



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222

EDN: VNZREN

УДК 528.851:528.88

Научная статья / Research article

Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам

В.Г. Андронов  , А.А. Чуев , Н.С. Дубровский 

Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация

 vladia58@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 января 2023 г.

Доработана: 12 апреля 2023 г.

Принята к публикации: 15 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

аэрофотосъемка, навигация,
параллакс изображений,
инерциальные измерения,
потеря спутниковых сигналов

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. В настоящее время широко используются беспилотные летательные аппараты, навигация которых основывается на данных бортовых интегрированных систем, включающих в себя инерциальные и спутниковые датчики. При этом для решения многих целевых задач обеспечивается их предварительный выход в заданную точку маршрута полета по кратчайшей горизонтальной траектории. Однако на практике возможны ситуации, когда получаемая от навигационных спутников информация может перестать быть доступной, что приводит к снижению точности навигации. Рассмотрена методика детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от навигационных спутников по снимкам подстилающей поверхности. В качестве критерия, свидетельствующего о возникновении отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, предложено использовать изменение параллаксов смежных пар снимков. Представлены аналитические соотношения, описывающие функциональную связь изменений параллаксов снимков и параметров линейных и угловых отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и учитывающие все возможные варианты этих отклонений. Полученные результаты позволяют путем моделирования выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории. Основываясь на этой оценке, можно повысить точность детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Для цитирования

Андронов В.Г., Чуев А.А., Дубровский Н.С. Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 213–222. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>



Detection of unmanned aerial vehicle trajectory using overlapping images

Vladimir G. Andronov , Andrey A. Chuev ,
Nikita S. Dubrovsky 

Southwest State University, Kursk, Russian Federation

 vladia58@mail.ru

Article history

Received: January 16, 2023

Revised: April 12, 2023

Accepted: April 15, 2023

Keywords:

aerial photography, navigation,
image parallax, inertial measurements,
loss of satellite signals

Conflicts of interest

The authors declare that there
is no conflict of interest.

Abstract. Currently, unmanned aerial vehicles are widely used with navigation based on data from onboard integrated systems including inertial and satellite sensors. In this case, to solve many target tasks, their preliminary exit to a given point of the flight route along the shortest horizontal trajectory is provided. However, in practice, there may be situations when the information received from navigation satellites may no longer be available, which leads to a decrease in navigation accuracy. Considered a technique for detecting the trajectory of unmanned aerial vehicles under conditions of loss of signals from navigation satellites using the underlying surface images. As a criterion indicating the occurrence of deviations of unmanned aerial vehicles from a specified trajectory, it is proposed to use the change in parallaxes of adjacent pairs of images. Analytical relations describing the functional relationship between changes in image parallaxes and parameters of linear and angular deviations of unmanned aerial vehicles from a specified trajectory. All possible options of these deviations are also considered. The obtained results provide an a priori estimate of the threshold value of parallax changes corresponding to the acceptable level of unmanned aerial vehicles deviations from the specified trajectory by means of modelling. Based on this estimate, it is possible to improve the accuracy of trajectory detection of unmanned aerial vehicles under conditions of loss of signals from navigation satellites.

For citation

Andronov VG, Chuev AA, Dubrovsky NS. Detection of unmanned aerial vehicle trajectory using overlapping images. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):213–222. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>

Введение

Для навигационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в интересах дистанционного зондирования наземных объектов широко применяются интегрированные системы, включающие в себя бортовые инерциальные датчики и приемники спутниковой информации GPS и/или ГЛОНАСС [1–3]. Необходимость использования спутниковых сигналов обусловлена зависимостью точности инерциальных датчиков от длительности их автономной работы, что связано с накоплением ошибок измерений [4–8]. В частности, в [9] представлены данные экспериментальных исследований точности навигации малоразмерных БЛА, которые свидетельствуют о стремительном росте уровня ошибок инерциальных измерений в случае нештатной потери сигналов от спутников (табл. 1).

Для использования БЛА по целевому назначению часто предусматривается их предварительный выход в заданную точку маршрута по кратчайшей горизонтальной прямолинейной траектории. Очевидно, что в условиях потери сигналов от спутников могут возникнуть существенные отклонения БЛА от заданной траектории, снижающие эффективность решения целевых задач. В этой связи актуальна разработка методик детектирования траектории БЛА по дополнительной информации, в частности по регистрируемому в процессе полета изображению подстилающей поверхности [10–13]. Здесь и далее под детектированием траектории будем понимать проверку наличия ее отклонений от горизонтального маршрута полета в задачах навигационного обеспечения выхода БЛА в заданную точку маршрута полета.

Таблица 1

Ошибки при горизонтальном полете БЛА		
Погрешности в штатном режиме полета		Погрешности инерциальных измерений через пять минут после потери сигналов от спутников
Углы тангажа и крена, °	0,1	0,4
Угол рыскания, °	0,2	3,0
Высота полета БЛА, м	2,0	6,0
Путевая скорость, м\с	0,2	5,0
Координаты, м	6	500

Table 1

Errors during horizontal flight of UAVs		
Errors in normal flight mode		Errors in inertial measurements five minutes after the loss of satellite signals
Pitch and roll angles, °	0.1	0.4
Yaw angle,	0.2	3.0
UAV flight altitude, m	2.0	6.0
Ground speed, m/s	0.2	5.0
Coordinates, m	6	500

1. Анализ известных методов, цель и задачи исследования

Суть известных фотограмметрических методов обработки изображений подстилающей поверхности на борту БЛА в интересах их навигации сводится к нахождению их элементов внешнего или взаимного ориентирования [14–16]. Первый подход основан на методе обратной фотограмметрической засечки по одиночным или перекрывающимся изображениям, второй — на свойствах компланарности векторов, соединяющих центры проекций и соответственные пары точек в зоне перекрытия снимков. Однако, поскольку задача детектирования должна решаться непрерывно на всем участке полета БЛА к заданной точке их целевого применения, применение этих методов требует многократного определения параметров ориентации БЛА с использованием достаточно существенных вычислительных затрат. В ряде случаев эти вычислительные ресурсы целесообразно направить на реализацию других задач, особенно на борту малоразмерных БЛА [12]. В этой связи целью исследования является разработка методики, обеспечивающей возможность детектирования траектории горизонтального полета БЛА по перекрывающимся изображениям подстилающей поверхности без определения абсолютных значений их элементов внешнего или взаимного ориентиро-

вания. Для этого необходимо решить следующие основные задачи: выполнить математическое описание взаимной ориентации систем координат (СК) БЛА и изображений, получить аналитические соотношения, описывающие функциональную связь изменений параллаксов изображений и отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории, найти оценки степени влияния этих отклонений на уровень изменений параллаксов. Рассмотрим содержание и результаты решения этих задач.

2. Взаимная ориентация беспилотных летательных аппаратов и изображений

Будем, как и в [11], считать, что в штатном режиме БЛА принимает и использует сигналы от навигационных спутников, заданная траектория полета представляет собой прямолинейный маршрут r , параллельный плоскости местного горизонта, и в процессе полета производится аэрофотосъемка с заданным процентом перекрытия снимков P_j, P_{j+1} (рис. 1).

Поскольку площадь регистрируемых территорий в полосе захвата смежных пар горизонтальных снимков (P_j, P_{j+1}) , (P_{j+2}, P_{j+3}) достаточно мала, изменениями рельефа местности в ее пределах можно пренебречь и считать, что эти снимки получены с одинаковой высоты. Положим также, что в какой-то момент времени $T = T_1$

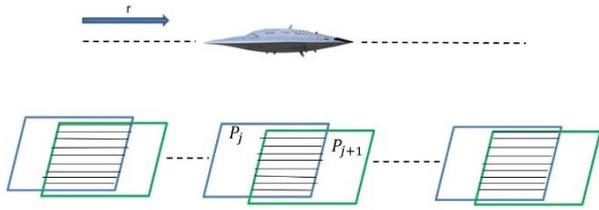


Рис. 1. Заданная траектория БЛА
Figure 1. The specified UAV trajectory

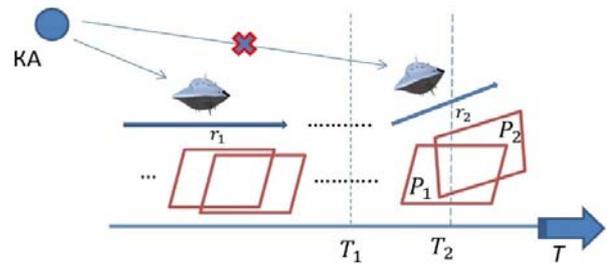


Рис. 2. Иллюстрация изменения заданной траектории полета БЛА
Figure 2. Illustration of a change in a specified UAV flight trajectory

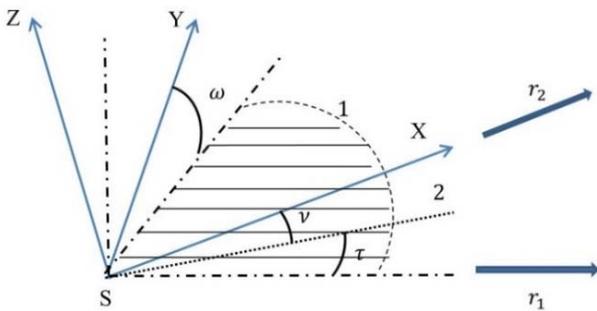


Рис. 3. Система координат SXYZ
Figure 3. SXYZ coordinate system

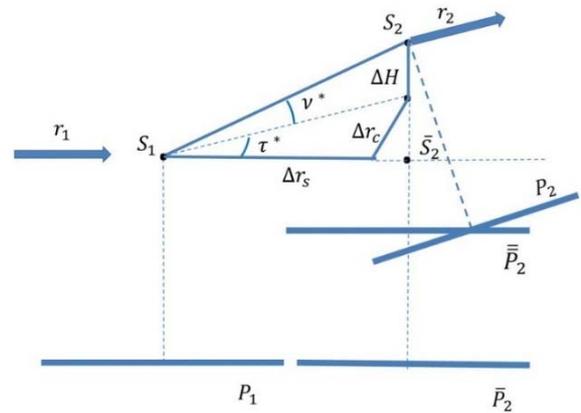


Рис. 4. Вариации отклонений БЛА
Figure 4. Variations of UAV deviations

полета БЛА по штатной горизонтальной траектории r_1 сигналы от спутников были потеряны, а в моменты $T = T_2$ и $T = T_2 + \Delta T$ получена пара перекрывающихся снимков P_1 и P_2 , причем первый — горизонтальный, а второй — плановый (рис. 2).

Введем связанную с осями инерции БЛА СК SXYZ (рис. 3) и определим его угловую ориентацию относительно земной поверхности.

В соответствии с российским государственным стандартом¹ угол ν между продольной осью БЛА SX и плоскостью местного горизонта l — это угол тангажа, угол крена ω — угол между поперечной осью БЛА SY и плоскостью l , а угол рыскания τ — угол между проекцией 2 нештатной траектории r_2 на плоскость l и штатной траекторией r_1 .

Очевидно, что при отсутствии отклонений текущего маршрута полета БЛА от штатной гори-

зонтальной траектории (см. рис. 1) углы тангажа и рыскания равны нулю. Положим для определенности, что в этом случае и угол крена равен нулю. Поскольку в момент получения второго снимка пары P_1 и P_2 в общем случае возможны отклонения траектории по высоте ΔH и/или курсу Δr_c полета и/или изменения ориентации БЛА по углам ν , ω и τ (рис. 4). Тогда условимся, что обозначение P_2 второго снимка на рис. 4 означает наличие в момент его получения отклонений траектории БЛА по высоте и направлению полета с изменением его ориентации, \bar{P}_2 — по высоте и направлению полета без изменения ориентации, а \bar{P}_2 — отсутствие отклонений, как по высоте и направлению полета, так и изменений ориентации.

При этом линейные отклонения ΔH , Δr_c от заданной траектории r_1 по высоте и направлению

¹ ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения (с поправками). М.: Издательство стандартов, 1981. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-20058-80>.

полета и углы ориентации v^*, τ^* базиса $S_1 S_2$ съемки связаны соотношениями:

$$\Delta H = \Delta r_S \operatorname{tg} v^* / \cos \tau^*; \quad (1)$$

$$\Delta r_c = \Delta r_S \operatorname{tg} \tau^*, \quad (2)$$

где Δr_S — расстояние между центрами проекции S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

Положим также, что оси СК снимков $P_1, P_2, \bar{P}_2, \bar{\bar{P}}_2$ параллельны осям СК, связанных с БЛА в моменты их получения. Тогда оси СК горизонтальных снимков будут параллельны осям фотограмметрической СК земной поверхности $OXYZ$, а углы тангажа v , крена ω и рыскания τ , определяющие ориентацию БЛА относительно этой СК, являются в то же время углами взаимной ориентации снимков P_1 и P_2, P_2 и $\bar{\bar{P}}_2$ (рис. 5).

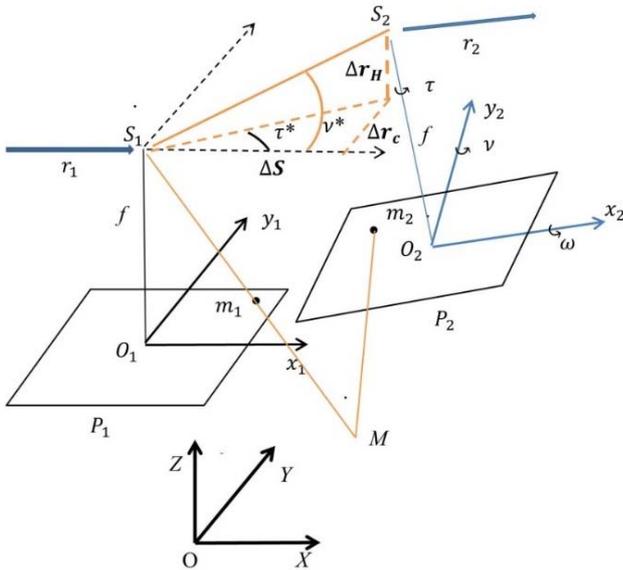


Рис. 5. Координатное пространство
Figure 5. Coordinate space

Учитывая изложенное, угловая ориентация БЛА в нештатном режиме будет определяться взаимной ориентацией осей СК $O_1 x_1 y_1$ и $O_2 x_2 y_2$ или осей СК $O_2 x_2 y_2$ и $\bar{\bar{O}}_2 \bar{x}_2 \bar{y}_2$, и описываться известной матрицей направляющих косинусов [11]:

$$A = A_v A_\omega A_\tau, \quad (3)$$

где:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix},$$

$$A_v = \begin{vmatrix} \cos v & 0 & -\sin v \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin v & 0 & \cos v \end{vmatrix},$$

$$A_\omega = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix},$$

$$A_\tau = \begin{vmatrix} \cos \tau & \sin \tau & 0 \\ -\sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos v \cos \tau - \sin v \sin \omega \sin \tau, \\ a_{12} &= -\cos v \sin \tau - \sin v \sin \omega \cos \tau, \\ a_{13} &= -\sin v \cos \omega, \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \tau, \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \tau, \\ a_{23} &= -\sin \omega, \\ a_{31} &= \sin v \cos \tau + \cos v \sin \omega \sin \tau, \\ a_{32} &= -\sin v \sin \tau + \cos v \sin \omega \cos \tau, \\ a_{33} &= \cos v \cos \omega. \end{aligned} \quad (5)$$

3. Математическая модель детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов

Для получения аналитических соотношений, описывающих модель детектирования траектории БЛА, отметим следующее. Для параллаксов перекрывающихся горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полета БЛА, можно записать², что

$$\begin{cases} p_{ш} = p_{j,j+1} = x_j - x_{j+1} = \text{const}; \\ q_{ш} = q_{j,j+1} = y_j - y_{j+1} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку по условиям задачи справедливы соотношения $x_j - x_{j+1} = x_{j+2} - x_{j+3}$; $y_j - y_{j+1} = y_{j+2} - y_{j+3}$, отличие от нуля разностей продольных и поперечных параллаксов смежных пар снимков является критерием наличия отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории полета [11]. Тогда задача детектирования траектории БЛА сводится к последовательному

² Михайлов А.П. Фотограмметрия: учебник для вузов / под общей редакцией А.Г. Чибуничева. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2016. 294 с.

сравнению продольных и поперечных параллаксов каждой текущей смежной пары регистрируемых снимков. При этом горизонтальные снимки P_1 и \bar{P}_2 будут характеризоваться одинаковой высотой съемки H и углами взаимного ориентирования $\nu^* = \tau^* = 0$, $\nu = \omega = \tau = 0$, а снимки P_1 и P_2 — высотой съемки H и $H + \Delta H$ соответственно и углами взаимного ориентирования $\nu^* \neq 0, \tau^* \neq 0, \tau \neq 0, \omega \neq 0, \nu \neq 0$. Условимся также, что смежной со снимками P_1, P_2 парой горизонтальных снимков, полученной в моменты $T < T_2$, являются снимки P_j, P_{j+1} .

С учетом изложенного рассмотрим разности параллаксов $\Delta p = p_{нш} - p_{ш}$, $\Delta q = q_{нш} - q_{ш}$ снимков P_1, P_2 и P_1, \bar{P}_2 (см. рис. 5). Учитывая, что

$$p_{ш} = x_j - x_{j+1} = x_1 - \bar{x}_2,$$

$$q_{ш} = y_j - y_{j+1} = y_1 - \bar{y}_2,$$

получим

$$\Delta p = (x_1 - x_2) - (x_1 - \bar{x}_2) = -x_2 + \bar{x}_2;$$

$$\Delta q = (y_1 - y_2) - (y_1 - \bar{y}_2) = -y_2 + \bar{y}_2. \quad (7)$$

Для учета отклонений центра проекции S_2 от S_1 по высоте и направлению полета БЛА воспользуемся известными соотношениями³, которые в соответствии с принятыми обозначениями будут иметь следующий вид:

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_2 + \delta x_{\Delta H} + \delta x_{\Delta r_c}; \quad (8)$$

$$\bar{y}_2 = \bar{y}_2 + \delta y_{\Delta H} + \delta y_{\Delta r_c}, \quad (9)$$

где $\delta x_{\Delta H}, \delta x_{\Delta r_c}, \delta y_{\Delta H}, \delta y_{\Delta r_c}$ — поправки в координаты \bar{x}_2 и \bar{y}_2 ; $\delta x_{\Delta r_c} = 0$.

С учетом (8)–(9), известных соотношений связи плоских координат $(x_2, \bar{x}_2), (y_2, \bar{y}_2)$ точек наклонного и горизонтального снимков, полученных из одного центра проекции, выражения (7) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p = -x_2 - \frac{fP}{c} + \delta x_{\Delta H}; \\ \Delta q = -y_2 - \frac{fQ}{c} + \delta y_{\Delta H} + \delta y_{\Delta r_c}, \end{cases} \quad (10)$$

где: $P = a_{11}x_2 + a_{12}y_2 - a_{13}f$,

$$Q = a_{21}x_2 + a_{22}y_2 - a_{23}f,$$

$$C = a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f,$$

f — фокусное расстояние фотокамеры.

Аппроксимируем выражения (5) на основе разложений в ряд по формулам $\sin x = x, \cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2, \operatorname{tg} x = x$ и подставим полученные результаты в (10). Выполним далее преобразования, аналогичные представленным в работе⁴, и учитывая известные в теории фотограмметрии соотношения $\delta x_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{H}x_2, \delta y_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{H}y_2, \delta y_{\Delta r_c} = p_{ш} \operatorname{tg} \tau^*$ и выражение $\operatorname{tg} \tau^* = \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}$, окончательно имеем

$$\begin{cases} \Delta p = \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)v + \frac{x_2 y_2}{f}\omega - y_2 \tau + x_2 \left(1 + \frac{x_2^2}{f}\right)v^2 + \\ + x_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}x_2 \tau^2 + 2\frac{x_2^2}{f^2}v\omega - 2\frac{x_2 y_2}{f}v\tau + \\ + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)\omega\tau + x_2 \frac{\Delta H}{H}; \\ \Delta q = \frac{x_2 y_2}{f}v + \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega + x_2 \tau + y_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2}\right)v^2 + \\ + y_2 \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}y_2 \tau^2 + x_2 \left(1 + 2\frac{y_2^2}{f^2}\right)v\omega + \\ + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)v\tau + 2\frac{x_2 y_2}{f}\omega\tau + y_2 \frac{\Delta H}{H} + p_{ш} \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}. \end{cases} \quad (11)$$

Система уравнений (11) описывает изменения параллаксов перекрывающихся изображений при возникновении отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полета и его ориентации. Модель (11) позволяет детектировать траекторию БЛА на основе сравнения априорных оценок и текущих значений разностей параллаксов смежных пар перекрывающихся снимков. При этом плоские координаты соответственных точек снимков и параллаксы в (11) должны быть выражены в миллиметрах, а углы — в радианах.

4. Экспериментальные исследования

Для исследования влияния степени отклонений БЛА от заданной траектории и изменений его ориентации на уровень разностей параллаксов была сформирована пара макетных перекрываю-

³ Лобанов А.Н. Фотограмметрия: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 552 с.

⁴ Там же.

щихся снимков P_1, P_2 (рис. 6) и в зоне их перекрытия заданы координаты двух соответственных точек m_1 и m_2 в СК снимка P_2 . При этом предполагалось, что ошибки измерения отсутствуют.

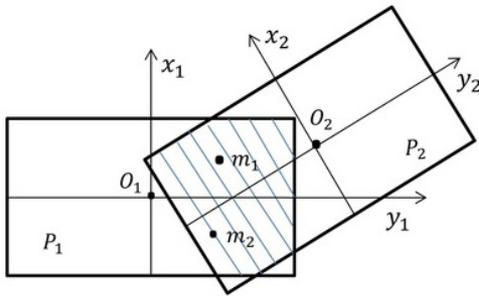


Рис. 6. Макетные снимки P_1, P_2
Figure 6. Layout images P_1, P_2

Параметры съемки камерой Nikon P700 [17] представлены в табл. 2, а полученные на основе модели (11) оценки влияния отклонений БЛА от заданной траектории и изменений его ориентации на уровень разностей параллаксов — в табл. 3.

Проведенный анализ полученных данных позволяет отметить следующее. Величина разности параллаксов смежных пар снимков определяется величиной изменений траектории БЛА по высоте и направлению полета, его разворотов по углам тангажа, крена и рыскания и зависит от

положения соответственных точек в зоне их перекрытия.

Характер изменений разности параллаксов имеет квазилинейный характер, поскольку квадратичные и перекрестные члены в модели (11) существенно меньше линейных слагаемых. Полученные результаты исследования позволяют по известным параметрам камеры и съемки выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории. При этом под допустимым понимается такой уровень, который не приводит к снижению эффективности выполнения поставленной целевой задачи. Например, если положить допустимыми изменения угловой ориентации на 0,5 град., а линейные отклонения — два метра, то уровень разности продольных параллаксов при положительной и отрицательной ординате точки не должен превышать соответственно 8 и 20 пикселей, а поперечных — 40 пикселей в обоих случаях. Таким образом, выполняя измерения в процессе полета разностей параллаксов смежных пар снимков вместо измерений самих параметров ориентации БЛА, можно упростить контроль траектории БЛА в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Таблица 2

Параметры съемки

Фотоприемная структура	Принятые экспериментальные данные	
Размеры: 8 мм на 6 мм Число элементов ПЗС: 3648×2736 Размер элемента ПЗС: $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм Фокусное расстояние: 2,4 мм	Высота съемки: $H = 285$ м Расстояние между центрами проекций S_1 и S_2 : $\Delta r_s = 95$ м Степень перекрытия снимков P_1, P_2 : 50%	Формат снимков P_1, P_2 : $-4 \text{ мм} \leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4 \text{ мм}$ $-3 \text{ мм} \leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3 \text{ мм}$ Параллаксы в штатном режиме съемки: $p_{ш} = 4 \text{ мм}; q_{ш} = 0$

Table 2

Shooting Parameters

Photodetector structure	Accepted experimental data	
Dimensions: 8 mm×6 mm Number of CCD elements: 3648×2736 The size of the CCD element: $2,2 \cdot 10^{-3}$ mm Focal length: 2,4 mm	Shooting height: $H = 285$ m Distance between projection centers S_1 and S_2 : $\Delta r_s = 95$ m Degree of overlap of images P_1, P_2 : 50%	Snapshot format P_1, P_2 : $-4 \text{ mm} \leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4 \text{ mm}$ $-3 \text{ mm} \leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3 \text{ mm}$ Parallaxes in normal shooting mode: $p_{ш} = 4 \text{ mm}; q_{ш} = 0$

Результаты исследования / Research results

Разность параллаксов, мм / Parallax difference, mm	Ориентация БЛА $\nu = \tau = \omega$, град / UAV orientation $\nu = \tau = \omega$, °								
	0			2,5			5		
	Линейные отклонения $\Delta H = \Delta r_c$, м / Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$, m								
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
Точка m_1 ($x_2 = -2$ мм; $y_2 = 1,5$ мм) / Point m_1 ($x_2 = -2$ мм; $y_2 = 1,5$ мм)									
Δp_1	0	-0,029	-0,056	0,158	0,129	0,101	0,318	0,29	0,261
Δq_1	0	0,021	0,042	0,004	0,194	0,383	0,101	0,198	0,388
Точка m_2 ($x_2 = -2$ мм; $y_2 = -1,5$ мм) / Point m_2 ($x_2 = -2$ мм; $y_2 = -1,5$ мм)									
Δp_2	0	-0,029	-0,056	0,279	0,251	0,222	0,542	0,513	0,485
Δq_2	0	-0,021	-0,042	0,111	0,258	0,406	0,217	0,365	0,512

Заключение

1. Разработана модель, устанавливающая функциональную связь между разностями продольного и поперечного параллаксов смежных пар перекрывающихся снимков и величиной линейных отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полета и изменений его угловой ориентации.

2. Полученные аналитические соотношения позволяют выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории, и в условиях потери сигналов от навигационных спутников обеспечивают возможность автоматического детектирования траектории БЛА без непосредственного измерения параметров полета.

Список литературы

1. Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Интегрированная система ориентации и навигации БПЛА // Новости навигации. 2011. № 4. С. 22–28. EDN: RBHKYZ
2. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А. Анализ состояния разработок, интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32–41. EDN: RBGRIF
3. Кузнецов И.М., Пронькин А.Н., Веремеенко К.К. Малогабаритные интегрированные навигационные модули: алгоритмы и особенности структуры // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3(104). С. 245–250. EDN: LMCOZF

4. Пронькин А.Н., Кузнецов И.М., Веремеенко К.К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. С. 14. EDN: NCGDBJ

5. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilankumaran M., Suresh V., Saravanakumar R.R., Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non-linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 995(1). Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>

6. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. № 48 (12). P. 1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

7. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. № 34 (6). P. 652–661. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11741>

8. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multimodal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle // Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42. № 6. P. 1–10.

9. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой — основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: https://www.academia.edu/26013627/Uav_autopilot_salychev (дата обращения: 15.02.2023).

10. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на

базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 14. EDN: XEQWYZ

11. Андронов В.Г., Чуев А.А., Князев А.А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 1 (12). С. 129–144. <https://doi.org/10.21869/2223-15362022-12-1-129-144>.

12. Олейник И.И., Черноморец А.А., Андронов В.Г., Жилияков Е.Г., Заливин А.Н., Мухин И.Е., Чуев А.А. Малогабаритные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. 171 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46554248> (дата обращения: 15.02.2023).

13. Ардентов А.А., Бесчастный И.Ю., Маштаков А.П., Попов А.Ю., Сачков Ю.Л., Сачкова Е.Ф. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3 (12). С. 23–38.

14. Гермак О.В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 150.

15. Добрынин Н.Ф., Пимшина Т.М. Взаимное ориентирование аэроснимков с новым сочетанием угловых элементов в стереопаре // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2 (29). С. 43.

16. Коришунов Р.А., Носков В.В., Погорелов В.В. Центральная обратная фотограмметрическая засечка // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 67–71.

17. Раков Д.Н., Никитин В.Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 7. С. 27–36. EDN: QITTPR

References

1. Veremeenko KK, Antonov DA, Zharkov MV, Zimin RYu, Kuznetsov IM, Pronkin AN. Integrated UAV orientation and navigation system. *Navigation News*. 2011;4:22–28. (In Russ.) EDN: RBHKYZ

2. Veremeenko KK, Koshelev BV, Soloviev YA. The analysis of development of the integrated inertial & satellite navigation systems. *Navigation News*. 2010;4:32–41. (In Russ.) EDN: RBGRIF

3. Kuznetsov IM, Pronkin AN, Veremeenko KK. Small-sized integrated navigation modules: algorithms and structural features. *News of the SFU. Technical sciences*. 2010; 3(104):245–250. (In Russ.) EDN: LMCOZF

4. Pronkin AN, Kuznetsov IM, Veremeenko KK. Integrated UAV navigation system: structure and research of characteristics. *Trudy MAI [Proceedings of MAI]*. 2010; 41:14. (In Russ.) EDN: NCGDBJ

5. Arulmurugan L, Raghavendra Prabhu S, Ilankumar M, Suresh V, Saravanakumar RR, Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for nonlinear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;995(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>

6. Hosseini K, Ebadi H, Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2020;48(12):1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

7. Kikutis R, Stankūnas J, Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*. 2019; 34(6):652–661. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11741>

8. Luo S, Liu H, Hu M, Dong J. Review of multimodal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology*. 2020;42(6):1–10.

9. Salychev OS. UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes. Available from: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf. (In Russ.) (accessed: 15.02.2023).

10. Antonov DA, Zharkov MV, Kuznetsov IM, Lunev EM, Pronkin AN. Unmanned aerial vehicle positioning based on photographic image and inertial measurements. *Trudy MAI [Proceedings of MAI]*. 2016;91:14. (In Russ.) EDN: XEQWYZ

11. Andronov VG, Chuev AA, Knyazev AA. Determination and assessment of the level of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory from images of the underlying surface. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;1(12):129–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144>

12. Oleinik II, Chernomorets AA, Andronov VG, Zhilyakov EG, Zhalivin AN, Mukhin IE, Chuev AA. *Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them*. Kursk: Southwest State University; 2021. (In Russ.) Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_46554248_69730965.pdf (accessed: 15.02.2023)

13. Ardentov AA, Beschastny IYu, Mashtakov AP, Popov AYU, Sachkov YuL, Sachkova EF. Algorithms for evaluation position and orientation of UAV. *Program systems: Theory and applications*. 2012;3(3(12):23–38. (In Russ.)

14. Germak OV. Determination of elements of mutual orientation of images. *Online journal of Science Studies*. 2012;4(13):150. (In Russ.)

15. Dobrynin NF, Pimshina TM. Mutual orientation of aerial photographs with a new combination of angular elements in a stereo pair. *Engineering Bulletin of the Don*. 2014;2(29):43. (In Russ.)

16. Korshunov RA, Noskov VV, Pogorelov VV. Non-central reverse photogrammetric notch. *News of higher*

educational institutions. Geodesy and aerial photography. 2013;5:67–71. (In Russ.)

17. Rakov DN, Nikitin VN. The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex. *Interexpo Geo-Siberia*. 2012;7:27–36. (In Russ.) EDN: QITTPR.

Сведения об авторах

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, факультет фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2578-0026; E-mail: vladia58@mail.ru

Чуев Андрей Алексеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, факультет фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2980-0533; E-mail: chuev-aa@inbox.ru

Дубровский Никита Сергеевич, студент, юридический факультет, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1261-1928; E-mail: dubrovsky69@icloud.com

About the authors

Vladimir G. Andronov, D.Sc., Senior Researcher, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2578-0026; E-mail: vladia58@mail.ru

Andrey A. Chuev, Lecturer, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2980-0533; E-mail: chuev-aa@inbox.ru

Nikita S. Dubrovsky, Student, Faculty of Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1261-1928; E-mail: dubrovsky69@icloud.com