

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦИФРОВЫХ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

С.А. Кадничанский (НП АГП «Меридиан+»)

В 1973 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «аэрофотогеодезия». После окончания института работал в Госцентре «Природа», с 1979 г. — в ЦНИИГАиК. С 1993 г. — заведующий отделом цифровых кадастровых технологий РосНИЦ «Земля» и Центра «ЛАРИС», с 2002 г. — начальник отдела новых технологий ФГУП «Госземкадастръёмка» — ВИСХАГИ и по совместительству профессор кафедры картографии ГУЗ, с 2005 г. — директор по научно-исследовательской работе компании «Геокосмос». В настоящее время — главный технолог ООО «НП АГП «Меридиан+». Кандидат технических наук. Вице-президент РОО «Общество содействия развитию фотограмметрии и дистанционного зондирования».

Производительность аэрофотосъемочного оборудования является весьма важным показателем, хотя далеко не единственным, который следует принимать в расчет, выбирая аэрофотокамеру. Однако при имеющемся разнообразии цифровых аэрофотосъемочных систем (АФС) весьма актуальным представляется вопрос о сравнении их производительности.

Под производительностью АФС будем понимать площадь территории, аэрофотосъемка которой выполняется за единицу времени. Следует отнести

эти затраты к одному часу полетного времени, которое включает затраты на движение по маршрутам, развороты, время на перелет от аэродрома до участка съемки и возвращение на аэродром. Анализ производительности цифровых аэрофотокамер целесообразен применительно к съемке больших территорий, покрываемых десятками аэрофотосъемочных маршрутов.

Оценим производительность аэрофотосъемки, выполняемой в целях создания ортофотоплана масштаба 1:2000 для застро-

енных территорий и масштаба 1:10 000 для межселенных территорий, для следующих АФС: DMC, DMC II230, DMC II250, ADS40, A3, UltraCam Eagle 80, UltraCam Eagle 210 и сравним с производительностью аналоговой (пленочной) аэрофотокамеры, например, RC30, с фокусным расстоянием 300 мм, применяемой для создания ортофотоплана масштаба 1:2000, и 150 мм — для масштаба 1:10 000 (табл. 1). Значением масштаба определяется требуемое пространственное разрешение ортофотоплана, выражае-

Технические характеристики аэрофотокамер

Таблица 1

Тип аэрофотокамеры	Фокусное расстояние, мм	Поперечный размер выходного изображения, пикселей	Поперечный угол поля зрения, °	Физический размер пикселя, мкм
RC30 (f = 300)	300	15 333*	41,9	15*
RC30 (f = 150)	150	15 333*	75	15*
DMC	120	13 824	69,3	12
DMC II230	92	15 552	50,6	5,6
DMC II250	112	16 768	46,6	5,6
ADS40	62,8	12 000	64	6,5
A3	300	~63 000	108	9,0
UltraCam Eagle 80	80	20 010	66,1	5,2
UltraCam Eagle 210	210	20 010	27,8	5,2

**Примечание.**

\* — для аналоговой камеры дан размер пикселя, с которым выполняется сканирование аэрофотоснимка, и размер изображения, соответствующий этому размеру пикселя.

мое размером пикселя на местности, и пространственное разрешение самих аэрофотоснимков. Для масштаба 1:2000 будем исходить из размера пикселя на местности 18 см при площади территории 2500 км<sup>2</sup>, а для масштаба 1:10 000 — 50 см при площади территории 250 000 км<sup>2</sup>. Будем полагать, что геометрическая точность изображений всех типов камер при заданном размере пикселя на местности обеспечивает создание ортофотоплана требуемого масштаба. В обоих вариантах примем, что граница территории имеет форму квадрата.

Сравнительная оценка производительности должна выполняться при определенных и одинаковых для всех типов АФС условий, связанных с использованием конкретного воздушного судна и специфическими требованиями к материалам аэрофотосъемки. В качестве воздушного судна будем рассматривать самолет King Air 350 (рис. 1), обладающий весьма удачным сочетанием значений

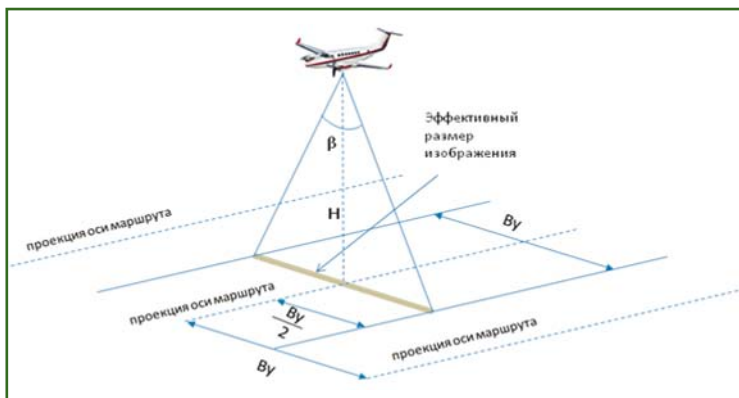


Рис. 2

Эффективный угол поля зрения и эффективный размер изображения

параметров, важных для аэрофотосъемки, и имеющийся в собственности у НП АГП «Меридиан+». Основные технические характеристики самолета приведены в табл. 2.

В дальнейшем анализе будет принято значение времени полета от аэропорта до участка съемки — 0,4 часа, и столько же — на возвращение в аэропорт. Используемая в расчетах скорость самолета составляет 520 км/час.

Введем понятие эффективного (поперечного) угла поля зрения аэрофотокамеры, под которым будем понимать угол  $\beta$ , ограничивающий часть аэрофотоснимка, используемую при монтаже ортофотоплана. Эффективный угол поля зрения связан с высотой съемки  $H$  и расстоянием между осями маршрутов  $B_y$  (рис. 2). Ему соответствует эффективный (поперечный) размер изображения  $E$ , выражаемый в пикселях.

Для того, чтобы сравнение выполнялось в условиях получения одинакового фотографического качества аэрофотоснимков, для плана масштаба 1:2000 эффективный угол поля зрения ограничим максимально допустимым значением 30°. Это соответствует условиям съемки пленочной фотокамерой формата 23x23 см с фокусным расстоянием 300 мм, применяемым обычно для застроенных территорий. А для масштаба 1:10 000 эффективный угол поля зрения примем равным 56°, что соответствует условиям съемки пленочной фотокамерой с фокусным расстоянием 150 мм и вполне уместно для межселенных территорий.

В табл. 3 и 4 приведены рассчитанные при сформулированных условиях затраты времени и производительности аэрофотосъемки для поперечных перекрытий, величины которых не

Основные характеристики самолета King Air 350

Таблица 2

Наименование характеристик	Значения характеристик
Максимальная высота полета при выполнении аэрофотосъемки, м	9500
Максимальная скорость, км/час	578
Средняя скорость, км/час	439
Минимальная скорость, км/час	250
Полетное время, часов	5,2



Рис. 1

Общий вид самолета King Air 350, оборудованного для аэрофотосъемки

Производительность аэрофотосъемки в целях создания ортофотоплана масштаба 1:2000

Таблица 3

Тип аэрофотокамеры	Размер пикселя на местности, см	Высота Н, м	Фактическое поперечное перекрытие, %	Продолжительность, часов/дней	Производительность, км <sup>2</sup> /час	Эффективный размер изображения N, пикселей	Фактический эффективный угол поля зрения, °
RC30							
(f = 300)	18	3600	30,00	6,3/1,2	400	10 733	30
DMC	18	1800	61,00	11,7/2,2	213	5391	30
DMC II <sub>230</sub>	18	2957	42,00	7,2/1,4	349	9020	30
DMC II <sub>250</sub>	18	3600	36,00	6,3/1,2	400	10 732	30
ADS40	18	1739	56,50	12,1/2,3	207	5220	30
A3	18** (17,44*)	5813	69,40	3,8/0,8	649	17 554	30
UltraCam Eagle 80	18	2769	58,80	7,7/1,5	325	8244	30
UltraCam Eagle 210	18	7269	30,00	4,4/0,8	571	14 007	<b>19,7</b>

**Примечания:**

\* — размер пикселя в точке надира;

\*\* — максимальный размер пикселя для эффективного размера изображения;

— в таблице выделено значение эффективного угла поля зрения, которое меньше заданного значения.

Производительность аэрофотосъемки в целях создания ортофотоплана масштаба 1:10 000

Таблица 4

Тип аэрофотокамеры	Размер пикселя на местности, см	Высота Н, м	Фактическое поперечное перекрытие, %	Продолжительность, часов/дней	Производительность, м <sup>2</sup> /час	Эффективный размер изображения, пикселей	Фактический эффективный угол поля зрения, °
RC30							
(f = 150)	50	5000	30	117,6/22,6	2125	10 733	56
DMC	50	5000	30	128,6/24,7	1943	9676	<b>51,6</b>
DMC II <sub>230</sub>	50	8214	30	113,7/21,9	2198	10 886	<b>36,6</b>
DMC II <sub>250</sub>	<b>46</b>	9300	30	112,6/21,7	2240	12 051	<b>33,5</b>
ADS40	50	4831	30	148,5/28,6	1683	8400	<b>47</b>
A3	<b>29*</b>	9333	62,50	62,9/12,6	3976	33 244	56
UltraCam Eagle 80	50	7692	30	89,6/17,2	2790	14 007	<b>48,9</b>
UltraCam Eagle 210	<b>23</b>	9300	30	193,3/37,2	1293	14 007	<b>19,7</b>

**Примечания:**

\* — средний размер пикселя для эффективного размера изображения;

— в таблице выделены значения размера пикселя на местности и эффективного угла поля зрения, которые меньше заданных значений.

менее стандартного значения (30%). Можно заметить, что при съемке в целях создания ортофотоплана масштаба 1:2000 (табл. 3) требуемое значение эффективного угла поля зрения

обеспечивается при разных величинах фактического поперечного перекрытия, в большинстве случаев превышающих 30%. Для камеры UltraCam Eagle 210 используется стандартное

значение поперечного перекрытия 30%, однако при этом фактическая величина эффективного угла поля зрения существенно меньше максимально допустимого значения. Это объ-

ясняется тем, что поперечный угол поля зрения данной камеры очень мал — всего 27,8°.

При аэросъемке в целях создания ортофотоплана масштаба 1:10 000 (табл. 4) наоборот — почти все фактические значения поперечного перекрытия равны стандартной величине 30%, но различаются фактические значения эффективного угла поля зрения. Исключение составляет аэрофотокамера АЗ, для которой фактический эффективный угол поля зрения равен максимально допустимому значению.

Сравнивая представленные в табл. 3 значения производительности и эффективного размера изображения N, можно заметить зависимость между ними, близкую к прямой пропор-

ции. В табл. 5 эта пропорциональность показана в числах. Их не полное совпадение обусловлено тем, что производительность вычисляется, в том числе, с использованием дискретных параметров (число маршрутов, количество аэросъемочных дней и связанных с ними затрат на полеты к участку съемки и обратно). Однако в целом видно, что производительность аэрофотокамеры можно характеризовать эффективным размером изображения как показателем свойства камеры при заданном значении эффективного угла поля зрения. А также с использованием этого показателя легко оценить относительную производительность цифровой аэрофотокамеры, понимая под этим отношение произ-

водительности цифровой камеры к производительности аналоговой камеры с фокусным расстоянием, соответствующим масштабу создаваемого ортофотоплана или типу местности. Это справедливо при условии, когда максимальная высота полета самолета не ограничивает получение заданного пространственного разрешения снимка. В противном случае пропорция нарушается, как показано в табл. 6, где для некоторых типов камер размер пикселя на местности меньше заданного (50 см) по причине этого ограничения.

Эффективный размер изображения E, используемый как показатель производительности цифровой АФС, при ограничении минимального значения поперечного перекрытия стандар-

**Зависимость производительности и эффективного размера изображения при выполнении аэрофотосъемки в целях создания ортофотоплана масштаба 1:2000**

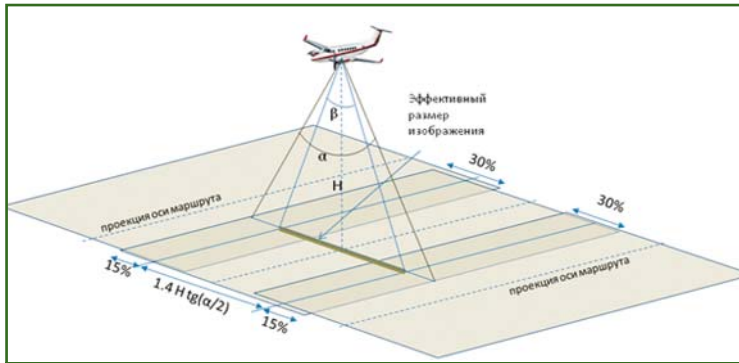
Таблица 5

Тип аэрофотокамеры	Производительность, км <sup>2</sup> /час	Эффективный размер, пикселей	Относительная производительность	Относительный эффективный размер	Размер пикселя на местности, см
RC30 (f = 300)	400	10 733	1	1	18
DMC	213	5391	0,533	0,502	18
DMC II <sub>230</sub>	349	9020	0,873	0,840	18
DMC II <sub>250</sub>	400	10 732	1,000	1,000	18
ADS40	207	5220	0,518	0,486	18
A3	649	17 554	1,623	1,636	18
UltraCam Eagle 80	325	8244	0,813	0,768	18
UltraCam Eagle 210	571	14 007	1,428	1,305	18

**Зависимость производительности и эффективного размера изображения при выполнении аэрофотосъемки в целях создания ортофотоплана масштаба 1:10 000**

Таблица 6

Тип аэрофотокамеры	Производительность, км <sup>2</sup> /час	Эффективный размер, пикселей	Относительная производительность	Относительный эффективный размер	Размер пикселя на местности, см
RC30 (f = 150)	2125	10 733	1	1	50
DMC	1943	9676	0,914	0,902	50
DMC II <sub>230</sub>	2198	10 886	1,034	1,014	50
DMC II <sub>250</sub>	2240	12 051	1,054	1,123	46
ADS40	1683	8400	0,792	0,783	50
A3	3976	33 244	1,871	3,097	29
UltraCam Eagle 80	2790	14 007	1,313	1,305	50
UltraCam Eagle 210	1293	14 007	0,608	1,305	23



**Рис. 3**  
Эффективный размер изображения при условии  $\text{tg}(\alpha/2) \geq 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$

ртным значением 30%, может быть выражен следующим образом (рис. 3):

$$E = 1,4H \text{tg}(\alpha/2)/G, \quad (1)$$

если  $1,4H \text{tg}(\alpha/2) < 2H \text{tg}(\beta/2)$  или  $\text{tg}(\alpha/2) < 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ ;

$$E = 2H \text{tg}(\beta/2)/G, \quad (2)$$

если  $1,4H \text{tg}(\alpha/2) > 2H \text{tg}(\beta/2)$  или  $\text{tg}(\alpha/2) > 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ ,

где  $\alpha$  — поперечный угол поля зрения аэрофотокамеры;

$G$  — размер пикселя на местности.

Учитывая, что высота аэрофотосъемки может быть определена через фокусное расстояние  $f$ , физический размер пикселя  $p$  и размер пикселя на местности  $G$ :

$$H = f(G/p), \quad (3)$$

выражения (1) и (2) целесообразно представить в более удобной форме, позволяющей сформулировать зависимость показателя производительности только от характеристик аэрофотокамеры и допустимого эффективного угла поля зрения  $\beta$ :

$$E = 1,4(f/p) \text{tg}(\alpha/2), \quad (4)$$

если  $\text{tg}(\alpha/2) < 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ ;

$$E = 2(f/p) \text{tg}(\beta/2), \quad (5)$$

если  $\text{tg}(\alpha/2) > 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ .

От показателя производительности легко перейти к оценке относительной производительности

$$R = E/N_0,$$

где  $N_0$  — выраженный в пиксе-

лях эффективный размер изображения аналоговой аэрофотокамеры.

При условии аэрофотосъемки со стандартным 30% поперечным перекрытием и сканирования аэрофотоснимка с размером пикселя 0,016 мм  $N_0 = 10\,000$ , что весьма удобно для вычислений и можно принять за «стандарт» для сравнения.

Тогда относительная производительность может быть оценена следующим образом:

$$R = 0,00014(f/p) \text{tg}(\alpha/2), \quad (6)$$

если  $\text{tg}(\alpha/2) < 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ ;

$$R = 0,0002(f/p) \text{tg}(\beta/2), \quad (7)$$

если  $\text{tg}(\alpha/2) > 1,4286 \text{tg}(\beta/2)$ .

Следует иметь в виду, что формулы (1), (2), (4) и (5) справедлива для случаев, когда возможности самолета позволяют подняться на высоту, обеспечивающую получение заданного размера пикселя на местности для сравниваемых камер. Если для какого-то типа АФС заданный размер пикселя на местности может быть достигнут при высоте полета  $H^*$ , превышающей потолок  $H_{\text{max}}$  для данного воздушного судна, то в показатель производительности следует внести поправку, умножив его на коэффициент  $E' = QE$ ,

$$Q = H_{\text{max}}/H^* \text{ или}$$

$$Q = G_f/G_t, \quad (8)$$

где  $G_f$  — фактическое, а  $G_t$  — требуемое (заданное) значение размера пикселя на местности.

Применительно к АФС АЗ формулы (4) и (5) несколько не точны, так как в выражениях (1) и (2) под  $G$  следует понимать среднее значение, в формуле (3) — значение в точке надира, а для аэрофотокамеры АЗ эти значения не равны. Отношение  $G$  в точке надира к среднему значению размера пикселя можно принять равным 0,94–0,98 и использовать его как корректировочный коэффициент  $W$  в тех случаях, когда не используется коэффициент  $Q$ .

В табл. 7 приведены значения показателей производительности  $E$ , вычисленные с учетом коэффициента  $Q$  и корректировочного коэффициента  $W$ , а также расхождения между значениями фактической относительной производительности и относительной производительности, вычисленной по показателю, из чего видно, что эти расхождения весьма малы и не превышают 8,6%, а среднее расхождение составляет 2,8%. Это подтверждает, что вычисляемая через показатель производительности  $E$  относительная производительность может быть уверенно использована для сравнительной оценки производительности.

Заметим, что фигурирующее в формулах (4) и (5) отношение  $f/p$  представляет собой обратную величину от пространственного разрешения аэрофотокамеры в точке надира, выраженного в угловой мере, т. е. углового пространственного разрешения. Следовательно, при заданном требовании к эффективному углу поля зрения производительность цифровой аэрофотокамеры зависит от сочетания углового разрешения и поперечного угла поля зрения камеры. Если значение эффективного угла поля зрения не ограничено каким-либо требованием, то для оценки относительной производительности  $R$  при стандартном поперечном пе-

Значения показателей производительности и относительной производительности (фактической и вычисленной)

Таблица 7

Тип аэро-фотокамеры	Производительность, км <sup>2</sup> /час	Показатель производительности, E	Относительная производительность (фактическая)	Относительная производительность (вычисленная)	Расхождение значений относительной производительности, %	Размер пикселя на местности, см
<i>Аэрофотосъемка в целях создания ортофотоплана масштаба 1:2000</i>						
DMC	213	5359	0,533	0,502	5,675	18
DMC II <sub>230</sub>	349	9020	0,873	0,840	3,679	18
DMC II <sub>250</sub>	400	10 732	1,000	1,000	0,009	18
ADS40	207	5178	0,518	0,486	6,019	18
A3	649	16 791	1,623	1,636	0,802	18
UltraCam Eagle 80	325	8245	0,813	0,768	5,465	18
UltraCam Eagle 210	571	13 992	1,428	1,305	8,579	18
<i>Аэрофотосъемка в целях создания ортофотоплана масштаба 1:10 000</i>						
DMC	1943	9676	0,914	0,902	1,404	50
DMC II <sub>230</sub>	2198	10 886	1,034	1,014	1,943	50
DMC II <sub>250</sub>	2240	12 051	1,054	1,043	1,055	46
ADS40	1683	8400	0,792	0,783	1,183	50
A3	3976	33 244	1,871	1,814	3,050	29
UltraCam Eagle 80	2790	14 007	1,313	1,305	0,602	50
UltraCam Eagle 210	1293	14 007	0,608	0,606	0,406	23

рекрытия (30%) следует без всяких условий использовать формулу

$$R=0,00014(f/p)tg(\alpha/2) \quad (9)$$

или

$$R=2(1-P_y)(f/N_{op})tg(\alpha/2) \quad (10)$$

при ином заданном в виде десятичной дроби поперечном перекрытии  $P_y$  для конкретной аэрофотокамеры.

Еще раз отметим, что формулы (6), (7) и (9) следует применять только при условии возможности съемки анализируемой аэрофотокамерой с требуемым пространственным разрешением, выражаемым размером пикселя на местности. Если максимальная высота полета самолета не позволяет обеспечить заданный размер пикселя на местности, то полученное значение относительной производительности следует умно-

жить на коэффициент  $Q$  из формулы (8):

$$R = 0,00014(Qf/p)tg(\alpha/2)$$

или

$$R = 2(1 - P_y)(Qf/N_{op})tg(\alpha/2).$$

Приведенные результаты оценки позволяют сделать следующие выводы:

— современные цифровые топографические аэрофотокамеры обладают высокой производительностью, позволяющей эффективно их использовать при аэрофотосъемке больших по площади территорий;

— относительная производительность цифровых аэрофотокамер (по сравнению с обычной аналоговой камерой) весьма просто может быть оценена с помощью эффективного поперечного размера изображения, выражаемого в пикселях. Этот

показатель производительности при заданном требовании (ограничении) к эффективному углу поля зрения зависит от углового разрешения аэрофотокамеры и ее поперечного угла поля зрения.

#### RESUME

Compares the performance of digital aerial cameras with performance of analog camera. Introduces the concept of effective transverse angle of view and the effective transverse size of the digital aerial photo. It is shown that the effective transverse size of the image can serve as a measure of performance digital camera. Relative (in comparison with an analog camera) performance can be easily assessed by this parameter, which depends on the angular resolution of the camera and its transverse angle of view.