

УДК 528.7

**АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СНИМКОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА;  
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ; П.Ф. ПАРАДНЯ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается использование в малых организациях беспилотных летательных аппаратов для съемки небольших объектов с помощью бытовых цифровых камер, далеких от совершенства, поэтому разрешающая способность полученных снимков будет низкой. Разрешающая способность снимка в значительной мере зависит от апертуры цифровой камеры, которую можно установить в большом диапазоне. Согласно литературным источникам, съемку выполняют при апертуре 2,2, но исследования о допустимости такой апертуры не проводились. Однако даже в профессиональных цифровых камерах, в которых объективы на порядок лучше, никогда не устанавливалась апертура 2,2, так как при апертуре менее четырех на качество изображения оказывают aberrации. В большинстве случаев цифровые камеры, устанавливаемые на беспилотные летательные аппараты, не калибруют. В данном исследовании расчет разрешающей способности сделан при апертуре 4.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, цифровая камера, апертура, aberrация, калибровка.

В настоящее время во многих организациях для съемки в крупных масштабах используют беспилотные летательные аппараты. Один из таких летательных аппаратов – MAVIC PRO; внешний вид показан на рисунке 1 [1]. MAVIC PRO является самым маленьким дроном от компании DJI (частная китайская компания, которая производит мультикоптеры, микроконтроллеры, видеооборудование).

Дрон MAVIC PRO состоит из полетного контроллера, системы передачи сигнала, силовой установки и аккумулятора [1]. Максимальная скорость полета MAVIC PRO составляет 65 км/ч, максимальное время полета – 27 мин. Пульт дистанционного управления позволяет управлять дроном на расстоянии до 7 км; аппарат может автоматически возвращаться в точку взлета при потере сигнала передачи или при низком уровне заряда аккумулятора [1]. На дроне имеются камеры переднего и нижнего обзора (рисунок 1). Камера переднего обзора используется для обнаружения препятствий и для выполнения аэрофотосъемки. Система нижнего обзора использует данные ультразвуковых и оптических датчиков для поддержания текущего положения дрона, взлета и посадки [1].



**Рисунок 1. – Внешний вид летательного аппарата**

Для аэрофотосъемки необходимо использовать режим *P* (позиционирования). Этот режим лучше всего использовать при наличии стабильных сигналов спутников. Дрон использует сигналы спутников и систему переднего и нижнего обзора для определения своего местоположения, автоматической стабилизации и навигации между препятствиями [1]. При слабом сигнале спутников, или если условия освещенности не соответствуют требованиям систем переднего и нижнего обзора, позиционирование будет выполняться по высоте с помощью барометрического высотомера.

Угол между носом дрона и оптической осью камеры переднего обзора устанавливаются с помощью стабилизатора. Стабилизатор может наклонять камеру в пределах 120°, как показано на рисунке 2 [1]. Угол между положением оптической оси камеры и носом дрона остается постоянным [1]. Диапазон положений оптической оси камеры переднего обзора показан на рисунке 2 [1].

Технические характеристики дрона MAVIC PRO приведены в таблице 1 [1].

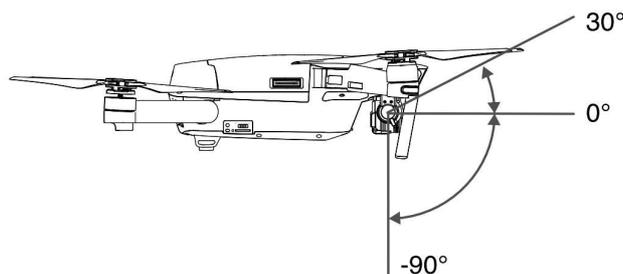


Рисунок 2. – Оптическая ось камеры переднего обзора дрона MAVIC PRO

Таблица 1. – Технические характеристики летательного аппарата

Масса	734 г
Масса (с крышкой стабилизатора)	743 г
Максимальная скорость	65 км/ч
Максимальная высота полета	5000 м
Спутниковые системы позиционирования	GPS/ГЛОНАСС

Пульт дистанционного управления оснащен рядом функций, позволяющих управлять процессом фотосъемки и просматривать полученные снимки. Аэросъемка выполняется с помощью цифровой камеры FC-220, технические характеристики которой приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2. – Технические характеристики камеры

Размер матрицы	CMOS 1/2,3"
Объектив	угол обзора – 78,8°
	фокусное расстояние, $f$ , – 4,73 мм
	апертура – $f/2,2$
Диапазон светочувствительности ISO	100...1600
Диапазон выдержек, с	8...1/8000
Число пикселей изображения	4000×3000

В работе [1] отмечено, что можно переключать режим фокусировки камеры, но нежелательно, и в работе [2] совершенно справедливо утверждается о целесообразности использования объективов с фиксированным фокусным расстоянием  $f$ . Можно регулировать настройки камеры, такие как ISO и выдержку. Диапазон выдержек составляет 8...1/800 с. Диапазон светочувствительности ISO 100...1600 ед. Необходимо устанавливать минимально возможное значение ISO, чтобы избежать дополнительного шума фотоснимков с высоким значением ISO [2], что не всегда возможно. При слабой освещенности приходится устанавливать более высокую светочувствительность.

В работе [1] рекомендовано выполнять аэросъемку при апертуре  $A = 2,2$ , и при фокусировке на бесконечность CMOS-матрица будет расположена в фокальной плоскости объектива.

Теоретически с точками фокальной плоскости  $P$  оптически сопряжены бесконечно удаленные точки. Практически же в этой плоскости будем иметь резкое изображение точек пространства, расположенных на конечном расстоянии от объектива. В оптике это расстояние называется началом бесконечности  $a$ , или гиперфокальным расстоянием [3]. Это отстояние  $a$  можно вычислить по формуле [4]:

$$a = \frac{d}{\tau} f = H_{min}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр входного отверстия объектива;  $\tau$  – кружок нерезкости, не превышающей заранее установленной величины;  $f$  – фокусное расстояние камеры;  $H_{min}$  – минимально допустимая высота съемки при заданном значении кружка нерезкости.

В паспортных данных камер зачастую задают не диаметр входного отверстия объектива  $d$ , а относительное отверстие  $1/n_0$ , связанное с диаметром входного отверстия и фокусным расстоянием  $f$  выражением [5]:

$$\frac{1}{n_0} = \frac{d}{f}. \quad (2)$$

В зарубежных странах и в Беларуси используют понятие апертура  $A$ , вычисляемую по формуле:

$$A = \frac{f}{d}. \quad (3)$$

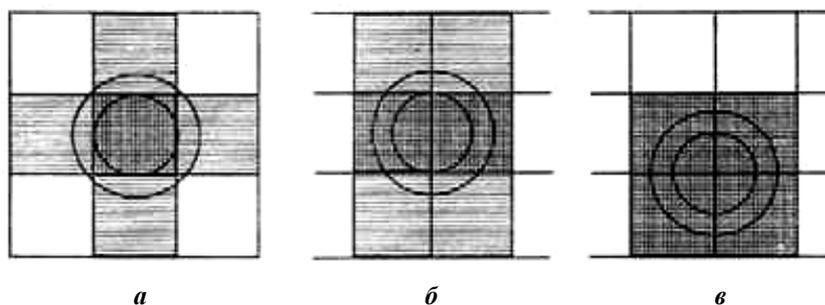
Относительное отверстие большинства аэрокамер находится в пределах  $1/4 \dots 1/9$  [5; 6]. Диапазон апертур аэрофотоаппаратов марки RC Швейцарской фирмы Leica составляет  $A = 4 \dots 22$  [7]. Апертура 2,2 в аэрофотоаппаратах (АФА) марки RC даже не предусматривалась, хотя объективы этих аэрофотоаппаратов одни из лучших в мире. В других АФА также отсутствует апертура 2,2. Возможно, и в рассматриваемой камере FC-220 примерно такой же диапазон апертур. Аэрофотосъемку почти всегда выполняли при апертуре  $A = 4$ . В своих расчетах примем относительное отверстие  $1/4$ , то есть апертура  $A = 4$ , так как при  $A = 2,2$  большое влияние на качество изображения будут иметь aberrации [6], а объектив далек от совершенства и aberrации будут очень большие. При апертуре более 9-ти на качество изображения влияют дифракционные явления [3; 6].

Выразив из формулы (2) или (3) величину  $d$ , формула (1) примет вид:

$$a = \frac{f^2}{4\tau} = H_{\min}. \quad (4)$$

Конструкция аэрофотоаппаратов жесткая, в отличие от бытовых цифровых камер. В рассматриваемой камере FC-220 можно выполнять перефокусировку [1; 2]. Фотографирование аэрофотоаппаратами ведется с больших высот, поэтому фотопленка или светочувствительная матрица (линейка) размещаются в фокальной плоскости объектива из предположения, что пятно нерезкости не превысит заранее заданной величины.

Точечный объект, сопоставимый по размеру с пикселем, в зависимости от положения точки на матрице может дать изображение более пикселя. На рисунке 3 показаны различные варианты размытости точки изображения. Для неразмытой точки (внутренняя окружность и клеточная штриховка) изображения получаются в пределах  $1 \dots 4$  пикселей. Размытая точка дает дополнительные изображения, показанные на рисунке 3 наружной окружностью и продольной штриховкой. Изображения размытой точки могут занимать  $4 \dots 6$  пикселей [8].



**Рисунок. 3 – Варианты размытости точки изображения вследствие неадекватной фокусировки объектива: а – центр пикселя; б – граница двух пикселей; в – стык четырех пикселей (прямыми линиями отмечены границы пикселей)**

В соответствии с исследованием, проведенным в работе [8], для расчета начала бесконечности примем кружок нерезкости 4 пикселя. Для определения кружка нерезкости  $\tau$  необходимо знать размер пикселя  $l$ . Кроме того, при фотограмметрической обработке снимков существенное значение имеет окончательная точность получаемых результатов, которая зависит от размера матрицы и от размера пикселя в матрице [9].

Размер матрицы указывается числом элементов по горизонтали и вертикали. Часто в паспортных данных задается размер диагонали в дюймах, например  $1/2,3''$  (таблица 2), где в числителе корень квадратный из одного дюйма. Однако в разных странах мира дюйм имеет отличные между собой значения, только в Германии более пяти разных дюймов [10]. В США и Великобритании 1 дюйм = 2,54 см [10], т.е. получим  $\sqrt{2,54} = 1,5937$  см, в Китае 1 дюйм составляет 3,3 см [10], тогда  $\sqrt{3,3} = 1,8166$  см. Возникает вопрос, как можно пользоваться дюймом?

Так как оборудование в нашем исследовании китайское, для расчетов примем оба приведенных значения. Размер диагонали рассматриваемой матрицы  $d$  при дюйме, равном 2,54 см, составит  $d = 1,5937/2,3 = 6,9929$  мм = 6929 мкм. А в случае китайского значения дюйма  $d = 1,8166/2,3 = 7898,2$  мкм. Переход к размеру матрицы можно выполнить на основании рисунка 4.

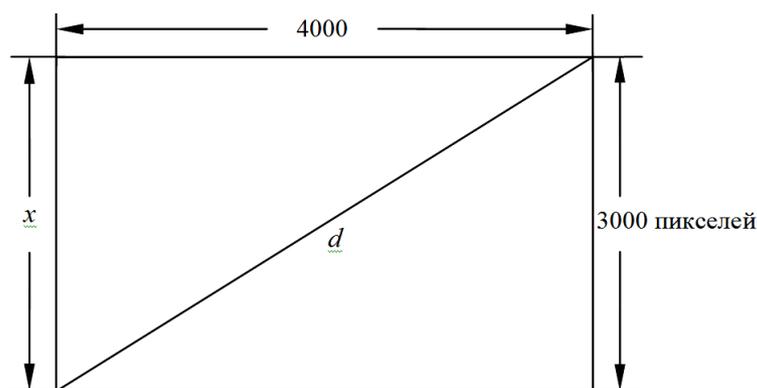


Рисунок 4. – Переход к размеру матрицы

На основании рисунка 4 диагональ  $d$  найдем из следующего выражения:

$$d = \sqrt{x^2 + \left(\frac{4000}{3000}\right)^2 x^2}, \quad (5)$$

откуда

$$x = \frac{d}{\sqrt{1 + \left(\frac{4000}{3000}\right)^2}}, \quad (6)$$

где  $x$  – ширина матрицы в мкм; 4000 – длина матрицы в пикселях; 3000 – ширина матрицы в пикселях.

По определенным размерам матрицы можно вычислить значение ширины матрицы  $x$  по формуле (6), длина матрицы составит  $x \frac{4}{3}$ . Размер пиксела вычислим по формуле  $l = x / 3000$ .

Расчеты размеров матрицы приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Расчет размеров матрицы в зависимости от принятых значений дюйма

Английский дюйм				Китайский дюйм			
$d$ , мм	длина, мм	ширина, мм	$l$ , мкм	$d$ , мм	длина, мм	ширина, мм	$l$ , мкм
6,9291	5,5432	4,1574	1,3858	7,8982	6,3185	4,7389	1,57964

Для проверки вычислений через длину и ширину матрицы рассчитаем диагональ по формуле (5).

Получили практически те же значения, что указаны в таблице 3 как для английского дюйма, так и китайского.

При обработке снимков корпуса № 3 Полоцкого государственного университета в программе Agisoft Photoscan [2] были получены параметры камеры FC220, приведенные в таблице 4.

Таблица 4. – Параметры камеры FC220

Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пиксела	Калибровка
4000×3000	4,73 мм	1,57×1,57 мкм	нет

Как видим из таблицы 4, калибровка камеры не выполнялась.

Рассчитанный нами размер пиксела близок к китайскому варианту (см. таблицу 4).

Проверим наш расчет размера пиксела и указанного в таблице 4. Для этого рассчитаем масштаб полученного изображения по следующей формуле [4]:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}, \quad (7)$$

где  $f$  – величина фокусного расстояния;  $H$  – высота фотографирования;  $m$  – знаменатель масштаба фотографирования.

По результатам съемки с дрона MAVIC PRO корпуса № 3 Полоцкого государственного университета со средней высоты фотографирования  $H = 52$  м получили  $m = 10994$ . Разрешение на местности  $L = 1,46$  см получено в результате вычислений по программе Agisoft Photoscan.

Проверим значение  $m$  по соотношению отрезков разрешения на местности  $L$  и размеру пиксела  $l$  по формуле (8):

$$m = L / l. \quad (8)$$

В результате получили:

1) для случая  $l = 1,57$  мкм  $m = 9300$ , то есть значительное расхождение;

2) по нашим расчетам  $l = 1,3858$  мкм,  $m = 10535$ , то есть более близкий результат.

С определёнными значениями  $l$  рассчитаем начало бесконечности  $a = H_{min}$  по формуле (4).

Получили  $H_{min} \approx 2$  м для обоих размеров пиксела. Высота съемки значительно больше рассчитанной величины. Изображение при любых масштабах съемки будет резким. При съемке следует выставлять фокусировку на бесконечность и отключать функцию «автофокуса» [2]. Не желательно выполнять съемку при апертуре 2,2 (см. таблицу 2), тем более что камера не калибровалась (см. таблицу 4).

В работе [2] отмечено, что необходимо использовать минимально возможный размер диафрагмы для достижения максимальной глубины резкости. Однако при высоте съемки более 2 м изображение будет резким. Кроме того, как отмечалось, при апертуре меньше 4-х на качество изображения значительное влияние оказывают aberrации, а при апертуре более 9-ти на качество изображения влияют дифракционные явления [6]. Так как камера не калибровалась, кроме того объектив далек от совершенства, то выполнять съемку с апертурой 2,2 или более 9-ти значит получить изображение с искажениями.

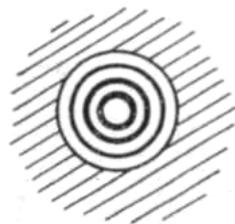


Рисунок 5. – Дифракционный кружок

Вследствие дифракции лучи света отклоняются от первоначального направления. В результате реальная оптическая система изображает точку предмета не точкой, а в виде так называемого дифракционного кружка, представляющего собой серию чередующихся светлых и темных концентрических колец с ярким центральным пятном (рисунок 5) [3].

Если оптическая система изображает две близкие между собой точки, дифракционные кружки от каждой из них, налагаясь один на другой, образуют сложную дифракционную картину. При этом наблюдатель ещё может разделить две точки, если они расположены на расстоянии радиуса первого темного кольца  $\sigma$ , которое принимается за наименьшее разрешаемое расстояние (предел разрешения).

Это расстояние может быть вычислено по следующей формуле [3]:

$$\sigma = 1,22\lambda \frac{f}{d} = 1,22\lambda A, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $f$  – фокусное расстояние;  $d$  – диаметр входного зрачка оптической системы;  $A$  – апертура.

Как видно из формулы (9), наименьшее разрешаемое расстояние зависит от длины волны  $\lambda$  и апертуры  $A$ . Длина волны, которую фиксируют светочувствительные матрицы, будет отличаться от длины волны, которую фиксирует фотоплёнка, поскольку матрицы будут фиксировать не только видимый свет, но и инфракрасный. Поэтому примем для расчетов среднюю длину световой волны, воспринимаемую светочувствительной матрицей, которая составит  $\lambda = 0,69$  мкм. Подставив  $\lambda = 0,69$  мкм,  $f = 21$  мм и  $A = 22$  в формулу (9), получили  $\sigma = 18,52$  мкм. Не имеет смысла конструировать матрицу с размером пиксела значительно меньше рассчитанной величины. А при апертуре  $A = 4$  предел разрешения составит  $\sigma = 3,37$  мкм, то есть даже при  $A = 4$  одна точка займет матрицу  $3 \times 3$  пиксела.

Рассчитаем разрешающую способность получаемого изображения. При расчете учтем размер пиксела светочувствительной матрицы цифровой камеры, влияние aberrаций объектива и дифракции. Разрешающая способность светочувствительной матрицы может быть вычислена по формуле [11; 12]:

$$R_m = \frac{1}{2l}, \quad (10)$$

где  $l$  – размер пиксела.

Предельно возможное значение разрешающей способности объектива, называемое дифракционной разрешающей способностью  $R_D$ , можно получить по формуле [6]:

$$R_D = \frac{1d}{1,22\lambda f} = \frac{1}{1,22\lambda A}. \quad (11)$$

В работе [11] приведена формула для расчета дифракционной разрешающей способности  $R_D$ :

$$R_D = 1/\sigma, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – радиус центрального пятна рассеяния.

Формулы (11) и (12) идентичны и дают одинаковые результаты. Подставив в формулу (12) значение  $\sigma$  из формулы (9), получим формулу (11).

Аберрации снизят эту разрешающую способность. Влияние аберраций учтем по формуле из [13]:

$$R_o = \frac{U}{4\epsilon}, \quad (13)$$

где  $U$  – апертурный угол в пространстве изображений;  $\epsilon$  – волновая аберрация, используемая в качестве обобщенной характеристики остаточных аберраций и  $\epsilon = 0,25\lambda$  – для оптических систем с отличной коррекцией аберраций и  $\epsilon = 0,5\lambda$  – для хорошей коррекции аберраций. В нашем случае аберрации не корректировались, поэтому примем  $\epsilon = \lambda$ . А если использовать  $A = 2,2$ , следует принять  $\epsilon$  не менее  $\epsilon = 2\lambda$ .

Апертурный угол в пространстве изображений можно вычислить по формуле [13]:

$$U = \frac{d}{2f} = \frac{1}{2A}, \quad (14)$$

используя полученное значение  $U$  по формуле (13), легко получить разрешающую способность объектива  $R_o$ .

Совместную разрешающую способность светочувствительной матрицы и объектива вычислим по следующей формуле из [13]:

$$\frac{1}{R_{o/m}} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_m}. \quad (15)$$

При расчетах примем размер пиксела  $l = 1,3858$  мкм и  $l = 1,5796$  мкм, среднюю длину световой волны  $\lambda = 0,69$  мкм, апертуру  $A = 4$ ,  $A = 22$  и  $A = 2,2$ . Результаты расчетов сведем в таблицу 5 и таблицу 6.

Таблица 5. – Расчет разрешающей способности при  $l = 1,3858$  мкм

$R_m, \text{мм}^{-1}$ ,	$R_D, \text{мм}^{-1}$	A	U	$R_o, \text{мм}^{-1}$	$R_{o/m}, \text{мм}^{-1}$
361	297	4	0,125	45	40
	54	22	0,0227	8	8
	540	2,2	0,227	41	37

В нашем случае получили  $R_o, \text{мм}^{-1}$  при  $A = 2,2$ , близкую к  $R_o$  при апертуре  $A = 4$ . При конструировании аэрокамер не предусматривалось использовать апертуру 2,2, возможно,  $R_{o/m}$  будет значительно ниже, но исследования на эту тему не проводились. В дальнейшем апертуру 2,2 рассматривать не будем.

Таблица 6. – Расчет разрешающей способности при  $l = 1,5796$  мкм

$R_m, \text{мм}^{-1}$ ,	$R_D, \text{мм}^{-1}$	A	U	$R_o, \text{мм}^{-1}$	$R_{o/m}, \text{мм}^{-1}$
317	297	4	0,125	45	40
	54	22	0,0227	8	8

Сопоставляя таблицы 5 и 6, видим, что получили одинаковые значения разрешающей способности, то есть незначительные расхождения в размере пиксела практически не повлияли на разрешающую способность. При этом получили значительные расхождения разрешающей способности при разных апертурах. Разрешающая способность играет важную роль при дешифрировании. При  $R_{o/m} = 40$  можно будет дешифрировать камерально объекты в пять раз мельче, чем при  $R_{o/m} = 8$ .

В рассматриваемой камере используется светочувствительная матрица с размером пиксела 1,3858 мкм. Проведя вычисления наименьшего разрешающего расстояния, получили значение  $\sigma = 18,52$  мкм при апертуре  $A = 22$ . Точка будет размером  $18,52 \times 18,52$  мкм, т.е. займет более чем  $13 \times 13$  пикселей, а при апертуре  $A = 4$  точка будет размером  $\sigma = 3,37$  мкм и займет более чем  $2 \times 2$  пиксела.

Полагаем, что можно было бы увеличить размер пиксела, например, до 5 мкм, что снизило бы шумы и улучшило соотношение сигнал/шум.

Рассчитаем разрешающую способность, если размер элемента матрицы CMOS  $l = 5$  мкм. Результаты расчета сведем в таблицу 7.

Таблица 7. – Расчет разрешающей способности при  $l = 5$  мкм

$R_m, \text{мм}^{-1}$	$R_D, \text{мм}^{-1}$	$A$	$U$	$R_o, \text{мм}^{-1}$	$R_{o/m}, \text{мм}^{-1}$
100	297	4	0,125	45	31
	54	22	0,0227	8	7

Как видим, в обоих случаях разрешающая способность снизилась, причем при апертуре  $A = 4$  в большей степени, чем при апертуре  $A = 22$ . Однако при размере пиксела 1,4 мкм или 1,58 мкм в значительно большей степени на окончательную разрешающую способность будут влиять шумы и, возможно, разрешающая способность будет ниже, чем при размере пиксела 5 мкм.

Фотографирование корпуса № 3 ПГУ выполнялось с высоты полета  $H = 52$  м. Проверим, повлияет ли атмосфера на разрешающую способность снимков. Влияние атмосферы можно учесть с помощью коэффициента прозрачности атмосферы  $k_a$ , который рассчитывается в зависимости от высоты съемки [13]:

$$k_a = \exp[-\tau_H], \quad (16)$$

где  $\tau_H$  – оптическая толщина атмосферы для высоты полета  $H$ , которую можно рассчитать следующим образом [13]:

$$\tau_H = \frac{\tau_Z}{8,0} H_{II}. \quad (17)$$

Здесь  $\tau_Z$  – оптическая толщина атмосферы, зависящая от зенитного расстояния Солнца  $Z$  и числа масс  $m_Z$ , которая вычисляется по формуле [13]:

$$\tau_Z = \tau m_Z, \quad (18)$$

где  $\tau$  – оптическая толщина атмосферы, которая равна сумме молекулярной толщины  $\tau_M$  и аэрозольной толщины  $\tau_a$ ;  $\tau = \tau_M + \tau_a$  [13]. В свою очередь, с достаточной для практики точностью и длиной волны  $\lambda = 0,69$  мкм  $\tau_M \approx 0,00879\lambda = 0,006065$ , а  $\tau_a \approx 1,2\alpha_{a,\lambda} = 0,258$ ,  $\tau = \tau_M + \tau_a = 0,264$  [13].

Аэрофотосъемку необходимо выполнять при высоте Солнца над горизонтом не ниже  $20^\circ$  [14]. Примем зенитное расстояние Солнца  $Z = 60^\circ$ , следовательно, высота Солнца над горизонтом  $30^\circ$ . В этом случае число масс  $m_Z = 2$  [13].

Приведенная высота  $H_{II}$ , определяется в зависимости от фактической высоты полета  $H$  [13]:

$$H_{II} = 8,0(1 - \exp[-0,13H]) = 54 \text{ м} = 0,054 \text{ км}, \quad (19)$$

Рассчитаем для параметров съемки 3-го корпуса ПГУ коэффициент  $k_a$  и суммарную разрешающую способность

$$R_{o/m/a} = R_{o/m} k_a. \quad (20)$$

Результаты расчетов для  $l = 1,3858$  сведем в таблицу 8.

Таблица 8. – Результаты вычислений суммарной разрешающей способности  $R_{o/m/a}$ 

$H, \text{км}$	$H_{II}, \text{км}$	$\tau_Z$	$\tau_H$	$k_a$	$R_{o/m}, \text{мм}^{-1}$	$R_{o/m/a}, \text{мм}^{-1}$
0,052	0,054	0,528	0,00356	0,9964	40	39,86

Как видим, получили незначительное расхождение, и при съемке с высоты полета до 50 м влияние атмосферы можно не учитывать.

На разрешающую способность системы «объектив – матрица – атмосфера» повлияет сдвиг изображения, возникающий из-за того, что камера во время экспонирования совершает совместно с летательным аппаратом линейное перемещение относительно снимаемой местности. Учесть влияние сдвига можно с использованием выражения [9; 14]:

$$R_{o/m/a/\text{сдв.}} = \frac{R_{o/m/a}}{\sqrt{1 + (R_{o/m/a} \delta_w)^2}}, \quad (21)$$

где сдвиг изображения  $\delta_w$  можно вычислить по формуле [5; 11]:

$$\delta_w = \frac{W}{m} t. \quad (22)$$

Здесь  $W$  – путевая скорость самолета;  $m$  – знаменатель масштаба фотографирования;  $t$  – выдержка.

Как видим, разрешающая способность будет постоянно меняться в зависимости от входящих в формулу (21) параметров. И для конкретного случая аэросъемки будет своя разрешающая способность снимков.

Рассчитаем результирующую разрешающую способность при съемке с высоты полета  $H = 52$  м, выполненной при путевой скорости самолета  $W = 2,4$  км/ч (0,667 м/с), выдержке  $1/200$  с и масштабе фотогафирования  $1: m = 1:11000$ , для цифровой камеры FC220 с  $f = 4,73$  мм, приняв  $R_{o/m/a} = 39,86$  мм<sup>-1</sup>.

Получили  $\delta_w = 0,3335$  мкм,  $R_{o/m/a/c\delta w} = 39,86 / \sqrt{1 + (39,86 \cdot 0,0003335)^2} = 39,34$ , т.е. совместное влияние атмосферы и сдвига изображения снизило разрешающую способность на  $0,7$  мм<sup>-1</sup>. Для расчета размера объекта, который можно отдешифровать камерально, примем  $R_{o/m/a/c\delta w} = 39$  мм<sup>-1</sup>.

Однако если выполнять полет с максимальной для аэросъемки скоростью  $W = 36$  км/ч =  $10$  м/с, то для масштаба фотогафирования  $1: m = 1:11000$  получим  $\delta_w = 4,545$  мкм, а разрешающую способность  $R_{o/m/a/c\delta w} = 36,7$  мм<sup>-1</sup>, то есть получили значительное снижение разрешающей способности.

Минимальный размер объекта  $S_{min}$  при  $R_{o/m/a/c\delta w} = 39$  мм<sup>-1</sup>, который будет изображен на снимке, вычислим по формуле [12]:

$$S_{min} = \frac{m}{2R} = 14 \text{ см}, \quad (23)$$

где  $m$  – знаменатель масштаба снимка;  $R$  – разрешающая способность исходного снимка  $R = 39$  мм<sup>-1</sup>.

Дешифровочные возможности проверим по вероятности дешифрирования  $P$ , которую можно рассчитать по формуле [12]:

$$P = \exp \left[ - \left( B \frac{S_{min}}{D} \right)^2 \right]^2, \quad (24)$$

где  $D$  – геометрический размер распознаваемого объекта (диаметр, диагональ, длина и т.п.);  $B$  – коэффициент распознавания формы простого объекта, так как объекты, имеющие одинаковые размеры, но отличающиеся по форме, распознаются с различной степенью достоверности [12].

В работе [12] приведены коэффициенты для объектов с простейшими геометрическими формами: круг, квадрат, прямоугольник, угол, стенка. В расчетах примем среднее значение коэффициента распознавания  $B = 1,62$ , также приведенного в работе [12].

Согласно работе [12], требовать, чтобы вероятность была равна или близка к единице, не всегда возможно и целесообразно. Считается вполне удовлетворительным результат дешифрирования, характеризующийся вероятностью распознавания  $0,75$ . При этом большинство задач, стоящих перед дешифрированием, будет выполнено с минимумом затрат на производство дешифрирования.

Подбирать вероятность  $0,75$  под размер дешифрируемого камерально объекта  $D$  довольно сложно, поэтому в работе [16] предложена формула, полученная на основании формулы (24):

$$P = \exp \left[ - \left( B \frac{S_{min}}{D} \right)^2 \right] = e^{- \left( \frac{BS_{min}}{D} \right)^2} = 0,75, \quad (25)$$

где  $e = 2,7183$  – основание натурального логарифма.

В этом случае размер дешифрируемого объекта  $D$  легко вычислить [16]:

$$\frac{BS_{min}}{D} = 0,53, \quad (26)$$

откуда легко определить размер дешифрируемого камерально объекта  $D$  с вероятностью  $75\%$ :

$$D = \frac{BS_{min}}{0,53} = 1,887 BS_{min}, \quad (27)$$

Для принятого нами коэффициента распознавания формы простого объекта  $B = 1,62$  размер дешифрируемого камерально объекта с вероятностью  $0,75$  составил  $D = 42,8$  см и более.

В заключение следует отметить, что в основном все недостатки КМОП-матриц (CMOS) решаются программными методами, т.е. постобработкой изображений, что, несомненно, также приводит к потере исходной информации [17].

Как утверждает автор [18], почти все камеры потребительского уровня будут выполнены на базе КМОП-приборов, а ПЗС будут применяться в устройствах среднего и высокого классов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. MAVIC PRO : Руководство пользователя, 2017. – 60 с.

2. Agisoft Photoscan : Руководство пользователя, 2016. – 113 с.
3. Мальцев, М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина – М. : Машиностроение, 1968. – 472 с.
4. Прикладная фотограмметрия : учеб.-метод. компл. для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия» / сост. и общ. ред. А.А. Михеевой, В.В. Ялтыхова. – Новополоцк : ПГУ, 2006. – 320 с.
5. Лаврова, Н.П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко. – М. : Недра, 1981. – 296 с.
6. Щербаков, Е.Я. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Е.Я. Щербаков – М. : Машиностроение, 1979. – 464 с.
7. Aerial camera system with forward-motion compensation (FMC) – проспект : кат. продукции. – [Б. м. : б. и., б. г.].
8. Гельман, Р.Н. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 23–31.
9. Михеева, А.А. Фотограмметрия. Наземная стереофотограмметрическая съемка : учеб.-метод. компл. / А.А. Михеева / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк, ПГУ, 2008. – 88 с.
10. Википедия : свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Дюйм>.
11. Савиных, В.П. Аэрокосмическая фотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко – М. : «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 1997. – 378 с.
12. Живичин, А.Н. Дешифрирование фотографических изображений / А.Н. Живичин, В.С. Соколов. – М. : Недра, 1980. – 254 с.
13. Кучко, А.С. Аэрофотография и специальные аэрофотографические исследования / А.С. Кучко. – М. : Недра, 1988. – 235 с.
14. Аэрофотосъемочные работы : справ. аэрофотосъемщика / А.А. Попов [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 200 с.
15. Стеценко, А.Ф. Учебное пособие по курсу «Аэрофотосъемка» : Проектирование аэрофотосъемочных работ / А.Ф. Стеценко. – М., Изд. МИИГАиК, 1995. – 48 с.
16. Михеева, А.А. Расчет разрешения при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования снимка / А.А. Михеева, А.В. Ильюшенко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 176–182.
17. Википедия : свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/КМОП-матрица>. (в тексте 10).
18. Википедия : свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/отношение\\_сигнал\\_шум](http://ru.wikipedia.org/отношение_сигнал_шум).

Поступила 22.05.2018

## THE ANALYSIS OF THE RESOLUTION ABILITY OF IMAGES RECEIVED FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, P. PARADNYA

*Considered use in small organizations of unmanned aerial vehicles. for shooting small objects using household digital cameras that are far from perfect, therefore, the resolution of the images taken will be low. The resolution of the image largely depends on the aperture of the digital camera, which can be set in a large range. According to literary sources, the survey is performed at an aperture of 2.2, but studies on the admissibility of such an aperture have not been carried out. However, even in professional digital cameras, in which the lenses are an order of magnitude better, a 2.2 aperture has never been established, since with an aperture of less than four, aberrations have an image quality. In most cases, digital cameras mounted on unmanned aerial vehicles are not calibrated. In this study, the calculation of the resolution was made at aperture 4.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, digital camera, aperture, aberration, calibration.*