

Исследование влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности, получаемых в режиме прямолинейного горизонтального полёта

В. Г. Андронов¹✉, А. А. Чуев¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования – оценка совместного и раздельного влияния линейных и угловых отклонений БЛА от траектории прямолинейного горизонтального полёта на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности.

Методы. Получение количественных оценок основано на исследовании чувствительности модели, описывающей функциональную связь между параметрами отклонений БЛА от заданной траектории и изменениями продольных и поперечных параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленными этими отклонениями.

Результаты. Разность продольных параллаксов в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия всегда положительна и с ростом уровня угловых девиаций возрастает, а поперечных – отрицательна и уменьшается, причём величина первой в три раза больше, чем второй. Разность поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых девиаций БЛА при положительной ординате точки в зоне перекрытия положительна, а продольных – отрицательна, а при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА первая возрастает, вторая – убывает, а величина первой в четыре раза больше, чем второй.

Заключение. Величина разностей параллаксов зависит от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, возникших в момент регистрации наклонного снимка, а знак – от знака ординаты соответственной точки в зоне перекрытия второй пары снимков. При этом разность продольных параллаксов всегда прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций, а поперечных параллаксов – прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрицательных значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъемка; обработка перекрывающихся аэрофотоснимков; отклонения от заданной траектории полёта.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Андронов В. Г., Чуев А. А. Исследование влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности, получаемых в режиме прямолинейного горизонтального полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-3-88-103>

Поступила в редакцию 16.07.2024

Подписана в печать 11.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Investigation of the influence of linear and angular deviations of UAVS on the change in parallaxes of images of the underlying surface obtained in the mode of rectilinear horizontal flight

Vladimir G. Andronov¹ ✉, Andrey A. Chuev¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is assessment of the joint and separate influence of linear and angular deviations of the UAV from the trajectory of rectilinear horizontal flight on the change in parallax images of the underlying surface.

Methods. Quantitative estimates are based on a study of the sensitivity of a model describing the functional relationship between the parameters of UAV deviations from a given trajectory and changes in the longitudinal and transverse parallaxes of overlapping images of the underlying surface caused by these deviations.

Results. The difference of longitudinal parallaxes in the absence of linear deviations of the UAV, regardless of the sign of the ordinate of the point in the overlap zone, is always positive and increases with an increase in the level of angular deviations, and transverse deviations are negative and decrease, and the value of the first is three times greater than the second. The difference of the transverse parallaxes in the absence of angular deviations of the UAV at a positive ordinate point in the overlap zone is positive, and the longitudinal parallaxes are negative, and at a negative ordinate, on the contrary. At the same time, regardless of the sign of the ordinate of the point in the overlap zone, with an increase in the level of linear deviations of the UAV, the first increases, the second decreases, and the value of the first is four times greater than the second.

Conclusion. The magnitude of the parallax differences depends on the levels of linear and angular deviations of the UAV that occurred at the time of registration of the inclined image, and the sign depends on the sign of the ordinate of the corresponding point in the overlap zone of the second pair of images. In this case, the difference of longitudinal parallaxes is always directly proportional to the level of angular deviations and inversely proportional to the level of linear deviations, and transverse parallaxes is directly proportional to the level of angular deviations at negative values of the ordinate of the point and inversely proportional at its positive values.

Keywords: unmanned aerial vehicle; parallax images; aerial photography; processing of overlapping aerial photographs; deviations from a given flight path.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Andronov V.G., Chuev A.A. Investigation of the influence of linear and angular deviations of UAVS on the change in parallaxes of images of the underlying surface obtained in the mode of rectilinear horizontal flight. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(3):88–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-88-103>

Received 16.07.2024

Accepted 11.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Одной из тенденций мирового научно-технического прогресса является бурное развитие беспилотных авиационных систем, в особенности мало-размерных БЛА с весом до 5 кг и размахом крыла до двух метров, которые из-за их сравнительно низкой стоимости широко используются для решения различных целевых задач во многих сферах деятельности [1]. Для эффективного решения этих задач большое значение имеет точность выхода таких БЛА к району целевого применения, которая обеспечивается элементами их системы управления [2]. Одним из основных элементов является система навигации, которая, как правило, включает в себя контуры инерциальных и спутниковых измерений и обработки информации, обеспечивающие определение параметров полёта БЛА и их отклонений от программных значений [3]. Совместное использование этих контуров позволяет сочетать свойства инерциальных навигационных систем (ИНС), имеющих пространственную память, но отличающихся накоплением погрешностей во времени, и спутниковых навигационных систем (СНС), характеризующихся отсутствием пространственной памяти, но обладающих высокой точностью определения координат без накопления погрешностей во времени [4].

Характеристики системы навигации БЛА, как и любой сложной технической системы, которая эксплуатируется во

взаимодействии с внешней средой, должны поддерживаться в заданных пределах как в нормальном (штатном) режиме функционирования, так и в условиях внешних воздействий [5]. В первом случае система навигации БЛА обеспечивает периодическое получение высокоточной информации об отклонениях маршрута полёта от программной траектории от СНС, по которой выполняется коррекция непрерывных инерциальных измерений [6]. Во втором случае может произойти снижение её точности, обусловленное влиянием таких внешних воздействий, как сложная электромагнитная обстановка, радиопомехи, порывы ветра, попадание в восходящий поток или воздушную яму [7]. Это приводит, с одной стороны, к потере сигналов от спутников, что вызывает быстрый рост погрешностей инерциальных измерений [8], а с другой – обуславливает возникновение некоординированных, т. е. не связанных с программными маневрами, девиаций БЛА [9]. Совместное воздействие этих факторов может привести к существенному отклонению траектории полёта БЛА от заданной и снижению эффективности решения поставленных задач [10]. В этой связи актуальными являются исследования путей повышения точности инерциально-спутниковой системы навигации БЛА [11], обеспечивающих в условиях внешних воздействий получение и обработку дополнительной навигационной информации о текущем положении и ориентации

БЛА [12]. С этой целью наиболее широко применяется информация, получаемая в результате обработки изображений подстилающей поверхности [13], которые в процессе полёта БЛА непрерывно регистрируются установленной на его борту системой видеонаблюдения, в частности цифровой фотокамерой [14].

Материалы и методы

Одним из перспективных путей повышения точности инерциально-спутниковой системы навигации БЛА в условиях внешних воздействий [15] по изображениям подстилающей поверхности является использование информации об их параллаксах [16]. Методология такого подхода заключается в следующем. Считается, что БЛА совершает движение по заданной траектории, которая представляет собой прямолинейный маршрут [17], параллельный плоскости местного горизонта, и характеризуется отсутствием программных маневров по направлению и высоте полёта [18]. При

этом система автоматического управления БЛА функционирует в режиме стабилизации и с требуемой точностью обрабатывает некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории [19]. Для этого датчиками инерциальной навигационной системы непрерывно измеряются параметры полёта БЛА, а также выполняется периодическая коррекция их значений по сигналам навигационных спутников. Наряду с этими навигационными измерениями цифровой фотокамерой с фокусным расстоянием f , установленной на борту БЛА, осуществляется регистрация смежных пар P_j, P_{j+1} перекрывающихся горизонтальных снимков подстилающей поверхности и определение их продольных и поперечных параллаксов (рис. 1): $p_{ш} = x_j(n_i) - x_{j+1}(n_{i+1})$, $q_{ш} = y_j(n_i) - y_{j+1}(n_{i+1})$, где $j = \overline{1, J}$, $x(n_i), y(n_i)$ – плоские координаты изображений точек земной поверхности N_i в зонах перекрытия снимков, $i = \overline{1, I}$.

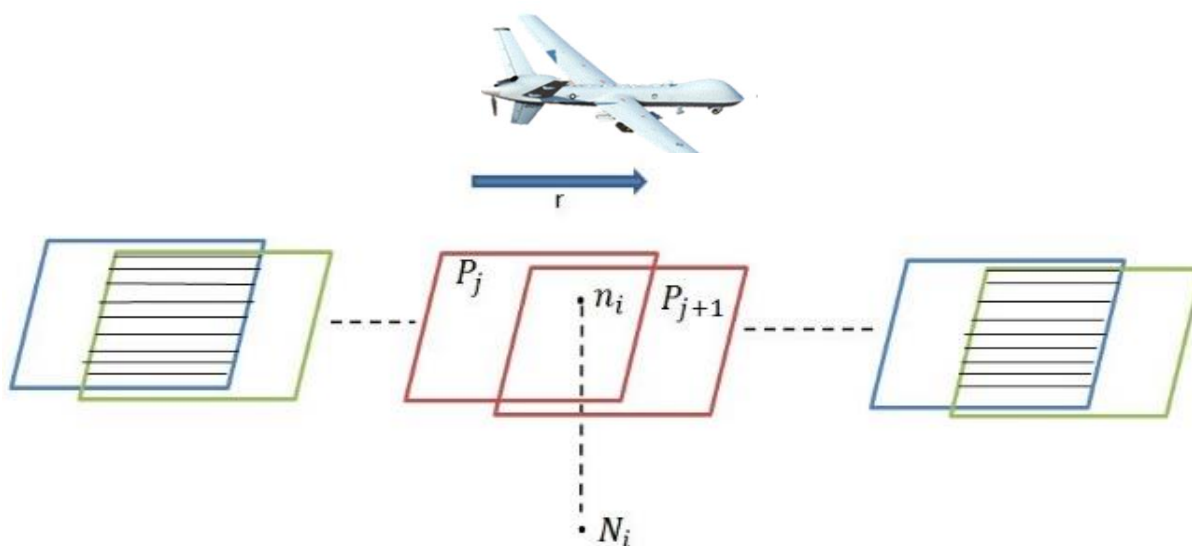


Рис. 1. Режим прямолинейного горизонтального полёта БЛА [20]

Fig. 1. UAV straight-line horizontal flight mode [20]

Полагается, что в какой-то момент полёта БЛА по заданной траектории в результате внешних воздействий происходит потеря сигналов от навигационных спутников. При этом продолжается регистрация перекрывающихся горизонтальных снимков P_{j^*,j^*+1}^* , а ещё через некоторое время, например после получения снимка горизонтального снимка P_1 , возникают некоординированные отклонения БЛА (рис. 2), в условиях которых

регистрируется перекрывающийся с ним снимок P_2 . По условиям задачи считается, что перекрывающиеся горизонтальные снимки $P_j, P_{j+1}, \dots, P_{j^*,j^*+1}^*$ получены с одной высоты полёта, вследствие чего разности параллаксов смежных пар этих снимков: $p_{j,j+1} - p_{j+2,j+3}, \dots, =$
 $= p_{j^*-2,j^*-1} - p_{j^*,j^*+1}^*; q_{j,j+1} - q_{j+2,j+3}, \dots, =$
 $= q_{j^*-2,j^*-1} - q_{j^*,j^*+1}^* -$ должны быть равны нулю.

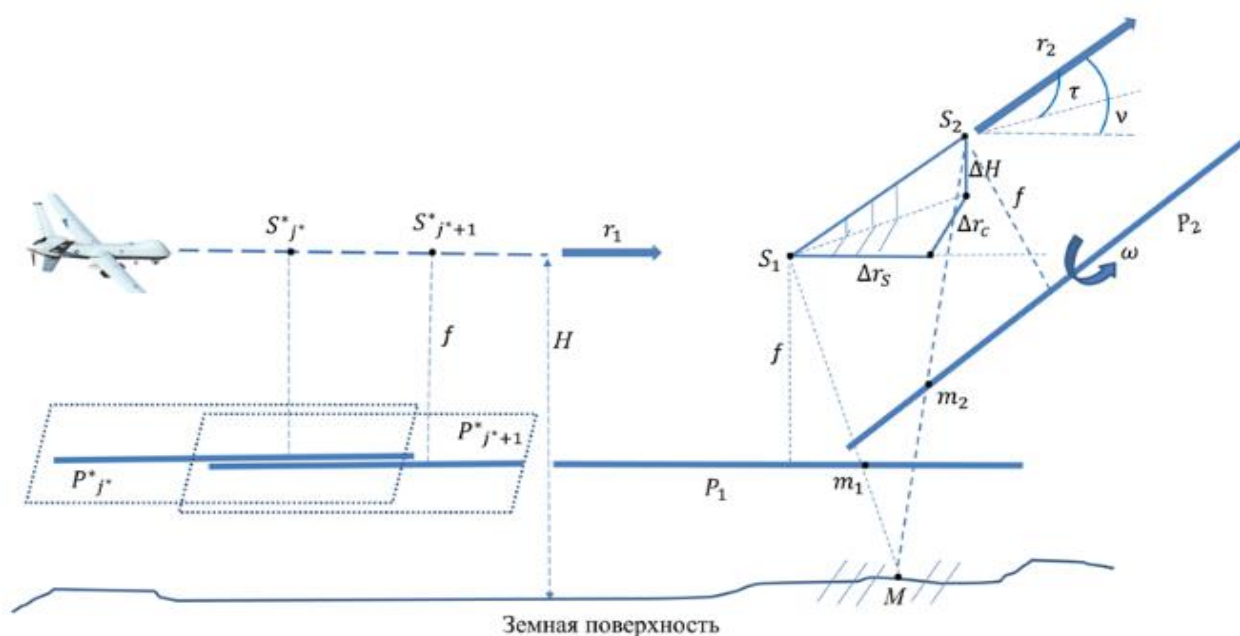


Рис. 2. Иллюстрация отклонений БЛА

Fig. 2. Illustration of UAV deviations

Параметры $\Delta r_c, \Delta H$, характеризующие отклонения возмущённой траектории r_2 БЛА от заданной r_1 по направлению и высоте полёта, вызваны линейными девиациями БЛА. Параметры ν, ω, τ , определяющие изменение ориентации БЛА в результате возникновения некоординированных отклонений,

обусловлены угловыми девиациями БЛА. Эти параметры представляют собой углы тангажа, крена и рыскания БЛА. Угол тангажа – угол ν между продольной осью БЛА, совпадающей с траекторией r_2 , и траекторией r_1 , параллельной плоскости местного горизонта; угол крена – угол ω между поперечной

осью БЛА и плоскостью местного горизонта; угол рыскания – угол τ между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

Для описания линейных и угловых девиаций БЛА разработана математическая модель [18], устанавливающая их функциональную связь с разностями параллаксов Δp , Δq смежных пар снимков:

$$P^* = \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)v + \frac{x_2 y_2}{f}\omega - y_2 \tau + x_2 \left(1 + \frac{x_2^2}{f}\right)v^2 + x_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}x_2 \tau^2 + 2 \frac{x_2^2}{f^2}v\omega - 2 \frac{x_2 y_2}{f}v\tau + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)\omega\tau,$$

$$Q^* = \frac{x_2 y_2}{f}v + \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega + x_2 \tau + y_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2}\right)v^2 + y_2 \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}y_2 \tau^2 + x_2 \left(1 + 2 \frac{y_2^2}{f^2}\right)v\omega + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)v\tau + 2 \frac{x_2 y_2}{f}\omega\tau;$$

x_2, y_2 – плоские координаты точки m_2 в системе координат снимка $P2$ в зоне перекрытия снимков $P1, P2$.

При отсутствии некоординированных отклонений БЛА ($\Delta H = \Delta r_c = v = \omega = \tau = 0$) разности параллаксов равны нулю, а при их возникновении – характеризуют уровень возникающих девиаций БЛА. В этой связи целью работы является оценка степени совместного и раздельного влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности. Методика исследования включает в себя следующую последовательность действий.

$P_{j^* j^*+1}^*$ и $P1, P2$, которая имеет следующий вид:

$$\Delta p = P^* \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) + x_2 \frac{\Delta H}{H}, \quad (1)$$

$$\Delta q = Q^* \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) + y_2 \frac{\Delta H}{H} + p_{\text{ш}} \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}, \quad (2)$$

где H – высота съёмки в штатном режиме горизонтального полёта БЛА; Δr_s – расстояние между центрами проекции (центрами тяжести БЛА) $S_{j^*}^*, S_{j^*+1}^*$ в режиме горизонтального полёта БЛА;

Шаг 1. Геометрическое построение макетных снимков $P1, P2$. Выполняется по известной в теории фотограмметрии методологии (рис. 3) на основе характеристик используемой цифровой камеры. В данной работе использовались характеристики цифровой камеры Nikon P700, представленные (табл. 1).

Полученные характеристики макетных снимков для двух вариантов топологии изображения точки местности в зоне перекрытия приведены в таблице 2. При этом будем считать, что плоские координаты точки определяются без ошибок.

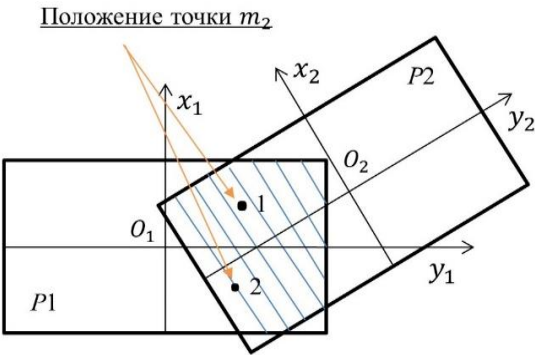


Рис. 3. Макетные снимки

Fig. 3. Mock-up images

Таблица 1. Характеристики цифровой камеры Nikon P700 и съёмки

Table 1. Characteristics of the Nikon P700 digital camera and shooting

Параметры цифровой камеры Digital camera parameters	Параметры съёмки Shooting parameters
Матрица ПЗС: длина 8 мм, ширина 6 мм Число пикселей: 3648 на 2736 Размер пикселя: $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм Фокусное расстояние камеры: 2,4 мм	Высота съёмки Н: 285 м Расстояние Δr_3 : 95м Перекрытие: 50%

Таблица 2. Характеристики макетных снимков

Table 2. Characteristics of the mock-up images

Параллаксы пары горизонтальных снимков Parallaxes of a pair of horizontal images	Формат снимка P2 Snapshot format	Плоские координаты изображения точки местности в зоне перекрытия снимков Flat coordinates of the image of the point of the terrain in the area of overlap of the images
$p_{ш} = 4 \text{ мм},$ $q_{ш} = 0$	$-4\text{мм} \leq x_2 \leq 4 \text{ мм}$ $-3\text{мм} \leq y_2 \leq 3 \text{ мм}$	<i>Положение 1</i> $x_2 = -2 \text{ мм},$ $y_2 = 1,5 \text{ мм}$ <i>Положение 2</i> $x_2 = -2 \text{ мм},$ $y_2 = -1,5 \text{ мм}$

Шаг 2. Задание различных вариантов сочетаний линейных и угловых девиаций и расчёт разностей параллаксов. Выполняется в соответствие с таблицей 2 и формулами (1) – (2).

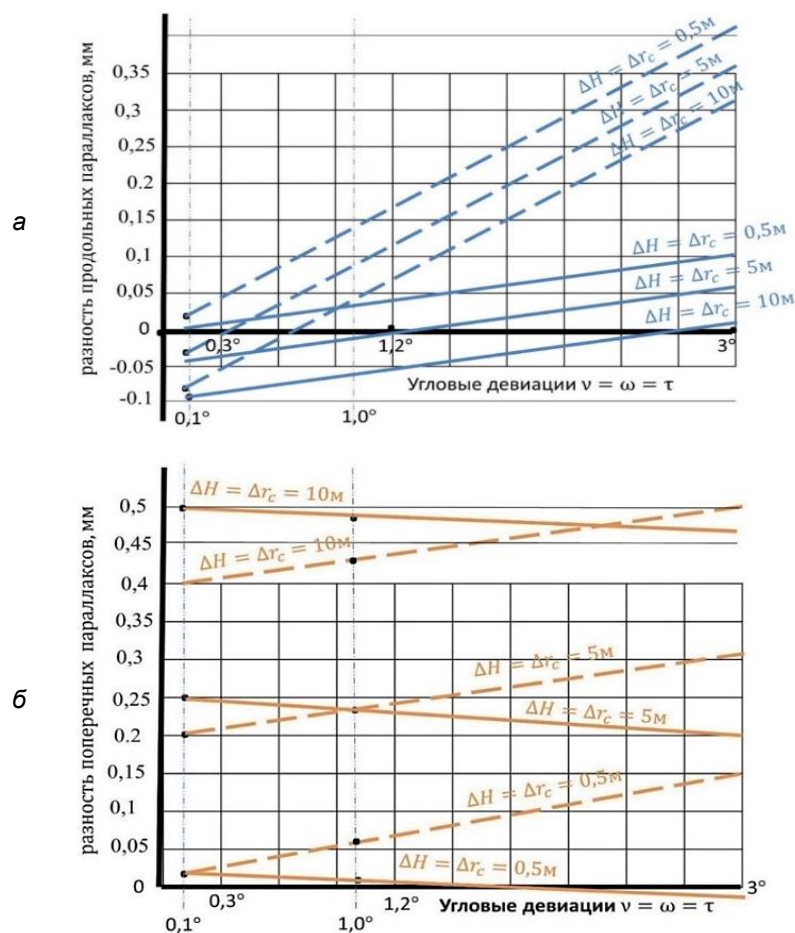
Шаг 3. Сравнение полученных результатов и формирование выводов.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим полученные результаты исследований и обсудим оценки совместного влияния линейных и угловых девиаций БЛА на величину разностей параллаксов смежных пар горизонтальных и горизонтального и наклонного снимков (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3. Оценки суммарного вклада линейных и угловых девиаций БЛА**Table 3.** Estimates of the total contribution of linear and angular deviations of UAV

Разность параллакс, мм Parallax difference, mm	Угловые девиации $\nu = \omega = \tau$, град Angular deviations $\nu = \omega = \tau$, deg								
	0,1°			1°			3°		
	Линейные девиации $\Delta H = \Delta r_c$, м Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$, m								
	0,5	5	10	0,5	5	10	0,5	5	10
Положение 1 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = 1,5$ мм)									
Δp_1	0,01	-0,04	-0,09	0,03	-0,01	-0,05	0,1	0,06	0,02
Δq_1	0,02	0,25	0,5	0,01	0,25	0,5	-0,01	0,2	0,44
Положение 2 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = -1,5$ мм)									
Δp_2	0,01	-0,03	-0,07	0,14	0,1	0,05	0,4	0,36	0,32
Δq_2	0,02	0,2	0,4	0,06	0,23	0,43	0,15	0,31	0,5

**Рис. 4.** Совместное влияние девиаций БЛА на разности параллакс: а – разности продольных параллакс; б – разности поперечных параллакс**Fig. 4.** The joint effect of UAV deviations on parallax differences: а – differences in longitudinal parallaxes; б – differences in transverse parallaxes

Анализ приведенных данных (табл. 3, рис. 4) позволяют отметить следующее. Величина и направленность (увеличение или уменьшение) изменений разностей, как продольных, так и поперечных параллаксов, зависит не только от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, но и от знака ординаты точки в зоне перекрытия снимков $P1$, $P2$.

При этом как уровень, так и направленность изменений разностей продольных параллаксов существенно отличаются от поперечных параллаксов. В частности:

1. Величина разности продольных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций как при положительных $(+y_2)$, так при отрицательных $(-y_2)$ значениях ординаты точки. При этом уровень разности в области минимальных угловых $(0,1^\circ - 0,5^\circ)$ и линейных $(0,5 - 1, 0 \text{ м})$ девиаций незначителен и не превышает несколько пикселей как при положительных, так и при отрицательных значениях ординаты точки, а при значительных угловых девиациях достигает следующих значений: при 1° – до $14 (+y_2) / 60 (-y_2)$ пикселей, а при 3° – до $45 (+y_2) / 180 (-y_2)$ пикселей. Причём уровень разности при отрицательных значениях ординаты точки в три раза выше, чем при её положительных значениях.

2. Величина разности поперечных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрица-

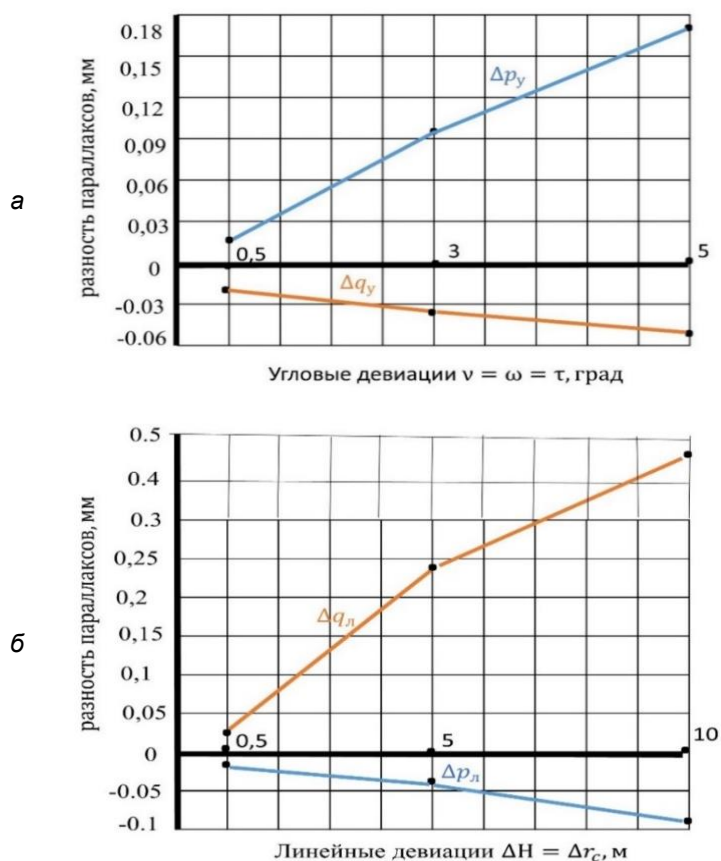
тельных $(-y_2)$ значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях $(+y_2)$. При этом уровень разности в области минимальных угловых $(0,1^\circ - 0,5^\circ)$ и линейных $(0,5 - 1, 0 \text{ м})$ девиаций составляет не менее 10 пикселей, а при значительных линейных девиациях достигает следующих значений: при 5 м – до $115 (+y_2) / 90 (-y_2)$ пикселей, а при 10 м – до $225 (+y_2) / 180 (-y_2)$ пикселей. Причём уровень разности при положительных и отрицательных значениях ординаты точки имеет один порядок.

3. Определяющее влияние на величину разностей продольных и поперечных параллаксов оказывают соответственно угловые и линейные девиации БЛА.

Рассмотрим и сравним между собой степени раздельного влияния угловых и линейных девиаций на разности продольных и поперечных параллаксов. С этой целью введём следующие обозначения: $(\Delta p_y, \Delta q_y)$, $(\Delta p_{\text{л}}, \Delta q_{\text{л}})$ – разности продольных и поперечных параллаксов, рассчитанные по формулам (1) – (2) при различных значениях угловых девиаций в условиях $\Delta H = \Delta r_c = 0$ и линейных девиаций в условиях $v = \omega = \tau = 0$. Тогда параметры $\Delta p_y, \Delta q_y$ будут характеризовать степень влияния угловых, а $\Delta p_{\text{л}}, \Delta q_{\text{л}}$ – линейных девиаций БЛА. Полученные результаты при положительных и отрицательных значениях ординаты точки в зоне перекрытия представлены в таблице 4 и на рисунках 5, 6.

Таблица 4. Оценки раздельного вклада линейных или угловых девиаций БЛА**Table 4.** Estimates of the separate contribution of linear or angular deviations of UAV

Разность параллакс, мм Parallax difference, mm	Угловые девиации $v = \omega = \tau$, град Angular deviations $v = \omega = \tau$, deg ($\Delta r_c = 0, \Delta H = 0$)			
	0,5°	3°	5°	
	Линейные девиации $\Delta H = \Delta r_c$, м / Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$, m ($v = \omega = \tau = 0$)			
				0,5 5,0 10,0
Точка 1 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = 1,5$ мм)				
Δp_y	0,017	0,103	0,174	
Δq_y	-0,006	-0,034	-0,052	
Δp_d				-0,004 -0,044 -0,088
Δq_d				0,023 0,24 0,474
Точка 2 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = -1,5$ мм)				
Δp_y	0,07	0,4	0,66	
Δq_y	0,02	0,12	0,21	
Δp_d				-0,005 -0,044 -0,088
Δq_d				0,02 0,185 0,37

**Рис. 5.** Разности параллакс при положительной ординате точки:
а – угловые девиации; б – линейные девиации**Fig. 5.** Parallax differences with a positive ordinate point:
а – angular deviations; б – linear deviations

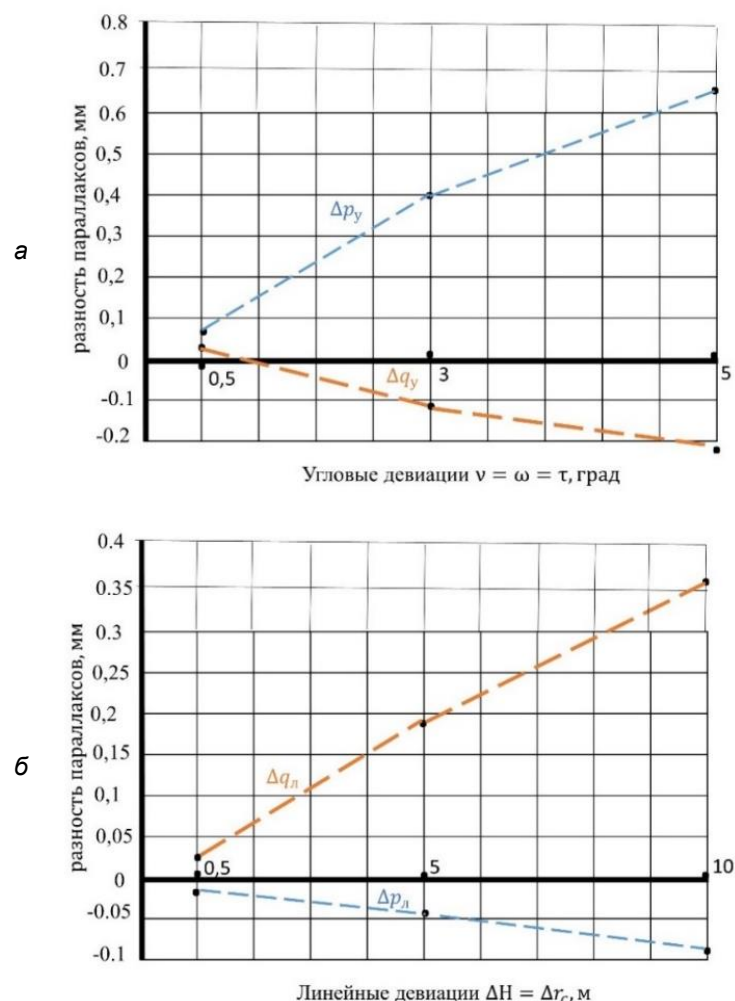


Рис. 6. Разности параллаксов при отрицательной ординате:
а – угловые девиации; б – линейные девиации

Fig. 6. Parallax differences with negative ordinate:
а – angular deviations; б – linear deviations

Анализ представленных в таблице 4 и на рисунках 5, 6 данных позволяет отметить следующее.

1. Разности продольных параллаксов в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия положительны, а поперечных – отрицательны, причём с ростом уровня угловых девиаций в диапазоне от $0,5^\circ$ до 5° первые возрастают, вторые – убывают, а величина первых в три раза больше, чем вторых.

2. Разности поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых

девиаций БЛА при положительной ординате точке в зоне перекрытия положительны, а продольных – отрицательны, при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА в диапазоне от 0,5 м до 10 м первые возрастают, вторые – убывают, а величина первых в четыре раза больше, чем вторых.

3. Определяющее влияние на величину разностей продольных и поперечных параллаксов оказывают соответственно угловые и линейные девиации БЛА.

Выводы

1. В процессе прямолинейного горизонтального полёта БЛА с регистрацией перекрывающихся изображений подстилающей поверхности после возникновения некоординированных отклонений БЛА от этой траектории один из перекрывающихся снимков будет горизонтальным, а другой – наклонным. При этом углы наклона (продольного и поперечного) и угол разворота наклонного снимка относительно горизонтального снимка совпадают с углами соответственно тангажа, крена и рыскания БЛА, а ориентация базиса съёмки, соединяющего центры проекций снимков, определяет параметры отклонений БЛА от заданной траектории по высоте и направлению полёта. В случае отсутствия отклонений эти отклонения, а также углы тангажа, крена и рыскания БЛА равны нулю.

2. Углы тангажа, крена и рыскания считаются положительными, если в момент регистрации наклонного снимка продольная и поперечная оси БЛА находятся соответственно выше и ниже плоскости местного горизонта, и при этом продольная ось находится справа относительно направления полёта. Критерием возникновения некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта БЛА является отличие от нуля разностей параллаксов каких-либо смежных пар снимков, поскольку для любой пары горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полёта БЛА, продольные параллаксы постоянны, а поперечные – равны нулю.

3. Величина разностей параллаксов зависит от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, возникших в момент регистрации наклонного снимка, и знака

ординаты соответственной точки в зоне перекрытия второй пары снимков. Уровни и знаки возникающих разностей продольных и поперечных параллаксов существенно отличаются друг от друга. Разность продольных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций как при положительных, так при отрицательных значениях ординаты точки, причём при отрицательных значениях ординаты точки она в три раза выше, чем при её положительных значениях. Разность поперечных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрицательных значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях, а её уровень при положительных и отрицательных значениях ординаты точки имеет один порядок.

4. Определяющее влияние на величину разности продольных параллаксов оказывают угловые, а поперечных – линейные девиации БЛА. При этом разность первых в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия всегда положительна и с ростом уровня угловых девиаций возрастает, а вторых – отрицательна и уменьшается, причём величина первой в три раза больше, чем второй. Разность поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых девиаций БЛА при положительной ординате точки в зоне перекрытия положительна, а продольных – отрицательна, а при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА первая возрастает, вторая убывает, а величина первой в четыре раза больше, чем второй.

Список литературы

1. Отказоустойчивая интегрированная навигационная система для беспилотного аппарата с использованием технического зрения / Д. А. Антонов К. К. Веремеенко, М. В. Жарков [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2020. № 2. С. 128–142. <https://doi.org/10.31857/S0002338820020043>
2. 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. N 48 (12). P. 1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>
3. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol. 16, N 1. P. 107–110. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16479>
4. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. N 34 (6). P. 652–661.
5. Kinematics and plane decomposition algorithm for nonlinear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilankumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. N 995 (1). P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>
6. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42, N 6. P. 1–10.
7. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, В. Г. Андронов [и др.]; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. 171 с.
8. Интегрированная система аэропортового транспортного средства с использованием технического зрения / Д. А. Антонов, К. К. Веремеенко, М. В. Жарков [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 132. <https://doi.org/10.7868/S0002338815040034>
9. Баклыков М. А. Применение модифицированных дронов при проведении топографо-геодезических работ // Автоматизация в промышленности. 2020. № 2. С. 19–21. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.02.05>
10. Attitude Determination Using Ambiguous GNSS Phase Measurements and Absolute Angular Rate Measurements / M. V. Zharkov, K. K. Veremeenko, D. A. Antonov, I. M. Kuznetsov // Gyroscopy and Navigation. 2018. Vol. 9, N 4. P. 277–286. <https://doi.org/10.1134/S2075108718040090>
11. Андронов В. Г., Князев А. А., Чуев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. № 4 (25). С. 145–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

12. Овчинникова Н. Г., Медведков Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3, № 1. С. 98–108. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108>
13. Elkaim G. H., Lie F. A. P., Gebre-Egziabher D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2015. P. 347–380.
14. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д. А. Антонов, М. В. Жарков, И. М. Кузнецов, Е. М. Лунев, А. Н. Пронькин // Труды МАИ. 2016. Вып. 91. С. 1–26.
15. 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.
16. Зоев И. В., Марков Н. Г., Рыжова С. Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 33, № 11. С. 34–49. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2346>
17. Мустаев А. Ф. Использование технологии «машинного зрения» для управления БПЛА // Международный научный журнал «Вестник науки». 2019. Т. 5, № 12 (21). С. 195–198.
18. Андронов В. Г., Чуев А. А. Идентификация девиаций беспилотных летательных аппаратов по параллаксам изображений // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 1. С. 59–69. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-59-69>
19. Андронов В. Г., Чуев А. А. Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 3. С. 321–332. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>
20. 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. Т. 12, № 1. С. 129–144. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144>

References

1. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., et al. Fault-tolerant integrated navigation system for an unmanned vehicle using technical vision. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2020;(2):128–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002338820020043>
2. 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):1675–689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

3. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(1):107–110. (In Russ.) <https://doi.org/0.5937/jaes16-16479>
4. 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.
5. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilangkumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., Raghunath R., 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):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>
6. 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;42(6):1–10.
7. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G., et al. Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 171 p. (In Russ.)
8. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., et al. The integrated system of an airport vehicle using technical vision. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2015;(4):132. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002338815040034>
9. Baklykov M.A. The use of modified drones during topographic and geodetic works. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*. 2020;(2):19–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.02.05>
10. Zharkov M.V., Veremeenko K.K., Antonov D.A., Kuznetsov I.M. Attitude Determination Using Ambiguous GNSS Phase Measurements and Absolute Angular Rate Measurements. *Gyroscopy and Navigation*. 2018;9(4):277–286. <https://doi.org/10.1134/S2075108718040090>
11. Andronov V.G., Knyazev A.A., Chuev A.A. Model of parameters of deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;4(25):145–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>
12. Ovchinnikova N.G., Medvedkov D.A. The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy = Economics and Ecology of Territorial Formations*. 2019;3(1):98–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108>
13. Elkaim G.H., Lie F.A.P., Gebre-Egziabher D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. In: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer; 2015. P. 347–380.
14. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pronkin A.N. Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2016;(91):1–26. (In Russ.)
15. Stepanov D.N. 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*, 2014;(1):150–157. (In Russ.)

16. Zoev I.V., Markov N.G., Ryzhova S.E. Intelligent computer vision system of unmanned aerial vehicles for monitoring technological facilities of oil and gas industry enterprises. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*. 2019;33(11):34–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2346>
17. Mustaeв A.F. Using «machine vision» technology to control UAVs. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Vestnik nauki» = International Scientific Journal «Bulletin of Science»*. 2019;5(12):95–198. (In Russ.)
18. Andronov V.G., Chuev A.A. Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images. *Vestnik SGUGiT = Bulletin of SGUGiT*. 2023;28(1):59–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-59-69>
19. Andronov V.G., Chuev A.A. Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2023;24(3):321–332. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>
20. Andronov V.G., Chuev A.A., Knyazev A.A. 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 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>

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

Чуев Андрей Алексеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, Researcher ID: AAF-5480-2019, ORCID: 0000-0002-2980-0533

Vladimir G. Andronov, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

Andrey A. Chuev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, Researcher ID: AAF-5480-2019, ORCID: 0000-0002-2980-0533