼ Другие особенности и характеристики

Из характеристик, влияющих на качество изображения, следует упомянуть о pansharpening, т. е. «расцвечивании» панхроматических изображений высокого разрешения с помощью спектральных изображений (обычно R, G, B и ИК) более низкого разрешения, полученных синхронно с панхроматическими. Существуют различные методы выполнения этой процедуры: метод подстановки (цветовых преобразований, PCA — анализа главных компонент), арифметические методы, методы на основе вейвлет-анализа (wavelet-analysis). При большой разнице размеров пикселей панхроматических и спектральных изображений может наблюдаться некоторое размытие цветов на границах ярких объектов при сохранении детальности изображения. Чем ближе к единице соотношение цветных и панхроматических пикселей, тем качественнее результат. Современные алгоритмы pansharpening хорошо отработаны, а соотношение цветных и панхроматических пикселей у последних моделей камер составляет $\sim 1:2-1:3$, поэтому можно считать, что pansharpening не оказывает существенного влияния на качество получаемых изображений и дешифрирования снимков для целей топографии.

Из характеристик, влияющих на удобство эксплуатации, наиболее существенной является периодичность выполнения калибровки камеры и проведения профилактических мероприятий, связанных с необходимостью отправки камеры для этих целей на завод-изготови-

тель, а также возможность ремонта камеры не в заводских условиях.

Транспортировка камеры на завод через границу и ее ввоз обратно может потребовать длительного времени и существенных финансовых затрат. Поэтому при выборе аэросъемочной системы данным вопросам необходимо уделять особое внимание.

▼ Основные выводы

Таким образом, очевидно, что при выборе цифровой аэросъемочной системы нельзя руководствоваться номинальными значениями ограниченного набора технических параметров. Следует оценивать также согласованность всех компонентов системы, конструктивные особенности, удобство эксплуатации.

Предпочтительнее использовать системы, состоящие из компонентов, специально сконструированных для целей аэросъемки, особенно это касается объективов. Такие объек-

тивы позволяют получать более качественные и геометрически точные изображения.

Применение камер, формирующих несоставной кадр, дает возможность получать более точные данные и избежать дополнительных затрат на специальные калибровки и способы исключения систематических ошибок.

Уменьшение размера отдельного пикселя и увеличение их количества в матрице не ведет автоматически к пропорциональному увеличению разрешения на местности. Поэтому при выборе камеры, а также при планировании работ над проектами необходимо обязательно учитывать так называемое эффективное разрешение аэросъемочной системы, которое может отличаться от номинального. Это может увеличить затраты на съемочные работы и обработку, но позволит надежно удовлетворить требования к готовой продукции.

▼ Список литературы

3. Effective Resolution of Digital Frame Images. Karsten Jacobsen. Presentation on ISPRS 2009 workshop.

4. Geometric Characteristics of Large Size Aerial Frame Cameras. Karsten Jacobsen. EuroCOW, 2008.

5. Tells The Number of Pixels The Truth? — Effective Resolution of Large Size Digital Frame Cameras. Karsten Jacobsen. ASPRS 2008 Annual Conference.

6. Geometric Analysis of DMC-II140. Karsten Jacobsen. ASPRS 2010, San Diego.

RESUME

There are considered the main trends in the development of the digital aerial imaging systems. Issues of an optimal choice of the digital airborne imaging camera are addressed. From this standpoint, some important but not obvious at the first glance camera's features and parameters that affect the images quality are considered. In particular, radiometric and geometric resolution, image blur and geometric accuracy of images.

Навигационно-Геодезический центр

Официальный дистрибьютор компании Leica Geosystems в Украине

Компания НГЦ предоставляет широкий спектр современного оборудования

- геодезическое оборудование
- GPS базовые станции и сети
- наземные лазерные сканеры
- строительное оборудование
- системы структурного мониторинга

Единственный авторизованный сервисный центр в Украине

Представляет журнал «Геопрофи» в Украине



Сайт: www.ngc.com.ua
Почта: ngc@ngc.com.ua
Тел./факс: +38 057 345-12-37



- when it has to be right

Leica
Geosystems