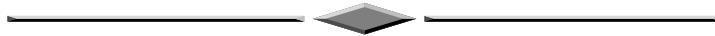


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 629.73

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-59-69

Идентификация девиаций беспилотных летательных аппаратов по параллаксам изображений

В. Г. Андронов^{1}, А. А. Чуев¹*

¹ Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

* e-mail: vladia58@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию идентификации девиаций беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся изображениям подстилающей поверхности без определения параметров их взаимной ориентации. С этой целью разработана математическая модель, устанавливающая функциональную связь между разностями параллаксов перекрывающихся снимков и параметрами девиации беспилотных летательных аппаратов. При этом учтены все возможные типы девиаций и варианты их комбинаций. Проведены исследования и получены оценки влияния девиаций на величину изменения параллаксов перекрывающихся снимков. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в процессе полета беспилотных летательных аппаратов представляется возможным выполнять автоматическую идентификацию и оценку их допустимых отклонений от заданной траектории по параллаксам перекрывающихся снимков без определения параметров их взаимной ориентации.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, навигация, параллаксы изображений

Введение

Для решения многих целевых задач беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используют систему автоматического управления, которая функционирует на основе данных, поступающих от автономных инерциальных и/или спутниковых систем навигации [1–10]. Эти системы обеспечивают измерение навигационных параметров ориентации и положения БПЛА. Однако известно [11, 12], что в процессе полета БПЛА возможна потеря спутниковой навигационной информации. В условиях внешнего возмущения (порыв ветра, восходящий поток или воздушная яма) это может привести к снижению точности навигации заданной БПЛА и эффективности выполнения целевых задач.

В этой связи актуальной остается задача идентификации девиаций БПЛА по независи-

мой от инерциальных измерений автономной информации [13, 14], например по изображениям подстилающей поверхности [15–18]. Известные подходы к решению этой задачи, основанные на обработке изображений, связаны с определением параметров ориентации снимков, базируясь на свойствах коллинеарности или компланарности векторов [19–21]. Однако реализация этих методов требует наличие на борту БПЛА достаточно существенных вычислительных ресурсов. Очевидно, что в ряде случаев, особенно при применении малоразмерных БПЛА, обеспечить выполнение этого условия достаточно затруднительно.

Основная часть

Целью исследования является исследование возможностей автоматической идентификации девиаций траектории БПЛА по изобра-

жениям подстилающей поверхности без определения параметров их взаимной ориентации. Для этого необходимо получить функциональную связь между параметрами девиации БПЛА и изменениями параллаксов снимков, а также оценки их влияния на величину этих изменений. Рассмотрим содержание и результаты решения этих задач.

Будем так же, как и в работах [22, 23], здесь и далее считать, что в штатном режиме траектория полета БПЛА представляет собой прямолинейный горизонтальный маршрут над плоскоравнинной местностью. Наряду с этим положим, что бортовой фотокамерой осуществляется аэрофотосъемка с заданным коэффициентом перекрытия (рис. 1).

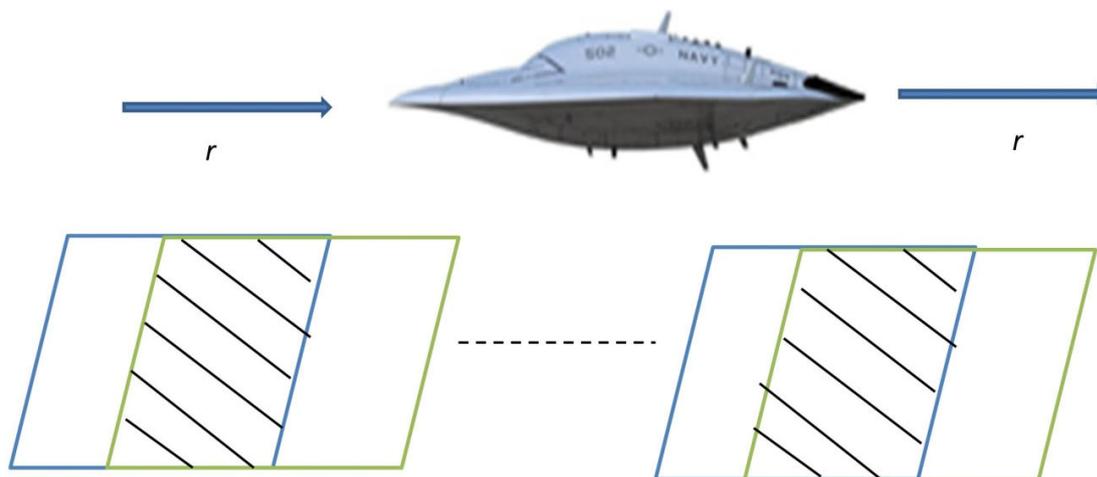


Рис. 1. Штатный полет БПЛА

Определим систему координат (СК) (рис. 2), связанную с осями инерции БПЛА [22, 23].

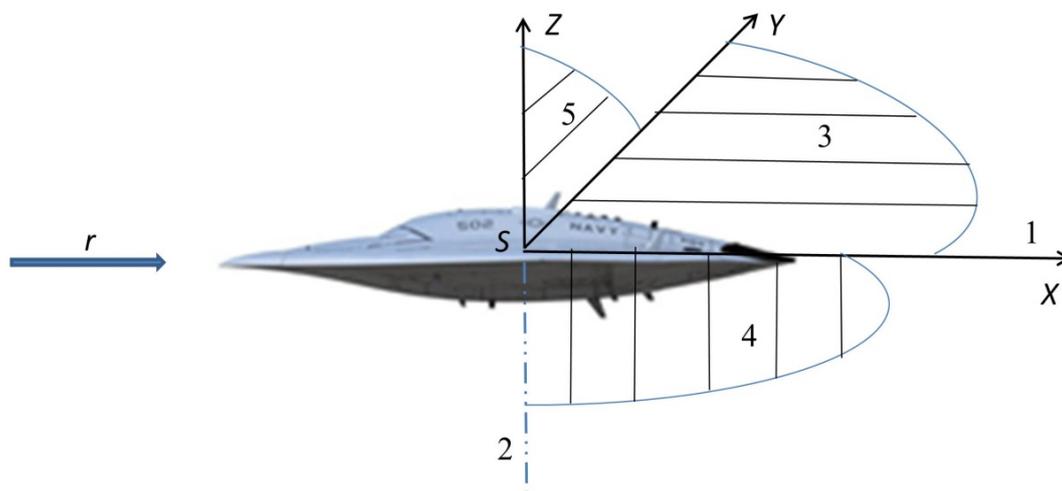


Рис. 2. Система координат SXYZ

Начало S разместим в центре проекции цифровой фотокамеры. Ось SX направим вдоль продольной оси БПЛА, совпадающей с направлением полета, а оси SY и SZ – соответственно влево и вверх относительно направления полета. При этом плоскость 3

параллельна плоскости местного горизонта, а плоскости 4 и 5 – перпендикулярны к ней соответственно в вертикальном и поперечном направлении. Тогда угол тангажа α – это угол между продольной осью БПЛА и плоскостью местного горизонта, угол крена β – угол

между поперечной осью БПЛА и плоскостью местного горизонта, а угол рыскания γ – угол между продольной осью БПЛА при горизонтальной траектории полета БПЛА и ее проекцией на горизонтальную плоскость при новой траектории [22]. Понятно, что при горизонтальном полете углы тангажа, крена и рыскания БПЛА равны нулю, а его продольная ось направлена по местной горизонтали 1 и перпендикулярна местной вертикали 2.

Допустим далее, что в некоторый момент времени возникла девиация траектории полета БПЛА, то есть произошли некоординированные отклонения от заданной траектории. Тогда из некоторых центров проекций S_1 и S_2 будут получены перекрывающиеся изображения P_1 и P_2 , первое из которых зарегистрировано в штатном режиме полета, а второе – в нештатном (рис. 3).

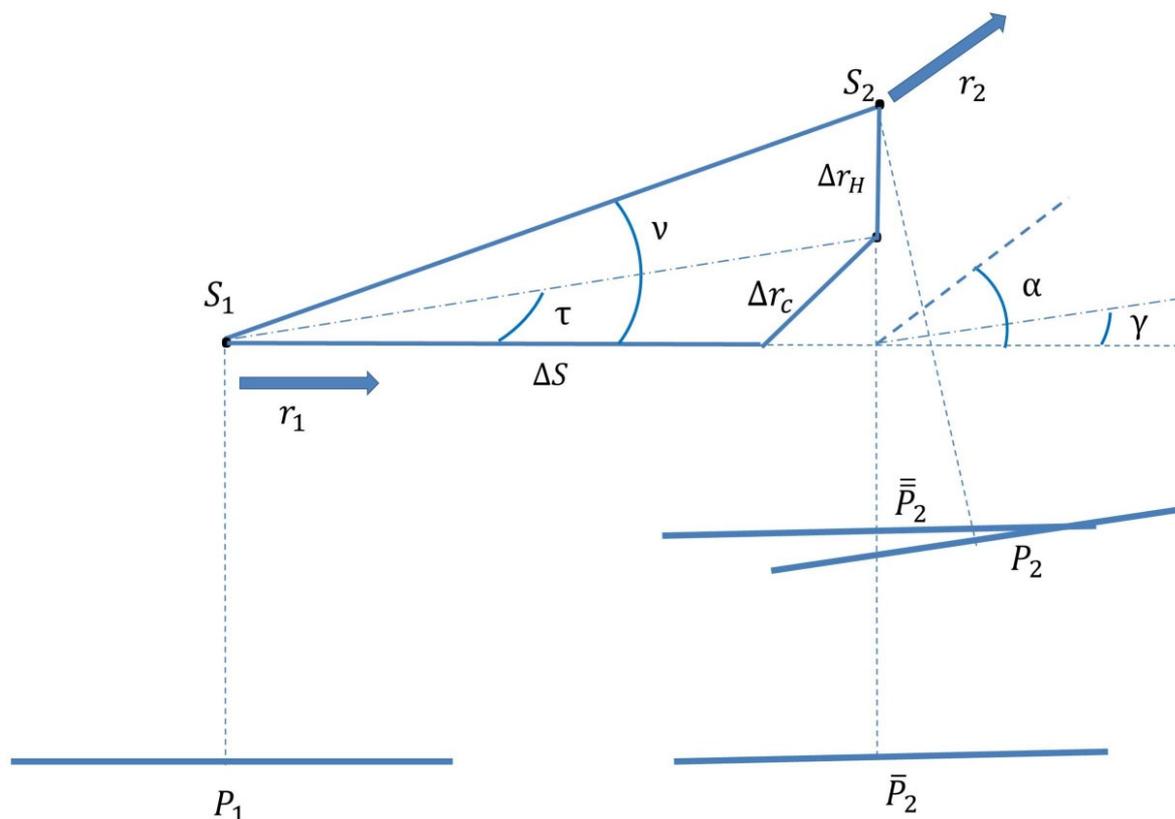


Рис. 3. Типы девиации траектории БПЛА

Снимем далее ограничения, принятые в работах [22, 23], и положим, что углы наклона ν и разворота τ базиса снимков S_1S_2 относительно заданной траектории не равны углам тангажа и рыскания БПЛА, то есть $\nu \neq \alpha$, $\tau \neq \gamma$. Это означает, в момент получения второго снимка могли произойти различные типы девиации траектории. К ним будем относить отклонения по высоте Δr_H и/или направлению полета Δr_c (линейные девиации) и развороты БПЛА по углам тангажа, крена и рыскания (угловые девиации), а также отклонения по высоте Δr_H и / или направлению полета Δr_c без изме-

нения ориентации БПЛА по углам тангажа, крена и рыскания.

Тогда второй снимок, полученный в этих условиях, будем в первом случае обозначать P_2 , во втором – $\bar{\bar{P}}_2$, а при отсутствии девиаций – \bar{P}_2 . Очевидно, что углы тангажа, крена и рыскания БПЛА являются углами взаимной ориентации снимков P_2 и $\bar{\bar{P}}_2$.

С учетом изложенных выше исходных данных постановка задачи состоит в построении модели, описывающей связь параметров девиации БПЛА с изменениями параллаксов перекрывающихся снимков P_1 и P_2 .

Математическая модель параметров девиации траектории БПЛА

Введем следующие СК (рис. 4): фотограмметрическую СК $OXYZ$, оси OX и OY которой расположены в плоскости местного горизонта на земной поверхности, и СК снимков $P_1, P_2, \bar{P}_2, \bar{\bar{P}}_2$, а именно: $O_1x_1y_1$, $O_2x_2y_2$, $\bar{O}_2\bar{x}_2\bar{y}_2$ и $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$.

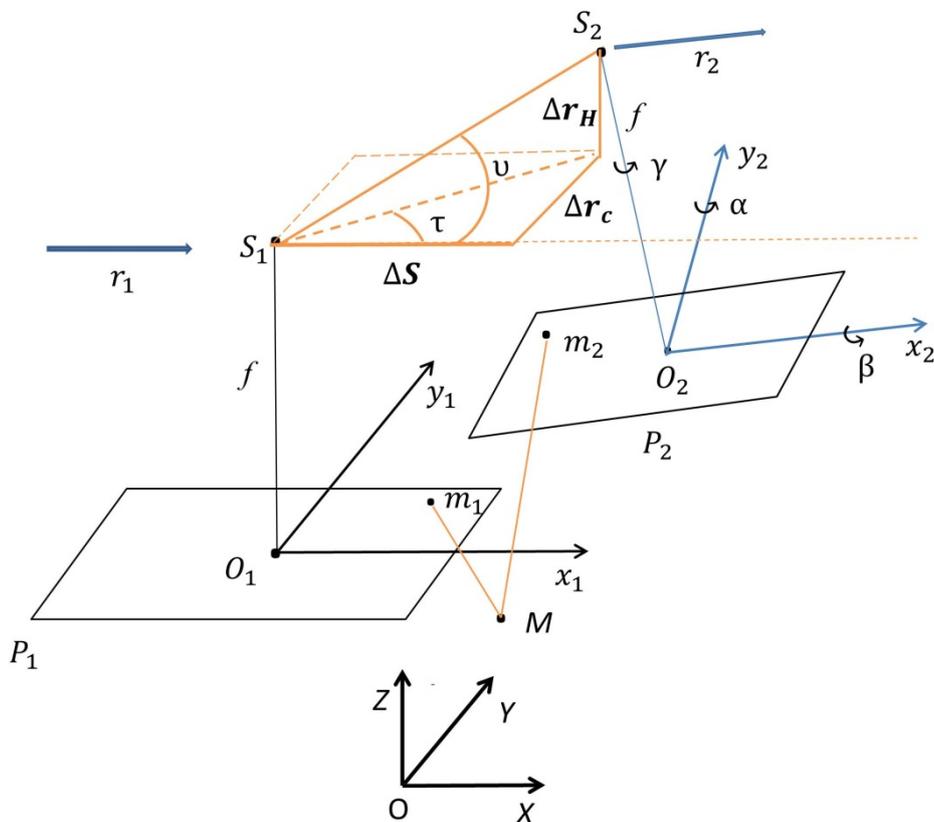


Рис. 4. Взаимная ориентация изображений P_1, P_2

Отметим, что оси СК этих снимков параллельны осям СК, связанных с БПЛА в моменты их получения. При этом оси СК $OXYZ$, $O_1x_1y_1$ и $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$ также параллельны друг другу. С учетом этого взаимная ориентация снимков P_2 и \bar{P}_2 будет определяться следующими известными соотношениями [19, 20, 22, 23]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_\alpha \mathbf{A}_\beta \mathbf{A}_\gamma,$$

где

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

\mathbf{A} – матрица направляющих косинусов;

$$\mathbf{A}_\alpha = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{vmatrix}; \quad \mathbf{A}_\beta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix}; \quad \mathbf{A}_\gamma = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma; \\
 a_{12} &= -\cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma; \\
 a_{13} &= -\sin \alpha \cos \beta; \\
 a_{21} &= \cos \beta \sin \gamma; \\
 a_{22} &= \cos \beta \cos \gamma; \\
 a_{23} &= -\sin \beta; \\
 a_{31} &= \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma; \\
 a_{32} &= -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma; \\
 a_{33} &= \cos \alpha \cos \beta.
 \end{aligned} \tag{1}$$

В теории фотограмметрии известно [19, 20], что продольные параллаксы перекрывающихся горизонтальных снимков плоскоравнинной местности, полученных с одной высоты полета БПЛА, не изменяются, а поперечные равны нулю. Тогда, как показано в работах [22, 23], справедливы соотношения

$$\begin{cases} p_{\text{ш}} = p_{j,j+1} = x_j - x_{j+1} = \text{const}; \\ q_{\text{ш}} = q_{j,j+1} = y_j - y_{j+1} = 0, \end{cases} \tag{2}$$

где $j = \overline{1, J}$ – порядковый номер снимков, полученных в штатном режиме полета БПЛА.

Очевидно, что нарушение соотношений (2) для какой-либо пары смежных снимков будет свидетельствовать о наличии девиации траектории БПЛА. Рассмотрим разности параллаксов Δp , Δq снимков P_1, P_2 и \bar{P}_1, \bar{P}_2 . Имеем

$$\Delta p = p_{\text{нш}} - p_{\text{ш}}; \Delta q = q_{\text{нш}} - q_{\text{ш}},$$

где $p_{\text{нш}} = x_1 - x_2$; $q_{\text{нш}} = y_1 - y_2$; $p_{\text{ш}} = x_1 - \bar{x}_2$; $q_{\text{ш}} = y_1 - \bar{y}_2$.

Поскольку снимки P_1 и \bar{P}_2 являются горизонтальными, а снимок P_2 характеризуется параметрами линейной и угловой девиации $\Delta r_c \neq 0$, $\Delta r_H \neq 0$; $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma \neq 0$, и, учитывая также, что $x_j - x_{j+1} = x_1 - \bar{x}_2$, $y_j - y_{j+1} = y_1 - \bar{y}_2$, получим

$$\Delta p = -x_2 + \bar{x}_2; \tag{3}$$

$$\Delta q = -y_2 + \bar{y}_2. \tag{4}$$

Для учета отклонений центра проекции S_2 по высоте и направлению полета БПЛА в координаты \bar{x}_2, \bar{y}_2 необходимо внести поправки $\delta x(\Delta r_H)$, $\delta y(\Delta r_H)$, $\delta y(\Delta r_c)$

$$\bar{x}_2 = \bar{\bar{x}}_2 + \delta x(\Delta r_H); \tag{5}$$

$$\bar{y}_2 = \bar{\bar{y}}_2 + \delta y(\Delta r_H) + \delta y(\Delta r_c). \tag{6}$$

Учитывая принятые обозначения и известные в теории фотограмметрии [20] соотношения для поправок, выражения (5), (6) примут следующий вид:

$$\bar{x}_2 = \bar{\bar{x}}_2 + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) x_2; \quad (7)$$

$$\bar{y}_2 = \bar{\bar{y}}_2 + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) y_2 + p_{\text{ш}} \left(\frac{\Delta r_c}{\Delta S} \right), \quad (8)$$

где $\Delta r_H = \Delta S \operatorname{tg} \nu / \cos \tau$; $\Delta r_c = \Delta S \operatorname{tg} \tau$; ΔS – расстояние между центрами проекции S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта; H – высота съемки в момент получения снимка P_1 .

Обозначим далее

$$x^* = a_{11}x_2 + a_{12}y_2 - a_{13}f;$$

$$y^* = a_{21}x_2 + a_{22}y_2 - a_{23}f;$$

$$z^* = a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f.$$

Тогда с учетом выражений (7), (8) и известных формул [19, 20], описывающих взаимосвязь плоских координат точек наклонного и горизонтального снимков, полученных из одного центра проекции, соотношения (3), (4) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p = -x_2 - f \left(\frac{x^*}{z^*} \right) + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) x_2; \\ \Delta q = -y_2 - f \left(\frac{y^*}{z^*} \right) + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) y_2 + p_{\text{ш}} \left(\frac{\Delta r_c}{\Delta S} \right). \end{cases} \quad (9)$$

Положим далее, что величина угловых девиаций БПЛА не превышает трех градусов, то есть снимок P_2 является плановым. Тогда выражения (1) могут быть аппроксимированы на основе разложений в ряд по формулам $\sin x = x$, $\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2$, $\operatorname{tg} x = x$. Подставив полученные результаты аппроксимации в (9), после преобразований, аналогичных представленным в работе [20], окончательно получим

$$\begin{cases} \Delta p = P^* + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) x_2; \\ \Delta q = Q^* + \left(\frac{\Delta r_H}{H} \right) y_2 + p_{\text{ш}} \left(\frac{\Delta r_c}{\Delta S} \right). \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} P^* = & \left(f + \frac{x_2^2}{f} \right) \alpha + \frac{x_2 y_2}{f} \beta - y_2 \gamma + x_2 \left(1 + \frac{x_2^2}{f} \right) \alpha^2 + x_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \beta^2 - \frac{1}{2} x_2 \gamma^2 + 2 \frac{x_2^2}{f^2} \alpha \beta - \\ & - 2 \frac{x_2 y_2}{f} \alpha \gamma + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \beta \gamma; \end{aligned}$$

$$Q^* = \frac{x_2 y_2}{f} \alpha + \left(f + \frac{y_2^2}{f} \right) \beta + x_2 \gamma + y_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2} \right) \alpha^2 + y_2 \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \beta^2 - \frac{1}{2} y_2 \gamma^2 + x_2 \left(1 + 2 \frac{y_2^2}{f^2} \right) \alpha \beta + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \alpha \gamma + 2 \frac{x_2 y_2}{f} \beta \gamma.$$

Влияние параметров девиации БПЛА на величину изменений параллаксов

Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1, а полученные на основе модели (14) оценки – в табл. 2.

Таблица 1

Исходные данные

Данные камеры	Данные съемки	
Размеры: 8 мм на 6 мм Число светочувствительных элементов: 3 648 × 2 736. Размер светочувствительного элемента: 2,2 · 10 ⁻³ мм	H = 285 м; ΔS = 95 м; Процент перекрытия снимков: 50 %	-4 мм ≤ x ₁ , x̄ ₂ ≤ 4 мм; -3 мм ≤ y ₁ , ȳ ₂ ≤ 3 мм; p _ш = 4 мм; q _ш = 0; f = 2,4 мм

Таблица 2

Результаты моделирования

Разность параллаксов, пиксель	Ориентация БПЛА α = β = γ, град								
	0			0,1			1,0		
	Линейные отклонения ΔH = Δr _c , м								
	0	0,5	1,0	0	0,5	1,0	0	0,5	1,0
Точка m ₁ (x ₂ = -2 мм; y ₂ = 1,5 мм)									
Δp ₁	0	1,5	3	3	4	5	27	28	29
Δq ₁	0	7,5	15	0,06	8	16	0,6	8	16
Точка m ₂ (x ₂ = -2 мм; y ₂ = -1,5 мм)									
Δp ₂	0	1,5	3	5	6	7	48	49	50
Δq ₂	0	10	20	2	12	22	18	28	38

Для моделирования были взяты характеристики цифровой фотокамеры Nikon P700 [24] с КМОП-матрицей светочувствительных элементов, а значения координат x₂, y₂ задавались, исходя из заданного формата и процента перекрытия снимков.

Заключение

Разработанная математическая модель устанавливает функциональную связь параметров линейной и угловой девиации БПЛА

и обусловленных ими изменений параллаксов перекрывающихся изображений. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что зависимость изменений параллаксов снимков от линейных и угловых девиаций БПЛА имеет линейный характер. При этом рост уровня отклонений приводит к увеличению как продольного, так и поперечного параллаксов. Если считать, что погрешности определения плоских координат соответственных точек и параллаксов снимков не превышают одного пикселя, то порог

чувствительности разработанной модели позволяет выполнять автоматическую идентификацию угловых девиаций БПЛА, начиная с 0,1 град, а линейных – с 0,5 м.

Несомненный интерес представляет более детальный анализ степени раздельного и совместного влияния линейных и угловых девиаций на величину и скорость изменений параллаксов, что является предметом дальней-

ших исследований. Это позволит использовать разработанную модель для априорной оценки уровня их допустимых изменений и тем самым существенно уменьшить вычислительные затраты, связанные с автоматической идентификацией отклонений БПЛА от заданной траектории по измеряемым в процессе полета параллаксам регистрируемых снимков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – No 48 (12). – P. 1675–1689. – DOI 10.1007/s12524-020-01187-4.
2. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // *Transport*. – 2019. – No. 34 (6). – P. 652–661.
3. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilankumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., 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. – No. 995 (1). – P. 012019.
4. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle // *Journal of National University of Defense Technology*. – 2020. – Vol. 42, No. 6. – P. 1–10.
5. Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // *Новости навигации*. – 2010. – № 4. – С. 32–41.
6. Пронькин А. Н., Кузнецов И. М., Веремеенко К. К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2010. – Выпуск № 41. – Режим доступа: <https://trudymai.ru/>.
7. Деришев С. Г. Беспилотные авиационные комплексы для геофизических исследований и мониторинга земной поверхности // *ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 46–50.
8. Эпов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»*: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 22–28.
9. Кузнецов И. М., Пронькин А. Н., Веремеенко К. К. Малогабаритные интегрированные навигационные модули: алгоритмы и особенности структуры // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2010. – Т. 104, № 3. – С. 245–250.
10. Веремеенко К. К., Антонов Д. А., Жарков М. В. и др. Интегрированная система ориентации и навигации БПЛА // *Московский авиационный институт (государственный технический университет)*. – 2011. – № 4. – С. 22–28.
11. Салычев О. С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tekno1.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf.
12. Олейник И. И., Черноморец А. А., Андронов В. Г. и др. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения : монография / Под ред. В. Г. Андропова. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. – 171 с.
13. Товкач С. Е. Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата. – Тула : ТГУ, 2010.
14. Ардентов А. А., Бесчастный И. Ю., Маштаков А. П. [и др.] Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА // *Программные системы: теория и приложения*. – 2012. – Т. 3, № 3(12). – С. 23–38.

15. Барбасов В. К., Руднев П. Р., Орлов П. Ю., Гречищев А. В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 158–163.
16. 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. 1–26.
17. Степанов Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1. – С. 150–157.
18. Костюк А. С. Особенности аэрофотосъемки со сверхлегких беспилотных летательных аппаратов // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 236–240.
19. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия : учебник для вузов / Под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – М. : МИИГАиК, 2016. – 294 с.
20. Лобанов А. Н. Фотограмметрия : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 552 с.
21. Гермак О. В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 4. – С. 1–5.
22. 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.
23. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полета беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25 (4). – С. 145–161. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.
24. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.: сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 27–36.

Об авторах

Владимир Германович Андронов – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи.

Андрей Алексеевич Чуев – старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи.

Получено 24.08.2022

© В. Г. Андронов, А. А. Чуев, 2023

Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images

V. G. Andronov^{1}, A. A. Chuev¹*

¹ Southwest State University, Kursk, Russian Federation

*e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the identification of deviations of unmanned aerial vehicles from overlapping images of the underlying surface without determining the parameters of their mutual orientation. For this purpose, a mathematical model has been developed that establishes a functional relationship between the parallax differences of overlapping images and the deviation parameters of unmanned aerial vehicles. In this case, all possible types of deviations and options for their combinations are taken into account. Studies have been carried out and estimates of the influence of deviations on the magnitude of the change in the parallaxes of overlapping images have been obtained. The results obtained allowed us to conclude that during the flight of unmanned aerial vehicles it is possible to automatically identify and evaluate their allowa-

ble deviations from a given trajectory using the parallaxes of overlapping images without determining the parameters of their mutual orientation.

Keywords: aerial photography, unmanned aerial vehicle, navigation, parallax images

REFERENCES

1. Hosseini, K., Ebadi, H., & Farnood Ahmadi, F. (2020). 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*, 48(12), 1675–1689. doi: 10.1007/s12524-020-01187-4.
2. Kikutis, R., Stankūnas, J., & Rudinskas, D. (2019). Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*, 34(6), 652–661.
3. Arulmurugan, L., Raghavendra Prabhu, S., Ilangkumaran, M., Suresh, V., Saravanakumar, R., & Raghunath, M. (2020). Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 995(1), P. 012019.
4. Luo, S., Liu, H., Hu, M., & Dong, J. (2020). Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Journal of National University of Defense Technology*, 42(6), 1–10.
5. Veremeenko, K. K., Koshelev, B. V., & Soloviev, Yu. A. (2010). Analysis of the state of development of integrated inertial-satellite navigation systems. *Novosti navigatsii [Navigation News]*, 4, 32–41 [in Russian].
6. Pronkin, A. N., Kuznetsov, I. M., & Veremeenko, K. K. (2010). Integrated UAV navigation system: structure and research of characteristics. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI" [Electronic journal "Proceedings of MAI"]*, No. 41. Retrieved from <https://trudymai.ru/> [in Russian].
7. Derishev, S. G. (2010). Unmanned aircraft systems for geophysical research and monitoring of the earth's surface. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 4, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol.4, Part 1]* (pp. 46–50). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Epov, M. I., & Zlygostev, I. N. (2012). Application of unmanned aerial vehicles in airborne geophysical reconnaissance. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, ge-oekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 22–28). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
9. Kuznetsov I. M., Pronkin A. N., & Veremeenko K. K. (2010). Small-sized integrated navigation modules: algorithms and structural features. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestia of the Southern Federal University. Technical sciences]*, 104(3), 245–250 [in Russian].
10. Veremeenko, K. K., Antonov, D. A., Zharkov, M. V., & et al. (2011). Integrated UAV orientation and navigation system. *Moskovskiy aviatsionnyy institut (gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet) [Moscow Aviation Institute (State Technical University)]*, 4, 22–28 [in Russian].
11. Salychev, O. S. (n. d.). Autopilot of a UAV with an inertial integrated system – the basis for safe operation of unmanned complexes. Retrieved from http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf. [in Russian].
12. Oleinik, I. I., Chernomorets, A. A., Andronov, V. G., & et al. (2021). *Malorazmernye bespilotnye letatel'nye apparaty: zadachi obnaruzheniya i puti ikh resheniya [Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them]*. V. G. Andronov (Ed.). Kursk: Southwestern State University, 171 p. [in Russian].
13. Tovkach, S. E. (2010). *Informatsionno-izmeritel'naya sistema pirometricheskogo tipa dlya malorazmernogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Information-measuring system of pyrometric type for a small-sized unmanned aerial vehicle]*. Tula: TSU Publ. [in Russian].
14. Ardentov, A. A., Beschastny, I. Yu., Mashtakov, A. P., & et al. (2012). Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV. *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya [Software Systems: Theory and Applications]*, Vol. 3, No. 3(12), 23–38 [in Russian].
15. Barbasov, V. K., Rudnev, P. R., Orlov, P. Y., & Grechishchev, A. V. (2013). Application of small unmanned aerial vehicles for survey of terrain and preparation of geoinformation content in emergency situa-

tions. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 158–163). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

16. Antonov, D. A., Zharkov, M. V., Kuznetsov, I. M., Lunev, E. M., & Pronkin, A. N. (2016). Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements. *Trudy MAI [Proceedings of MAI]*, 91, 1–26 [in Russian].

17. Stepanov, D. N. (2014). Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras. *Programmnye produkty i sistemy [Software Products and Systems]*, 1, 150–157 [in Russian].

18. Kostyuk, A. S. (2011). Features of aerial photography from ultralight unmanned aerial vehicles. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 1(104), 236–240 [in Russian].

19. Mikhailov, A. P., & Chibunichev, A. G. (2016). *Fotogrammetriya [Photogrammetry]*. Moscow: MII-GAiK Publ., 294 p. [in Russian].

20. Lobanov, A. N. (1984). *Fotogrammetriya [Photogrammetry]* (2nd ed.). Moscow: Nedra Publ, 552 p. [in Russian].

21. Germak, O. V. (2012). Determination of elements of mutual orientation of images. *Internet-zhurnal "Naukovedenie" [Online journal "Science Studies"]*, 4, 1–5 [in Russian].

22. Andronov, V. G., Chuev, A. A., & Knyazev, A. A. (2022). Determination and assessment of the level of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory from images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie [Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, Computer engineering, Computer science. Medical instrumentation]*, 1(12), 129–144 [in Russian].

23. Andronov, V. G., Chuev, A. A., & Knyazev, A. A. (2021). Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the Southwest State University]*, 25(4), 145–161. Retrieved from <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.

24. Rakov, D. N., & Nikitin, V. N. (2012). The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Sbornik molodykh uchenykh SSGA [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Collection of Young Scientists]* (pp. 27–36). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Author details

Vladimir G. Andronov – D. Sc., Senior Researcher, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems.

Andrey A. Chuev – Lecturer, Department of Space Instrumentation and Communication Systems.

Received 24.08.2022

© V. G. Andronov, A. A. Chuev, 2023