

ЦИФРОВЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

С.В. Олейник (НПП «Геосистема», Винница, Украина)

В 1991 г. окончил Винницкий политехнический институт (Украина) по специальности «автоматика и информационно-измерительная техника». После окончания института работал в ПО «Аэрогеоприбор» (Винница). С 1994 г. работает в НПП «Геосистема», в настоящее время — заместитель директора.

В.Б. Гайда (НПП «Геосистема», Винница, Украина)

В 1981 г. окончил Винницкий политехнический институт (Украина) по специальности «радиотехника». После окончания института работал в Винницком политехническом институте. С 1994 г. работает в НПП «Геосистема», в настоящее время — начальник конструкторского бюро.

▼ История появления полноформатных цифровых камер

Первые полноформатные цифровые камеры для аэро съемки были представлены на XIX Международном фотограмметрическом конгрессе в Амстердаме летом 2000 г. фирмами Zeiss/Intergraph Imaging (Германия/США) и Leica Geosystems (Швейцария/США). Продукция двух ведущих конкурирующих компаний довольно сильно отличалась по принципу действия. Камера **DMC** фирмы Z/I Imaging была построена на матричных светочувствительных датчиках, а поскольку одна ПЗС-матрица не обеспечивала достаточного разрешения, то пришлось применить несколько датчиков, из которых формировался единый кадр. Такие камеры принято называть кадровыми.

Leica Geosystems при создании камеры **ADS40** пошла другим путем, применив сканирующий принцип (push-broom), который к тому времени уже широко использовался в системах ДЗЗ из космоса, таких как SPOT, LANDSAT, IKONOS и др. Его суть состоит в том, что вместо матричного датчика используется линейный, дающий изображение узкой полосы местности поперек направления полета. Полное изображение в такой

камере формируется непрерывной полосой за счет движения носителя: самолета или спутника. Для создания стереоскопического изображения в **ADS40** используются три независимых канала, снимающие местность под разными углами по ходу движения самолета.

На следующем фотограмметрическом конгрессе, проходившем в Стамбуле в 2004 г., были продемонстрированы еще две новые разработки. Цифровая камера **UltraCam**, представленная фирмой Vexcel Imaging (Австрия/США), как и **DMC**, была построена на комбинации ПЗС-матриц. В цифровой камере **3-DAS**, разработанной НПП «Геосистема» (Geosystem, Украина) совместно с компанией Wehrli and Associates (США), был использован сканирующий принцип, ранее примененный в камере **ADS40**.

▼ Цифровые камеры против аналоговых

В отличие от бытового фотографиярования, где цифровые камеры в последнее время окончательно вытеснили пленочные, в области аэрофото съемки пока все не настолько однозначно. Наиболее широко распространенная в настоящее время гибридная технология съемки на пленку с последую-

щим сканированием обеспечивает впечатляющие точность и разрешение. Возьмем за основу традиционный снимок формата 230x230 мм (поскольку старые советские камеры формата 180x180 мм давно морально устарели и уже не используются). Отсканировав его на фотограмметрическом сканере с типовым разрешением 16 микрон, получаем цифровое изображение размером 14 375x14 375 пикселей, что составляет более 200 мегапикселей. Даже с учетом того, что реальная рабочая зона фотоснимка несколько меньше, все равно получим порядка 180 мегапикселей. А если учесть, что современные фотосканеры способны обеспечить разрешение в единицы микрон, то эта цифра может вырасти еще на порядок. Справедливости ради все же нужно отметить, что собственная разрешающая способность пленки (особенно цветной) часто оказывается ниже возможностей сканеров. Исходя из этого, в реальных фотограмметрических проектах крайне редко применяют сканирование с пикселем менее 10 микрон.

Учитывая то, что разрешающая способность серийно выпускаемых ПЗС-матриц едва достигает 40 мегапикселей, становится понятно, что разработчикам

цифровых аэрофотокамер приходится применять довольно сложные технические решения, чтобы достигнуть разрешения, соизмеримого с пленочным. Добавим сюда еще такой, не слишком известный неспециалистам факт, что разрешение, указываемое для цветных матриц, на самом деле монохромное, а цветное изображение на выходе получается в результате интерполяции по методу Байера. Структура типовой цветной матрицы представлена на рис. 1. Поверх исходных светочувствительных ячеек, которые изначально не являются цветными, поскольку восприимчивы к любому цвету, в шахматном порядке наносятся светофильтры трех основных цветов. Таким образом, каждый пиксель определяет яркость лишь «своего» цветового канала, и после пересчета в «полноценное» цветное изображение его общее геометрическое разрешение падает примерно в два раза.

Для решения этой проблемы производители кадровых цифровых камер не используют цветные датчики, а формируют цветное изображение из комбинации четырех монохромных матриц, каждая из которых имеет нужный светофильтр (синий, зеленый, красный и инфракрасный).

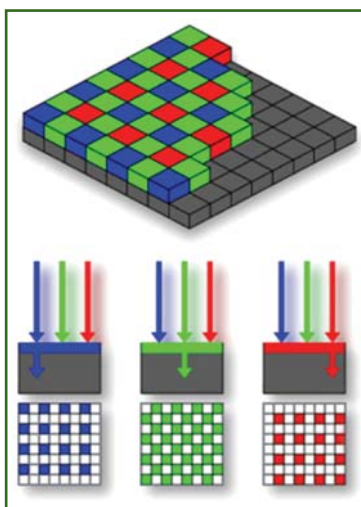


Рис. 1
Структура цветной ПЗС-матрицы

В настоящий момент разрешение лучших цифровых камер превосходит 100 мегапикселей. Но поскольку прогресс не стоит на месте, ясно, что в течение ближайшего десятилетия цифровая технология аэросъемки догонит пленочную по разрешающей способности. Тем более, что по остальным параметрам ее преимущества очевидны. К ним относятся: более высокая оперативность выполнения работ за счет исключения процесса проявления и сканирования; более высокое радиометрическое разрешение, которое благотворно сказывается на визуальном качестве изображения; отсутствие затрат на дорогостоящие расходные материалы. Возможность одновременной съемки не только в видимом, но и в ближнем инфракрасном диапазоне также является преимуществом, особенно важным для целей ДЗЗ.

▼ Кадр или сканирование

Итак, конструктивно цифровые камеры разделяются на две основные группы: кадровые и сканирующие. Кадровые камеры, в свою очередь, можно разделить на среднеформатные, состоящие из одной цветной ПЗС-матрицы и имеющие разрешение в 20–40 мегапикселей, и полноформатные, представленные моделями Z/I Imaging **DMC** и Vexcel **UltraCam**. Примером сканирующих камер, которые еще иногда называют трилинейными (trilinear), являются модели Leica Geosystems **ADS40** и Wehrli/Geosystem **3-DAS**.

Из того, что различные камеры относятся к одной группе, вовсе не следует, что они устроены совершенно одинаково, поскольку каждый производитель использует собственные подходы и оригинальные технические решения. Тем не менее, между кадровыми и сканирующими камерами существует ряд принципиальных отличий, которые практически не зависят от кон-

кретной модели и производителя. Рассмотрим наиболее существенные из них.

Геометрия получаемых изображений. Под геометрией в данном случае подразумевается не столько точность, которая при средних масштабах съемки примерно одинаковая у обеих групп, сколько геометрические соотношения, устанавливающие взаимосвязь между отдельными элементами изображения (пикселями).

Кадровые камеры, дающие на выходе стандартные снимки центральной проекции, в этом случае имеют определенное преимущество. Снимок кадровой камеры не отличается от аналогового снимка после сканирования. Следовательно, для обработки таких снимков можно с успехом применять практически любое существующее программное обеспечение (при условии, что оно поддерживает нужный графический формат). Да и технология мало отличается от традиционной. Единственными особенностями является отсутствие этапа внутреннего ориентирования снимков и неквадратный кадр, примерно соответствующий аналоговому снимку размером 150x230 мм.

Сканирующие камеры дают на выходе изображение, которое является снимком центральной проекции только по одной оси (поперек направления полета, где «работает» объектив). Вдоль оси полета изображение имеет плановую проекцию. Эта особенность является, с одной стороны, недостатком, поскольку требует для фотограмметрической обработки специально адаптированного программного обеспечения. С другой стороны, за счет плановой проекции вдоль направления полета изображение оказывается максимально близким к истинному ортофото (true ortho). А так как маршрут записывается в виде единого сним-

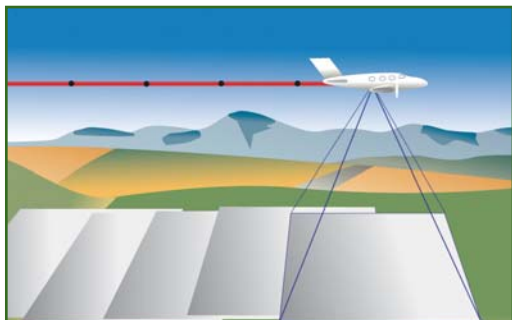


Рис. 2
Стереоскопическое покрытие кадровой камеры

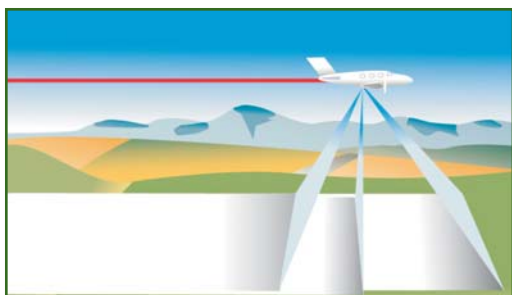


Рис. 3
Стереоскопическое покрытие сканирующей камеры

ка, процесс триангуляции для таких изображений значительно упрощается, а часто может быть и вовсе исключен.

Стереоскопическое покрытие. Для кадровых камер стереоскопическое покрытие вдоль маршрута образуется за счет продольного перекрытия снимков, также как для пленочных камер (рис. 2). Таким образом, при стандартном продольном перекрытии 60% обеспечивается полное двойное перекрытие, достаточное для стереоскопической обработки, и частичное тройное перекрытие.

Сканирующие камеры несколько выигрывают по этому показателю, стандартно обеспечивая тройное перекрытие на снимаемой территории. Напомним, что сканирующая камера состоит из трех независимых каналов. Один из них (forward) «смотрит» вперед, сканируя местность спереди по ходу движения самолета, другой (backward) наклонен назад и сканирует местность сзади, а третий (nadir),

являющийся основным, снимает местность непосредственно под самолетом (рис. 3). Таким образом, каждая точка местности в процессе движения оказывается снятой тремя камерами.

На первый взгляд, полное тройное перекрытие является избыточным, поскольку двойного вполне достаточно для построения стереоскопического изображения. Однако тройное перекрытие все же позволяет серьезно повысить степень автоматизации при создании цифровых моделей рельефа (ЦМР). За счет сравнения матриц высот, построенных автоматически при помощи корреляции, по стереопарам изображений из разных каналов программным путем можно отбраковать недостоверные измерения и тем самым повысить точность и надежность результата. Практический опыт автоматического построения ЦМР по стереопаре обычных снимков показывает, что для ее проверки и исправления зачастую требуется почти столько же времени, сколько для создания вручную (при крупномасштабной съемке застроенных территорий).

Радиометрическое качество получаемых изображений. Практически все рассматриваемые камеры обеспечивают радиометрическое разрешение более 12 бит, однако сканирующие системы имеют некоторое преимущество по уровню шумов. Оно достигается за счет того, что динамический диапазон (отношение полезного сигнала к шуму) у ПЗС-линеек, как правило, в 2–3 раза выше, чем у ПЗС-матриц. В связи с этим имеется некоторое несоответствие в спецификациях разных производителей. Некоторые из них указывают реальный динамический диапазон или эффективное количество разрядов. Другие, вместо этого, указывают разрядность аналого-цифровых преобразователей (АЦП), кото-

рая может достигать 16 бит, но поскольку датчик «не вытягивает» такого динамического диапазона, то младшие разряды, по сути, заполняются случайным шумом, не несущим никакой информации об изображении местности.

Кроме преимущества по уровню шумов, сканирующие системы создают истинное цветное изображение с максимальным разрешением, в то время как кадровые создают синтезированное изображение, накладывая цветной снимок низкого разрешения на монохромный (черно-белый) снимок высокого разрешения (технология pan-sharpening).

Геометрическая точность. Строгое сравнение характеристик точности цифровых камер требует серьезного исследования, включающего многократные тестовые съемки полигонов с анализом и обработкой результатов. Поэтому мы остановимся на общих соображениях относительно потенциальной точности различных типов камер.

Что касается кадровых камер, то технологический процесс производства ПЗС-матриц обеспечивает микронную точность их изготовления, гарантируя тем самым жесткую геометрическую связь между элементами изображения. Методы изготовления объективов с малой дисторсией и математический аппарат учета поправок за дисторсию также хорошо отработаны. Тонким моментом в плане точности является только стыковка изображений с разных ПЗС-матриц. Как уже было сказано, полноформатные камеры создают выходной кадр, «сшивая» изображения, снятые несколькими датчиками.

Например, в камере Z/I Imaging DMC составное изображение размером 13 824x7680 пикселей формируется пересчетом из четырех монохром-

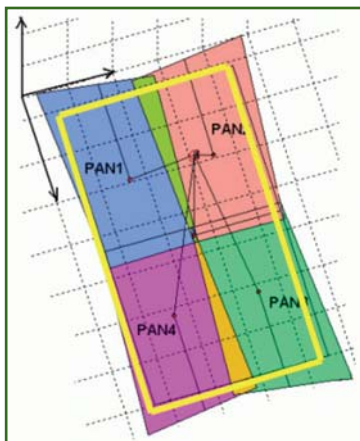


Рис. 4
Схема составного кадра в DMC

ных матриц (PAN1–PAN4), имеющих по 7000x4000 пикселей каждая. Матрицы наклонены таким образом, чтобы обеспечить перекрытие снимаемых участков, как показано на рис. 4. Дополнительно площадь составного кадра снимается четырьмя матрицами более низкого разрешения (3000x2000 пикселей), каждая из которых имеет соответствующий светофильтр (синий, зеленый, красный и инфракрасный). Эти матрицы расположены так, что снимают практически одну и ту же площадь, формируя единый цветной (мультиспектральный) кадр. В результате совмещения полученного цветного изображения низкого разрешения (2000x3000) и монохромного изображения высокого разрешения (7680x13824) получается выходное цветное изображение с разрешением более 100 мегапикселей.

В камере Vexcel **UltraCam** используется похожий принцип, но монохромное изображение высокого разрешения «сшивается» уже из девяти матриц. Цветное изображение низкого разрешения, как и в **DMC**, получается при помощи четырех дополнительных матриц со светофильтрами. В итоге формируется цветной кадр размером 11 500x7500 (86 мегапикселей).

Как видно, для повышения

разрешения кадровые камеры синтезируют выходное изображение из нескольких датчиков, используя при этом множество объективов с разным фокусом и механическими затворами. По этой причине различные фрагменты снимаются не строго в один и тот же момент времени и не из одного и того же центра проектирования, что также должно учитываться при создании составного кадра.

По-видимому, эти проблемы успешно решены производителями, поскольку они заявляют о достигнутой внутренней точности составного изображения не хуже ± 2 мкм (СКО). При размере элемента матрицы 9–12 микрон такой точности более чем достаточно. Тем не менее, очевидно, что эта точность относится только к положению контуров, но не гарантирует цветового совмещения. Практически на всех доступных нам снимках полноформатных кадровых камер имеются несовпадения цветов, ореолы и другие цветовые артефакты размером в несколько пикселей (рис. 5 и 6).

Рассмотрим теперь сканирующие камеры, для которых задача достижения необходимой точности является еще более нетривиальной. Как и в случае с матрицами, высокая геометрическая точность ПЗС-линеек гарантирована технологией их изготовления. Однако, если кадровые камеры «сшивают» изображение из десятка прямоугольных фрагментов, то в сканирующей камере каждая строка изображения имеет собственные элементы внешнего ориентирования. За счет движения самолета каждая новая полоса местности снимается из другого центра проектирования. И, в отличие от космических аппаратов, имеющих гладкую прогнозируемую траекторию, постоянные механические возмущения самолета в полете приводят к тому, что каждая по-

лоса имеет еще и собственный угол наклона. Если в кадровых камерах проблема определения элементов внешнего ориентирования снимков блока давно и успешно решается методом фототриангуляции, то определить подобным образом элементы ориентирования для каждой из десятков тысяч строк сканерного изображения не представляется возможным.

Итак, мы подошли, пожалуй, к основному слабому месту сканирующих систем. Обязательным компонентом при их использовании для метрических целей является система определения пространственных координат в режиме реального времени (direct geo-referencing —



Рис. 5
Цветовые артефакты (DMC)



Рис. 6
Несовпадения цветов (UltraCam, спектрозональная съемка)



Рис. 7
Исходное «сырое» изображение,
снятое сканирующей камерой 3-DAS



Рис. 8
Геометрически исправленное
ректифицированное изображение

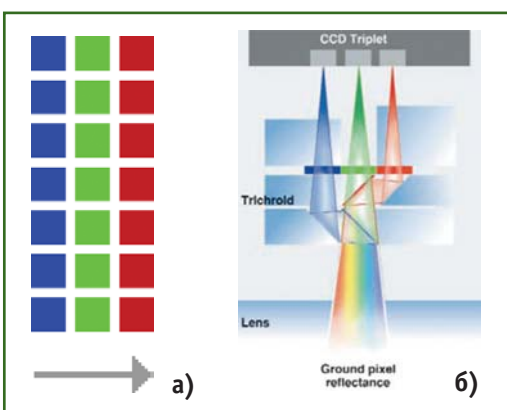


Рис. 9
Реализация полноценного цветного
изображения: а) 3-DAS; б) ADS40

прямое геопозиционирование) на базе интегрированной инерциальной и спутниковой систем GPS/IMU (см. Геопрофи. — 2005. — № 3–6. — *Прим. ред.*). Совместная обработка спутниковых измерений и данных инерциальной системы позволяет воссоздать точную траекторию движения самолета и определить абсолютные углы наклона в каждый момент времени полета, не реже чем 200 раз в секунду, а синхронизация во время полета измерений сканирующей камеры с данными GPS/IMU позволяет получить готовые элементы внешнего ориентирования для каждой снятой строки изображения. Эти данные затем используются в программном обеспечении камеры для пересчета (ректификации) исходных данных и создания геометрически точного изображения, как показано на рис. 7 и 8.

Из вышеизложенного ясно, что точность любой сканирующей камеры (также как и лазерного сканера) практически полностью зависит от параметров используемой системы определения пространственных координат. Подобные системы выпускаются несколькими производителями. Рассмотрим в качестве примера систему **POS AV 610**, предлагаемую компанией Applanix (Канада). Паспортная точность определения углов тангажа и крена («альфа» и «омега») для **POS AV 610** составляет 0,0025 градуса, а точность определения направления курса («каппа») — 0,005 градуса. Пересчитав эти угловые ошибки в смещение на местности применительно к сканирующей камере **3-DAS**, имеющей фокусное расстояние 110 мм, получим для масштаба съемки 1:10 000 (высота 1100 м, ширина полосы 720 м) суммарную погрешность определения координат 0,08 м. Типовая погрешность определения координат центров проектирования

с помощью приемников GPS для **POS AV** лежит в пределах 0,15 м. Таким образом, системой обеспечивается суммарная погрешность определения координат местности, не превышающая 0,20 м. Это вполне приемлемо для данного масштаба съемки, особенно учитывая, что такая точность обеспечивается без использования наземных опорных точек. Выполнив ориентирование полученных изображений по опорным точкам, точность определения координат местности можно повысить. Поскольку **3-DAS** использует линейный датчик с размером элемента 9 микрон, то разрешение на местности при таком масштабе съемки составит 0,09 м.

Как уже упоминалось, сканирующие камеры обеспечивают полноценное цветное (True RGB) разрешение. В **3-DAS** это реализовано при помощи цветного линейного датчика, физически состоящего из трех рядов светочувствительных элементов с нанесенными светофильтрами основных цветов (рис. 9а). В камере **ADS40** та же задача решается при помощи трех монохромных датчиков и разложения входящего светового потока на составляющие при помощи специальной призмы (рис. 9б). Последний подход, хотя и является технически более сложным и приводит к дополнительной потере освещенности, все же гарантирует лучшее совмещение цветов, поскольку каждая точка местности снимается тремя цветовыми каналами одновременно.

В случае с **3-DAS**, использование цветных ПСЗ-матриц упрощает систему и позволяет получить цветное изображение для трех каналов (в **ADS40** цветным является только надирный канал). Однако здесь также кроется и недостаток. Поскольку RGB-каналы датчика физически разнесены на некоторое расстояние (108 микрон),

то одна и та же точка местности сканируется не строго одновременно. Поэтому на совмещение цветов оказывает влияние конечная точность определения элементов ориентирования, что приводит к цветовым окантовкам на контрастных контурах, которые, правда, становятся заметны лишь при значительном увеличении (рис. 10).

Подводя некоторый итог в сравнении характеристик точности кадровых и сканирующих камер, хочется отметить, что последние слабо применимы для создания крупномасштабных ортофотопланов, когда необходимо обеспечить точность определения координат 0,10 м и выше. По заявлениям производителей кадровых камер, для них всегда можно подобрать масштаб съемки, обеспечивающий точность вплоть до 0,05 м. В ска-

нирующей камере это зачастую оказывается недостижимым из-за принципиальной невозможности применения системы компенсации сдвига. При стандартной скорости самолета 250–300 км/ч (АН-30/L-410) и типовой выдержке 1/500, смещение самолета за время экспозиции (смаз) составляет 0,15 м, что довольно критично при разрешении на местности 0,10 м и выше. Правда, использование для съемки менее скоростного АН-2 (160–180 км/ч) или вертолета позволяет обойти эту проблему.

Однако в общем случае можно говорить о том, что камеры со сканирующей системой получения изображения наиболее эффективны, когда требуется точность 0,15–0,6 м. Эти камеры прекрасно подходят для оперативного создания ортофотопланов масштаба 1:2000 и в качест-

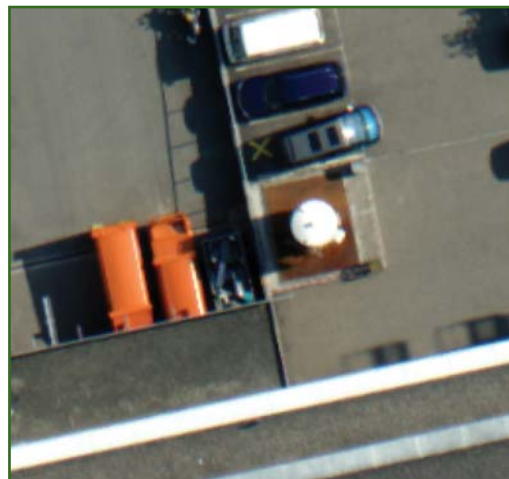


Рис. 10
Цветовые окантовки, заметные на изображении камеры 3-DAS

ве более дешевой альтернативы по сравнению с данными космической съемки. Для создания инженерных планов в векторном виде масштабов 1:1000–1:500 предпочтитель-

Технические характеристики цифровых камер (по материалам Earth Imaging Journal)

Производитель	Z/I Imaging	Vexcel Imaging	Leica Geosystems	НПП «Геосистема»
Модель	DMC	UltraCam D	ADS40	3-DAS-1
Размер изображения, пиксель	13 824x7680	11 500x7500	12 000 x любое	8000 x любое
Ширина полосы захвата при разрешении на местности 0,2 м, м	2765	2300	2400	1600
Размер ПЗС-матрицы (ПЗС-линейки), пиксель / количество датчиков / тип изображения	7000x4000 / 4 / монохромный 3000x2000 / 4 / мультиспектральный	3680x2400 / 9 / монохромный 3680x2400 / 4 / мультиспектральный	12 000 / 3 / монохромный 8000 / 4 / мультиспектральный	8000xRGB / 3 / мультиспектральный
Размер пикселя, мкм	12	9	6,5	9
Радиометрическое разрешение (разрядность АЦП), бит	12	14	16	14
Минимальный интервал съемки, с	2,1	1	800 строк/с	750 строк/с
Угловое поле зрения, °	74x44	55x37	64	36
Необходимость наличия GPS/IMU	Желательно	Желательно	Обязательно	Обязательно
Ориентировочная стоимость, дол.	>1 000 000	700 000	>1 000 000	250 000



нее использовать кадровые камеры.

Основные технические характеристики рассмотренных моделей камер приведены в таблице.

Кроме блока камеры в комплект обычно входит специализированный компьютер для управления камерой в полете и хранения снятой информации, а также гиросtabilизирующая платформа для компенсации сдвига и минимизации углов наклона/разворота. Камера и гиросtabilизирующая платформа имеют интерфейсы для подключения различных типов GPS/IMU-систем, выпускаемых компаниями Applanix (**POS AV**), Leica Geosystems (**IPAS**), IGI (**CCNS4/Aerocontrol**) и другими.

Еще одним важным компонентом является программно-аппаратная система управления полетом (flight management system), которая обеспечивает планирование и прокладку маршрутов при подготовке залета. В процессе полета на отдельном мониторе, установленном в кабине пилота, выдается текущее местоположение и отклонение от заданной траектории. Система управления полетом также подает кадровым камерам сигнал на съемку каждого кадра, а сканирующим — сигналы начала или конца съемки каждого маршрута.

▼ Перспективы

Рынок цифровых камер динамично развивается и в последнее время пополнился новыми разработками. К ним относятся: сканирующая камера **JAS150** компании Jena-Optronik (Германия) и полноформатная цифровая камера от DIMAC Systems (Люксембург). Компания Vexcel Imaging, приобретенная в 2006 г. корпорацией Microsoft, недавно анонсировала свою последнюю разработку — камеру **UltraCam X**, которая станет доступна в конце 2006 г. и обеспечивает разрешение 14 430x9420

ГЕОСИСТЕМА

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ



«ДЕЛЬТА»
Цифровая фотограмметрическая станция

Полный цикл обработки аэросъемки и спутниковых снимков

Высокое разрешение и точность сканирования в автоматическом режиме



«ДЕЛЬТАСКАН»
Цветной фотограмметрический сканер



«ПЛАНСКАН»
Планшетный картографический сканер

Специально разработан для планшетов на любых носителях

Полная цифровая технология аэросъемки и обработки



«3-DAS»
Цифровая камера для аэросъемки

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ И КАРТОГРАФИИ

Украина, г. Винница, 21027, ул. 600-летия 25, факс: +38 0432 52-30-43
e-mail: info@vingeo.com, http://www.vingeo.com

пикселей (см. Геопрофи. — 2006. — № 3. — С. 24. — *Прим. ред.*). Тандем Wehrli/Geosystem в начале 2006 г. завершил создание модификации камеры **3-DAS**, предназначенной для наклонной съемки. Модель, получившая название **3-OC-1**, имеет углы наклона переднего и заднего каналов 45° (вместо 26° и 16° у **3-DAS**) и предназначена для приложений по созданию реалистичных трехмерных моделей городов. Также заканчивается разработка одноканальной сканирующей камеры для

использования совместно с лазерным сканером. Такая камера, имеющая достаточно привлекательную стоимость, станет более конкурентным решением для создания ортофотопланов практически в режиме реального времени.

RESUME

A survey of digital cameras for aerial surveying is introduced together with the history of their origin and evolution. The main design feature, performance and application fields are also given.