

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 «Госземкадастръёмка» — ВИСХАГИ, с 2005 г. — в ООО «Геокосмос». С 2008 г. работает в филиале Intergraph Z/I Imaging, в настоящее время — главный специалист.

В настоящее время стал очевидным процесс быстрого замещения устаревших аэросъёмочных плёночных систем цифровыми камерами. Появилось большое количество моделей цифровых аэросъёмочных камер и систем, включающих управляющее оборудование, накопители информации, гиросплатформы и т. д., различных производителей. Активно идет развитие в сегменте средне- и полноформатных цифровых камер, применяемых для аэросъёмки. Каждый год появляются новые модели, в которых ис-

пользуются последние достижения как в области ПЗС-матриц (далее матриц), так и среди других компонентов съёмочных систем.

Особенно быстро развиваются и очень востребованы среднеформатные камеры. Так, даже ведущие производители полноформатных цифровых камер — компании Microsoft/Vexcel, Intergraph Z/I Imaging и Leica Geosystems — выпустили среднеформатные съёмочные системы (рис.1).

Такие камеры можно применять для съёмки небольших по

площади или протяженных линейных объектов, а также для сопровождения аэросъёмочных работ, выполняемых воздушными лазерными сканерами. Привлекают эти системы и относительно невысокой стоимостью.

Однако, для съёмки значительных территорий, решения классических фотограмметрических задач и получения данных с высокой точностью эффективнее использовать полноформатные камеры, которые обладают более высокой производительностью и стабильностью конструкции, а также лучшими метрическими свойствами.

Основная тенденция последнего времени в развитии цифровых аэросъёмочных камер — увеличение количества пикселей в используемых матрицах при одновременном уменьшении физического размера пикселя.

Так, для среднеформатных камер стали применяться матрицы 39 Мпикселей с размером пикселя 6,8 мкм и 60 Мпикселей с размером пикселя 6 мкм. В камерах DiMAC используются матрицы с размером пикселя 6,8 мкм. При этом активно предлагаются съёмочные системы с двумя и четырьмя камерами, позволяющие либо уве-



Рис. 1

Среднеформатные цифровые камеры

личивать размер результирующего кадра за счет «сшивки» исходных кадров, либо одновременно получать RGB и ИК изображения.

Среднеформатные системы UCL/UCLp (Microsoft/Vexcel) и R M K - D / R M K - D x / D M C - II (Intergraph) также являются многокамерными, но при этом каждая камера получает изображение в своем спектральном диапазоне. Камера UCL позволяет получать следующие кадры: панхроматический — 64 Мпикселя («сшитый» из двух исходных кадров), цветной (RGB) и ИК, каждый по 19 Мпикселей, при использовании матриц с размером пикселя 7,2 мкм. В камере UCLp применяется такая же конструкция, но за счет матриц с размером пикселя 6 мкм размер результирующего кадра составляет 92 Мпикселя.

Камерой RMK-D получают четыре кадра (R, G, B и ИК) с одинаковым размером 39 Мпикселей без отдельного панхроматического кадра. При этом размер пикселя матриц составляет 7,2 мкм. С помощью камер RMK-Dx/DMC-II140 в дополнение к четырем спектральным изображениям получают один панхроматический несоставной кадр 138 Мпикселей с использованием матрицы с размером пикселя 7,2 мкм.

UCLp и RMK-Dx/DMC-II140 также позиционируются как так



Рис. 2
Полноформатные цифровые камеры

называемые супер-среднеформатные камеры (super medium format), хотя DMC-II140, скорее всего, следует отнести к полноформатным съемочным системам.

Тенденция увеличения количества пикселей в матрице и уменьшения физического размера пикселей среди полноформатных камер (рис. 2) проиллюстрирована в табл. 1 на примере различных моделей камер компаний Microsoft/Vexcel и Intergraph Z/I Imaging при получении панхроматических изображений.

Все полноформатные камеры, приведенные в табл. 1, для одного снимка позволяют получать панхроматическое изображение высокого разрешения и четыре спектральных изображения (R, G, B и ИК) более низкого разрешения. В настоящее время съемочные системы серии DMC-II — это единствен-

ные модели полноформатных камер такого формата с **несоставным** кадром.

Кроме описанной выше тенденции, значительный прогресс наблюдается в бортовых накопителях информации съемочных систем — увеличение объема данных и переход на твердотельные (бездисковые) накопители. Это характерно как для среднеформатных, так и для полноформатных камер.

Помимо этого, улучшаются характеристики объективов камер, появляются новые гиростабилизирующие платформы, в том числе для среднеформатных камер, а также совершенствуются методы геометрической и радиометрической калибровки и обработки цифровых изображений.

В связи с большим разнообразием предлагаемых цифровых камер, для производственных организаций, планирующих их приобретение или зака-

Тенденции развития полноформатных цифровых камер компаний Microsoft/Vexcel и Intergraph Z/I Imaging

Таблица 1

Фирма-производитель	Модель камеры	Размер используемых матриц, пиксель	Размер результирующего кадра, пиксель	Размер пикселя, мкм
Microsoft/Vexcel	UltraCamD	4kx2,7k	11 500x7500	9
	UltraCamX	5kx3,3k	14 430x9420	7,2
	UltraCamXp	8kx6k	17 310x11 310	6
Intergraph Z/I Imaging	DMC	7,2kx4,1k	13 824x7680	12
	DMC-II140	12,2kx11,4k	12 096x11 200	7,2
	DMC-II230	15,1kx14,4k	15 104x14 400	5,6
	DMC-II250	17,2kx14,6k	17 216x14 656	5,6

Примечание. k — сокращение для указания тысяч пикселей, используемое для кратности.

зывающих аэросъемку, актуальным является правильное понимание технических параметров цифровых съемочных систем, что позволит корректно сравнить имеющиеся предложения и выбрать эффективное решение, удовлетворяющее требованиям будущих проектов.

Обычно при выборе камеры организация имеет дело с перечнем технических характеристик, представленных в рекламных проспектах, а также с обзорами, публикуемыми в различных изданиях, где проводится сравнение камер по номинальным значениям ряда ключевых технических параметров. Из таких параметров обычно обращают внимание на количество пикселей в матрице, фокусное расстояние объектива, минимальный интервал фотографирования, размер пикселя матрицы и емкость бортовых накопителей информации.

Номинальные значения параметров напрямую используются для оценки возможности применения аэросъемочных камер при работе над конкретными проектами. Однако такой подход, без учета влияния всех компонентов съемочной системы на результирующее изображение, представляется не совсем корректным. Существует много других параметров и нюансов, влияющих как на качество изображений и их геометри-

ческую точность, так и на удобство эксплуатации системы в целом. Поэтому рассмотрим детально наиболее существенные из них:

- радиометрическое и геометрическое разрешение;
- «смаз изображения»;
- геометрическую точность изображений;
- удобство эксплуатации.

▼ Радиометрическое и геометрическое разрешение

Эти характеристики стоит рассмотреть с точки зрения влияния основной тенденции, т. е. увеличения количества пикселей в матрице при одновременном уменьшении размера пикселя, на качество и геометрическую точность изображения, и отметить некоторые имеющиеся здесь «подводные камни».

Из теории известно, что уменьшение размера пикселя ведет к уменьшению его светочувствительной области и, соответственно, — чувствительности, а также к ухудшению способности накапливать электрический заряд, от которой зависит динамический диапазон.

Чувствительность определяется фототоком элемента матрицы и выражается как отношение выходного видеосигнала к освещенности на светочувствительной поверхности при заданных условиях.

Из формулы, описывающей выходной видеосигнал [1], видно, что он прямо пропорционален площади светочувствительной области пикселя.

$$U = AT \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

где $A = \Delta x \Delta y$ — площадь светочувствительного элемента;

T — время накопления электрического заряда;

$S(\lambda)$ — спектральная чувствительность элемента матрицы;

$\Phi(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической освещенности монохроматического светового потока;

λ — длина волны светового потока.

В реальности, ухудшение чувствительности и динамического диапазона при уменьшении размера пикселя оказывается меньше теоретического, так как производители совершенствуют технологии изготовления матриц и предпринимают специальные меры для компенсации этих эффектов.

Другой важный параметр — разрешение получаемого цифрового изображения. Обычно оно описывается параметром GSD (ground sampling distance), который означает размер пикселя на местности.

Естественно, номинальное значение разрешения зависит от соотношения высоты фотографирования (H), фокусного расстояния объектива камеры (f), физического размера пикселя матрицы (Sp) и может быть вычислено по формуле:

$$GSD = H Sp / f. \quad (2)$$

Но на самом деле, разрешение, обеспечиваемое цифровой камерой как сложной системой, будет отличаться от номинального. На него оказывают влияние как характеристики отдельных компонентов (в первую очередь, матрицы и объектива), так и конструктивные особенности всей съемочной системы. Кроме того, на окончательное разрешение влияют и другие факторы — «смаз изображения», состояние атмосферы.

Обычно качество и разрешение получаемого изображения описывается с помощью функции передачи модуляции (MTF — modulation transfer function), представляющей собой отношение контраста изображения заданной пространственной частоты к контрасту

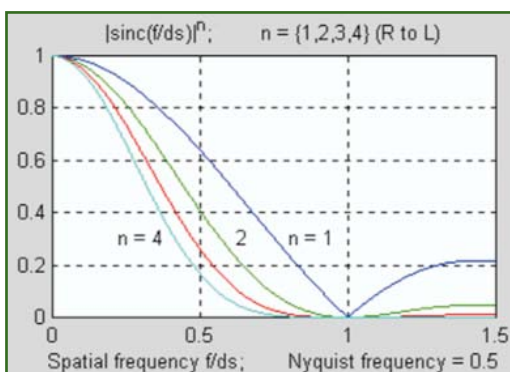


Рис. 3
Графики функции передачи модуляции матрицы

изображения для низкой пространственной частоты (черный и белый участки). Как правило, MTF выражается в процентах или в децибелах. Для получения общей функции передачи модуляции камеры как системы, MTF ее отдельных компонентов (матрицы и оптической системы) должны быть перемножены.

MTF матрицы может быть приближенно описана следующей формулой [2] (соответствует линии красного цвета на рис. 3):

$$MTFs(f) = |\text{sinc}(f/ds)|^3, \quad (3)$$

где sinc от лат. sinus cardinalis — «кардинальный синус», причем **sinc(x)** в цифровой обработке сигналов и теории связи обычно определяется следующим образом:

$$\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x) \text{ при } x = 1;$$

$$\text{sinc}(0) = 1 \text{ при } x = 0;$$

f — пространственная частота пар линий/мм;

ds — физическое разрешение матрицы в пикселях/мм (размер пикселя $Sp = 1/ds$).

Упрощая, можно сказать, что разрешение в поле изображения, выражаемое в парах линий/мм, обеспечиваемое матрицей, будет определяться как $0,5/Sp$, что соответствует частоте Найквиста. Соответственно, оптическая система должна быть согласована с матрицей и обеспечивать такое же разре-

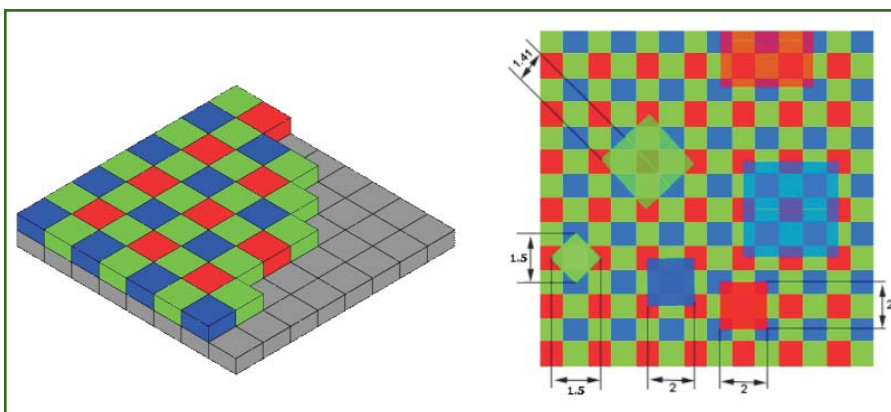


Рис. 4
Шаблон цветных фильтров Байера

шение. Если оптическая система обеспечивает значительно лучшее разрешение, то на изображении будет проявляться эффект наложения (aliasing) для объектов, имеющих пространственную частоту выше, чем $0,5/Sp$ (на рис. 3 подъем функции после минимума в точке $f/ds = 1$ объясняется наличием сигнала из-за эффекта наложения). Этот эффект выражается в появлении фиктивных объектов с низкой пространственной частотой в виде регулярных структур или диагональных полос. Для борьбы с эффектом наложения необходимо использовать специальные фильтры (anti-aliasing filters), либо выполнять дополнительную обработку изображения программным путем (применяя так называемые low-pass filters). Оба способа приводят к потере чет-

кости мелких деталей изображения.

У большинства среднеформатных камер, в которых применяется байеровский принцип (регистрация красного, зеленого и синего цветовых компонентов одной матрицей — рис. 4), частота Найквиста для пикселей, принимающих красный и синий световой поток, в два раза меньше, чем для пикселей, принимающих зеленый, что сказывается на картине наложения и разрешающей способности. При вычислении для пикселей недостающих цветовых компонентов с помощью интерполяции получается, что разрешение для зеленого канала меньше номинального, вычисленного, исходя из физических размеров пикселя, примерно в 1,5 раза, а для синего и красного — в 2 раза.

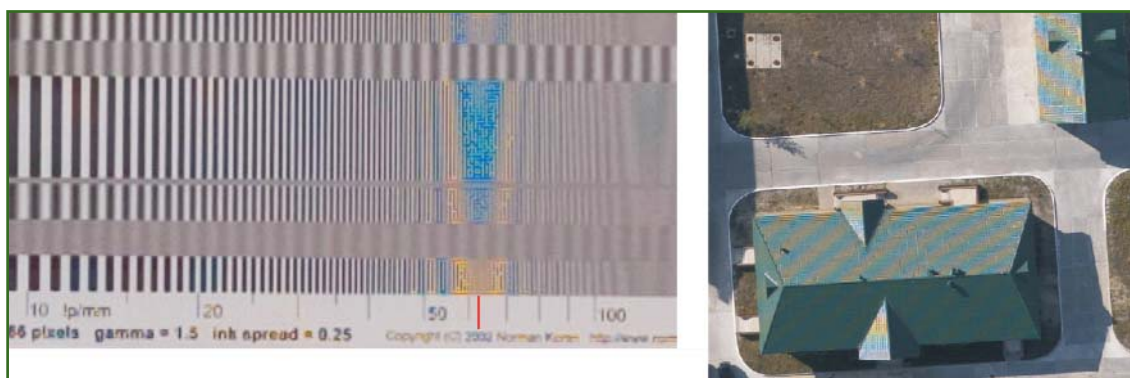


Рис. 5
Иллюстрация эффекта наложения: а) результат эффекта наложения и байеровского принципа регистрации; б) этот же эффект на изображении реальной местности

Значения радиуса кольца «диска Айри» для зеленого и красного цветов в зависимости от величины относительного отверстия объектива Таблица 2

Относительное отверстие объектива	d, мкм	
	Зеленый цвет	Красный цвет
f/5,6	3,1	3,7
f/8	4,5	5,3
f/11	6,1	7,2
f/16	8,9	10,5
f/22	12,2	14,4

К тому же, разрешение для диагональных линий на изображении выше, чем для вертикальных и горизонтальных линий (в случае горизонтального расположения строк пикселей матрицы). В результате разрешение снимков на местности ухудшается примерно в два раза относительно номинального, рассчитанного по формуле (2).

Картина, возникающая из-за эффекта наложения, проиллюстрирована на рис. 5а (линией красного цвета отмечена частота Найквиста; для этого примера она равна 63 пары линий/мм) [2]. Здесь цветные по-

лосы — результат байеровского принципа регистрации. Естественно, на реальном изображении такая четкая картина наблюдается не всегда, так как объекты местности обычно не имеют подобной регулярной структуры, но отрицательное влияние этого эффекта на разрешение сохраняется. Результат наложения и применения фильтров Байера на реальном изображении показан на рис. 5б (снимок получен камерой DigiCam H-39).

На результирующем разрешении цифровой камеры также сказываются и другие свойства

оптической системы. Например, существенное отрицательное влияние оказывают дифракционные ограничения оптики. Предел разрешения из-за таких явлений (так называемая «рэлеевская граница» — rayleigh limit), соответствующий разрешающей силе свободного от аберраций объектива, зависит от длины волны и относительного отверстия объектива. Для оценки «рэлеевской границы» может использоваться следующая формула:

$$RI \text{ (пар линий/мм)} = \frac{1}{1,22N\lambda}, \quad (4)$$

где N — знаменатель относительного отверстия объектива; λ — длина волны света в мм.

Если для какого-либо относительного отверстия объектива значение RI окажется меньше, чем частота Найквиста матрицы ($0,5/Sp$), то итоговое разрешение съемочной системы будет ограничено оптикой, а не размером пикселя. Т. е. уменьшение размера пикселя матрицы не приведет к улучшению разрешения цифровой камеры в целом. Величиной $d = 1/RI$ (радиус кольца так называемого «диска Айри») характеризуется размер минимального объекта, различаемого оптической системой. В табл. 2 (взятой из [3]) приведены значения d для красного и зеленого цветов (для синего цвета значения будут меньше приблизительно на 20%).

Кроме того, на MTF оптических систем оказывают влияние конструкция объектива и качество изготовления и монтажа компонентов, и в реальности разрешающая сила объектива будет меньше рассмотренных выше теоретических значений из-за наличия аберраций. Поэтому MTF разных объективов могут сильно различаться. Приблизительно можно считать, что MTF оптической системы описывается следующей функцией [2]:

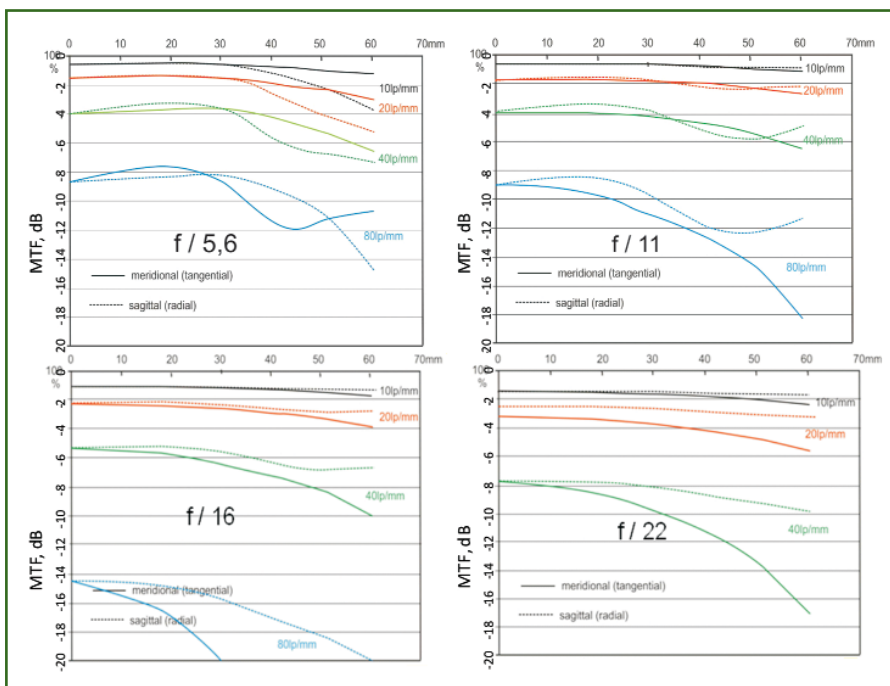


Рис. 6
Графики MTF (по оси абсцисс — расстояние по полю изображения, по оси ординат — значения MTF в децибелах)

$$MTF_{flens}(f) = 1 / (1 + |f/flens|^4), \quad (5)$$

где f — частота в парах линий/мм;

$flens$ — частота для $MTF = 0,5$ (50%).

Величина l принимается равной 2, что дает достаточно хорошее приближение для типовых объективов.

Реальные значения MTF, отражающие влияние всех факторов, достигаются в результате специальных измерений для разных пространственных частот (например, для 10, 20, 40 и 80 пар линий/мм), отдельно для радиального и тангенциального направлений и при различных значениях диафрагмы объектива. Таким образом, получается серия графиков значений MTF в зависимости от расстояния по полю кадра.

В качестве примера на рис. 6 представлены кривые MTF объектива, используемого в одной из цифровых аэросъемочных систем [3].

При уменьшении относительного отверстия объектива наблюдается довольно резкое падение кривых MTF, особенно для высоких пространственных частот, что ведет к уменьшению разрешающей способности объектива, в большей степени на краях кадра. Например, на представленных графиках видно, что кривая, соответствующая пространственной частоте 80 пар линий/мм «падает» до уровня -20 dB (10%) для относительного отверстия $f/16$ и отсутствует на графиках для относительного отверстия $f/22$, т. е., не превышает уровня -20 dB.

Соответственно, в этом случае невозможно в полной мере использовать потенциал разрешения, обеспечиваемого матрицей с размером пикселя 6 мкм. Да и для матриц с размером пикселя 7,2 мкм также возможны проблемы с разрешением, либо необходимо вводить огра-

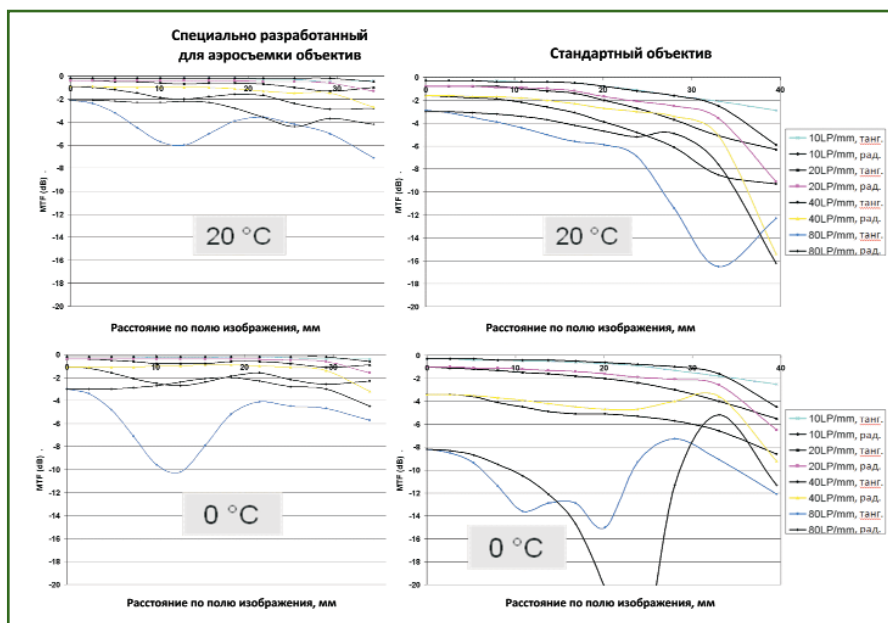


Рис. 7

Пример зависимости MTF различных объективов от температуры окружающей среды

ничение по допустимым значениям относительного отверстия объектива.

Отсюда следует, что **свойства оптической системы должны быть согласованы с разрешением матрицы. Т. е. объектив должен быть приспособлен именно для цифровой съемки.** Слишком высокое разрешение может вызывать эффект наложения, а недостаточное — потерю деталей при определенных условиях.

Кроме того, значения MTF обычных объективов могут сильно меняться при изменении температуры окружающей среды. Для иллюстрации на рис. 7 представлены графики зависимости MTF объективов (специально разработанных для аэросъемки и обычных) при различных значениях температуры окружающей среды. Графики построены для зеленого канала с относительным отверстием объектива $f/4,0$.

Поэтому **в аэросъемочных системах должны использоваться специально сконструированные и приспособлен-**

ные для воздушной цифровой съемки объективы.

▼ Список литературы

1. Вахромеева О.С., Манцетов А.А., Шиманская К.А. Характеристики чувствительности телевизионных камер на матричных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. — 2004. — Вып. 4. — С. 25–35.
2. Understanding image sharpness and MTF curves. Norman Koren. <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html>.
3. Effective Resolution of Digital Frame Images. Karsten Jacobsen. Presentation on ISPRS 2009 workshop.

Окончание следует

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.