

УДК 528.71:629.7

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-65-81

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ РАБОТ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Владислав Иванович Юрченко

ООО «ЗКК Геостарт», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Некрасова, 44, технический директор, e-mail: vlyurchenko2372@gmail.com

Существующие общедоступные программы проектирования полетов беспилотного воздушного судна (БВС) предполагают начальный уровень подготовки персонала и не предусматривают детальной проработки проекта аэрофотосъемки (АФС) с точки зрения фотограмметрического и изобразительного (фотографического) качества фотоматериалов, требований нормативных документов, предъявляемых к точности конечной продукции. С целью достижения топографического качества АФС с БВС необходимо учитывать ряд ее особенностей. В работе рассмотрены вопросы определения оптимальной продолжительности аэрофотосъемочного дня и эффективного формата изображения при использовании сменных объективов, приведен рекомендуемый порядок расчета параметров топографической АФС с учетом данных экспозиционного треугольника «выдержка – диафрагма – светочувствительность», требований к предельному качеству и теоретическому разрешению системы «объектив – цифровой снимок». Описана методика определения положения высотных объектов относительно границ глубины резко изображаемого пространства (ГРИП) при заданных экспозиционных параметрах фотокамеры и возможности их корректировки. На основе теоретических положений автором разработана программа, позволяющая выполнять комплексное проектирование аэрофотосъемочных работ с БВС, в том числе бытовыми фотокамерами для получения результатов топографического качества. По результатам проведенных исследований сделан вывод о необходимости итерационного подхода к проектированию параметров АФС на основе данных о снимаемой местности, требований заказчика, характеристик БВС и используемой фотоаппаратуры.

Ключевые слова: аэрофотосъемочный день, гиперфокальное расстояние, дифракционный предел резкости, диск Эйри, допустимая кратность тени, критерий Релея, кольца Френеля, проектирование аэрофотосъемочных работ, теоретическая разрешающая способность, экспозиционный треугольник, эффективный формат изображения

Введение

Мировой рынок беспилотных воздушных судов (БВС) в 2017 г. составил 7,8 млрд долл., в 2019 г. – более 8 млрд долл. и имеет тенденцию к активному росту. Дроны гражданского назначения представлены моделями самолетного, роторного и гибридного типов и занимают порядка 47 % рынка БВС [1, 2]. Сегмент российского рынка представлен в основном малыми БВС зарубежного производства – DJI, PARROT, 3DR и др. Эксперты к 2025 г. оценивают потенциальный объем российского рынка – около 2,5 млн устройств и 10 млрд руб. продаж в год [2].

Доступность приобретения БВС, наличие программ пакетной фотограмметрической обработки (Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, Trimble UASMaster и др.) привели к появле-

нию в отрасли большого числа организаций, занимающихся аэрофотосъемкой для решения топографических и прикладных задач на коммерческой основе. Как правило, основной штат таких организаций – любители, не имеющие образования по специальности. Этап детального проектирования аэрофотосъемочных работ с учетом топографических требований к точности практически исчез. Так, программы планирования и формирования полетных заданий, поставляемые с БВС (Flight Planner, DroneDeploy, Pix4Dcapture и др.), не предусматривают детальных расчетов и разработку проекта аэрофотосъемочных работ. Работа оператора сводится к простым операциям – очерчиванию площади съемки на картах Google или Yandex, ручному вводу модели используемой фотокамеры, высоты фотографирования или раз-

мера пикселя на местности (GSD), средней скорости полета. Между тем, важные параметры, влияющие на фотограмметрическое и изобразительное качество материалов АФС, и экономические показатели проекта, такие как фокусное расстояние и экспозиционные параметры камеры; высота, базис и интервал фотографирования; проценты продольного и поперечного перекрытий; количество маршрутов и снимков, должны быть обоснованы штурманом-оператором и требуют отдельных расчетов в техническом проекте аэрофотосъемочных работ. В проекте также должны быть решены вопросы выбора предпочтительного типа БВС и полезной нагрузки, обоснованы требования к виду, расположению и точности опорных данных, выполнены расчеты основных экономических показателей. Существующие нормативные документы по планированию и проведению аэрофотосъемочных работ [3, 4], ориентированные на применение специализированных аэрофотосъемочных самолетов, пленочных аэрофотоаппаратов, устаревшего аэрофотосъемочного оборудования, не обновляются и практически не используются.

К современным работам на заданную тематику можно отнести [5, 6], где рассмотрены общие вопросы планирования полетов БВС, выполнен анализ факторов, подлежащих контролю во время полета, разработке интеллектуальных систем АФС. В работе [7] рассмотрено влияние значений параметров на производительность и себестоимость АФС.

***Предлагаемая методика,
программная реализация,
результаты практических расчетов***

Автором статьи разработана методика последовательного итерационного проектирования всех параметров АФС с БВС, включая экспозиционные. На основании методики составлена программа «Проектирование аэрофотосъемочных работ», позволяющая производить проектирование в зависимости от характеристик выбранного БВС и фотокамеры, рельефа и освещенности местности, заданных требований к точности фо-

тограмметрической продукции в плане и по высоте. По сути, работа программы сводится к моделированию параметров полета БВС и работы фотоаппаратуры с текущим анализом априорных оценок точности фототриангуляции, характеристик изобразительных свойств фотоматериалов. Программа предназначена для использования специалистами среднего уровня подготовки и состоит из ряда модулей: «Расчет продолжительности аэрофотосъемочного дня»; «Расчет эффективного формата изображения»; «Расчет экспозиционных параметров фотоаппарата» и др. Результаты практических вычислений приведены по ходу рассмотрения работы каждого модуля.

Рассмотрим методику расчета и работу некоторых модулей программы.

Так, при съемке в солнечную малооблачную погоду изобразительное качество материалов АФС определяется как условиями солнечного освещения снимаемой местности, так и длиной естественных теней, отбрасываемых объектами. Существующие программы планирования полетов не позволяют рассчитать оптимальное время начала-окончания аэрофотосъемочного дня и зависящее от этого изображение на ортофотопланах или текстурах 3D-моделей естественных теней объектов, что имеет значение особенно при АФС высотных объектов или территорий плотной городской застройки.

Модуль «Расчет продолжительности аэрофотосъемочного дня» позволяет рассчитывать оптимальное время начала-окончания АФС на каждый день предполагаемого сезона проведения работ, а также дополнительные параметры положения Солнца в истинный полдень данной местности. Расчеты производятся в зависимости от заданной пользователем широты-долготы места проведения работ, планируемых дат, кратности максимально допустимой длины тени от объектов, разницы местного и московского времени (рис. 1). В расчетах также предусмотрен учет критериев минимально допустимой высоты Солнца над горизонтом для АФС – $H_{\odot \min}$. Так, согласно п. 5.2.9 Руководства [4], критерий $H_{\odot \min} = 20^\circ$, по другим исследованиям – $H_{\odot \min} = 30^\circ$ [8].

Исходные данные **Местоположение объекта**

Дата начала съёмки		Дата окончания съёмки		Северная широта места			Восточная долгота места		
день	месяц	день	месяц	градусы	минуты	секунды	градусы	минуты	секунды
01	08	15	08	55	01	28	82	55	20

Кратность длины тени: Разница местного с московским временем (часы): Минимально допустимая высота Солнца над горизонтом (градус):

РАСЧИТАТЬ И ПОСТРОИТЬ ГРАФИК

Высота Солнца над горизонтом при заданной кратности длины тени

Количество аэрофотосъёмочных дней:

Результаты расчёта на начало работ (местное время)

Время начала АФС работ	Время окончания АФС работ	Продолжительность аэрофотосъёмочного дня
<input type="text" value="9 ч 49 мин"/>	<input type="text" value="17 ч 18 мин"/>	<input type="text" value="7 ч 29 мин"/>
Склонение Солнца	Время видимого восхода Солнца	Время видимого заката Солнца
<input type="text" value="17°"/> <input type="text" value="49'"/> <input type="text" value="14"/>	<input type="text" value="5 ч 37 мин 22 с"/>	<input type="text" value="21 ч 30 мин 1 с"/>

В истинный полдень

Высота Солнца над горизонтом	Кратность длины тени	Полуденное время
<input type="text" value="52°"/> <input type="text" value="47'"/> <input type="text" value="46"/>	<input type="text" value="0,76"/>	<input type="text" value="13 ч 33 мин 41 с"/>

Результаты расчёта на окончание работ (местное время)

Время начала АФС работ	Время окончания АФС работ	Продолжительность аэрофотосъёмочного дня
<input type="text" value="10 ч 12 мин"/>	<input type="text" value="16 ч 51 мин"/>	<input type="text" value="6 ч 39 мин"/>
Склонение Солнца	Время видимого восхода Солнца	Время видимого заката Солнца
<input type="text" value="13°"/> <input type="text" value="48'"/> <input type="text" value="38"/>	<input type="text" value="6 ч 2 мин 37 с"/>	<input type="text" value="20 ч 59 мин 60 с"/>

В истинный полдень

Высота Солнца над горизонтом	Кратность длины тени	Полуденное время
<input type="text" value="48°"/> <input type="text" value="47'"/> <input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="0,88"/>	<input type="text" value="13 ч 31 мин 18 с"/>

Рис. 1. Главное окно модуля «Расчет оптимального времени проведения аэрофотосъёмочных работ»

Модуль работает для любой точки местности северного полушария восточнее Гринвичского меридиана. При расчетах оптимального времени АФС с учетом уравнения времени [9] погрешность составляет не более 2–3 мин. Кратность длины тени задается в зависимости от характера рельефа местности, высотности и плотности застроек. Например, для городов с плотной застройкой и высотными строениями рекомендуемый

диапазон кратности тени 0,75–1,5, сельских населенных пунктов – 1,5–2,25, плоскоравнинной местности с минимальным количеством искусственных объектов – 2–2,75.

Кратность длины тени также можно рассчитывать с использованием дополнительной утилиты двумя способами: по заданной высоте и расстоянию между строениями; по заданной степени затененности снимаемой территории (рис. 2).

РАСЧЁТ ДОПУСТИМОЙ КРАТНОСТИ ТЕНИ

<p>1 способ (по затенённости соседних объектов)</p> <p><input type="text" value="25"/> Высота объекта, м</p> <p><input type="text" value="38"/> Расстояние между объектами, м</p> <p><input type="text" value="0"/> Наложение падающей тени, ± %</p> <p><input type="text" value="1,52"/> Допустимая кратность тени</p>	<p>2 способ (по затенённости площадей)</p> <p><input type="text" value="15"/> Средняя высота объектов, м</p> <p><input type="text" value="20"/> Средняя протяжённость объектов, м</p> <p><input type="text" value="10"/> Количество объектов, шт</p> <p><input type="text" value="3"/> Площадь съёмки, Га</p> <p><input type="text" value="20"/> Допустимая затенённость снимаемой площади, %</p> <p><input type="text" value="2"/> Допустимая кратность тени</p>
--	--

Рис. 2. Расчет кратности тени

Кроме предложенного выше, для городских территорий при расчетах кратности длины тени можно воспользоваться строительными нормами допустимых расстояний между зданиями [10].

По рассчитанному времени начала-окончания каждого аэрофотосъемочного дня строится диаграмма продолжительности всего заданного периода АФС работ текущего года. Диаграмма для г. Новосибирска в период с 01.08.2020 по 15.08.2020 (согласно рис. 1) представлена на рис. 3.

Данные об оптимальном периоде времени проведения АФС, известная площадь съемки и характеристики БВС являются параметрами, которые позволяют планировать продолжительность полевых работ, определять их экономические показатели. Отметим, что кроме длины естественных теней, дополнительным фактором при проведении АФС является прозрачность тени – утренние и вечерние тени более прозрачны, чем полуденные. Например, при высоте Солнца над горизонтом до 10° в ясную безоблачную погоду освещенность объекта в тени составляет порядка 45–75 % общей освещенности местности,

а в пасмурную погоду эти параметры практически выравниваются [11].

Для решения широкого круга задач экономически целесообразно использование любительских фотокамер со сменными объективами, устанавливаемыми на БВС. Стоимость сменного объектива на порядок меньше стоимости камеры с несъемным объективом, а наличие комплекта таких объективов позволяет гибко и оперативно подходить к решению различных фотограмметрических задач. Быстрая замена сменных объективов возможна, если техническое решение позволяет организовать жесткую конструкцию крепления объектива к корпусу фотокамеры. Механическая совместимость сменного объектива и камеры обеспечивается переходником-адаптером заданного типа байонетного крепления (например, байонет Sony A) и равными рабочими отрезками. Возможные изменения элементов внутреннего ориентирования в процессе съемки могут быть учтены путем проведения фототриангуляции с самокалибровкой при увеличенном маршрутном и межмаршрутном перекрытии снимков.

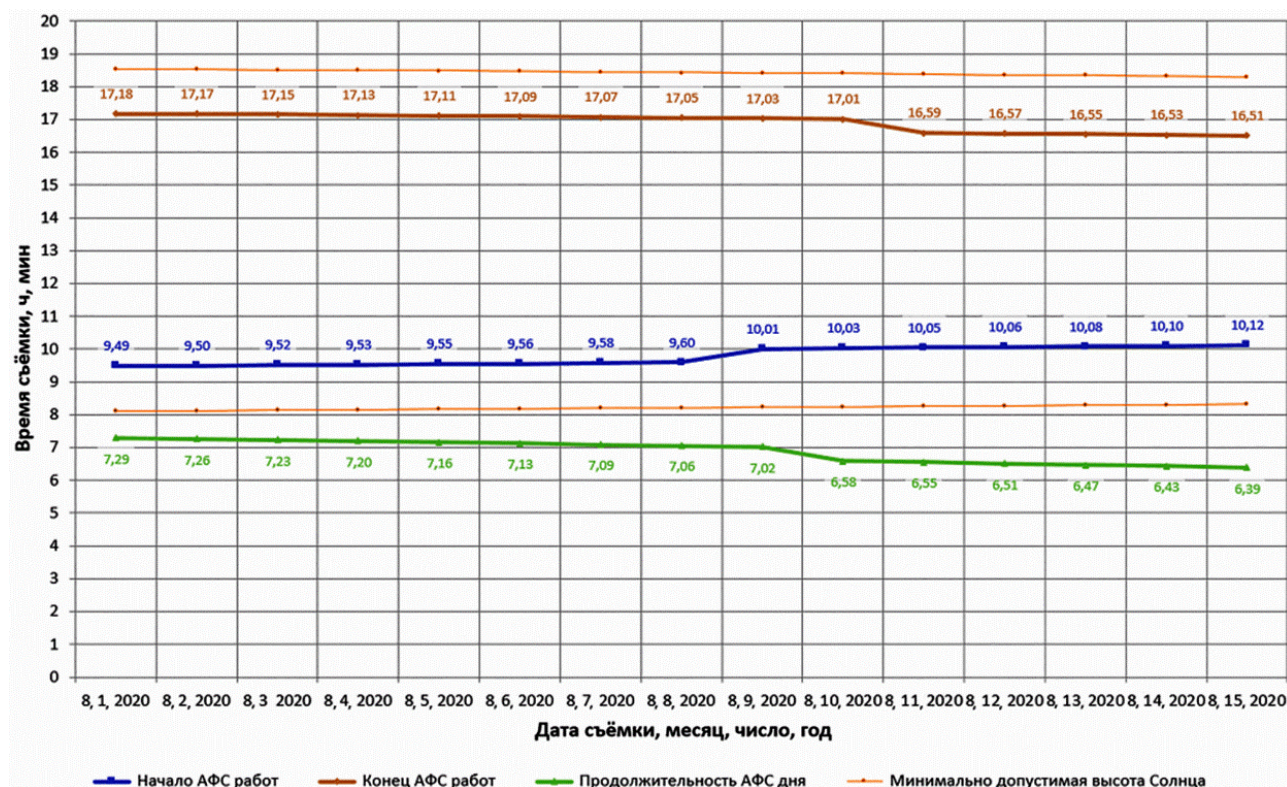


Рис. 3. Диаграмма продолжительности аэрофотосъемочного дня

При расчете параметров АФС для фотокамер со сменными объективами следует учитывать несоответствие размеров светочувствительной матрицы и поля изображения объектива. В этом случае может наблюдаться заметное падение резкости и эффект затемнения краев кадра – виньетирование. Необходимо определить оптимальные размеры фотоизображения, принимаемого для расчетов параметров АФС и последующей фотограмметрической обработки, – «эффективный формат изображения».

Модуль «Расчет эффективного формата изображения» позволяет пользователю на основе известного формата кадра по светочувствительной матрице и рассчитанного формата изображения по объективу задавать «эффективный формат цифрового изображения». Расчет формата изображения по объективу производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} l_{x(\text{об})} &= \frac{2f m}{\sqrt{m^2 + n^2}} \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ l_{y(\text{об})} &= \frac{2f n}{\sqrt{m^2 + n^2}} \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{aligned} \right\},$$

где $l_{x(\text{об})}, l_{y(\text{об})}$ – формат изображения по объективу по осям x и y , мм; f – истинное (не эквивалентное) фокусное расстояние объектива, мм; γ – угловое поле объектива, рад; $m : n$ – постоянное заданное соотношение длинной и короткой сторон светочувствительной матрицы (например, 3 : 2), берется из паспорта камеры.

В качестве исходного формата изображения при дальнейших расчетах параметров АФС задается наименьший из форматов – по объективу или по светочувствительной матрице. Если априори известно, что монохроматические aberrации (например, дисторсия) на краях кадра велики, имеется возможность задавать не используемую в обработке зону отсечки изображения (в процентах). Влияние изменения формата изображения устанавливается путем итерационных пересчетов и априорного анализа точности пространственной фототриангуляции (ПФТ).

Одним из основных в программе является модуль «Расчет экспозиционных параметров фотокамеры», который позволяет пользова-

телю подобрать оптимальные значения экспозиционного треугольника «выдержка – диафрагма – светочувствительность», рассчитать границы ГРИП и предельную разрешающую способность фотографической системы на снимке и местности. Исходными данными для работы модуля являются масштаб АФС, характеристики БВС и фотокамеры, текущая освещенность местности.

Методика расчетов экспозиционных параметров фотокамеры состоит из последовательно выполняемых этапов. По известным требованиям к точности конечной продукции рассчитывают высоту фотографирования – H_f . Далее определяют знаменатель минимально возможной выдержки затвора – $1 / \tau_v$. Выдержка затвора зависит от заданного так называемого допустимого смаза (сдвига) изображения δ_v и характеристик движения БВС – линейной и угловых скоростей движения летательного аппарата относительно его центра инерции. Так, значение выдержки за скорость движения БВС в общем виде определяется как [12]

$$\frac{1}{\tau_v} = \frac{\delta_v}{V}, \quad (1)$$

где V – средняя путевая скорость носителя в момент экспонирования, м/с; δ_v – допустимый линейный смаз на местности при прямолинейном движении

$$\delta_v = \delta_{\text{pix}} \text{pix} M \cdot 10^{-6} = \delta_{\text{pix}} GSD,$$

где δ_{pix} – допустимый смаз изображения за движение БВС, пиксель; pix – размер пикселя изображения, мкм; M – знаменатель масштаба фотографирования ($1/M = f/H_f$); GSD (*Ground sampling distance*) – размер пикселя на местности, м.

При расчете выдержки фотокамеры, кроме средней путевой скорости, необходимо также учитывать влияние скорости изменения углов ориентирования БВС в полете – крена (γ), рыскания (ψ) и тангажа (ν) – на суммарный смаз изображения. В общем виде формулы опреде-

ления выдержки при изменении угловых скоростей носителя выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\tau_\gamma} &= \frac{\delta_\gamma}{\omega_\gamma d_\gamma} \\ \frac{1}{\tau_\psi} &= \frac{\delta_\psi}{\omega_\psi d_\psi} \\ \frac{1}{\tau_\nu} &= \frac{\delta_\nu}{\omega_\nu d_\nu} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $\delta_\gamma, \delta_\psi, \delta_\nu$ – смаз в соответствующих плоскостях вращения фотокамеры; $\omega_\gamma, \omega_\psi, \omega_\nu$ –

известная скорость изменения соответствующих углов носителя в полете, рад/с; d_γ, d_ψ, d_ν – расстояние от оси вращения соответствующего угла летательного аппарата до максимально удаленной точки на снимке.

Величины четырех составляющих смаза изображения – $\delta_\nu, \delta_\gamma, \delta_\psi, \delta_\nu$, приведенные к плоскости снимка и общему центру инерции, согласно уравнениям (1) и (2), зависят от геометрических параметров используемой камеры, высоты фотографирования, линейной и угловых скоростей перемещения носителя (рис. 4).

Исходные данные по БВС		Исходные данные по камере	
282	Высота фотографирования, м	35	Фокусное расстояние, мм
72	Путевая скорость БВС, км/ч	23,84	Длина кадра вдоль направления полета, мм
10	Угловая скорость рыскания, градус/с	35,76	Ширина кадра поперек направления полета, мм
10	Угловая скорость тангажа, градус/с	5,96	Размер пикселя, мкм
10	Угловая скорость крена, градус/с	0,8	Допустимый смаз изображения, пиксель
РАСЧЁТ			
Результаты расчётов			
521	Знаменатель выдержки при движении, 1/с	787	Знаменатель выдержки при рыскании, 1/с
235	Знаменатель выдержки при тангаже, 1/с	459	Знаменатель выдержки при крене, 1/с
787	Знаменатель минимально допустимой выдержки - $1/\tau_{доп}$, 1/с	1000	Знаменатель минимально допустимой стандартной выдержки - $1/\tau_{ст}$, 1/с

Рис. 4. Расчет стандартной выдержки фотокамеры

Скорости изменения углов γ, ψ и ν задаются пользователем в каждом случае индивидуально и зависят от конструкции и устойчивости БВС в полете, текущих условий турбулентности. Например, практические расчеты (согласно рис. 4) показывают, что при АФС с целью создания ортофотоплана масштаба 1 : 2 000 бытовой фотокамерой *Sony RX1* с $f = 35$ мм с высоты фотографирования $H_\phi = 280$ м, скорости изменения углов крена и тангажа менее 10 градусов/с практически не оказывают влияния на выбор знаменателя выдержки. Использование гиросtabilизирующих платформ позволяет свести к минимуму корректировку выдержки фотокамеры при угловых перемещениях, ограничиваясь только

учетом линейной скорости БВС. Такой подход позволяет расширить диапазон минимально допустимой выдержки для учета иных факторов аэрофотосъемки, например, повышения изобразительного качества снимков при слабой освещенности. При выполнении АФС фотокамерами со шторно-щелевыми (ламельными) затворами необходимо проводить предварительно оценку влияния параметров съемочной аппаратуры на геометрию формирования изображения, а допустимый смаз изображения в расчетах выдержки следует уменьшать [13]. В целом, при проведении АФС с топографическими требованиями к качеству предпочтение следует отдавать фотокамерам с центральным затвором.

Так как значение выдержки для аэрофото- съемки является функцией от угловых и путе- вой скоростей БВС, ее корректировка в даль- нейших расчетах, исходя из фактической освещенности местности, нецелесообразна.

После определения знаменателя стандарт- ной выдержки рассчитывают диафрагменное число объектива N , исходя из данных о стан- дартной выдержке $1/\tau_{ст}$, начальной светочув- ствительности матрицы (ISO) и известного числа экспозиций (EV), соответствующего уровню освещенности снимаемой местности [14]. В модуле «Расчет экспозиционных пара- метров фотокамеры» предусмотрен как таб- личный ввод числа EV , так и ручной по пока- заниям с фотоэкспонетра при тестовом по- лете. Значение ISO рекомендуется принимать минимально возможным для используемой фотокамеры, так как в этом случае электриче- ский сигнал будет сниматься с ячеек матрицы без усиления. Увеличение светочувствитель- ности приводит к повышению уровня радио- метрических шумов на темных участках кадра и снижению изобразительного качества фото- материалов. По рассчитанному значению N ав- томатически подбирается ближайшее стан- дартное относительное отверстие диафрагмы фотокамеры – $f / N_{ст}$ ($f/8, f/11$ и т. д.).

Непосредственно перед запуском БВС, ис- ходя из фактической освещенности местности, производится корректировка треугольника экспозиционных параметров «выдержка – диафрагма – светочувствительность».

Возможны два варианта использования известных значений экспозиционного тре- угольника:

- если цифровая фотокамера имеет встро- енный режим автоматического управления экспозицией (РАУЭ), оператору необходимо установить режим «приоритет выдержки», рассчитанные стандартные значения вы- держки и минимальное значение ISO . При корректно подобранных параметрах экспози- ции значение относительного отверстия диа- фрагмы ($f / N_{ст}$) в полете должно колебаться в среднем диапазоне шкалы диафрагмы;

- если фотокамера не оборудована РАУЭ, непосредственно перед полетом оператор де- лает необходимую корректировку параметров «диафрагма – светочувствительность», исходя из выбранного значения $1/\tau_{ст}$ и фактической

освещенности местности по показаниям фото- экспонетра. В этом случае необходимо пери- одически вносить поправки в экспозиционные параметры за изменение освещенности и состо- яние атмосферы во время полета БВС. Rekomендуется сокращать полетное время до 1 ч.

В любом случае при установке экспозици- онных параметров необходимо соблюдать условия минимизации ISO и ограничения вы- бора крайних значений шкалы относительного отверстия диафрагмы, соответствующих пол- ностью открытой или закрытой диафрагме объектива, например, $f/2$ или $f/22$. Дадим пояс- нение ограничению выбора значений диафраг- менного числа.

При полностью открытой диафрагме на све- точувствительную матрицу попадает свет со всей поверхности линзы. В этом случае в фор- мировании изображения участвуют усиливаю- щиеся к краям монохроматические aberrации высоких порядков – дисторсия, сферическая aberrация, астигматизм, кривизна поля изобра- жения и др. Эта особенность в большей степени касается применяемых при съемке с БВС быто- вых фотокамер формата 35 мм, объективы ко- торых не являются анастигматами. При закры- тии диафрагмы отсекается часть светового по- тока, проходящего через края линз. В формиро- вании изображения будет участвовать только центральная часть линзы с минимальными хро- матическими искажениями.

При полностью закрытой диафрагме боль- шой процент световых лучей, проходящих через отверстие объектива, будет касаться краев диафрагмы. В этом случае проявляется волновая природа света и усиливается явле- ние дифракции в параллельных лучах – диф- фракция Фраунгофера [15]. Лучи света по мере закрытия диафрагмы все сильнее откло- няются от своего исходного пути, огибая края отверстия диафрагмы, что приводит к размы- тости изображения. Влияние негативных фак- торов воздействия оптических систем на ка- чество изображения при разных положениях диафрагмы и зона рекомендуемых значений схематично представлены на рис. 5.

Рассмотрим вопросы определения пре- дельно возможного изобразительного качества системы «объектив – светочувствительная мат- рица», не производя АФС и лабораторные ис- следования полученного цифрового изображе- ния, т. е. априори.

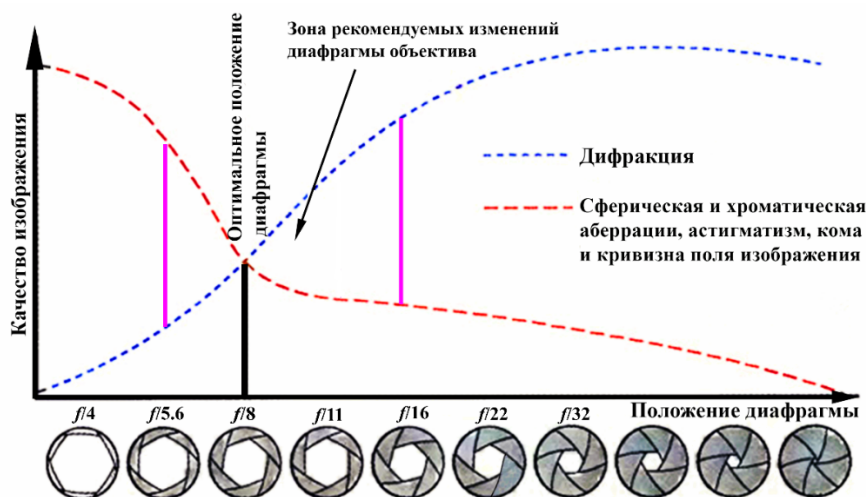


Рис. 5. Влияние установок диафрагмы на качество фотоизображения

Основными критериями изобразительного качества системы в этом случае будут являться: предел достижимой резкости – диаметр кружка рассеяния (нерезкости) и разрешающая способность системы.

Так, для идеального объектива изображение точечного объекта, даже будучи строго в фокальной плоскости и при отсутствии систематических искажений, проецируется на цифровую матрицу в виде кольцевых зон Френеля и центрального светлого пятна с 83,8 % от исходной интенсивности яркости объекта – диска Эйри. Схематичное изображение дифракции Фраунгофера на круглом отверстии диафрагмы при АФС удаленных объектов представлено на рис. 6.

Согласно рис. 6, радиус диска Эйри R_3 в мкм равен [14]

$$R_3 = 1,22 \frac{\lambda}{D \cdot 10^3} f = 1,22 \frac{\lambda N}{10^3}, \quad (3)$$

где λ – длина волны пропускаемого объективом света, нм; D – диаметр входного отверстия объектива, мм.

Из уравнения (3) следует, что диаметр кружка рассеяния тем больше, чем меньше отверстие диафрагмы. Когда диаметр диска Эйри сопоставим с размером пикселя матрицы, рассеяние изображения начинает влиять на качество фотограмметрических измерений, и это явление следует учитывать при проектировании АФС.

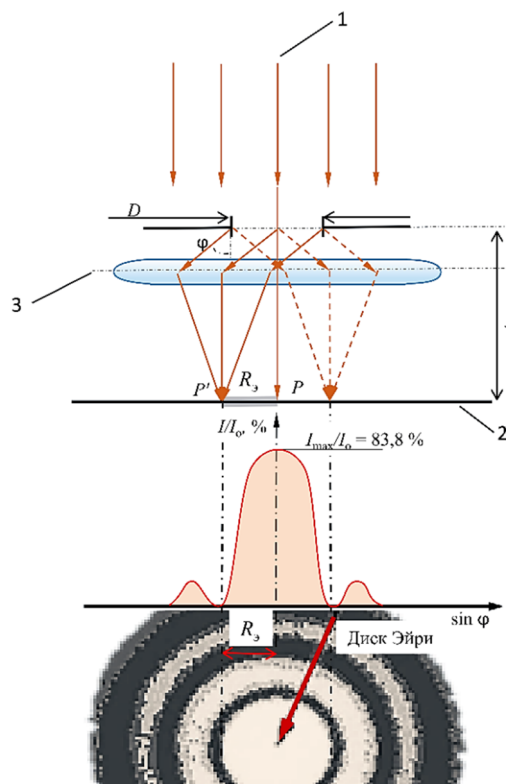


Рис. 6. Дифракция Фраунгофера в параллельных лучах при закрытой диафрагме:

1 – параллельный пучок лучей при АФС удаленных объектов; 2 – фокальная плоскость объектива; 3 – выходящая линза; φ – угол отклонения лучей на краях диафрагмы; P' – изображение точки P под действием рефракции; I_0 – исходная интенсивность падающего света; I_{\max} – интенсивность центрального пятна; R_3 – радиус диска Эйри

Например, для объектива Sony SEL35F18 с установленным $N = 22$ и длиной волны наиболее распространенной зеленой части спектра $\lambda = 550$ нм радиус диска Эйри $R_3 = 14,8$ мкм. Данное значение радиуса составляет 2–3 пикселя современных фотокамер и является дифракционным пределом резкости изображения при заданном числе диафрагмы. Это означает, что любой точечный объект размером GSD , пройдя через объектив, отобразится на матрице в виде светового пятна диаметром 4–6 пикселей. Для определения предела достижимой резкости системы «объектив – светочувствительная матрица» рассмотрим три возможных варианта решения.

1. Радиус диска Эйри меньше половины пикселя цифровой матрицы ($R_3 < pix/2$). Тогда рассеяния изображения точечного объекта не происходит, влияние дифракции объектива не превышает конструктивных размеров минимального элемента изображения. Предел достижимой резкости изображения укладывается в один пиксель матрицы. В расчетах априорной оценки точности результатов ПФТ следует принимать СКО измерения пикселя.

2. Радиус диска Эйри больше половины, но меньше целого пикселя матрицы ($pix/2 \leq R_3 \leq pix$). В этом случае за предел резкости изображения следует принять кружок рассеяния максимальным диаметром два пикселя. Требуется итерационный пересчет высоты фотографирования и всех параметров АФС или в расчетах априорной оценки точности ПФТ следует принимать СКО измерения удвоенного пикселя.

3. Радиус диска Эйри больше пикселя матрицы ($R_3 > pix$). Предел резкости системы определяется дифракционным пределом объектива. Диаметр кружка рассеяния точечного объекта равен диаметру диска Эйри. В это случае предел достижимой резкости следует принять равным диаметру диска Эйри с точностью округления до целого пикселя в большую сторону. Целесообразен итерационный пересчет всех параметров АФС.

Рассчитанный с учетом приведенных положений предел достижимой резкости определяет размер светового пятна яркого точечного объекта на цифровом снимке при отсутствии

дополнительных шумов, вносимых светочувствительной матрицей. Практически экспозиционные параметры фотокамеры должны быть заданы таким образом, чтобы предел изобразительного качества системы не превышал допустимого смаза изображения за время движения и изменения угловой ориентации БВС.

Вторым параметром, определяющим изобразительное качество фотоматериала, является разрешающая способность системы «объектив – светочувствительная матрица». Известно, что для определения разрешающей способности объектива существует критерий разрешающей способности оптической системы – критерий Релея [16]. Данный критерий является удовлетворительным для оперативной предварительной оценки предельной разрешающей способности оптических систем, а также не требует непосредственных измерений и инструментария.

Согласно критерию Релея, для идеальных оптических систем и при отсутствии аберраций две точки изображения едва различаются визуально, если расстояние между ними не меньше радиуса диска Эйри, т. е. когда центр изображения дифракционного диска Эйри первой точки совпадает с первым минимумом дифракционной картины второй точки. Оптическая разрешающая способность по Релею тем лучше, чем больше относительное отверстие объектива и соответственно меньше радиус диска Эйри (рис. 7).

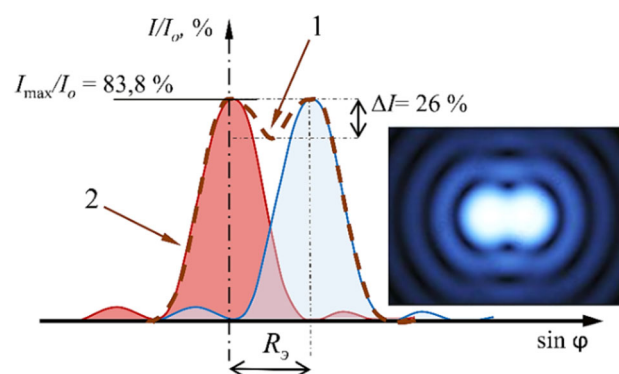


Рис. 7. Разрешение оптической системы по критерию Релея:

1 – падение интенсивности освещенности на границе диска Эйри; 2 – распределение суммарной интенсивности двух близлежащих точечных объектов на светочувствительной матрице

Очевидно, что снижение яркости на 26 % между двумя близко расположенными точечными объектами (см. рис. 7), позволяет наблюдателю едва различить их визуально, но не учитывает матричной структуры цифрового изображения. Необходим учет одновременно нескольких факторов: оптической разрешающей способности, размера пикселя и положения изображений соседних дисков Эйри на матрице относительно ближайших границ пикселей. Существующие современные методы определения разрешения систем по пограничной кривой предполагают проведение измерений на снимке и выполняются после получения материалов АФС, т. е. определяют фактическую разрешающую способность и фотографическую резкость [17, 18]. Для оперативной предварительной оценки разрешающей способности введем критерий «Теоретическая разрешающая способность». Теоретическая разрешающая способность (ТРС) системы «объектив – светочувствительная матрица» – это характеристика изобразительного качества, которая определяет минимальное расстояние на цифровом изображении между двумя яркими точечными объектами, при котором возможно выполнить однозначную идентификацию этих объектов оператором (или автоматически) при отсутствии цифровых шумов светочувствительной матрицы или когда этими шумами можно пренебречь (рис. 8). Для определения ТРС не требуется проведения измерений на изображении.

Из рис. 8 видно, что полное разрешение границ близлежащих точечных объектов на цифровом фотоизображении выполнимо, если расстояние между соседними кружками рассеяния будет не меньше размера пикселя светочувствительной матрицы. В этом случае в пикселе между кружками рассеяния однозначно будут находиться первый минимум и частично (или полностью) первый локальный максимум. Известно, что распределение интенсивности яркости в первом светлом кольце Френеля составляет не более 7,2 % исходной яркости, во втором – 2,8 %. Наложение первых минимума и максимума в одном пикселе даст суммарную интенсивность яркости пикселя, сравнимую с уровнем естественного шума цифрового изображения. Следовательно, в качестве ТРС следует принять расстояние, равное диаметру диска Эйри плюс один пиксель светочувствительной матрицы между ними.

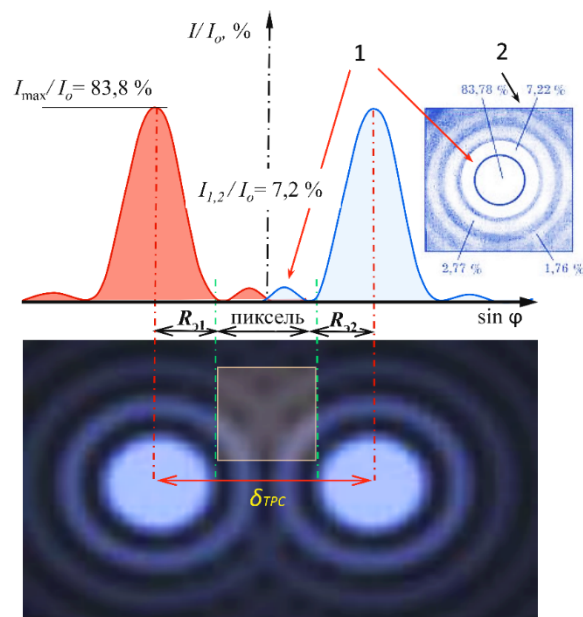


Рис. 8. Геометрический смысл теоретической разрешающей способности системы «объектив – светочувствительная матрица»:

1 – первое светлое кольцо Френеля; 2 – распределение световой энергии в кольцах Френеля

На все, последующие за первым, локальные максимумы приходится не более 9 % суммарной интенсивности яркости объекта, что позволяет пренебречь их влиянием для определения оценок качества цифрового изображения.

Таким образом, ТРС задает минимально возможное расстояние между объектами с четкими контурами для фотограмметрических измерений и зависит от диаметра относительного отверстия объектива и размера пикселя светочувствительной матрицы. ТРС также может являться критерием размера минимального информационного элемента, изображаемого на ортофотопланах при расчетах информационной емкости изображений. Применяемые в расчетах ТРС допущения вполне уместны на этапе проектирования параметров АФС. Используемые на БВС, как правило, любительские (неметрические) или полупрофессиональные фотокамеры с неортоскопичными объективами являются основанием для такого подхода.

Из изложенного выше следует, что проектировать параметры АФС только исходя из точности конечной продукции путем расчета размера GSD не всегда корректно. Необходимо учитывать две изобразительные характери-

стики системы «объектив – светочувствительная матрица» – предел достижимой резкости и теоретическую разрешающую способность. Модуль «Расчет экспозиционных параметров фотокамеры» позволяет количественно определять изобразительные характеристики системы как в масштабе снимка, так и в пересчете на местность. Приведем практический пример расчета диафрагмы и изобразительных параметров качества системы для камеры Sony RX1 с $f = 35$ мм (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что при установленных параметрах объектива точечный объект размером

GSD изобразится на снимке пятном рассеяния диаметром до 3 пикселей и ТРС до 3,5 пикселей, что следует учитывать при определении других параметров АФС, влияющих на точность фотограмметрических работ. Также отметим, что при больших размерах пятна рассеяния его границы приобретают форму многогранника (рисунок боке «шайба»), повторяющего форму отверстия диафрагмы. Для избегания подобного эффекта при АФС рекомендуется применение объективов с количеством лепестков диафрагмы более 6 и имеющих скругленную форму, дающих круглое отверстие диафрагмы.

The screenshot shows a software window titled "Расчёт экспозиционных параметров фотокамеры" (Calculation of exposure parameters of a camera). It is divided into several sections:

- Inputs:**
 - Lighting: "По характеру освещения местности" (Selected), "Характер освещения местности" (Усреднённый сюжет при Солнце в дымке (мягкие тени)), "Светочувствительность, ед. ISO" (200 ед.), "Стандартная выдержка, 1/c" (1/500 с).
 - Exposure: "По известному числу экспозиции" (Selected), "Число экспозиции" (16), "Диаметр кружка рассеяния для расчёта ГРИП, пиксель" (0,8), "Длина волны света через объектив, нм" (550), "Максимальная высота строения на объекте, м" (50).
- Buttons:** "РАСЧЁТ"
- Results Section (Results of calculations):**
 - Diaphragm of the camera:** "Относительное число диафрагмы, 1/N" (11), "Ближайшее стандартное относительное число диафрагмы, 1/Nст." (11), "Освещённость на матрице, lux" (20480).
 - Image quality characteristics:**
 - "Размер пиксела на снимке, мкм" (5,96), "Размер пиксела на местности, см" (4,8)
 - "Радиус диска Эйри, пиксель" (1,24), "Предельная разрешающая способность объектива на местности (по Релею), см" (5,95)
 - "Дифракционный предел достижимой резкости системы (пятно рассеяния), пиксель" (2,48 - 3), "Дифракционный предел достижимой резкости системы, см" (11,9 - 14,4)
 - "Теоретическая разрешающая способность (ТРС) системы на снимке, пиксель" (3,48), "Теоретическая разрешающая способность (ТРС) системы на местности, см" (16,71)

Рис. 9. Окно модуля для расчета диафрагмы и предельного качества системы «объектив – светочувствительная матрица»

При создании ортофотопланов, 3D-моделей современной городской застройки или объектов, требующих высокого уровня детализации (подвески опор ЛЭП, памятники, архитектурные композиции и т. д.), АФС производится с небольших высот фотографирования при сфокусированной на бесконечность шкале отстояний. Детальность построения подобных плотных 3D-моделей напрямую зависит от изобразительного качества накладываемой на полигональную модель текстуры [19, 20]. В данном случае при проектировании АФС, кроме расчета геометрических и экспозиционных параметров, необходимо определять параметры глубины резко изображаемого пространства – гиперфокальное расстояние объектива

$H_{гр}$, верхнюю и нижнюю границы резко изображаемого пространства – $H_{в.гр}$, $H_{н.гр}$.

$$\left. \begin{aligned} H_{гр} &= \left(f + \frac{f^2 \cdot 10^3}{d N \text{ pix } M} \right) / 10^3 \\ H_{в.гр} &= \frac{H_{гр} \cdot H_{\phi}}{H_{гр} + H_{\phi}} \\ H_{н.гр} &= \frac{H_{гр} \cdot H_{\phi}}{H_{гр} - H_{\phi}} \\ \text{ГРИП} &= H_{н.гр} - H_{в.гр} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где d – заданный диаметр кружка рассеяния за ГРИП на снимке, пиксель.

Задаваемый диаметр кружка рассеяния за ГРИП должен быть не больше дифракционного предела достижимой резкости, определенного под конкретные экспозиционные параметры объектива.

Для исключения попадания частей снимаемого объекта в область рассеяния необходимо провести анализ соотношений H_ϕ , высоты объекта – h_0 и рассчитанных согласно уравнениям (4) параметров ГРИП. В ходе анализа проверяются три варианта решений по корректировке параметров АФС.

1. $H_\phi > H_{гр.}$ и $(H_\phi - h_0) > H_{в.гр.}$. В этом случае объект съемки полностью попадает в зону ГРИП, корректировка параметров АФС не нужна.

2. $H_\phi > H_{гр.}$ и $(H_\phi - h_0) \leq H_{в.гр.}$. В этом случае части объекта, расположенные выше верхней границы ГРИП, будут размыты (рис. 10, а). Необходима замена объектива фотокамеры на объектив с меньшим фокусом или корректировка экспозиционных парамет-

ров фотокамеры. Возможно решение путем увеличения высоты фотографирования или заданного диаметра кружка рассеяния.

3. $H_\phi \leq H_{гр.}$. Следует определить расположение объекта относительно верхней и нижней границ зоны ГРИП, рассчитать зоны нерезкости изображения объекта. Необходима корректировка параметров АФС или замена объектива фотокамеры на объектив с меньшим фокусом (рис. 10, б).

Увеличение фокусного расстояния снижает зону ГРИП [21], что ведет к нерезкости верхних частей высотных объектов на ортофотопланах. Кроме того, большое значение при расчете ГРИП имеют уровень освещенности местности и установленные экспозиционные параметры камеры. Например, при съемке высотного объекта ($h_0 = 50$ м) камерой Sony RX1 с $f = 35$ мм с $H_\phi = 100$ м под сплошной облачностью нужно иметь в виду, что часть строения выше 43,8 м будет изображена с кружком нерезкости больше заданного диаметром 0,8 пикселя (рис. 11).

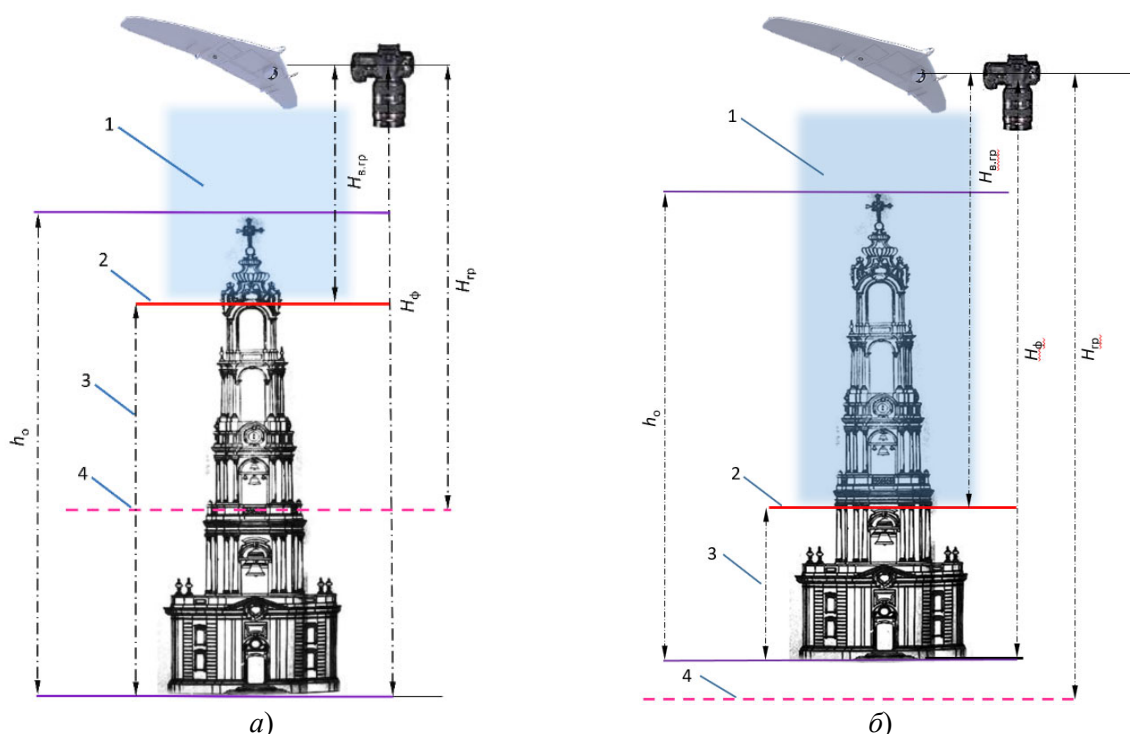


Рис. 10. Варианты расположения частей объекта в зоне нерезкости при фокусировке на бесконечность:

а) верхней части объекта (условия: $H_\phi > H_{гр.}$, $(H_\phi - h_0) \leq H_{в.гр.}$); б) верхней и нижней частей объекта (условие: $H_\phi \leq H_{гр.}$), где 1 – зона нерезкого изображения; 2 – верхняя граница ГРИП; 3 – зона резкого изображения; 4 – граница гиперфокального расстояния

Расчёт экспозиционных параметров фотокамеры

☞ По характеру освещения местности ед. Светочувствительность, ед. ISO

Характер освещения местности

с Стандартная выдержка, 1/с

☞ По известному числу экспозиции

Число экспозиции Диаметр кружка рассеяния для расчёта ГРИП, пиксель

Длина волны света через объектив, нм

Максимальная высота строения на объекте, м

РАСЧЁТ

Результаты расчётов

Диафрагма фотокамеры

Относительное число диафрагмы, 1/N Ближайшее стандартное относительное число диафрагмы, 1/Nст.

Освещённость на матрице,

Характеристики изобразительного качества системы

Размер пиксела на снимке, мкм Размер пиксела на местности, см

Радиус диска Эйри, пиксель Предельная разрешающая способность объектива на местности (по Релею), см

Дифракционный предел достижимой резкости системы (плотно рассеяния), пиксель Дифракционный предел достижимой резкости системы, см

Теоретическая разрешающая способность (ТРС) системы на снимке, Теоретическая разрешающая способность (ТРС) системы на местности, см

Глубина резко изображаемого пространства (ГРИП)

Высота фотографирования, м Гиперфокальное расстояние, м

Расстояние до передней границы ГРИП, м Расстояние до задней границы ГРИП, м

Глубина резко изображ. пространства, м

Объект выходит за зону ГРИП. Увеличьте Nf на 28,5 м

Рис. 11. Окно модуля для расчета параметров ГРИП

В данном случае следует увеличить диафрагменное число объектива или высоту фотографирования на 28,5 м. Для создания 3D-моделей необходима замена стандартного объектива камеры ($f = 35$ мм) на короткофокусный.

Выводы

1. Несмотря на разнообразие существующих на рынке программ подготовки полетных заданий БВС, вопросы проектирования топографической АФС освещены слабо. Предварительное проектирование аэрофото съемочных работ с учетом требований нормативных документов к фотограмметрическому и изобразительному качеству полученных материалов является необходимым элементом.

2. АФС следует производить с целью обработки и получения ортофотопланов и текстурированных 3D-моделей с высокими изобразительными свойствами. Для этого расчет оптимального времени выполнения аэрофото съемочных работ следует выполнять при заданном параметре кратности длины теней,

известных характере рельефа местности и высот искусственных сооружений, планируемом месте и месяце проведения АФС. Подобные расчеты особенно важны для аэрофото съемки территорий с плотной высотной застройкой.

3. Для оперативного решения широкого круга фотограмметрических задач экономически целесообразно использование фотокамер со сменными объективами. В этом случае необходимо учитывать возможное несоответствие размеров поля зрения объектива и светочувствительной матрицы, приводящее к падению резкости и виньетированию по краям изображения. Для расчетов параметров АФС необходимы анализ и определение эффективного формата кадра изображения. Эффективный формат задается в зависимости от соотношения геометрических параметров сменного объектива и светочувствительной матрицы; характеристик качества изображения объектива, уровня и характера его aberrаций; требуемой точности результатов дальнейшей обработки.

4. Для оценки максимально возможного изобразительного качества фотоматериалов следует определять два параметра – дифракционный предел достижимой резкости и теоретическую разрешающую способность системы «объектив – светочувствительная матрица». На основе полученных оценок и требований к изобразительному качеству материалов производятся итерационная корректировка геометрических и экспозиционных параметров АФС и априорная оценка точности ПФТ.

5. Расчет экспозиционного треугольника «выдержка – диафрагма – светочувствительность» следует выполнять в определенной последовательности, исходя из заданного смаза изображения, скорости движения и угловых скоростей изменения ориентации БВС, геометрических характеристик фотокамеры, уровня освещения местности, требований к изобразительным характеристикам изображения. Задаваемый смаз изображения за движение БВС должен быть сопоставим с дифракционным пределом достижимой резкости. Экспозиционные параметры подлежат уточнению непосредственно перед полетом, исходя из фактической освещенности местности.

6. Использование фотокамер с режимом автоматического управления экспозицией является предпочтительным. В этом случае перед полетом на фотокамере следует устанавливать приоритет выдержки. При правильно рассчитанных экспозиционных параметрах ISO в полете будет изменяться от минимальных значений на увеличение (если позволяет режим), а диафрагма – от средних положений шкалы. При отсутствии АРУЭ оператору по-

летов следует периодически вносить поправки за освещенность с высоты полета БВС, а также сокращать полетное время до одного часа для внесения текущих поправок.

7. При АФС высотных объектов с расстояний, близких к гиперфокальному, необходима проверка соотношений высоты снимаемого объекта, высоты фотографирования, верхней и нижней границ ГРИП с целью определения частей объекта, попадающих в область рассеяния для возможной корректировки параметров аэрофотосъемки или замены объектива фотокамеры. Задаваемый для расчета ГРИП кружок рассеяния должен быть сопоставим с дифракционным пределом достижимой резкости.

Заключение

В целом предлагаемый метод проектирования аэрофотосъемочных работ заключается в итерационном процессе моделирования параметров АФС на основе данных о снимаемой местности, требований заказчика к точности, разрешению и изобразительному качеству фотограмметрической продукции – с одной стороны, и характеристик БВС, дополнительного оборудования и используемой фотоаппаратуры – с другой.

Разработанная автором программа «Проектирование аэрофотосъемочных работ» позволяет учитывать особенности аэрофотосъемки с БВС с точки зрения теории классических основ АФС, фотограмметрии и формирования изображений оптических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рынок дронов в России и в мире, 2017 г. (беспилотные летательные аппараты, БЛА, БПЛА). Аналитика ИКТ и Digital Media. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/gynok-dronov-v-rossii-i-v-mire-2017-g-bespilotnye-letatelnye-apparaty-bla-bpla-20180427124557 (дата обращения: 26.06.2019).
2. Анализ существующего состояния международного и отечественного рынка применений БАС гражданского назначения [Электронный ресурс] // Аэронет. – 2019. – Режим доступа: http://nti-aeronet.ru/?attachment_id=2631 (дата обращения: 16.05.2020).
3. Воронов Я. Г., Дуденков В. И., Ивановский А. А. и др. Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях (РАФ-89) / Под ред. Н. М. Мешалова. – М. : Редакционно-издательский отдел ВТУ ГШ, 1989. – 105 с.
4. Полетаев Ю. И., Божко С. В., Попов А. А., и др. Руководство по аэрофотосъемочным работам / Под ред. Н. Ю. Ладановой. – М. : Воздушный транспорт, 1988. – 334 с.

5. Li X. L. Yang Design and Implementation of UAV Intelligent Aerial Photography System // 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Nanchang, Jiangxi. – 2012. – P. 200–203. doi: 10.1109/IHMSC.2012.144.
6. Pepe M., Fregonese L., Scaioni M. Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors // European Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 51(1). – P. 412–436. doi: 10.1080/22797254.2018.1444945.
7. Кадничанский С. А. Обоснование оптимальных параметров цифровой аэрофотокамеры // Геодезия и картография. – 2016. – № 6. – С. 49–56. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-912-6-49-56.
8. Kraus K. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. Walter de Gruyter. – 2nd ed. – Germany, 2007. – 459 p.
9. Черный М. А. Авиационная астрономия. – М. : Транспорт, 1978. – 208 с.
10. Допустимые расстояния между жилыми домами. УК-Управдом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn---8sbgi0aqnej0ac.xn--plai/dopustimye-rasstoyaniya-mezhdu-zhilyimi-domami/> (дата обращения: 28.06.2019).
11. Шаронов В. В. Таблицы для расчета природной освещенности и видимости. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1945. – 197 с.
12. Павлов В. И. Фотограмметрия. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары снимков. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. горный ин-т, 2006. – 175 с.
13. Михайлов А. П., Монтель Андраде Э. Р., Мануэль Де Хесус П. В. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 30–32.
14. Экспозиция в фотографии. Принципы фотографии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.64bita.ru/tableex.html> (дата обращения: 01.07.2019).
15. Значение диафрагмы и его влияние на качество. TakeFoto.ru: Все о цифровой фотографии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.takefoto.ru/articles/raznoe/1041_znachenie_diafragmy_i_ego_vliyanie_na_kachestvo_fotografii (дата обращения: 01.07.2019).
16. Коронкевич В. П. Формирование изображения в оптических системах : учеб. пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2005. – 76 с.
17. Аникеева И. А., Кадничанский С. А. Оценка фактической разрешающей способности аэро- и космических фотоснимков по пограничной кривой // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78. – № 6. – С. 25–36. doi: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36.
18. Аникеева И. А. Показатель фотографической резкости аэро- и космических изображений, получаемых для целей картографирования // Геодезия и картография. – 2020. – № 6. – С. 35–44. doi: 10.22389/0016-7126-2020-960-6-35-44.
19. Хлебникова Т. А., Опритова О. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 119–129.
20. Xie F., Lin Z., Gui D., Lin H. Study on construction of 3D building based on UAV images // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012. – Vol. XXXIX-B1. – P. 469–473.
21. Митчел Э. Фотография / Пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 420 с.

Получено 25.11.2020

© В. И. Юрченко, 2021

DESIGN PECULIARITIES OF THE AERIAL PHOTOGRAPHY FROM AN UNMANNED AIRCRAFT

Vladislav I. Yurchenko

LLC "Geostart", 44, Nekrasova St., 630005, Novosibirsk, Russia, Technical Director, e-mail: vlyurchenko2372@gmail.com

The existing publicly available programs for the design of unmanned aerial vehicle (UAV) flights assume an initial level of personnel training and do not provide for a detailed study of the aerial photography project

(APP) in terms of photogrammetric and visual (photographic) quality of photographic materials, requirements of regulatory documents for the accuracy of the final product. In order to achieve the topographic quality of the APP with UAV, it is necessary to take into account a number of its features. The paper considers the issues of determining the optimal duration of the aerial photography day and the effective image format when using interchangeable lenses. It also provides the recommended procedure for calculating the parameters of the topographic APP, taking into account the data of the exposure triangle "shutter speed - aperture - photosensitivity (ISO)", requirements for the maximum quality and theoretical resolution of the "lens - digital image" system. The technique of determining the position of high-rise objects relative to the boundaries of the depth of field (DOF) at given exposure parameters of the camera and the possibility of their correction is described. Based on the theoretical provisions, the author has developed a program that allows it possible to carry out the comprehensive design of aerial photography works with UAVs, including consumer cameras to obtain results of topographic quality. According to the results of the carried out research, it was concluded that an iterative approach to the design of APP parameters is necessary based on the data on shoot location, the customer's requirements for accuracy, the characteristics of the UAV, and the used photographic equipment.

Keywords: aerial photography day, hyperfocal distance, diffraction limit of sharpness, Airy disk, permissible shadow ratio, Rayleigh criterion, Fresnel rings, aerial photography design, theoretical resolution, exposure triangle, effective image format

REFERENCES

1. The drone market in Russia and in the world, 2017 (unmanned aerial vehicles, UAVs, UAVs). ICT Analytics and Digital Media. Retrieved from http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-dronov-v-rossii-iv-mire-2017-g-bspilotnye-letatelnye-apparaty-bla-bpla-20180427124557 (accessed 06.26.2019).
2. Analysis of the current state of the international and domestic market for civil BAS applications. Aeronet. (2019). Retrieved from http://nti-aeronet.ru/?attachment_id=2631 (accessed 16.05.2020).
3. Voronov, Ya. G., Dudenkov, V. I., Ivanovskiy, A. A., & et al. (1989). *Rukovodstvo po aerofotos"emke v kartograficheskikh tselyakh (RAF-89) [Guidelines for aerial photography for cartographic purposes (RAF-89)]*. N. M. Meshalov (Ed.). Moscow: Military Topographic Directorate of the General Staff Publ., 105 p. [in Russian].
4. Poletaev, Yu. I., Bozhko, S. V., Popov A. A., & et al. (1988). *Rukovodstvo po aerofotos"emochnym rabotam [Guidance on aerial photography]*. N. Yu. Ladanova (Ed.). Moscow: Vozdushnyy transport Publ., 334 p. [in Russian].
5. Li, X., & Yang, L. (2012). Design and Implementation of UAV Intelligent Aerial Photography System. *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics* (pp. 200–203). Nanchang, Jiangxi. doi: 10.1109/IHMSC.2012.144.
6. Pepe, M., Fregonese, L., & Scaioni, M. (2018). Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 412–436. doi: 10.1080/22797254.2018.1444945.
7. Kadnichansky, S. A. (2013). Substantiation of the permissible height of photography in stereotopographic survey of the relief. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 31–35 [in Russian].
8. Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. Walter de Gruyter (2nd ed.). Germany, 459 p.
9. Cherny, M. A. (1978). *Aviatsionnaya astronomiya [Aviation astronomy]*. Moscow: Transport Publ., 208 p. [in Russian].
10. Allowable distances between residential buildings. UK-Manager. (n. d.). Retrieved from <https://xn----8sbgi0aqnej0ac.xn--p1ai/dopustimye-rasstoyaniya-mezhdu-zhilyimi-domami/> (accessed 28.06.2019).
11. Sharonov, V. V. (1945). *Tablitsy dlya rascheta prirodnoy osveshchennosti i vidimosti [Tables for calculating natural illumination and visibility]*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 197 p. [in Russian].
12. Pavlov, V. I. (2006). *Fotogrammetriya. Teoriya odinochnogo snimka i stereoskopicheskoy pary snimkov [Photogrammetry. The theory of a single image and a stereoscopic pair of images]*. Saint Petersburg: St. Petersburg State Mining Institute, 175 p. [in Russian].
13. Mikhailov, A. P., Montel Andrade, E. R., & Manuel de Jesus, P. V. (2013). Application of digital cameras with the storm slit shutter for performance of aerial photography from lightengine and unmanned

aerial vehicles. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 30–32 [in Russian].

14. Exposition in photography. Principles of photography. (n. d.). Retrieved from <https://www.64bita.ru/tablex.html> (accessed 01.07.2019).

15. Aperture value and its impact on quality. TakeFoto.ru: Everything about digital photography. (n. d.). Retrieved from https://www.takefoto.ru/articles/raznoe/1041_znachenie_diafragmy_i_ego_vliyanie_na_kachestvo_fotografii (accessed 01.07.2019).

16. Koronkevich, V. P. (2005). *Formirovanie izobrazheniya v opticheskikh sistemakh [Image formation in optical systems]*. Novosibirsk: NSTU Publ., 76 p. [in Russian].

17. Anikeeva, I. A., & Kadnichanskiy, S. A. (2017). Assessment of the actual resolution of aerial and space photographs along the boundary curve. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 78(6), 25–36. doi: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36 [in Russian].

18. Anikeeva, I. A. (2020). Indicator of photographic sharpness of aerial and space images obtained for mapping purposes. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 35–44 [in Russian]. doi: 10.22389/0016-7126-2020-960-6-35-44.

19. Khlebnikova, T. A., & Opritova, O. A. (2018). Experimental studies of the accuracy of the construction of a dense digital model based on the materials of an unmanned aircraft system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 119–129 [in Russian].

20. Xie, F., Lin, Z., Gui, D., & Lin, H. (2012). Study on construction of 3D building based on UAV images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B1*, 469–473.

21. Mitchel, E. (1988). *Fotografiya [Photography]* (Trans.). Moscow: Mir Publ., 420 p. [in Russian].

Received 25.11.2020

© V. I. Yurchenko, 2021