

УДК 528.067

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-318-326

ПОДХОД К ВЕДЕНИЮ АЭРОСЪЕМКИ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОНОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КАМЕР

А.Н. Григорьев, А.И. Алтухов, Д.С. Коршунов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
 Адрес для переписки: korshunov.denis@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.03.20, принята к печати 05.05.20
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к ведению аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 318–326. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-318-326

Аннотация

Предмет исследования. В статье предложен подход к ведению аэросъемки местности, обеспечивающий фотограмметрическое качество снимков, необходимое для создания ортофотопланов с высоким картографическим подобием. Актуальность подхода определяется снижением картографического подобия ортофотопланов местности в случае автоматизированной обработки снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата в условиях возмущенного полета. В частности, на ортофотопланах формируются артефакты, снижающие адекватность представления местности на изображении и препятствующие корректному визуальному дешифрированию изображений. Предложенный авторами подход обеспечивает получение плановых снимков местности, в результате автоматизированной обработки которых формируются ортофотопланы местности с улучшенным картографическим подобием. **Описание подхода.** В основу подхода к ведению аэросъемки местности положена идея использования компоновки оптико-электронных камер, функционирование которых реализуется на основе анализа данных навигационных измерений. Предложенный подход позволяет минимизировать перспективные геометрические искажения на снимках, возникающие в процессе полета при выполнении разворотов беспилотным летательным аппаратом по тангажу, крену и рысканию. Этим обеспечивается выполнение условий плановой аэросъемки и, как следствие, получение аэроснимков с требуемым фотограмметрическим качеством. Отсутствие перспективных геометрических искажений на снимках позволяет создать ортофотоплан местности без видимых искажений. **Основные результаты.** Разработана модель геометрических искажений аэроснимка, позволяющая анализировать влияние отклонения линии визирования оптико-электронной камеры от направления в надир на возникновение перспективных геометрических искажений на снимках. Приведены результаты расчетов параметров проекции кадра на земную поверхность для объективов с различным угловым полем зрения. На основе результатов анализа предложен подход к ведению аэросъемки с использованием компоновки оптико-электронных камер, обеспечивающей получение плановых снимков местности в условиях совершения маневров беспилотным летательным аппаратом. **Практическая значимость.** Подход к ведению аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер позволяет получать плановые снимки без использования дополнительных технических средств стабилизации съемочной аппаратуры, что обеспечивает сохранение аэродинамического качества планера беспилотного летательного аппарата. Кроме того, применение предложенного авторами технического решения сохранит передаточные характеристики объективов оптико-электронных камер, установленных в корпусе беспилотного летательного аппарата и функционирующих в условиях существенного изменения температуры окружающей среды. Результаты экспериментов демонстрируют повышение картографического подобия ортофотопланов при выборе для их создания снимков, полученных в условиях использования компоновки оптико-электронных камер для ведения аэросъемки.

Ключевые слова

аэросъемка, геометрические искажения снимков, компоновка оптико-электронных камер, плановый снимок

AERIAL MAPPING BASED ON ARRANGEMENT OF OPTICAL ELECTRON CAMERAS

A.N. Grigor'ev, A.I. Altukhov, D.S. Korshunov

Mozhayskiy Space Military Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation
Corresponding author: korshunov.denis@rambler.ru

Article info

Received 27.03.20, accepted 05.05.20

Article in Russian

For citation: Grigor'ev A.N., Altukhov A.I., Korshunov D.S. Aerial mapping based on arrangement of optical electron cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 318–326 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-318-326

Abstract

Subject of Research. The paper proposes an approach to aerial mapping that provides the photogrammetric quality of images necessary for creating orthophotoplans with high cartographic similarity. The topicality of the approach is determined by cartographic similarity reduction of the area orthophotoplans in case of automated processing of images obtained from an unmanned aerial vehicle in disturbed flight conditions. In particular, artifacts are formed on orthophotoplans that reduce the area representation adequacy in the image and prevent the correct visual interpretation of images. We propose an approach that provides planned area images, and after their automated processing orthophotoplans of places are formed with improved cartographic similarity. **Method.** The aerial mapping approach is based on the idea of applying the arrangement of optical-electronic cameras that analyze navigation measurement data. The proposed approach gives the possibility to minimize image perspective geometric distortions on pitch, roll and yaw that occur when an unmanned aircraft turns around during flight. Consequently, the conditions for planned aerial photography are met and, as a result, aerial images with the required photogrammetric quality are obtained. The absence of perspective geometric distortions in the images provides the creation of the area orthophotoplan without visible distortions. **Main Results.** A model of an aerial image geometric distortions has been developed that analyzes the effect of the optical-electronic camera sight line deviation from the direction to nadir on the occurrence of perspective geometric image distortions. Calculation results are presented for parameters of the frame projection on the earth surface for lenses with different angular fields of view. Following on from the results, an approach to aerial mapping is proposed using an optical-electronic camera arrangement that provides planned area images in the conditions of an unmanned aerial vehicle maneuvering. **Practical Relevance.** The arrangement of optoelectronic cameras in aerial mapping makes it possible to get planned images without additional technical means of shooting equipment stabilization and ensures the aerodynamic quality of an unmanned aerial vehicle airframe. In addition, the application of the proposed technical solution maintains the transfer characteristics of lenses of optoelectronic cameras installed in the body of an unmanned aerial vehicle and functioning in conditions of significant changes in the ambient temperature. The results of experiments demonstrate an increase in the cartographic similarity of orthophotoplans when selecting images obtained by applying the arrangement of optoelectronic cameras for aerial photography.

Keywords

aerial mapping, geometric image distortion, optoelectronic cameras arrangement, planned image

Введение

Снимки земной поверхности, получаемые беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), используются для создания ортофотопланов местности, широко применяемых при решении инженерных и научных задач. Снимки, пригодные для создания ортофотоплана, должны характеризоваться фотограмметрическим качеством, которое обеспечивается путем соблюдения определенных требований. К таким требованиям относится выполнение многомаршрутной плановой аэросъемки оптико-электронной камерой (ОЭК) с заданными продольным и поперечным перекрытиями [1].

Анализ снимков [2] показывает, если ОЭК заданным образом ориентирована и неподвижно закреплена во внутренней компоновке БПЛА самолетного типа, выполнение требований к ведению плановой аэросъемки на практике не обеспечивается. Это объясняется тем, что управление полетом БПЛА при выполнении многомаршрутной съемки осуществляется с использованием автопилота, функционирующего на основе заданного плана полета. Основу указанного плана составляет

идеальная траектория полета, определяемая заранее без учета нестационарности воздушных потоков в атмосфере. В реальных условиях полета на БПЛА воздействуют воздушные потоки в общем случае со случайными параметрами. При этом функционирование автопилота направлено на обеспечение близости реальной траектории полета к заданной идеальной траектории. В силу этого БПЛА в полете совершает вынужденные маневры, результатом которых становится отклонение линии визирования ОЭК от идеального направления в надир, что ведет к переходу от плановой аэросъемки местности к перспективной.

В режиме перспективной аэросъемки местности формируются перспективные геометрические искажения [3–5], обуславливающие снижение качества автоматизированной обработки снимков. В частности, наблюдается увеличение времени поиска общих точек на снимках и ухудшение точности их расстановки. Кроме того, в силу наличия геометрических искажений, результаты обработки снимков могут быть некорректны по картографическому подобию местности и ее изображения на ортофотоплане [6, 7].

В настоящее время компенсация нестабильности ориентации ОЭК в интересах ведения плановой аэросъемки обеспечивается путем использования дополнительных технических средств, корректирующих ориентацию ОЭК во время полета [1–3]. Однако, как показывает практика, использование стабилизирующих подвесов предполагает вынос ОЭК за пределы корпуса БПЛА, что негативно сказывается на аэродинамическом качестве планера за счет увеличения лобового сопротивления. В свою очередь БПЛА самолетного типа могут использоваться для аэрофотосъемки с разных высот и в разных климатических условиях, что обуславливает широкий диапазон температур эксплуатации ОЭК. При этом технические решения для термостабилизации конструкции ОЭК, размещенной в открытом подвижном подвесе, существенно усложняются. Использование ОЭК при значительных вариациях температуры объектива вызывает изменение передаточной характеристики, определяющей нестабильность качества получаемых снимков.

Таким образом, актуально решение задачи получения снимков с борта БПЛА, фотограмметрическое качество которых позволяет с использованием автоматизированных методов создавать ортофотопланы местности с улучшенным картографическим подобием. Под картографическим подобием понимается соответствие положения объектов на ортофотоплане их действительному положению на местности, а также отражение взаимных соотношений с другими объектами, их характерные особенности и соподчиненность. В качестве условий решения этой задачи рассматривается сохранение аэродинамического качества планера БПЛА и обеспечение температурного режима функционирования ОЭК.

В статье предложен подход к ведению аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер (КОЭК), целью которого является повышение картографического подобия ортофотопланов местности. Реализация подхода предполагает разработку концепта КОЭК на основе результатов оценивания перспективных геометрических искажений снимков, возникающих при совершении маневров БПЛА. Применение КОЭК позволит получать плановые сним-

ки, пригодные для создания ортофотоплана местности автоматизированными методами.

Модель геометрических искажений аэроснимка

Наличие перспективных геометрических искажений на аэроснимках зависит от пространственного положения и ориентации ОЭК в момент съемки, которое описывается элементами внешнего и внутреннего ориентирования [1–3, 6]. Элементы внешнего ориентирования используются для описания положения кадра на местности P' , в частности в топоцентрической системе координат. К данной группе элементов относят (рис. 1, а): α — продольный угол наклона главной оптической оси ОЭК; ω — поперечный угол наклона главной оптической оси ОЭК; κ — угол разворота вокруг главной оптической оси ОЭК; $S(X, Y, Z)$ — топоцентрические координаты центра проекции (точки фотографирования); X', Y', Z' — оси системы координат ОЭК; x', y' — оси системы координат кадра на местности [8–10].

Элементы внутреннего ориентирования используются для описания положения центра проекции относительно плоскости изображения P . Плоскость изображения P представлена светочувствительной площадкой фотоприемного устройства, предназначенного для регистрации оптического изображения объекта. К таким элементам относят прямоугольные координаты главной точки оптической оси $O_0(y_0, x_0)$, лежащей в плоскости изображения и заднее фокусное расстояние объектива ОЭК f (рис. 1, б).

Примеры, представленные на рис. 2, показывают, что геометрическая форма границы кадра на местности P' зависит от значений углов продольного α и поперечного ω наклона главной оптической оси аппаратур, двигающейся в направлении V . В случае, когда главная оптическая ось направлена в нади́р H , форма границы кадра близка к правильному четырехугольнику $ABCD$. При отклонении главной оптической оси в указанных направлениях N рассматриваемая форма преобразуется в трапецию P'' . Имеющая место трансформация вызывает изменение соотношения сторон четырехугольника $ABCD$ и, как следствие, обуславливает возникновение геометрических искажений на аэроснимке. На практике

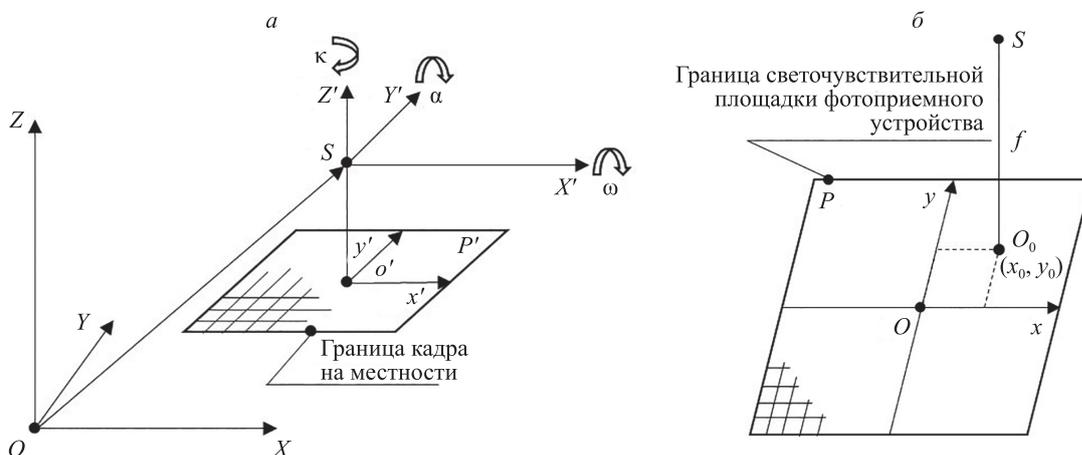


Рис. 1. Элементы ориентирования плоскости изображения: внешние (а) и внутренние (б)

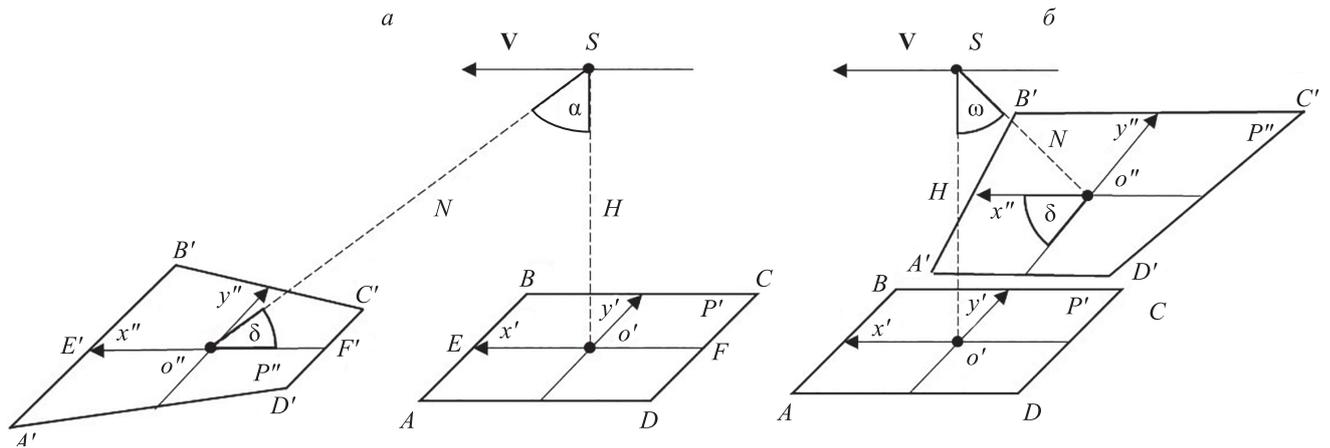


Рис. 2. Форма границы кадра на местности в случаях изменения: продольного угла α (а); поперечного угла ω (б)

это имеет место при смене планового режима аэросъемки на перспективный режим.

Связь между длиной сторон кадра $A'B'C'D'$ и значениями угловых элементов ориентирования ОЭК описывается функциями $AB' = f(\alpha, \omega)$, $CD' = f(\alpha, \omega)$, $BD' = f(\alpha, \omega)$, $AC' = f(\alpha, \omega)$. Графики функций, демонстрирующие изменение длин сторон кадра вследствие увеличения значения продольного угла наклона главной оптической оси ОЭК (табл. 1) приведены на рис. 3.

Расчеты длины сторон кадра $A'B'C'D'$ выполнены с использованием формул [2]:

$$\begin{aligned}
 AB' &= \frac{2h \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\delta - \frac{\beta}{2}\right)}; \\
 CD' &= \frac{2h \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\delta + \frac{\beta}{2}\right)}; \\
 AD' = BC' &= \frac{h \sin\beta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} \cos^2 \delta}}{\sin\left(\delta - \frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\delta + \frac{\beta}{2}\right)}, \\
 \delta &= \begin{cases} 180^\circ - (\alpha + 90^\circ), & \alpha \leq 45^\circ \\ 180^\circ - (\omega + 90^\circ), & \omega \leq 45^\circ \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где AB' — длина дальней поперечной стороны кадра на местности; CD' — длина ближней поперечной стороны кадра на местности; AD' , BC' — длина продольных сторон кадра на местности; β — угловое поле зрения аппаратуры; δ — угол прямого восхождения над плоскостью горизонта, h — высота аэросъемки.

В формулах (1) угловое поле зрения объектива β рассчитывается по формулам [6]:

$$\beta = 2 \arctg \frac{EF}{2h}; \quad EF = h \frac{l}{f};$$

где EF — длина кадра на местности при аэросъемке в надири; f — фокусное расстояние объектива; l —

длина светочувствительной площадки фотоприемного устройства.

Из графиков (рис. 3) видно, что в случае направления главной оптической оси ОЭК в надири, длины сторон кадра равны ($AB' = AD' = BC' = CD'$). При отклонении главной оптической оси на некоторый угол наблюдается существенное изменение длин продольных ($AD' = BC'$) и поперечных (AB' , CD') сторон кадра (табл. 2).

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, демонстрируют, что при выборе объективов с угловым полем зрения $15\text{--}22^\circ$, длины сторон кадра на местности увеличиваются по мере изменения продольного угла наклона главной оптической оси α . Согласно теоретическим положениям фотограмметрии [1–3], данное геометрическое преобразование свидетельствует о формировании по всей площади кадра перспективных искажений. В случае выбора объективов с угловым полем зрения $40\text{--}84^\circ$, длина ближней поперечной стороны кадра CD' сокращается. Это свидетельствует о том, что в границах кадра присутствует фрагмент изображения без перспективных искажений.

Полученные результаты моделирования показывают, как отклонение линии визирования ОЭК от направления в надири обуславливает возникновение геометрических искажений на снимках. Вместе с тем получение частично плановых снимков местности с маневрирующего БПЛА без применения стабилизирующих подвесов можно обеспечить за счет использования широкоугольных объективов. Такой снимок будет содержать фрагмент с малыми геометрическими искажениями, который может использоваться для создания ортофотоплана местности, обладающего высоким картографическим подобием.

При этом процедура выделения плановых фрагментов из набора снимков требует дополнительной проработки. Предполагается, что выполнение этой процедуры увеличит затраты ресурсов для создания ортофотоплана. В этих условиях предлагается рассмотреть альтернативный подход к получению плановых снимков местности путем ведения плановой аэросъемки с использованием КОЭК, обладающих малым угловым полем зрения.

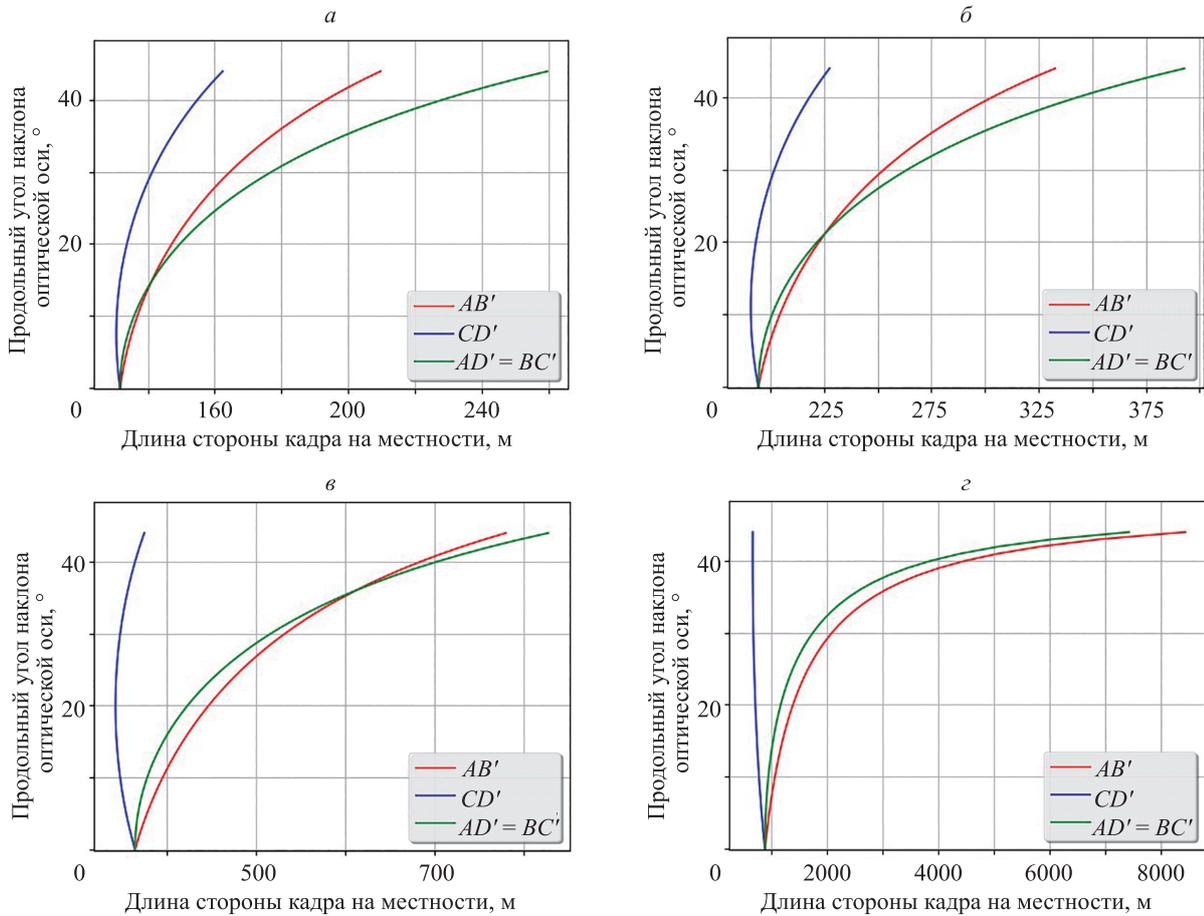


Рис. 3. Результаты вычислений длины сторон кадра на местности при разных значениях углового поля зрения объектива: 15° (а); 22° (б); 40° (в); 84° (з)

Таблица 1. Параметры съемки земной поверхности

Параметр	Значение
Высота полета летательного аппарата, м	500
Угловое поле зрения объектива, град.	15, 22, 40, 84
Продольный угол наклона главной оптической оси, град.	0–45
Поперечный угол наклона главной оптической оси, град.	0
Размер светочувствительной площадки фотоприемного устройства, мм	36 × 36
Фокусное расстояние объектива, мм	130, 90, 50, 20

Таблица 2. Длины сторон кадра для случаев плановой ($\alpha = 0^\circ$) и перспективной ($\alpha = 30^\circ$) съемки (в скобках), м

Сторона кадра	Угловое поле зрения β			
	15°	22°	40°	84°
AB (AB')	120 (164)	177 (225)	267 (532)	910 (2010)
AD (AD')	120 (176)	177 (260)	267 (515)	910 (1710)
BC (BC')	120 (176)	177 (260)	267 (515)	910 (1710)
CD (CD')	120 (143)	177 (205)	267 (236)	910 (681)

Подход к ведению аэросъемки с использованием компоновки оптико-электронных камер

Под широкоугольной ОЭК понимается устройство с объективом, угловое поле зрения которого превышает 40° [11–13]. Благодаря использованию такой камеры при аэросъемке существует возможность получения частично плановых снимков местности при отклонении главной оптической оси от направления в надир.

Результаты расчетов (рис. 3) демонстрируют, что на снимках, полученных с использованием широкоугольной ОЭК, присутствуют сильные геометрические искажения, вызванные особенностями формирования изображения по закону центрального проектирования. Такие искажения снижают качество автоматизированной обработки снимков и являются причиной формирования артефактов на получаемых ортофотопланах местности [13–15].

Предполагается, что существует возможность минимизации геометрических искажений и получения плановых снимков местности при маневрах БПЛА путем использования системы из определенного числа узкоугольных ОЭК, которые неподвижно закреплены во внутренней компоновке БПЛА. Оптические оси ОЭК развернуты на заданные углы в продольном, поперечном и диагональном направлениях относительно направления в надир при невозмущенном полете БПЛА. Вариант размещения КОЭК в корпусе БПЛА, приведен на рис. 4.

При использовании указанного варианта сохраняется аэродинамическое качество БПЛА, так как отсутствуют внешние элементы, увеличивающие лобовое сопротивление при полете. Кроме того, упрощается решение задачи по термостабилизации ОЭК, что обуславливает сохранение передаточных характеристик объективов независимо от температуры внешней среды. В рамках предлагаемого подхода с использованием КОЭК ведение аэросъемки предполагает динамический выбор активной ОЭК для регистрации снимка местности. Под активной понимается узкоугольная ОЭК,

реализующая в текущий момент времени наиболее близкую к плановой съемку. При разворотах БПЛА по углам крена и тангажа, приводящих к отклонению главной оптической оси объектива от направления в надир, выполняется смена активной ОЭК.

Выбор активной ОЭК выполняется по критерию наименьшего угла между главным и надирным лучами ϵ . Для расчета значения угла ϵ требуется решить фотограмметрическую задачу ориентирования плоскости изображения относительно земной поверхности, исходными данными для которой являются элементы внешнего ориентирования КОЭК. Суть решения задачи сводится к расчету топоцентрических координат главной точки по формулам, выражающим строгую зависимость между координатами точки местности и снимка [1–3]:

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{a_1 \left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \Sigma j}{2} \right) + a_2 \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \Sigma i}{2} \right) - a_3 f}{c_1 \left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \Sigma j}{2} \right) + c_2 \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \Sigma i}{2} \right) - c_3 f};$$

$$Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{b_1 \left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \Sigma j}{2} \right) + b_2 \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \Sigma i}{2} \right) - b_3 f}{c_1 \left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \Sigma j}{2} \right) + c_2 \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \Sigma i}{2} \right) - c_3 f},$$

где i, j — координаты пикселя в матрице цифрового изображения; i_0, j_0 — координаты пикселя в матрице цифрового изображения, через который проходит главная оптическая ось объектива камеры; Δ — физические размеры сторон пикселя цифрового изображения; X, Y, Z — топоцентрические координаты главной точки; X_S, Y_S, Z_S — топоцентрические координаты точки фотографирования; f — фокусное расстояние объектива камеры.

В формулах (2) $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ — направляющие косинусы углов между соответствующи-

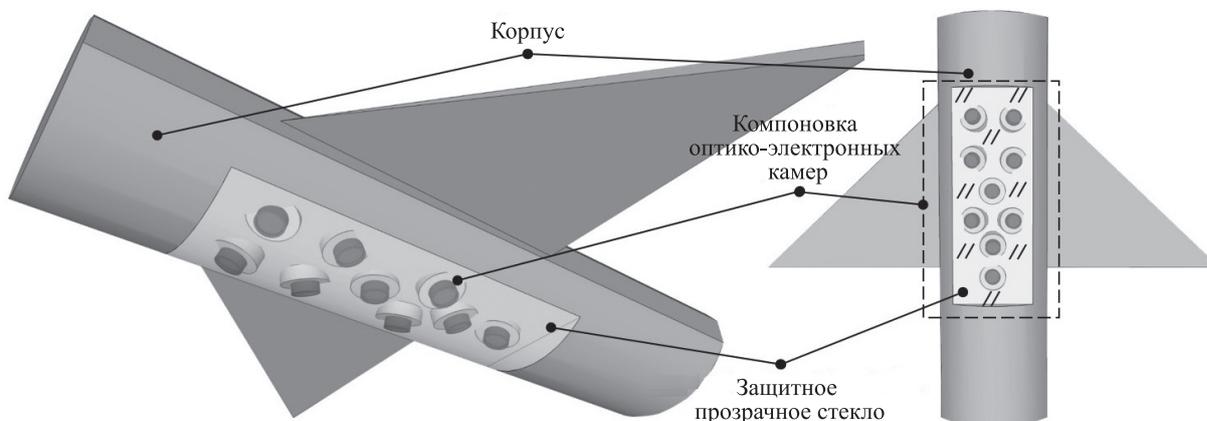


Рис. 4. Концепт размещения компоновки оптико-электронных камер на борту беспилотного летательного аппарата

ми осями систем координат, которые берут начало в точке фотографирования и на земной поверхности. Использование направляющих косинусов позволяет определить направления главных оптических осей ОЭК, размещенных в корпусе БПЛА, а также учесть возможные изменения положения БПЛА в пространстве. Расчет направляющих косинусов выполняется по формулам [1–3]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos(\alpha + \xi)\cos(\kappa + \gamma) - \sin(\alpha + \xi)\sin(\omega + \tau)\sin(\kappa + \gamma); \\ a_2 &= -\cos(\alpha + \xi)\sin(\kappa + \gamma) - \sin(\alpha + \xi)\sin(\omega + \tau)\cos(\kappa + \gamma); \\ a_3 &= -\sin(\alpha + \xi)\cos(\omega + \tau); \\ b_1 &= \cos(\omega + \tau)\sin(\kappa + \gamma); \\ b_2 &= \cos(\omega + \tau)\cos(\kappa + \gamma); \\ b_3 &= -\sin(\omega + \tau); \\ c_1 &= \sin(\alpha + \xi)\cos(\kappa + \gamma) + \cos(\alpha + \xi)\sin(\omega + \tau)\sin(\kappa + \gamma); \\ c_2 &= -\sin(\alpha + \xi)\sin(\kappa + \gamma) + \cos(\alpha + \xi)\sin(\omega + \tau)\cos(\kappa + \gamma); \\ c_3 &= \cos(\alpha + \xi)\cos(\omega + \tau), \end{aligned}$$

где α — продольный угол наклона главной оптической оси ОЭК; ξ — угол разворота БПЛА по тангажу; κ — угол разворота вокруг главной оптической оси ОЭК; γ — угол разворота БПЛА по азимуту; ω — поперечный угол наклона главной оптической оси ОЭК; τ — угол разворота БПЛА по крену.

По топоцентрическим координатам главной точки рассчитывается значение угла ε между главным и надирным лучами по формуле:

$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{L}{D}\right) = \arccos\left(\frac{\sqrt{(X_N - X)^2 + (Y_N - Y)^2}}{\sqrt{(X_S - X)^2 + (Y_S - Y)^2 + (Z_S - Z)^2}}\right),$$

где L — расстояние на местности от точки надира до главной точки; D — наклонная дальность; X_N, Y_N, Z_N — топоцентрические координаты точки надира на плоскости основания.

Схема вычислений, которые необходимо выполнить для выбора активной ОЭК, приведена на рис. 5.

Указанные вычисления выполняются непосредственно перед моментом регистрации снимка местности. Согласно схеме, значение угла ε между главным и надирным лучами рассчитывается N раз, где N — число ОЭК, входящих в состав КОЭК. Выбор активной ОЭК $n_{\text{акт}}$ выполняется по критерию минимального угла $\varepsilon_{\text{мин}}$, значение которого рассчитывается на основе данных о параметрах угловой ориентации БПЛА в воздушном пространстве, поправок за ориентацию ОЭК относительно корпуса БПЛА, а также ряда технических параметров, регистрируемых во время аэросъемки. Ряд параметров, необходимых для вычислений по схеме (рис. 5), регистрируется с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы.

Результатом аэросъемки с использованием КОЭК является набор плановых снимков, пригодных для создания ортофотоплана местности автоматизированными методами. На основе банков материалов аэросъемки выполнен эксперимент по формированию ортофотопланов местности. Выбор исходных снимков выполнен таким образом, чтобы имитировать предложенный и стандартный подходы к ведению аэросъемки местности. Фрагмент ортофотоплана, соответствующий первому из указанных вариантов, представлен на рис. 6, а. Для сравнения на рис. 6, б представлен фрагмент ортофотоплана местности, сформированного из снимков, полученных стандартным образом с использованием типового ОЭК.

Сравнение фрагментов ортофотопланов местности (рис. 6) показывает отсутствие артефактов (рис. 6, а), препятствующих дальнейшей тематической визуальной обработке изображений. Например, на фотоплане (рис. 6, б) наблюдаются сильные искажения геометрической формы объектов, размытости, а также артефакты, содержащие ложную информацию о свойствах местности. Таким образом, можно сделать вывод, что ведение плановой аэросъемки с использованием КОЭК позволяет получить снимки местности, характеризующиеся высоким фотограмметрическим качеством, и обеспечить формирование ортофотопланов с высоким картографическим подобием.

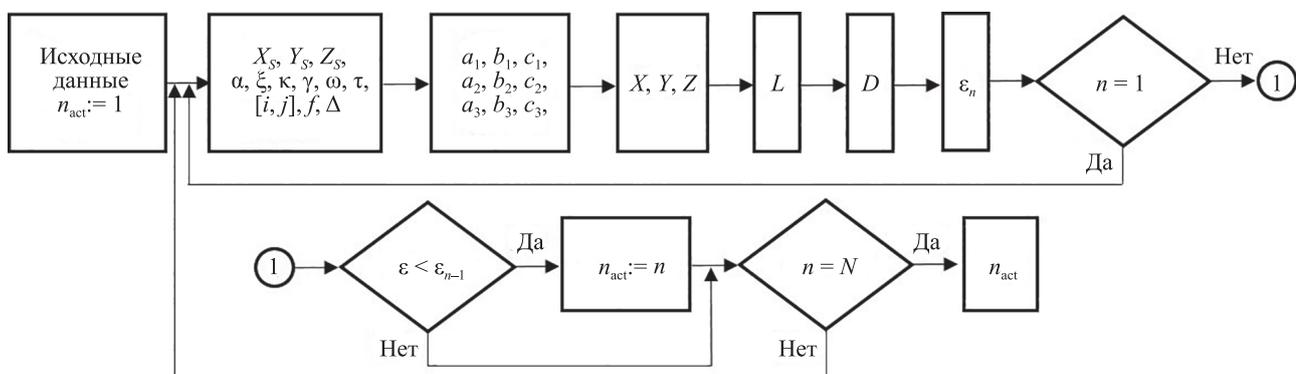


Рис. 5. Блок-схема алгоритма выбора активной оптико-электронной камеры

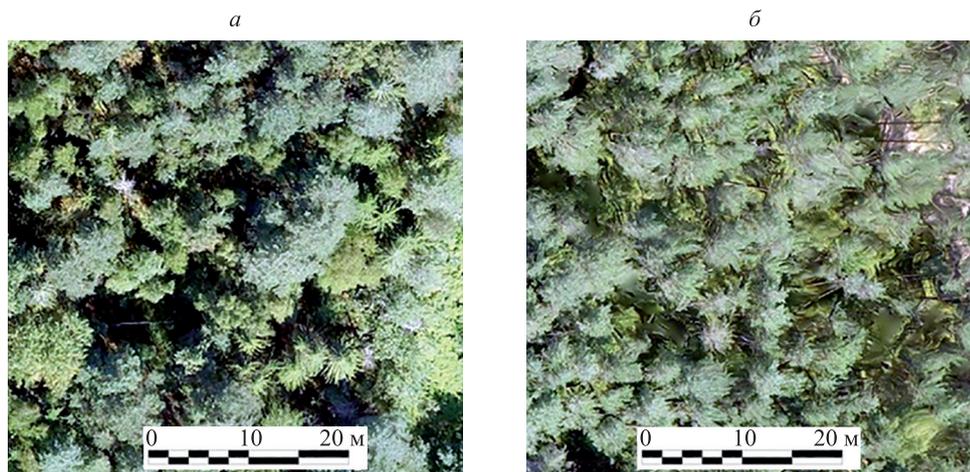


Рис. 6. Результаты обработки снимков местности, полученных в условиях, соответствующих: предложенному подходу (а) и стандартному подходу (б)

Заключение

В статье предложен подход к ведению плановой аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер. В частности, предложено использовать систему из определенного числа узкоугольных камер, установленных в корпус беспилотного летательного аппарата. Каждая камера имеет собственные заданные параметры ориентирования в пространстве. Плановая аэросъемка обеспечивается динамическим выбором активной узкоугольной камеры на основе данных навигационных измерений. Такое техническое решение позволяет получить снимки, обладающие высоким фотограмметрическим качеством и пригодные для создания ортофотопланов местности автоматизированными методами.

Достоинством предложенного подхода является то, что применение компоновки оптико-электронных камер

по отдельным свойствам упрощает конструкцию беспилотного летательного аппарата. Таким образом, для ведения плановой аэросъемки не требуется установка стабилизирующего подвеса, ухудшающего аэродинамическое качество беспилотного летательного аппарата. Также установка компоновки оптико-электронных камер в корпус беспилотного летательного аппарата обеспечивает изоляцию камер от внешней среды и стабильность передаточной характеристики объективов в условиях изменения температуры атмосферы.

Целесообразность использования предложенного подхода к ведению аэросъемки подтверждается результатами экспериментов по созданию ортофотопланов местности. В частности, результаты экспериментов показали, что наилучшим картографическим подобием характеризуются ортофотопланы, сформированные на основе снимков, полученных с использованием компоновки оптико-электронных камер.

Литература

1. Назаров А.С. Фотограмметрия: учебное пособие для студентов ВУЗов. Мн.: Тетра Системс, 2006. 368 с.
2. Моисеев В.С. Динамика полета и управление беспилотными летательными аппаратами: монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2017. 416 с. (Современная прикладная математика и информатика).
3. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции: учебно-методическое пособие для студентов физического факультета КГУ, обучающихся по специальности «Астрономогеодезия». Казань: КГУ, 2009. 86 с.
4. Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., Беляев А.С. Прогнозирование качества гиперспектральных снимков космических систем дистанционного зондирования // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. № 629. С. 143–147.
5. Веселов Ю.Г., Островский А.С., Сельвесюк Н.И., Красавин И.В. Оценка предельного разрешения цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли с использованием теории линейных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 84–89.
6. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: Бином, 2014. 234 с.
7. Алтухов А.И., Шабakov Е.И., Коршунов Д.С. Повышение качества изображений путем синтеза космических снимков с разной экспозицией // Научно-технический вестник информа-

References

1. Nazarov A.S. *Photogrammetry*. Tutorial. Minsk, Tetra Sistems Publ., 2006, 368 p. (in Russian)
2. Moiseev V.S. *Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Vehicles*. Kazan, Shkola Publ., 2017, 416 p. (in Russian)
3. Bezmenov V.M. *Photogrammetry. Creation and Adjustment of Analytical Triangulation*. Kazan, KFU, 2009, 86 p. (in Russian)
4. Grigorev A.N., Korshunov D.S., Beliaev A.S. Quality forecasting of hyperspectral images for space remote sensing systems. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2010, no. 629, pp. 143–147. (in Russian)
5. Veselov J.G., Ostrovskiy A.S., Selvesyuk N.I., Krasavin I.V. Estimation of the limiting resolution of digital optoelectronic systems of remote sensing using the theory of linear systems. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013, no. 3(140), pp. 84–89. (in Russian)
6. Baklanov A.I. *Observation and Monitoring Systems*. Moscow, BINOM Publ., 2014, 234 p. (in Russian)
7. Altuhov A.I., Shabakov E.I., Korshunov D.S. Increased image quality by synthesizing space photos with different exposures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 24–30. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-24-30
8. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and Detectors of Optical Radiation*. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 104 p.

- ционных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 24–30. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-24-30
8. Korotaev V.V., Maraev A.A. Sources and Detectors of Optical Radiation. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 104 p.
 9. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
 10. Vasiliev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images // Proceedings of SPIE. 2015. V. 9530. P. 953007. doi: 10.1117/12.2184554
 11. Григорьев А.Н., Дудин Е.А., Коршунов Д.С., Октябрьский В.В. Концептуальная и аналитическая модели ведения оптико-электронной съемки с априорной экспонетрией на борту космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 128–138. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-128-138
 12. Занин К.А. Выбор параметров оптико-электронной космической системы наблюдения по качеству изображения // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 11. С. 30–37.
 13. Васильев А.С., Коротаев В.В., Краснящих А.В., Лашманов О.Ю., Ненарокомов О.Н. Совмещение тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 12–16.
 14. Васильев А.С., Краснящих А.В., Коротаев В.В., Лашманов О.Ю., Лысенко Д.Ю., Ненарокомов О.Н., Широков А.С., Ярышев С.Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 12. С. 50–56.
 15. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
 9. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. *Solid-State Matrix Photoconverters and Cameras Based on Them*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 98 p. (in Russian)
 10. Vasiliev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9530, pp. 953007. doi: 10.1117/12.2184554
 11. Grigoriev A.N., Dudin E.A., Korshunov D.S., Oktiabrskii V.V. The conceptual and analytical models of optoelectronic survey with prior exposure metering on board a spacecraft. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 128–138. (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-128-138
 12. Zanin K.A. Image quality based selection of parameters of optical-electronic space observation system. *All-Russian Scientific and Technical Journal "Polyot" ("Flight")*, 2007, no. 11, pp. 30–37. (in Russian)
 13. Vasiliev A.S., Korotaev V.V., Krasnyashchikh A.V., Lashmanov O.Yu., Nenarokomov O.N. Superposition of thermal and television images in examination of building units and constructions. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 4, pp. 12–16. (in Russian)
 14. Vasiliev A.S., Krasnyashchikh A.V., Korotaev V.V., Lashmanov O. Yu., Lysenko D. Yu., Nenarokomov O.N., Shirokov A.S., Yaryshev S.N. Unmanned aerial vehicle computer system for wildfire detection by image superimposing. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 12, pp. 50–56. (in Russian)
 15. Krasilnikov N.N. *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg, BHV Publ., 2011, 608 p. (in Russian)

Авторы

Григорьев Андрей Николаевич — доктор технических наук, доцент, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, Scopus ID: 57200211777, ORCID ID: 0000-0001-6941-6475, Grig-AN@ya.ru

Алтухов Александр Иванович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4105-0296, aai_51@mail.ru

Коршунов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6344-2533, korshunov.denis@rambler.ru

Authors

Andrey N. Grigor'ev — D.Sc., Associate Professor, Associate Professor, Mozhayskiy Space Military Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, Scopus ID: 57200211777, ORCID ID: 0000-0001-6941-6475, Grig-AN@ya.ru

Alexander I. Altukhov — PhD, Associate Professor, Head of Chair, Mozhayskiy Space Military Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4105-0296, aai_51@mail.ru

Denis S. Korshunov — PhD, Senior Lecturer, Mozhayskiy Space Military Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6344-2533, korshunov.denis@rambler.ru