

Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности

В.Г. Андронов¹ ✉, А.А. Чуев¹, И.С. Юдин¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка методики определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Методы. Методика основана на функциональной связи между параметрами отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и изменениями продольных и поперечных параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленными этими отклонениями. При математическом описании вычислительных процедур определения параметров отклонений использовались методы аппроксимации функций и математической обработки результатов измерений с оценкой точности полученных результатов.

Результаты. Разработана методика, включающая в себя контроль, оценку уровня и определения величины и направления отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории. Получена система нелинейных уравнений, описывающая функциональную связь между параметрами отклонений и изменениями параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности. Выполнены процедуры линеаризации, нормализации и решения этой системы уравнений по методу наименьших квадратов, получены аналитические соотношения для апостериорной оценки точности получаемых результатов.

Заключение. Методика обеспечивает обнаружение и определение параметров некоординированных отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории с точностью, соизмеримой с методами спутниковой навигации. Предложенный подход по сравнению с известными методиками позволяет уменьшить число обрабатываемых соответственных точек на перекрывающихся изображениях и размерность решаемой задачи. Это позволяет существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат, что имеет большое значение для использования разработанной методики на борту малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: автономная навигация; беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъемка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Андронов В.Г., Чуев А.А., Юдин И.С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 122-141. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Подписана в печать 17.05.2022

Опубликована 29.07.2022

Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images

Vladimir G. Andronov ¹ ✉, Andrey A. Chuev ¹, Ilya S. Yudin ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a methodology for determining deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory in conditions of signals loss from navigation satellites.

Methods. The technique is based on functional relationship between deviation parameters of pilotless aircrafts from a given trajectory and changes in longitudinal and transverse parallaxes of overlapping images of the underlying surface due to these deviations. Mathematical description of computational procedures for deviation parameters determination used methods of functions approximation and mathematical processing of measurement results with accuracy estimation of obtained results.

Results. A methodology that includes monitoring, assessing the level and determining the magnitude and direction of deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory was developed. A system of nonlinear equations describing functional relationship between deviation parameters and changes in parallax of overlapping images of the underlying surface is obtained. Linearization, normalization and solutions of this system of equations by the least squares method were performed. Analytical relations were obtained for a posterior accuracy assessment of the obtained results.

Conclusion. The technique provides parameters detection and determination of uncoordinated deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory with an accuracy commensurate with satellite navigation methods. The proposed approach makes it possible to reduce the number of processed corresponding points in overlapping images and the dimension of the problem being solved in comparison with known methods. This significantly reduces the level of computational and resource costs, which is of great importance for the use of developed technique on the board of miniature pilotless aircrafts

Keywords: autonomous navigation; pilotless aircrafts; parallax of images; aerial photography.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 122-141 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>.

Received 30.03.2022

Accepted 17.05.2022

Published 29.07.2022

Введение

Для автоматического управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) используются параметры их текущего положения и ориентации, которые измеряются, как правило, датчиками контура инерциальной навигации. Основным недостатком инерциальных систем является существенная зависимость точности от длительности автономной работы. Это обусловлено принципами их работы и связано с накоплением ошибок измерений. Известно, что из-за ограничений по весу и габаритам наиболее высокая скорость накопления ошибок характерна для мини БЛА. Например, уже через несколько минут автономного полёта мини БЛА весом 2–4 кг точность инерциальных измерений ухудшается в два-три раза [1]. В условиях внешних возмущений (прерывистые порывы ветра, восходящий поток, воздушная яма и т.п.) это может привести к возникновению некоординированных отклонений БЛА и существенному отклонению маршрута его полёта от заданной траектории. Поэтому при высоких требованиях к точности выхода БЛА на заданную точку траектории в районе выполнения целевых задач инерциальная навигационная система БЛА, как правило, интегрируется со спутниковой навигационной системой, по сигналам которой выполняется коррекция инерциальных измерений [2-6]. Вместе с тем известно [7-10], что в про-

цессе полёта БЛА не исключены потери сигналов от навигационных спутников.

В этой связи актуальной является задача коррекции инерциальных измерений ориентации и положения БЛА по дополнительной автономной информации в случае потери сигналов от навигационных спутников. Для решения этой задачи широко применяются различные методы, в том числе обработки изображений подстилающей поверхности [11]. В данной работе рассматривается новая методика определения отклонений БЛА от заданной траектории по параллаксам текущих изображений подстилающей поверхности.

Материалы и методы

Постановка задачи

Будем считать, что БЛА совершает движение по заданной траектории, которая представляет собой прямолинейный маршрут, параллельный плоскости местного горизонта, и характеризуется отсутствием программных маневров по направлению и высоте полёта. При этом система автоматического управления БЛА функционирует в режиме стабилизации и с требуемой точностью отрабатывает некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории. Для этого датчиками инерциальной навигационной системы измеряются параметры полёта БЛА, а также выполняется коррекция их значений по сигналам навигационных спутников. Наряду с

этим навигационными измерениями цифровой фотокамерой, установленной на борту БЛА, осуществляется регистрация и фотограмметрическая обработка (рис.1) перекрывающихся изоб-

ражений P_j подстилающей поверхности, где $j = \overline{1, J}$. При этом зоны перекрытия имеют только смежные пары снимков P_j, P_{j+1} , а коэффициент их перекрытия k_p априорно известен.

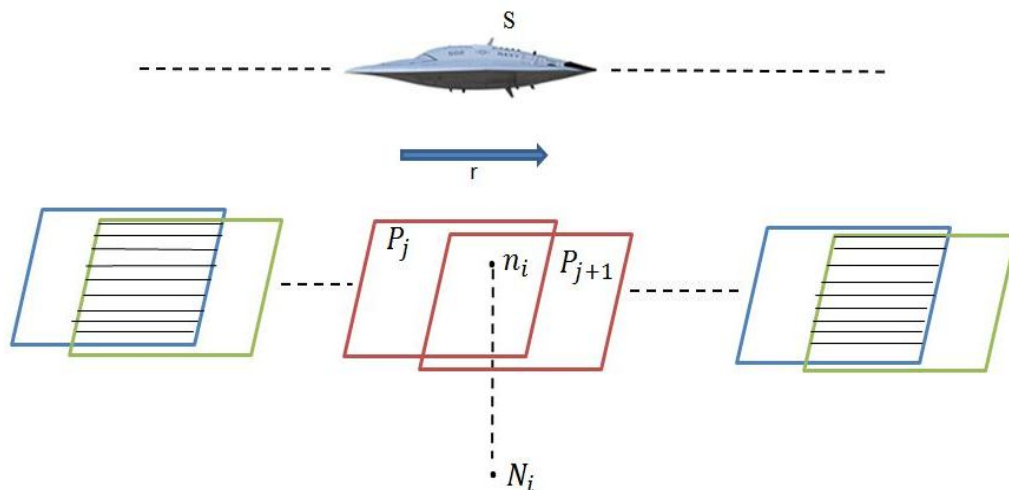


Рис. 1. Режим горизонтального полёта БЛА

Fig. 1. PLA horizontal flight mode

Допустим далее, что в какой-то момент полёта БЛА по заданной траектории произошла потеря сигналов от навигационных спутников, а ещё через некоторое время, например, после получения снимка $P_{j+1} = P1$, возникли неkoordinированные отклонения БЛА (рис. 2), в условиях которых был получен перекрывающийся с ним снимок $P_{j+2} = P2$. Поскольку снимок P1 получен в режиме горизонтального полёта БЛА по заданной траектории r_1 , а P2 – в условиях отклонений БЛА и движения по новой траектории r_2 , первое изображение будем называть горизонтальным, а второе – наклонным. Введём угловые и линейные параметры, характеризую-

щие величину и направления отклонений БЛА от заданной траектории r_1 .

Угол тангажа ν – угол между продольной осью БЛА, совпадающей с траекторией r_2 , и траекторией r_1 , параллельной плоскости местного горизонта; угол крена ω – угол между поперечной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; угол рыскания τ – угол между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

На рис. 2 видно, что параметры угловых отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта в то же время являются углами взаимной ориентации снимков P1 и P2.

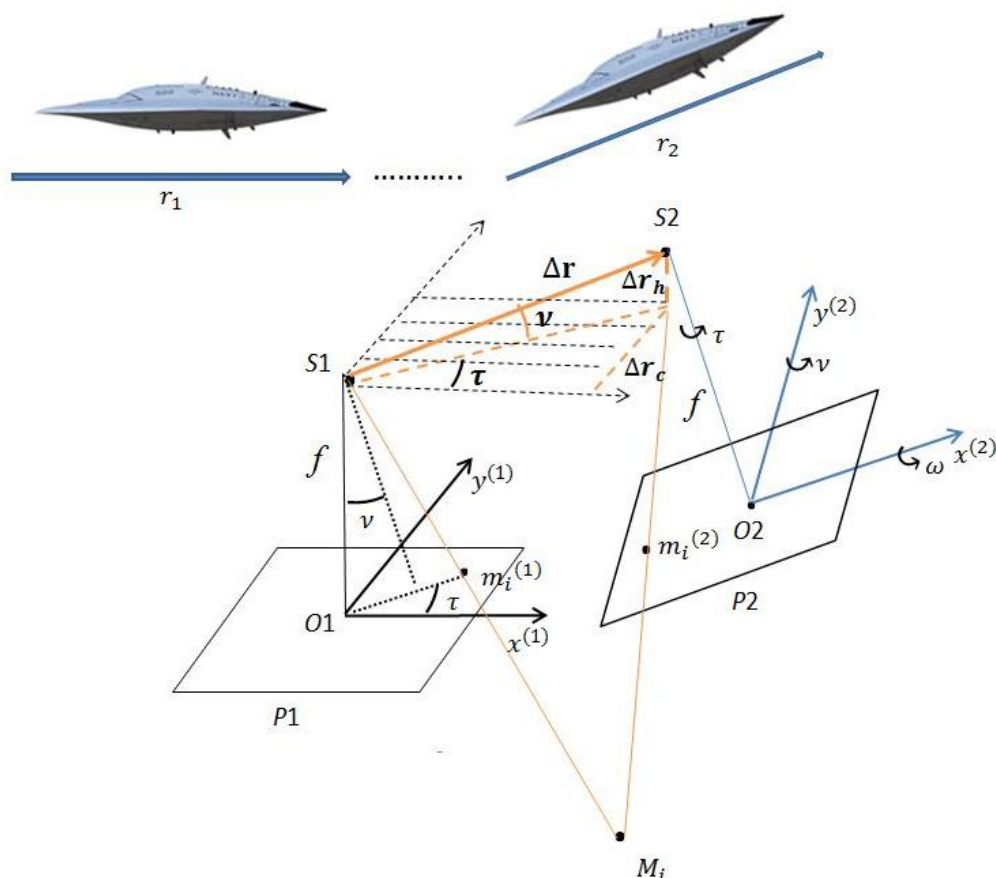


Рис. 2. Взаимная ориентация изображений P_1 и P_2

Fig. 2. Mutual orientation of images P_1 and P_2

К параметрам линейных отклонений БЛА от заданной траектории будем относить отклонения $\Delta r_c, \Delta r_h$ траектории r_2 от r_1 по направлению и высоте полёта БЛА.

Положим также, что в результате инерциальных измерений и последовательной фотограмметрической обработки смежных пар снимков $\{<P_j, P_{j+1}>\}$, получаемых при движении БЛА по заданной траектории r_1 , а также снимков P_1 и P_2 , определены следующие параметры:

- плоские координаты $\{<x_i^{(j)}, y_i^{(j)}>\}$ точек $\{n_j\}$ в системе координат горизонтальных снимков P_j ;

- продольные и поперечные параллаксы $\{<p_i^{(j,j+1)}, q_i^{(j,j+1)}>\}$ смежных пар горизонтальных снимков P_j, P_{j+1} ;

- плоские координаты $\{<x_i^{(1)}, y_i^{(1)}>, <x_i^{(2)}, y_i^{(2)}> | i = \overline{1, I}\}$ соответственных точек $m_i^{(1)}$ и $m_i^{(2)}$, изобразившихся на снимках P_1 и P_2 ;

- продольный и поперечный параллаксы $p_i^{(1,2)}, q_i^{(1,2)}$ снимков P_1, P_2 ;

- фокусное расстояние f цифровой камеры;

- расстояние Δr_s между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта;

– углы тангажа ν , крена ω и рыскания БЛА τ , измеренные штатными средствами инерциальной навигационной системы в момент времени получения снимка P_2 .

Задача заключается в определении значений параметров ν , ω , τ и $\Delta r_c, \Delta r_h$ по результатам раздельной фотограмметрической обработки снимков $\{<P_j, P_{j+1}>\}$ и снимков P_1, P_2 .

Методика решения задачи

Известно [13], что для любой соответственной точки i в каждой паре смежных горизонтальных снимков $j, j+1$ в соответствии с определением параллаксов должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} p_i^{(j,j+1)} = x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)} = \text{const}; \\ q_i^{(j,j+1)} = y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Из (1) следует, что отличие от нуля разностей параллаксов $(p_i^{(j+1,j+2)} - p_i^{(j,j+1)})$, $(q_i^{(j+1,j+2)} - q_i^{(j,j+1)})$ каких-либо смежных пар снимков говорит о том, что возникли некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории горизонтального полёта БЛА.

Выражения для расчёта разностей параллаксов $\Delta p_i, \Delta q_i$ пары горизонтальных снимков P_j, P_{j+1} и смежной с ней пары снимков $P_1=P_{j+1}, P_2=P_{j+2}$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p_i = (x_i^{(1)} - x_i^{(2)}) - (x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)}); \\ \Delta q_i = (y_i^{(1)} - y_i^{(2)}) - (y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)}). \end{cases} \quad (2)$$

Пусть далее имеется виртуальный снимок $\bar{P}_2$, полученный путём трансформирования наклонного снимка P_2 в горизонтальную проекцию по элементам $a_{11}(\nu, \omega, \tau), \dots, a_{33}(\nu, \omega, \tau)$ матрицы направляющих косинусов, описывающим взаимную ориентацию этих снимков. Очевидно, что изображение точки M_i земной поверхности будет находиться в зоне перекрытия пары горизонтальных снимков $P_1, \bar{P}_2$ и в соответствии с (1) справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)} = x_i^{(1)} - \bar{x}_i^{(2)}; \\ (y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)}) = y_i^{(1)} - \bar{y}_i^{(2)}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{x}_i^{(2)}, \bar{y}_i^{(2)}$ – плоские координаты точки M_i в системе координат снимка $\bar{P}_2$.

Сравнивая выражения (2) и (3), получим:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \bar{x}_i^{(2)} - x_i^{(2)}; \\ \Delta q_i = \bar{y}_i^{(2)} - y_i^{(2)}. \end{cases} \quad (4)$$

Подставим в (4) известные соотношения [12] между плоскими координатами соответственных точек горизонтального и наклонного снимков, полученных из одного центра проекции. Имеем:

$$\begin{cases} \Delta p_i = -x_i^{(2)} - f \frac{a_{11}x_i^{(2)} + a_{12}y_i^{(2)} - a_{13}f}{a_{31}x_i^{(2)} + a_{32}y_i^{(2)} - a_{33}f}; \\ \Delta q_i = -y_i^{(2)} - f \frac{a_{21}x_i^{(2)} + a_{22}y_i^{(2)} - a_{23}f}{a_{31}x_i^{(2)} + a_{32}y_i^{(2)} - a_{33}f}. \end{cases} \quad (5)$$

Применив к тригонометрическим функциям $a_{11}(\nu, \omega, \tau), \dots, a_{33}(\nu, \omega, \tau)$ методы аппроксимации так, как это показано в работе [13], после алгебраических преобразований получим:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \frac{1}{2} x_i^{(2)} (\omega^2 - \tau^2) + f v - y_i^{(2)} \tau + x_i^{(2)} v^2 + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f} (v + \omega \tau) - \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} \omega \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} (\omega - 2v\tau); \\ \Delta q_i = y_i^{(2)} \frac{1}{2} (v^2 - \tau^2) + f \omega + x_i^{(2)} (v \omega - \tau) + y_i^{(2)} \omega^2 + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} (\omega - v\tau) + \frac{x_i^{(2)}}{f} v\tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} (v + 2\omega\tau). \end{cases} \quad (6)$$

Из выражений (6) следует, что при $v = \omega = \tau = 0$, то есть при отсутствии отклонений БЛА от заданной траектории, справедливы соотношения $\Delta p_i = \Delta q_i = 0$. Поэтому система уравнений (6) описывает зависимость изменений параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности от величины возникающих угловых отклонений БЛА от заданной траектории прямолинейного горизонтального полёта. Известные подходы к описанию этой зависимости [14] основаны на построении сложного функционала с громоздкими, в том числе тригонометрическими, выражениями. Разработанная модель (6) позволяет в два раза сократить число соответственных точек, необходимых для организации корректной математической обработки резуль-

татов измерений, и существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат.

Для решения поставленной задачи в части определения параметров v , ω , τ разложим нелинейные уравнения (6) в ряд Тейлора и, ограничившись только линейными членами, получим:

$$\begin{aligned} d(\Delta p_i) &= \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} dv + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} d\tau; \\ d(\Delta q_i) &= \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} dv + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} d\tau. \end{aligned}$$

Представим эту систему линеаризованных уравнений в матрично-векторной форме:

$$\begin{bmatrix} d(\Delta p_i) \\ d(\Delta q_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dv \\ d\omega \\ d\tau \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Дифференцируя уравнения (6), найдём частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} &= 2x_i^{(2)} v - 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \tau + \left(f + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f} \right); \\ \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} &= x_i^{(2)} \omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f}; \\ \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} &= -2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} v + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \omega + x_i^{(2)} \tau - y_i^{(2)}; \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} &= y_i^{(2)} v + x_i^{(2)} \omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f}; \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} &= x_i^{(2)} v + 2y_i^{(2)} \omega + 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \tau + \left(f + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} = \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) v + 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \omega + y_i^{(2)} \tau - x_i^{(2)}.$$

Составим уравнение поправок, соответствующее линеаризованному уравнению (7). Пусть $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$ – приближённые значения углов тангажа, крена и рыскания БЛА; $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ – разности параллакс-ов снимков P1, P2 и смежной с ней предыдущей пары горизонтальных изображений, полученные по измеренным координатам соответственных точек, а $\Delta \tilde{p}_i, \Delta \tilde{q}_i$ – приближённые значения этих разностей параллакс-ов.

Тогда вектор

$$\bar{\epsilon}_i = \begin{pmatrix} \Delta p_i^0 - \Delta \tilde{p}_i \\ \Delta q_i^0 - \Delta \tilde{q}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_i^p \\ \epsilon_i^q \end{pmatrix} \quad (9)$$

будет вектором свободных членов, а в качестве вектора поправок в значения $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ примем вектор

$$\bar{\mathbf{g}}_i = \begin{pmatrix} \mathfrak{g}_i^p \\ \mathfrak{g}_i^q \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Учитывая изложенное, уравнение поправок для каждой точки i , соответствующее линеаризованному уравнению (7), будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_i \Delta \bar{\mathbf{U}}_i = \bar{\epsilon}_i + \bar{\mathbf{g}}_i, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} \end{bmatrix}$$

– матрица частных производных;

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_i = \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \\ \Delta \tau \end{pmatrix} \text{ – вектор поправок к}$$

приближённым значениям $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$.

В уравнении (11) компоненты $\Delta \tilde{p}_i, \Delta \tilde{q}_i$ вектора $\bar{\epsilon}_i$ и элементы матрицы $\mathbf{M}_i$ вычисляются соответственно по формулам (6) и (8) при приближённых значениях углов $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$. При этом размерность уравнения поправок (11) определяется размерностью свободного члена $\bar{\epsilon}_i$, а именно в миллиметрах. Поэтому углы тангажа, крена и рыскания БЛА в уравнениях (6), (8) и поправки к ним в (11) должны быть выражены в радианах, а плоские координаты $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$ i -й точки и фокусное расстояние f цифровой камеры – в миллиметрах.

Для каждой точки i с плоскими координатами $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$, находящейся в зоне перекрытия изображений P1 и P2, можно составить два уравнения поправок. Тогда структура общей системы уравнений поправок в векторно-матричной форме для всех включенных в обработку точек с порядковыми номерами $i = \overline{1, I}$ будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_{[2I, 3]} \Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3, 1>} = \bar{\epsilon}_{<2I, 1>} + \bar{\mathbf{g}}_{<2I, 1>}, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{M}_{[2I, 3]} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial \tau} \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{U}_{<3,1>} = \begin{pmatrix} \delta v \\ \delta \omega \\ \delta \tau \end{pmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_1^q \\ \vdots \\ \varepsilon_I^p \\ \varepsilon_I^q \end{pmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{g}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} g_1^p \\ g_1^q \\ \vdots \\ g_I^p \\ g_I^q \end{pmatrix}.$$

В соответствии с методом наименьших квадратов для решения задачи определения углов тангажа, крена и рыскания БЛА необходимо иметь переопределённую систему уравнений поправок (12), для чего требуется выделить в зоне перекрытия не менее двух точек. При этом итерационный процесс решения системы уравнений (12) производится по формуле

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi) = (\mathbf{M}_{[3,2I]}^T \cdot \mathbf{M}_{[2I,3]})_{(\xi)}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{[3,2I]}^T_{(\xi)} \bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>}(\xi), \quad (13)$$

где ξ – порядковый номер итерации.

В процессе решения поправки $\Delta v, \Delta \omega, \Delta \tau$ находятся до тех пор, пока в какой-либо итерации $(\xi + 1)$ не выполнится условие

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1) - \Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi) \leq (\delta v, \delta \omega, \delta \tau)_{\text{доп}}^T, \quad (14)$$

где $(\delta v, \delta \omega, \delta \tau)_{\text{доп}}^T$ – заданная априорно точность вычислений.

Оценка точности полученных решений производится по формуле

$$\sigma \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1) = \sigma_0 \sqrt{\text{diag}[(\mathbf{M}_{[3,2I]}^T \mathbf{M}_{[2I,3]})_{(\xi+1)}^{-1}]}. \quad (15)$$

Параметр σ_0 представляет собой ошибку единицы веса измерений и вычисляется следующим образом. Полученные в заключительной итерации $(\xi + 1)$ значения элементов матрицы $\mathbf{M}_{[2I,3]}(\xi+1)$, компонент векторов свободных членов $\bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>}(\xi+1)$ и поправок $\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1)$ подставляют в уравнение (8) и находят значения компонент вектора $\bar{\mathbf{g}}_{<2I,1>}(\xi+1)$, после чего σ_0 определяют по формуле

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\bar{\mathbf{g}}_1^p{}^T_{<2I,1>}(\xi+1) \bar{\mathbf{g}}_1^p_{<2I,1>}(\xi+1)}{2I-3}} = \sqrt{\frac{(g_1^p)^2 + (g_1^q)^2 + \dots + (g_I^p)^2 + (g_I^q)^2}{2I-3}}. \quad (16)$$

Решение задачи в части определения параметров $\Delta r_c, \Delta r_h$ выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta r_c &= \Delta r_S \tan \tau; \\ \Delta r_h &= \Delta r_S (\tan \nu / \cos \tau), \end{aligned} \quad (17)$$

где Δr_S – расстояние между центрами проекций $S1$ и $S2$ в плоскости местного горизонта.

Результаты и их обсуждение

Разработанная методика включает в себя три этапа решения поставленной задачи (рис. 3): калибровка параллакс-ов, контроль уровня отклонений БЛА от заданной траектории и определение параметров отклонений БЛА.

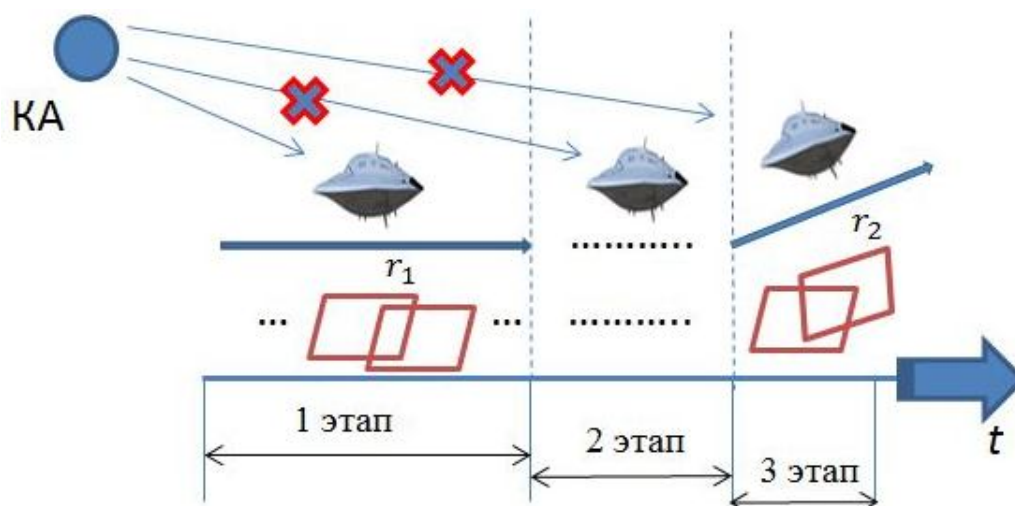


Рис. 3. Иллюстрация к методике

Fig. 3. Illustration of the method

На каждом этапе выполняются процедуры анализа и обработки изображений, связанные с поиском и отождествлением соответственных точек в зонах перекрытия изображений подстилающей поверхности, вычислительные процедуры расчёта их плоских координат, параллаксов, разностей параллаксов и ряд других простых алгебраических операций. На первом этапе к ним добавляются вычислительные процедуры калибровки параллаксов, а на третьем – решения системы нелинейных уравнений по методу наименьших квадратов. Рассмотрим содержание этих процедур более подробно.

На первом этапе в штатном режиме прямолинейного горизонтального полёта БЛА по траектории r_1 производится регистрация и обработка перекрывающихся горизонтальных изображений. В соответствии с этим в зонах перекрытия каждой пары снимков последовательно выполняются автоматические процедуры задания и определе-

ния пиксельных координат двух точек. Плоские координаты $x_i^{(j)}, y_i^{(j)}$ точек в зонах перекрытия пар снимков рассчитываются по порядковым номерам пикселей, содержащих изображения этих точек. На первых снимках смежных пар порядковые номера пикселей этих точек задаются по известному коэффициенту перекрытия, причём одна из них выбирается в положительной, а другая – в отрицательной части их осей ординат. На вторых снимках осуществляется поиск и отождествление этих точек корреляционными методами.

Далее по мере определения координат точек производится вычисление параллаксов $p_{ши}^{(j,j+1)}, q_{ши}^{(j,j+1)}$ смежных пар изображений и их разностей

$$\Delta p_{ши}^{(j)} = p_{ши}^{(j+1,j+2)} - p_{ши}^{(j,j+1)},$$

$$\Delta q_{ши}^{(j)} = q_{ши}^{(j+1,j+2)} - q_{ши}^{(j,j+1)},$$

где обозначение «ш» в нижних индексах свидетельствует о том, что снимки получены в штатном режиме полёта БЛА.

По условиям задачи считается, что система навигации БЛА на первом этапе функционирует в штатном режиме с использованием сигналов от навигационных спутников и обеспечивает заданную точность определения и стабилизации параметров заданной траектории. Вместе с тем, очевидно, что в штатном режиме полёта БЛА вследствие имеющихся ошибок навигации БЛА условия (1) будут выполняться с априорно неизвестной погрешностью.

Для оценки величины этой погрешности производится калибровка полученных значений параллаксов, под которой понимается определение степени нарушения условий (1), то есть степени отличий реальных значений $\Delta p_{\text{ши}}^{(j)}, \Delta q_{\text{ши}}^{(j)}$ от нуля, а также задание коэффициента γ , устанавливающего допустимый уровень $\Delta p_{\text{доп}}, \Delta q_{\text{доп}}$ этих отличий.

С этой целью в конце первого этапа по всем точкам смежных пар снимков вычисляются математические ожидания разностей параллаксов $\Delta \bar{p}_{\text{ш}}, \Delta \bar{q}_{\text{ш}}$ и задаются значения допустимого уровня их отличий от нуля:

$$\begin{cases} \Delta \bar{p}_{\text{ш}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta p_{\text{ши}}^{(j)}; \\ \Delta \bar{q}_{\text{ш}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta q_{\text{ши}}^{(j)}. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Delta p_{\text{доп}} = \gamma \Delta \bar{p}_{\text{ш}}; \\ \Delta q_{\text{доп}} = \gamma \Delta \bar{q}_{\text{ш}}. \end{cases} \quad (19)$$

На втором этапе, который наступает с потерей сигналов от спутников и характеризуется быстро нарастающим уровнем снижения точности инерциальных измерений, выполняется кон-

троль и оценка уровня отклонений БЛА от заданной траектории. Для этого в том же порядке, как на первом этапе, выполняются процедуры анализа и обработки изображений, а также вычислительные процедуры расчёта плоских координат точек, параллаксов и разностей параллаксов $\Delta p_i^{(j)}, \Delta q_i^{(j)}$ смежных пар снимков. При этом к ним добавляются операции последовательного сравнения значений $\Delta p_i^{(j)}, \Delta q_i^{(j)}$ и $\Delta p_{\text{доп}}, \Delta q_{\text{доп}}$ по формуле

$$\begin{cases} \Delta p_i^{(j)} \leq \Delta p_{\text{доп}}; \\ \Delta q_i^{(j)} \leq \Delta q_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (20)$$

Нарушение условий (20), возникшее при обработке каких-либо смежных пар снимков $P_J, P1$ и $P1, P2$, считается моментом завершения второго этапа и является критерием превышения допустимого уровня некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории.

На третьем заключительном этапе производятся вычислительные процедуры математической обработки результатов фотограмметрических и инерциальных измерений, выполненных после регистрации снимков $P1$ и $P2$. Математическая обработка осуществляется в соответствии с формулами (6), (8) – (16) путём решения системы нелинейных уравнений по методу наименьших квадратов и вычислений по формулам (1). Этап заканчивается выдачей в систему управления БЛА значений параметров его угловых и линейных отклонений $v^*, \omega^*, \tau^*, \Delta r_c, \Delta r_h$.

Для оценки работоспособности предлагаемой методики были проведены экспериментальные исследования на макет-

ных снимках, построенных на основе характеристик цифровой камеры Nikon P700 [15] которые представлены в табл.1.

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: 2,4 мм.	Высота съёмки: 285 м. Расстояние $S_1 S_2$: 95 м. Коэффициент перекрытия горизонтальных снимков в штатном режиме горизонтального полёта: $k_p = 0,5$ (50%).

Макетные снимки включали в себя смежные пары горизонтальных снимков $(P_1, P_2); \dots; (P_{j-1}, P_j), (P_j, P_1)$ и пару горизонтального и наклонного снимков P_1, P_2 , смежную с парой (P_j, P_1) . Графическая иллюстрация горизонтальных макетных снимков P_1 представлена рис.4, снимков P_1, P_2 – на рис.5, а их характеристики – в табл.2.

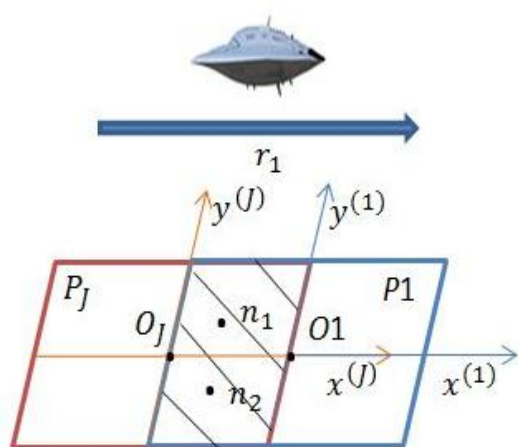


Рис. 4. Горизонтальные снимки P_j, P_1

Fig. 4. Horizontal snapshots P_j, P_1

Значения параметров макетных снимков формировались следующим образом. На паре горизонтальных снимков P_j и P_1 в зоне их перекрытия были выбраны точки n_1, n_2 , а в зоне перекрытия пары P_1, P_2 – точки m_1, m_2 .

Плоские координаты точек n_1, n_2 на снимках $P_1, P_2, \dots, P_j$ и P_1 и точек m_1, m_2 на снимке P_1 задавались, исходя из формата этих снимков и коэффициента перекрытия k_p горизонтальных снимков в штатном режиме полёта. Значения плоских координат $x_1^{(2)}, y_1^{(2)}; x_2^{(2)}, y_2^{(2)}$ точек m_1 и m_2 на наклонном снимке P_2 моделировались путём трансформации их горизонтальных координат $\bar{x}_1^{(2)} = \bar{x}_2^{(2)} = -x_1^{(1)} = -x_1^{(2)}, \bar{y}_1^{(2)} = y_1^{(1)}, \bar{y}_2^{(2)} = y_2^{(1)}$ при заданных значениях углов ν, ω, τ .

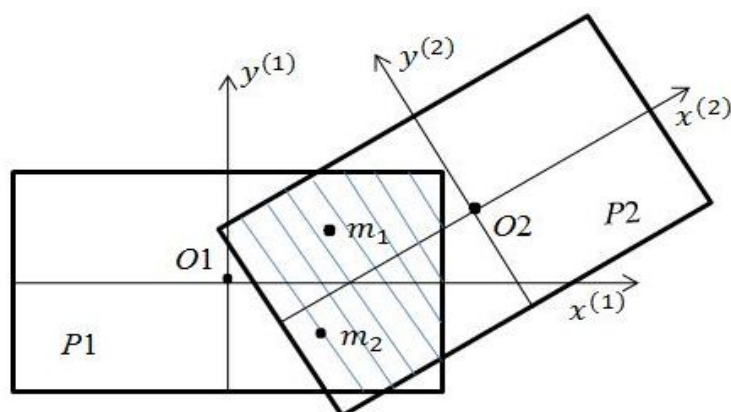
Рис. 5. Горизонтальный и наклонный снимки P_1, P_2 Fig. 5. Horizontal and oblique shots P_1, P_2

Таблица 2. Параметры макетных снимков

Table 2. Layout image parameters

Формат снимков $P_1, P_2, \dots, P_J, P_1$ / Snapshot format $P_1, P_2, \dots, P_J, P_1$	Плоские координаты / Flat coordinates	
	Снимки P_J и P_1 / Snapshots of P_J and P_1	Снимки P_1, P_2 / Snapshots of P_1, P_2
$-4 \text{ мм} \leq x^{(j)}, x^{(1)} \leq 4 \text{ мм};$ $-3 \text{ мм} \leq y^{(j)}, y^{(1)} \leq 3 \text{ мм};$ Параллаксы $p_{\text{ши}}^{(1,2)} = \dots = p_{\text{ши}}^{(J-1,J)} = 4 \text{ мм}$	Точка n_1 : $x_1^{(j)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(j)} = 1,5 \text{ мм}$ $x_1^{(1)} = -2 \text{ мм}$ $y_1^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ Точка n_2 : $x_2^{(j)} = 2 \text{ мм}$ $y_2^{(j)} = -1,5 \text{ мм}$ $x_2^{(1)} = -2 \text{ мм}$ $y_2^{(1)} = -1,5 \text{ мм}$ Параллаксы $p_{\text{ши}1}^{(j,1)} = 4 \text{ мм}$ $p_{\text{ши}2}^{(j,1)} = 4 \text{ мм}$ $q_{\text{ши}1}^{(j,1)} = 0 \text{ мм}$ $q_{\text{ши}2}^{(j,1)} = 0 \text{ мм}$	Точка m_1 : $x_1^{(1)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ $x_1^{(2)} = -2,134 \text{ мм}$ $y_1^{(2)} = 1,51 \text{ мм}$ Точка m_2 : $x_2^{(1)} = 2 \text{ мм}$ $y_2^{(1)} = -1,5 \text{ мм}$ $x_2^{(2)} = -2,656 \text{ мм}$ $y_2^{(2)} = -1,712 \text{ мм}$ Параллаксы $p_1^{(1,2)} = 4,134 \text{ мм}$ $p_2^{(1,2)} = 4,656 \text{ мм}$ $q_1^{(1,2)} = -0,01 \text{ мм}$ $q_2^{(1,2)} = 0,212 \text{ мм}$
Разности параллаксов / Parallax differences		
$\Delta p_{\text{ши}} = \Delta p_{\text{ши}} = 0$ $\Delta q_{\text{ши}} = \Delta q_{\text{ши}} = 0$	$\Delta p_1 = 0,134 \text{ мм}$ $\Delta q_1 = -0,01 \text{ мм}$ $\Delta p_2 = 0,656 \text{ мм}$ $\Delta q_2 = 0,212 \text{ мм}$	

Значения продольных и поперечных параллаксов $p_{ши}^{(1,2)}, \dots, p_{ши}^{(J-1,J)}, p_{ши}^{(J,1)}, p_i^{(1,2)}$; $q_{ши}^{(1,2)}, \dots, q_{ши}^{(J-1,J)}, q_{ши}^{(J,1)}, q_i^{(1,2)}$, где $i=\overline{1,2}$, рассчитывались по формуле (1).

В ходе экспериментальных исследований были выполнены оценки влияния отклонений БЛА на величину изменения параллаксов точек перекрываю-

щихся изображений и точности определения параметров отклонений БЛА. С этой целью в рамках первого направления исследований на наклонном снимке Р2 при значениях угловых отклонений $\nu=\omega=\tau=1^\circ; 3^\circ; 5^\circ$ были получены плоские координаты точек m_1 и m_2 и в соответствии с формулами (6) определены разности их параллаксов (табл.3).

Table 3. Оценки влияния угловых отклонений БЛА на изменения параллаксов точек перекрывающихся изображений

Table 3. Estimates of the effect of PLA angular deviations on changes in parallax points of overlapping images

Изменения параллаксов, мм / Parallax measurements, mm	Уровень угловых отклонений БЛА / The level of angular deviations of the UAV					
	$\nu = \tau = \omega$					
	1°	-1°	3°	-3°	5°	-5°
$\Delta p_1/\Delta p_2$	$\frac{0,02}{0,12}$	$\frac{-0,02}{-0,12}$	$\frac{0,08}{0,38}$	$\frac{-0,08}{-0,38}$	$\frac{0,14}{0,66}$	$\frac{-0,1}{-0,53}$
$\Delta p_{ср}$	0,07	-0,07	0,23	-0,23	0,4	-0,32
$\Delta q_1/\Delta q_2$	$\frac{0,001}{0,05}$	$\frac{-0,001}{-0,05}$	$\frac{-0,002}{0,13}$	$\frac{-0,01}{-0,13}$	$\frac{-0,01}{0,21}$	$\frac{-0,03}{-0,24}$
$\Delta q_{ср}$	0,03	-0,03	0,07	-0,07	0,1	-0,14

Анализ представленных в табл. 3 данных свидетельствует о следующем. Справедливы теоретические положения о том, что отличие от нуля разности параллаксов смежных пар снимков является достоверным показателем возникновения некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории его горизонтального полёта. Уровень разности параллаксов зависит от величины и направления отклонений БЛА и знака ординат соответствующих точек. По-

этому следует использовать среднее по точкам значение разностей параллаксов. Модуль разности параллаксов линейно увеличивается с ростом отклонений БЛА. Эти закономерности позволяют в условиях потери сигналов от навигационных спутников осуществлять обнаружение и оценку уровня некоординированных отклонений БЛА без прямых измерений параметров полёта. По величине разностей параллаксов из выражений (6) априорно могут

быть получены эвристические оценки уровня отклонений БЛА от заданной траектории. При рассматриваемых в работе характеристиках цифровой камеры Nikon P700 и средних разностях продольных и поперечных параллаксов 39 и 13 пикселей уровень угловых и линейных отклонений составит соответственно $1,2^\circ$ и 2 м. При этом пороговый уровень разностей параллаксов может быть получен путём экстраполирования на допустимую величину отклонений. Например, если допустимая величина отклонений ограничена величиной $0,2^\circ$ и 0,2 м, то пороговый уровень разностей параллаксов составит четыре и два пикселя.

В рамках второго направления исследований были заданы следующие контрольные (истинные) значения определяемых параметров:

$$v=\omega=\tau=5^\circ; \Delta r_c=8,31 \text{ м}; \Delta r_h=8,34 \text{ м}.$$

Полученные значения угловых и линейных отклонений и оценки точно-

сти их определения при начальных приближённых значениях углов $\tilde{v}=\tilde{\omega}=\tilde{\tau}=3^\circ$, моделирующих ошибки инерциальных измерений, приведены в табл.4.

Для сравнения в табл. 5 представлены данные о точности определения параметров полёта мини БЛА средствами бортовой интегрированной навигационной системы (инерциальной и спутниковой) в штатном режиме функционирования и в автономном режиме через 5 минут после потери сигналов от спутников [16].

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 4-5, свидетельствует о том, что разработанная методика в условиях потери сигналов от спутников обеспечивает точность определения параметров отклонений БЛА от заданной траектории, соизмеримую с точностью интегрированной навигационной системы в штатном режиме функционирования.

Таблица 4. Оценка точности определения отклонений БЛА

Table 4. Evaluation of the accuracy of determining PLA deviations

Значения линейных отклонений / Values of linear deviations		Значения угловых отклонений БЛА / Values of UAV angular deviations			Абсолютные ошибки определения отклонений БЛА / Absolute errors in determining UAV deviations				
Δr_c , м	Δr_h , м	v^* , град	ω^* , град	τ^* , град	δv , град	$\delta \omega$, град	$\delta \tau$, град	δr_c , м	$\delta \Delta r_h$, м
8,41	8,45	5,06	4,99	5,07	0,06	0,01	0,07	0,1	0,11

Таблица 5. Уровень ошибок навигации при прямолинейном горизонтальном полёте мини БЛА**Table 5.** The level of navigation errors during rectilinear horizontal flight of a mini PLA

Погрешности навигационной системы / Errors of the navigation system		
Штатный режим / Regular mode		Автономный режим / Autonomous mode
Углы тангажа и крена	0,1°	0,4°
Угол рыскания	0,2°	3,0°
Высота полёта БЛА	2 м	6м

При этом в случае необходимости может быть обеспечено автономное обнаружение, оценка уровня и определение величины параметров угловых и линейных отклонений БЛА от заданной траектории прямолинейного горизонтального полёта без прямых измерений этих параметров бортовыми средствами инерциальной и/или спутниковой навигации.

Выводы

Известные подходы к описанию зависимости параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности от величины угловых отклонений БЛА основаны на построении сложного функционала с громоздкими тригонометрическими выражениями. Разработанная модель основана на выявленных и неизвестных ранее закономерностях связи отклонений БЛА с разностью па-

раллаксов смежных пар изображений и формализует их в явном виде в форме двух простых алгебраических уравнений. Это позволяет в два раза сократить число соответственных точек, необходимых для организации корректной математической обработки результатов измерений, существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат, и обеспечивает новое качество анализа и синтеза этих процессов.

Разработанная методика включает в себя калибровку параллаксов в штатном режиме функционирования интегрированной навигационной системы, оценку текущего уровня и расчёт величины отклонений БЛА в условиях потери сигналов от спутников по разности параллаксов смежных пар изображений, и обеспечивает уровень точности, соизмеримый с методами спутниковой навигации.

Список литературы

1. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А. А. Ардентов, И. Ю. Бесчастный, А. П. Маштаков [и др.] // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3(12). С. 23-38.

2. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И.И. Олейник, А.А. Черноморец, В.Г. Андронов [и др]; под ред. В.Г. Андропова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. 171 с.
3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов / И.И. Олейник, А.А. Черноморец, В.Г. Андронов [и др]; под общ. ред. В.Г. Андропова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. 204 с.
4. 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. № 1. P. 107-110.
5. 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.
6. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilankumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, R., M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 995(1). P. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf> (дата обращения: 14.12.2021).
7. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Guofang Keji Daxue Xuebao. Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42. № 6. P. 1-10.
8. 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>.
9. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Метод автономной навигации космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2(65). С. 65-73.
10. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34-44.
11. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д.А. Антонов, М.В. Жарков, И.М. Кузнецов и [др] // Труды МАИ. 2016. Вып. № 91. С. 1-26.
12. Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. М.: Академический проект, 2018. 296 с.

13. 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.

14. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия / под общей ред. А. Г. Чибуничева. М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. 292 с.

15. Раков Д.Н., Никитин В.Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъёмочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 7. С. 27-36.

16. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (дата обращения: 14.12.2021).

References

1. Ardentov A. A., Beschastny I. Y., Mashtakov A. P. [etc.] Algoritmy vychisleniya polozheniya i orientatsii BPLA [Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software Systems: Theory and Applications*, 2012, vol. 3, no. 3(12), pp. 23-38.

2. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G. *Malorazmernye bespilotnye letatel'nye apparaty: zadachi obnaruzheniya i puti ikh resheniya* [Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them]; ed. by V.G. Andronov. Kursk, 2021. 171 p.

3. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G. *Metodologicheskie osnovy obnaruzheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove kompleksnoi subpolosnoi obrabotki sverkhkorotkoimpul'snykh radiolokatsionnykh i opticheskikh signalov* [Methodological foundations for the detection of small-sized unmanned aerial vehicles based on complex sub-band processing of ultrashort pulse radar and optical signals]. Kursk, 2021. 204 p.

4. 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, no. 1, pp. 107-110.

5. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*, 2019, no. 34(6), pp. 652-661.

6. 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 Se-*

ries: *Materials Science and Engineering*, 2020, no. 995(1), pp. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf>. Available at: 14.12.2021).

7. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal 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, no. 6, pp. 1-10.

8. 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), pp. 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>.

9. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Metod avtonomnoi navigatsii kosmicheskikh apparatov [Method of autonomous navigation of spacecraft]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 2(65), pp. 65-73.

10. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Astronavigatsiya kosmicheskikh apparatov na krugovykh okolozemnykh orbitakh [Astronavigation of spacecraft in circular near-Earth orbits]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34-44.

11. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pronkin A.N. Opredelenie navigatsionnykh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotoizobrazheniya i inertsial'nykh izmerenii [Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2016, is. no. 91, pp. 1-26.

12. Limonov A.N., Gavrilova L.A. *Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie* [Photogrammetry and remote sensing]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2018, 296 p.

13. Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Opredelenie i otsenka urovnya otklonenii bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii po izobrazheniyam podstilayushchei poverkhnosti [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, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 1(12), pp. 129-144.

14. Mikhailov A. P., Chibunichev A. G. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Moscow, 2016. 292 p.

15. Rakov D.N., Nikitin V.N. Vybór tsifrovogo nemetricheskogo fotoapparata dlya bespilotnogo aerofotos"emochnogo kompleksa [The choice of a digital non-metric camera for

an unmanned aerial photography complex]. *Interexpo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2012, no. 7, pp. 27-36.

16. Salychov O.S. *Avtopilot BPLA s inertsiial'noi integrirovannoi sistemoi – osnova bezopasnoi ekspluatatsii bespilotnykh kompleksov* [UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes]. Available at: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychov_2602182965.pdf (accessed: 14.12.2021).

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, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2578-0026>

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2578-0026>

Чуев Андрей Алексеевич, преподаватель кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2980-0533>

Andrey A. Chuev, Lecturer, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2980-0533>

Юдин Илья Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: angry_bender@mail.ru

Ilya S. Yudin, student, Constitutional Law Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: angry_bender@mail.ru