

УДК 629.7.05

doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.030

А.В. Сизов, С.В. Ипполитов, А.Ю. Савченко, В.А. Малышев

**СПОСОБ АВТОНОМНОЙ КОРРЕКЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ  
НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО  
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия*

*Разработан способ коррекции инерциальной навигационной системы на основе современных геоинформационных технологий с применением оптико-электронной системы и электронной карты местности, позволяющий определять координаты местоположения беспилотного летательного аппарата в автономном режиме без применения спутниковых и радиотехнических средств навигации. При этом текущие координаты беспилотного летательного аппарата определяются с помощью инерциальной навигационной системы. Затем эти координаты с учётом погрешности, накопленной после последней коррекции или выставки инерциальной навигационной системы, вводятся в электронную карту местности. Таким образом, определяются границы рабочей области электронной карты местности, что существенно сокращает вычислительные затраты. Коррекция текущих координат местоположения беспилотного летательного аппарата от оптико-электронной системы осуществляется за счет двух видов данных – географических координат трех известных ориентиров (идентичных точек) на местности и координат положения беспилотного летательного аппарата относительно данных ориентиров (относительные координаты – дальность, высота и боковое отклонение). Определение географических координат трех идентичных точек производится в электронной карте местности на основе распознавания, полученного оптико-электронной системой изображения. Расчет относительных координат беспилотного летательного аппарата осуществляется методом треугольника с описанной (вписанной) окружностью (сферой), вершинами которого являются три идентичные точки, с определением их координат в связанной системе координат беспилотного летательного аппарата в результате соответствующей обработки изображения оптико-электронной системой.*

**Ключевые слова:** инерциальная навигационная система, оптико-электронная система, электронная карта местности.

В настоящее время современные беспилотные летательные аппараты (БЛА) оборудуются навигационными системами, включающими в себя датчики навигационной информации, использующие различные методы навигации: инерциальные навигационные системы (ИНС), спутниковые навигационные системы (СНС), корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС). Основным источником навигационной

информации, как правило, является ИНС, поскольку ей присущи такие достоинства, как максимальная автономность (определение навигационных параметров без наличия внешних ориентиров, поступающих извне сигналов или каких-либо излучений), скрытность работы, помехозащищенность, возможность полной автоматизации всех процессов навигации и высокая скорость «выдачи» информации внешним потребителям. Но помимо всех перечисленных достоинств ИНС обладает и серьёзным недостатком – это накопление ошибки в определении координат местоположения БЛА. Так, к примеру, интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система КомпаНав – 2М, в инерциальном режиме за час полёта, накапливает ошибку 7,2 километра, что недопустимо при выполнении боевой задачи поражения наземных объектов (данные ошибки значительно уменьшают вероятность выхода на цель). В связи с этим возникает необходимость проведения коррекции ИНС с использованием дополнительных навигационных систем (СНС, КЭНС и др.). Точность позиционирования местоположения БЛА этими системами значительно выше, но их применение для коррекции ИНС связано с рядом проблем, таких как потери полезного сигнала от средств радиокоррекции, вызванных противодействием противника, отсутствием радиолокационного поля и др. Поэтому перспективным направлением является развитие автономных систем коррекции ИНС.

Предлагается новый способ коррекции ИНС на основе современных геоинформационных технологий с применением оптико-электронной системы (ОЭС) и электронной карты местности (ЭКМ), что позволит осуществлять коррекцию ИНС автономно и с высокой точностью. Реализация данного способа представлена на Рисунке 1. Определение текущих координат БЛА происходит по сигналам ИНС ( $X, Y, Z$ ). Затем эти координаты с учётом погрешности ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ), накопленной после последней коррекции или выставки ИНС, вводятся в ЭКМ. Таким образом, определяются границы рабочей области ЭКМ ( $X+\Delta X, Y+\Delta Y, Z+\Delta Z$ ), что существенно сокращает вычислительные затраты.

Коррекция текущих координат местоположения БЛА от ОЭС осуществляется за счет двух видов данных – географических координат трех известных ориентиров (идентичных точек) на местности и координат положения БЛА относительно данных ориентиров (относительные координаты – дальность, высота и боковое отклонение). Географические координаты трех идентичных точек необходимы для расчета географических координат базового ориентира ( $D$ ).

Базовый ориентир ( $D$ ) – это расчетная точка, полученная как центр вписанной (описанной) окружности (сферы) в треугольник, образованный в связанной системе координат БЛА тремя идентичными точками и выполняет две функции: в связанной системе координат БЛА необходим для расчета относительных координат, а в географической системе координат – для определения точки на местности, относительно которой ведется отсчет.

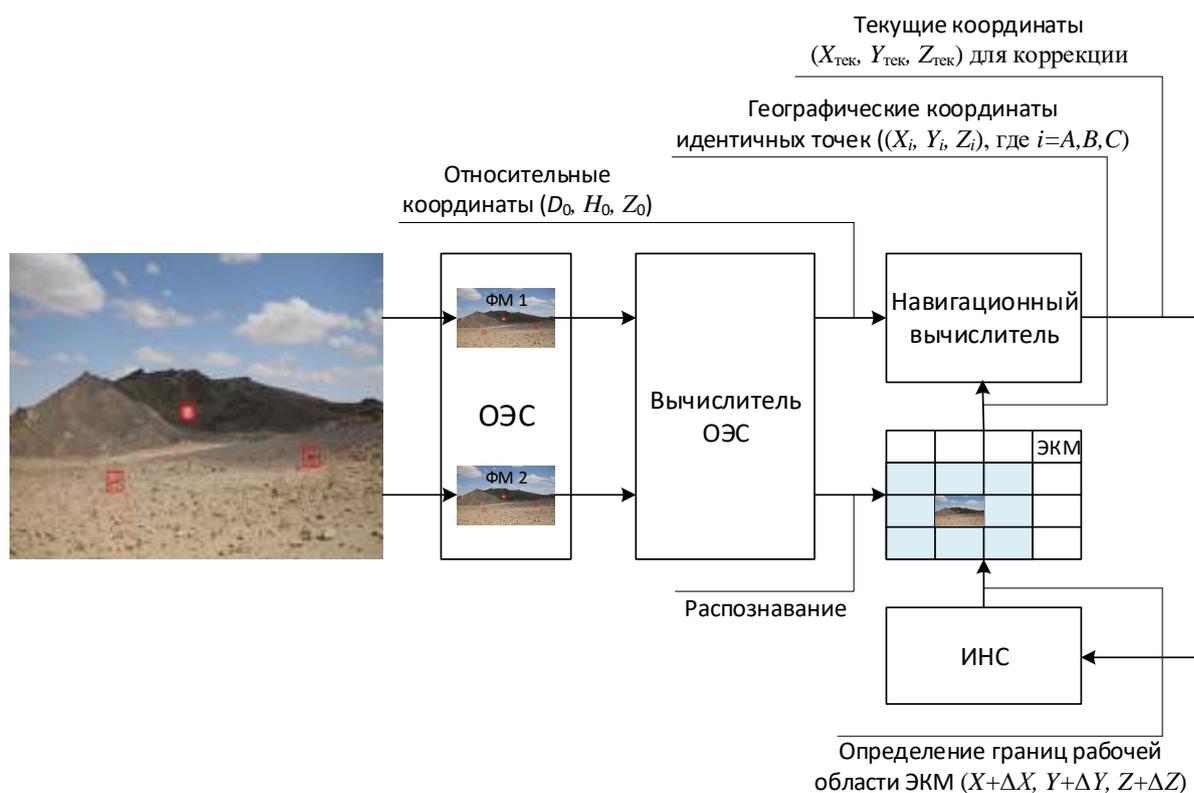


Рисунок 1 – Способ коррекции ИНС на основе ОЭС и ЭКМ

Относительные координаты отсчитываются от базового ориентира в географической системе координат на основе расчетных значений координат идентичных точек и базового ориентира в связанной с БЛА системе координат.

Определение географических координат трех идентичных точек производится в ЭКМ на основе распознавания полученного ОЭС изображения.

Расчет относительных координат БЛА осуществляется методом треугольника с описанной (вписанной) окружностью (сферой), вершинами которого являются три идентичные точки, с определением их координат в

связанной системе координат БЛА в результате соответствующей обработки изображения ОЭС.

С помощью ОЭС производится получение изображения подстилающей поверхности и обнаружение на нем трех характерных ориентиров (идентичных точек  $A, B, C$ ). Далее осуществляется идентификация данных точек в ЭКМ с целью определения их географических координат  $((X_i, Y_i, Z_i)$ , где  $i=A, B, C$ ). Задачу идентификации предлагается рассматривать как распознавание образов.

Одновременно определяются координаты идентичных точек на полученном изображении в связанной системе координат БЛА  $(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$ , где  $i=A, B, C$  для расчета относительных координат БЛА.

В общем случае решение задачи определения параметров относительного положения БЛА с помощью оптико-электронных средств предлагается следующим образом. На БЛА предлагается разместить два оптико-локационных блока, в состав каждого из которых входит оптическая система и фотоматрица (ФМ). На фотоматрицах проецируется изображения идентичных точек  $A, B, C$  впереди лежащего рельефа. Схема размещения измерительной ОЭС на БЛА представлена на Рисунке 2.

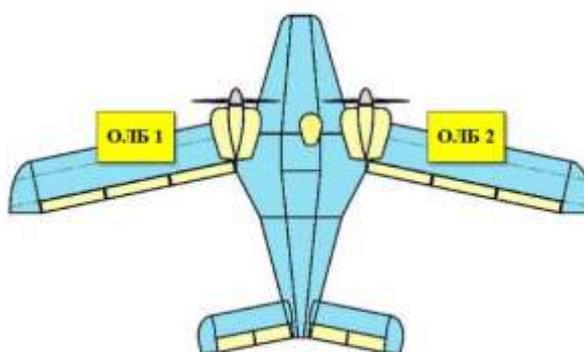


Рисунок 2 – Размещение ОЭС на БЛА

Данные точки рассматриваются в связанной с БЛА системе координат (СК)  $OXYZ$ , где ось  $OX$  направлена по продольной оси БЛА, ось  $OY$  направлена вверх по вертикальной оси БЛА, а ось  $OZ$  - поперечная ось БЛА. Фотоматрицы предлагается разместить в фокальной плоскости своих объективов, находящихся в плоскости координат  $OYZ$ , причем их центры располагают на оси  $OZ$  симметрично относительно начала координат  $O$ . Оптические оси

обоих объективов располагают параллельно оси  $OX$  и проходят через центры своих фоточувствительных матриц.

В результате выделены два подхода для решения задачи относительной навигации с помощью бортовой ОЭС БЛА. Первый подход, основан на векторном представлении сторон рассматриваемых треугольников и выражении их модулей расстояний через координаты данных векторов. Второй подход, основан на скалярном выражении требуемых расстояний [1, 2].

Первый подход определения координат идентичных точек заключается в следующем. В качестве примера рассмотрен способ определения одной идентичной точки  $P$  на фотоматрицах оптических объективов, схема измерения которой приведена на Рисунке 3.

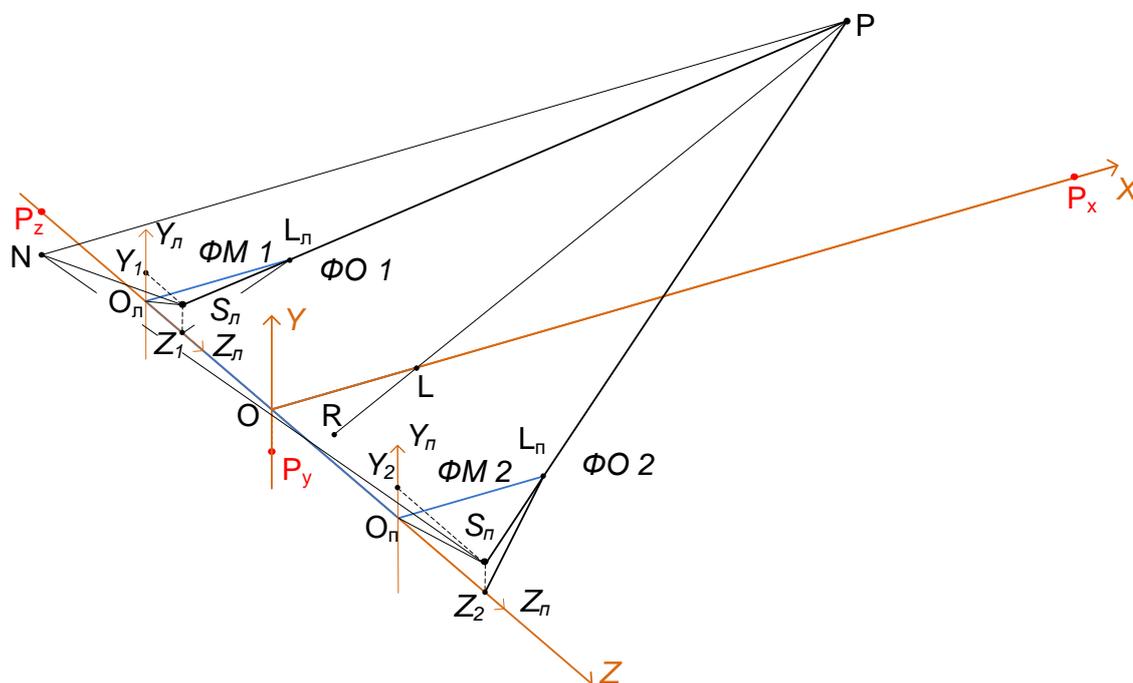


Рисунок 3 – Пример формирования изображения идентичной точки на фотоматрицах оптических объективов

Координаты идентичной точки  $P$  на фотоматрицах ФМ1 и ФМ2 – точки  $S_{л}$  и  $S_{п}$  соответственно, строят в соответствии с законами геометрической оптики. Точки  $S_{л}$  и  $S_{п}$  являются точками пересечения прямых  $PL_{л}$  и  $PL_{п}$  с

плоскостями  $O_l Y_l Z_l$  и  $O_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$ , в которых расположены фоточувствительные поверхности фотоматриц ФМ1 и ФМ2. Точка  $L$  расположена на оси  $OX$ , причем  $OL=F$ . Точка  $R$  лежит на пересечении прямой  $PL$  с плоскостью  $OYZ$ . Точка  $N$  является проекцией точки  $P$  на плоскость  $OYZ$ . Для определения координат точки  $P$  выражаются вектора  $S_l P$  и  $S_{\Pi} P$ , для этого используется подобие пар треугольников  $L_l S_l O_l$ ,  $PS_l N$  и  $L_{\Pi} S_{\Pi} O_{\Pi}$ ,  $PS_{\Pi} N$

$$S_l P = \frac{F \times i - Y_1 \times j - Z_1 \times k}{F} P_x, S_{\Pi} P = \frac{F \times i - Y_2 \times j - Z_2 \times k}{F} P_x, \quad (1)$$

где  $P_x$  – проекция вектора  $S_l P$  либо  $S_{\Pi} P$  на ось  $OX$  равная  $PN$ ;  $F = O_l L_l = O_{\Pi} L_{\Pi}$  – фокусное расстояние объектива телекамеры;  $i, j, k$  – единичные орты;  $Y_1, Z_1$  и  $Y_2, Z_2$  – координаты изображений точки  $P$  на фотоматрицах ФМ1 и ФМ2 соответственно.

Вычисляется вектор  $RP$

$$RP = \frac{S_l P + S_{\Pi} P}{2} = iP_x - \frac{Y_1 + Y_2}{2F} P_x j - \frac{Z_1 + Z_2}{2F} P_x k. \quad (2)$$

Из треугольника  $PS_l S_{\Pi}$  выражается известное расстояние между фотоматрицами  $B$  равное модулю вектора  $S_l S_{\Pi}$

$$S_l P - S_{\Pi} P = S_l S_{\Pi}. \quad (3)$$

Подставляя выражения для векторов  $S_l P$  и  $S_{\Pi} P$  в последнее равенство, определяется

$$S_l S_{\Pi} = \frac{Y_1 - Y_2}{2F} P_x j + \frac{Z_2 - Z_1}{2F} P_x k. \quad (4)$$

Отсюда выражается квадрат модуля вектора  $S_l S_{\Pi}$

$$B^2 = \frac{P_x^2}{F^2} (Y_1 - Y_2)^2 + \frac{P_x^2}{F^2} (Z_1 - Z_2)^2 \quad (5)$$

и вычисляется координата  $x$  вектора  $RP$

$$P_x = \frac{B \cdot F}{\sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}}. \quad (6)$$

Остальные координаты вектора  $RP$  выражаются из соотношения (2)

$$P_y = -\frac{Y_2 + Y_1}{2F} P_x, P_z = -\frac{Z_2 + Z_1}{2F} P_x. \quad (7)$$

Исходя из приведенного примера координаты идентичных точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  определяются как

$$P_{ix} = \frac{B \cdot F}{\sqrt{(Y_{i2} - Y_{i1})^2 + (Z_{i2} - Z_{i1})^2}}, P_{iy} = -\frac{Y_{i2} + Y_{i1}}{2F} P_{ix}, P_{iz} = -\frac{Z_{i2} + Z_{i1}}{2F} P_{ix}, \quad (8)$$

где  $Y_{i1}$ ,  $Z_{i1}$ ,  $Y_{i2}$ ,  $Z_{i2}$  – координаты изображений точек  $A$  ( $i = 1$ ),  $B$  ( $i = 2$ ),  $C$  ( $i = 3$ ), на первой и второй фотоматрицах соответственно. Таким образом, выражения (8) определяют первый способ определения идентичных точек подстилающей поверхности на основе векторного подхода.

Второй подход к определению идентичных точек основан на схеме измерения первого способа, однако в рассмотрение берутся другие расстояния до требуемых точек [1, 2]. Схема измерения данного способа измерения отображена на Рисунке 4.

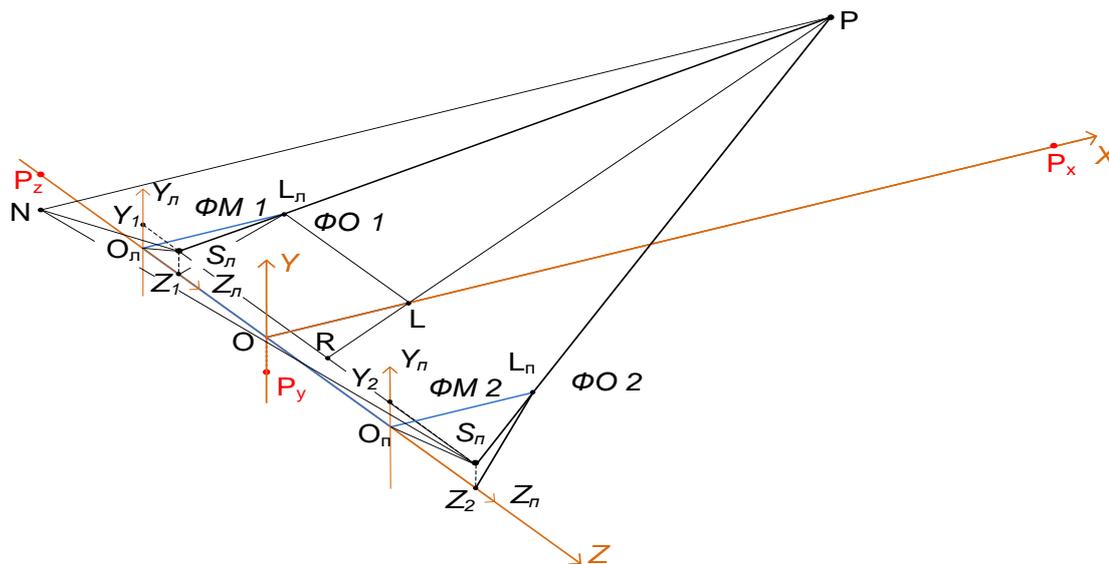


Рисунок 4 – Пример формирования изображения идентичной точки на фотоматрицах оптических объективов

Изображениям точки  $P$  на фотоматрицах являются точки  $S_l$  и  $S_n$ . Точка  $L$  расположена на оси  $OX$ , причём  $OL=F$ . Точка  $R$  лежит на пересечении прямой  $PL$  с плоскостью  $OYZ$ . Точка  $N$  является проекцией точки  $P$  на плоскость  $OYZ$ . Для определения рассматриваются подобные треугольники  $S_lPS_n$  и  $L_lPL_n$  и, используя свойство подобных треугольников и вышеописанные условия, выражается длина отрезка  $L_lP$ :

$$L_lP = \frac{B\sqrt{F^2 + Z_1^2}}{Z_2 - Z_1}. \quad (9)$$

Далее выражается расстояние  $PO$ , соответствующее координате  $P_x$  точки  $P$ , которое определяется следующим выражением:

$$PO = PL + LO. \quad (10)$$

Для определения расстояния  $PL$  берётся в рассмотрение прямоугольный треугольник  $L_lPL$  и косинус угла  $L_lPL$  (угол  $\theta$ ), в результате:

$$PL = L_{\text{л}}P \cdot \cos \theta \quad (11)$$

Угол  $\theta$  определяется на основе смежному ему углу  $\theta_1$ , выражение для определения, которого следующее:

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{O_{\text{л}}S_{\text{л}}}{O_{\text{л}}L_{\text{л}}}\right) = \arctg\left(\frac{Z_1}{F}\right), \quad (12)$$

где  $O_{\text{л}}S_{\text{л}} = Z_1$ ,  $O_{\text{л}}L_{\text{л}} = F$ .

Следовательно:

$$\theta = \arct\left(\frac{Z_1}{F}\right). \quad (13)$$

В результате выражение для координаты  $P_x$  точки  $P$  примет вид:

$$P_x = PO = \left[ \cos\left(\arct\left(\frac{Z_1}{F}\right)\right) \right] \cdot \left[ \frac{B\sqrt{F^2 + Z_1^2}}{Z_2 - Z_1} \right] + F. \quad (14)$$

Аналогично получаем из Рисунка 4 и, используя уже вычисленную координату  $P_x$ , выражение для координаты  $P_y$  и  $P_z$ :

$$P_y = \frac{Y_1 \cdot B}{Z_1 - Z_2}, \quad P_z = -\frac{(P_x - F)Z_1}{F} - \frac{B}{2}. \quad (15)$$

Таким образом, после упрощения и с учетом идентичных точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , расчетные формулы для определения их координат при втором способе следующие:

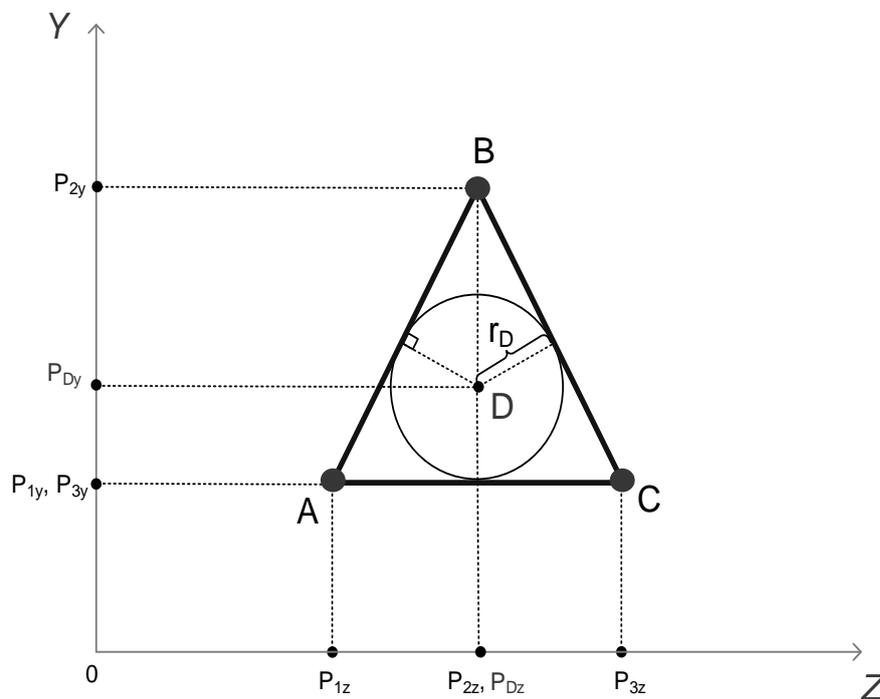
$$P_{ix} = (2FZ_{i1} + \frac{B\sqrt{F^2 + Z_{i1}^2}}{\sqrt{\frac{Z_{i1}^2}{F^2} + 1}}) / (Z_{i1} + |Z_{i2}|), P_{iy} = \frac{Y_{i1} \cdot B}{Z_{i1} - Z_{i2}}, P_{iz} = -\frac{(P_{ix} - F)Z_{i1}}{F} - \frac{B}{2},$$

(16)

где  $Y_{i1}, Z_{i1}, Y_{i2}, Z_{i2}$  – координаты изображений точек  $A$  ( $i = 1$ ),  $B$  ( $i = 2$ ),  $C$  ( $i = 3$ ), на первой и второй фотоматрицах соответственно.

Зная информацию о координатах идентичных точек подстилающей поверхности, можно определить параметры относительного положения БЛА.

Относительные координаты БЛА ( $D_0, H_0, Z_0$ ) определяются на основе способа представления идентичных точек земной поверхности ( $A, B, C$ ) в виде треугольника и вписанной в него окружности (сферы для  $OXYZ$ ) (рассматривается для плоскости  $OYZ$  в связанной системе координат БЛА), схема которого отображена на Рисунке 5 [3].



$P_{iy}, P_{iz}$  – координаты точек  $A$  ( $i = 1$ ),  $B$  ( $i = 2$ ),  $C$  ( $i = 3$ ) в связанной с БЛА системе координат;  $P_{Dy}, P_{Dz}$  – координаты базового ориентира  $D$  в связанной с БЛА системе координат

Рисунок 5 – Схема измерения по методу вписанной окружности

Координатам центра вписанной окружности (сферы) соответствуют следующие выражения:

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{|\overline{BC}|P_{1x} + |\overline{AC}|P_{2x} + |\overline{AB}|P_{3x}}{|\overline{BC}| + |\overline{AC}| + |\overline{AB}|}, \\ H_0 &= \frac{|\overline{BC}|P_{1y} + |\overline{AC}|P_{2y} + |\overline{AB}|P_{3y}}{|\overline{BC}| + |\overline{AC}| + |\overline{AB}|}, \\ Z_0 &= \frac{|\overline{BC}|P_{1z} + |\overline{AC}|P_{2z} + |\overline{AB}|P_{3z}}{|\overline{BC}| + |\overline{AC}| + |\overline{AB}|}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $|\overline{AB}|, |\overline{BC}|, |\overline{AC}|$  – модули векторов  $AB, BC, AC$ .

Далее производится расчет текущих географических координат БЛА  $(X_{\text{тек}}, Y_{\text{тек}}, Z_{\text{тек}})$  на основе географических координат базового ориентира  $D$   $(X_D, Y_D, Z_D)$  и относительных координат  $(D_0, H_0, Z_0)$  БЛА. Полученные координаты вводятся в ИНС для ее коррекции.

Предложенный способ автономной коррекции ИНС БЛА реализуется на основе современных геоинформационных технологий с применением ЭКМ, обеспечивающей высокую точность определения географических координат идентичных точек (ориентиров на местности) и ОЭС, позволяющей осуществить прецизионное определение координат БЛА относительно данных ориентиров. Алгоритм коррекции, реализующий предложенный способ обеспечивает высокую точность и автономность коррекции ИНС за счёт обработки высокоточной информации и применения пассивных измерителей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лопаткин Д. В., Ипполитов С.В., Губарь М.Н. Использование триангуляционного метода в задачах межсамолётной навигации / Д.В. Лопаткин, С.В. Ипполитов, М.Н. Губарь // XIV Наука. Промышленность. Оборона. Сб. тезисов докладов по материалам ВНТК (Новосибирск, 24–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск. НГТУ, 2013. С. 350–353.
2. Лопаткин Д.В., Ипполитов С.В. Алгоритм определения параметров относительного положения беспилотного летательного аппарата в группе. XXXIX Гагаринские чтения / Д.В. Лопаткин, С.В. Ипполитов // Сб. тезисов докладов по материалам Международной молодёжной научной конференции (Москва, 9–13 апреля 2013г.), том 3. – М.: МАТИ, 2013. С. 88.
3. Лопаткин, Д.В., Ипполитов, С.В. Методика синтеза алгоритма обработки информации об относительных параметрах движения беспилотного летательного аппарата / Д.В. Лопаткин, С.В. Ипполитов. // Авиакосмические технологии. Сб. тезисов докладов по мат-лам XVI ВНТК (Воронеж, 4-5 июня 2013 г.), Воронеж. ВГТУ, – 2013. – С. 98-99.

A.V. Sizov, S.V. Ippolitov, A.Y. Savchenko, V.A. Malyshev  
**METHOD OF AUTONOMOUS CORRECTION OF INERTIAL  
NAVIGATION SYSTEM OF UNMANNED AIRCRAFT ON THE BASIS  
OF MODERN GEOINFORMATION TECHNOLOGIES**

*MESC AF «Military air force academy named after professor  
N.E. Zukovskiy and Y.A. Gagarin»  
Voronezh, Russia*

*The method of correction of inertial navigation system based on modern geoinformation technologies with the use of optical-electronic system and electronic terrain map, allowing determining the coordinates of the location of the unmanned aircraft in offline mode without the use of satellite and radio navigation, is developed. In this case, the current coordinates of the unmanned aircraft are determined with the help of inertial navigation system. Then these coordinates, taking into account the error accumulated after the last correction of the inertial navigation system, are entered into an electronic terrain map. Thus, the boundaries of the working area of the electronic terrain map are determined, which significantly reduces the computational cost. The correction of the current coordinates of the location of the unmanned aircraft from the optical-electronic system is carried out by two types of data - the geographical coordinates of the three known landmarks (identical points) of the area and the coordinates of the position of the unmanned aircraft relative to these landmarks (relative coordinates - range, height and lateral deviation). Determination of geographical*

*coordinates of three identical points is made in the electronic terrain map on the basis of recognition of the received by the optical-electronic system image. The calculation of the relative coordinates of the unmanned aircraft is carried out by the triangle method with the circumscribed (inscribed) circle (sphere), the vertices of which are three identical points, with the determination of their coordinates in the associated coordinate system of the unmanned aircraft as a result of the corresponding image processing by the optical-electronic system.*

**Keywords:** inertial navigation system, optical-electronic system, electronic terrain map.

## REFERENCE

4. Lopatkin D.V., Ippolitov S.V., Gubar M.N. The using of the triangulation method in problems of inter-aircraft navigation / D.V. Lopatkin, S.V. Ippolitov, M.N. Gubar // XIV Science. Industry. Defence. Collection of abstracts on the materials of ASaTC (Novosibirsk, 24th-26th of April, 2013). - Novosibirsk. NSTU. 2013. Pages 350-353.
5. Lopatkin D.V., Ippolitov S.V. The algorithm of determining parameters of the relative position of the unmanned aircraft in the group. XXXIX Gagarin's readings/ D.V. Lopatkin, S.V. Ippolitov // Collection of abstracts on the materials of International youth scientific conference (Moscow, 9th-13th of April 2013), part 3 - M.: MATI, 2013, page 88.
6. Lopatkin D.V., Ippolitov S.V. The method of synthesis of the algorithm for processing information about the relative parameters of the motion of an unmanned aircraft / D.V. Lopatkin, S.V. Ippolitov. // Aerospace technologies. Collection of abstracts on the materials of XVI ASaTC (Voronezh, 4th-5th of June 2013), Voronezh, VSTU, - 2013, pages 98-99.