

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-КОНТРАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

А. А. Коваль¹, Д. А. Капустин², Г. В. Короп³,
С. В. Онопченко⁴, Р. Н. Сентяй⁵, В. В. Швыров⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Россия

³ ООО «Авиакомпания Волга-Днепр», Москва, Россия

¹ navigatorsystem@yandex.ru, ² kap-kapchik@mail.ru, ³ korop_g@mail.ru,

⁴ osv260176@rambler.ru, ⁵ sentyayroman@yandex.ru, ⁶ slavik_asas@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Анализируется содержание подходов и технологий разработки локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных элементов его конструкции. *Материалы и методы.* Представлены варианты пространственной компоновки измерительных элементов системы и их влияние на точность позиционирования беспилотного летательного аппарата. *Результаты и выводы.* Формулируется принцип работы локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции. Приводится алгоритм и математическая модель работы такой системы.

Ключевые слова: система координат, локальная система пространственного позиционирования БПЛА, математическая модель, температурно-контрастные элементы конструкции БПЛА

Для цитирования: Коваль А. А., Капустин Д. А., Короп Г. В., Онопченко С. В., Сентяй Р. Н., Швыров В. В. Локальная система пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных элементов его конструкции // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 54–69. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-6

A LOCAL SPATIAL POSITIONING SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON THE BEARING OF TEMPERATURE-CONTRASTING ELEMENTS OF ITS DESIGN

A.A. Koval¹, D.A. Kapustin², G.V. Korop³, S.V. Onopchenko⁴, R.N. Sentyay⁵, V.V. Shvyrov⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, Russia

³ Volga-Dnepr Airlines, Moscow, Russia

¹ navigatorsystem@yandex.ru, ² kap-kapchik@mail.ru, ³ korop_g@mail.ru,

⁴ osv260176@rambler.ru, ⁵ sentyayroman@yandex.ru, ⁶ slavik_asas@mail.ru

Abstract. *Background.* The content of approaches and technologies for the development of a local spatial positioning system for an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrasting elements of its design is analyzed. *Materials and methods.* The variants of the spatial arrangement of the measuring elements of the system and their effect on the accuracy of the unmanned aerial vehicle positioning are presented. *Results and conclusions.* The principle of operation of a local spatial positioning system of an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrast (color-contrast) elements of its design is formulated. The algorithm and mathematical model of such a system are given.

Keywords: coordinate system, local UAV spatial positioning system, mathematical model, temperature-contrasting elements of the UAV design

For citation: Koval A.A., Kapustin D.A., Korop G.V., Onopchenko S.V., Sentyay R.N., Shvyrov V.V. A local spatial positioning system for an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrasting elements of its design. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2025;(3):54–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-6

Постановка проблемы

В настоящее время в процессе подготовки операторов беспилотных авиационных систем активно используются тренажеры. Такие тренажеры позволяют сформировать необходимые начальные навыки в дистанционном пилотировании беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), навыки их пространственного позиционирования.

Под пространственным позиционированием БПЛА следует понимать процесс определения его пространственно-временных координат с целью вывода в заданную точку пространства. Процесс пространственного позиционирования лежит в основе точной пространственной навигации БПЛА и, следовательно, в основе выполнения любого полетного задания.

В настоящее время существуют различные системы определения пространственных координат БПЛА. В частности, такими системами являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), глобальные спутниковые навигационные системы (ГЛОНАСС, GPS), системы оптической (визуальной) одометрии и т.п.

В процессе тренажерной подготовки операторов беспилотных авиационных систем (БАС) важнейшей задачей является оценка точности работы оператора в позиционировании БПЛА, точности выполнения пространственных маневров, определения координат объектов (целей), сброса грузов и т.п.

Таким образом, непрерывное определение точных фактических координат БПЛА является необходимым условием как выполнения полетного задания, так и оценки действий оператора БАС.

Тренажерная подготовка операторов БАС проводится, как правило, на малом тактическом полигоне или в закрытом помещении соответствующих размеров. Поэтому для определения координат БПЛА требуется относительно недорогая, автономная и достаточно точная система пространственного позиционирования.

В настоящее время разработано и используется для этих целей несколько таких автономных систем. В частности, к таким системам можно отнести ультразвуковую и инфракрасную локальные системы позиционирования. Все такие системы решают задачу локального позиционирования БПЛА, хотя и имеют ряд ограничений их применения.

Стремительное расширение использования тренажеров для целей подготовки операторов БАС, а также ряд ограничений, связанных с использованием тренажерного оборудования в закрытых помещениях выявляют необходимость разработки новых автономных локальных систем позиционирования БПЛА с высокими точностными характеристиками.

Целью исследования, приведенного ниже, является разработка концептуальной модели локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Объектом исследования являются автономные системы локального пространственного позиционирования беспилотных летательных аппаратов.

Предметом исследования является математическая модель и алгоритмы функционирования локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Вид исследования: прикладное исследование, математическое моделирование.

Методы исследования: изучение документов, математическое моделирование, статистический анализ, структурная декомпозиция, систематизация, классификация, анализ, сравнение, обобщение, физическое моделирование, агрегация, наблюдение, измерение, эксперимент.

Концептуальная модель алгоритма пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов конструкции БПЛА

Представленная ниже концептуальная модель локальной системы пространственного позиционирования БПЛА на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции основана на возможности определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры. Один из способов определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры показан на рис. 1.

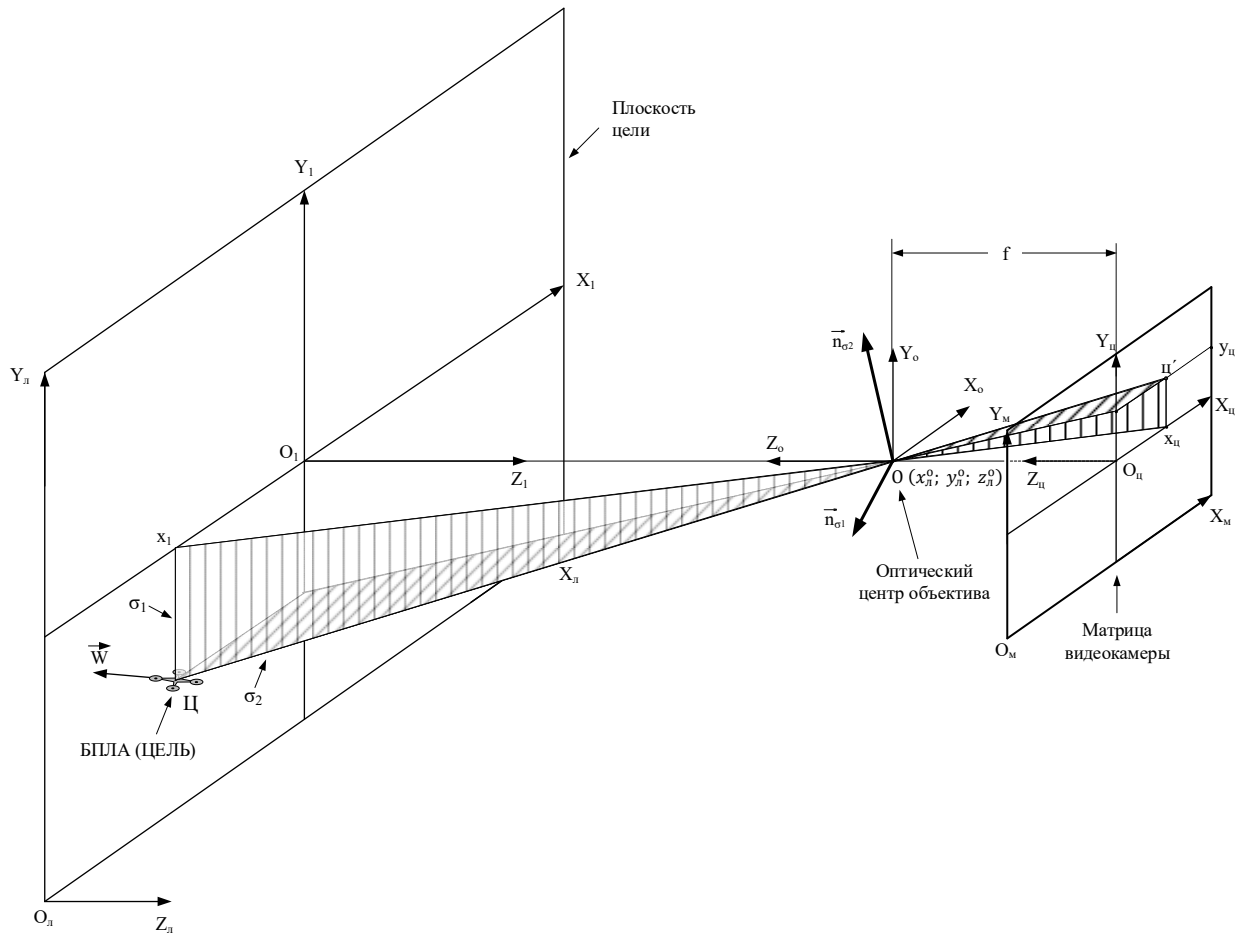


Рис. 1. Принцип определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры путем формирования двух плоскостей пеленгования

На рис. 1 показана матрица видеокамеры и три связанных с ней системы координат [1, 2]: пространственная прямоугольная система координат матрицы $O_M X_M Y_M Z_M$, пространственная система координат цели $O_C X_C Y_C Z_C$ и пространственная система координат $O X_O Y_O Z_O$, совмещенная с оптическим центром объектива. В обозначенных системах координат координаты точек метрические и измеряются в долях метра.

Параллельно плоскости матрицы видеокамеры расположена плоскость цели. С плоскостью цели связаны две пространственные системы координат: локальная система координат $O_L X_L Y_L Z_L$ и вспомогательная система координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. В этих системах координат определяются пространственная ориентация и координаты центра матрицы видеокамеры, координаты фокуса видеокамеры $O_F(x_1; y_1; z_1)$, координаты векторов нормалей к плоскостям пеленгования \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} , плоскости пеленгования σ_1 и σ_2 (на рис. 1 выделены вертикальной и горизонтальной штриховкой), текущие координаты БПЛА.

Ориентация плоскостей пеленгования σ_1 и σ_2 в пространстве в системе координат $O X_O Y_O Z_O$, совмещенной с оптическим центром объектива, определяется векторами нормалей \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} . Как будет показано дальше, координаты этих векторов могут быть рассчитаны через координаты цели $(x_{\text{ц}}^{\text{бла}}; y_{\text{ц}}^{\text{бла}}; z_{\text{ц}}^{\text{бла}})$ в системе координат цели $O_C X_C Y_C Z_C$ и координаты оптического центра объектива $O(x_{\text{л}}^{\text{о}}; y_{\text{л}}^{\text{о}}; z_{\text{л}}^{\text{о}})$ в локальной системе координат.

Таким образом, плоскости пеленгования БПЛА (цели) σ_1 и σ_2 могут быть однозначно определены через свои векторы нормалей \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} и координаты оптического центра объектива $O(x_{\text{л}}^{\text{о}}; y_{\text{л}}^{\text{о}}; z_{\text{л}}^{\text{о}})$ как точки, принадлежащие этим плоскостям.

Другой способ определения направления на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры показан на рис. 2.

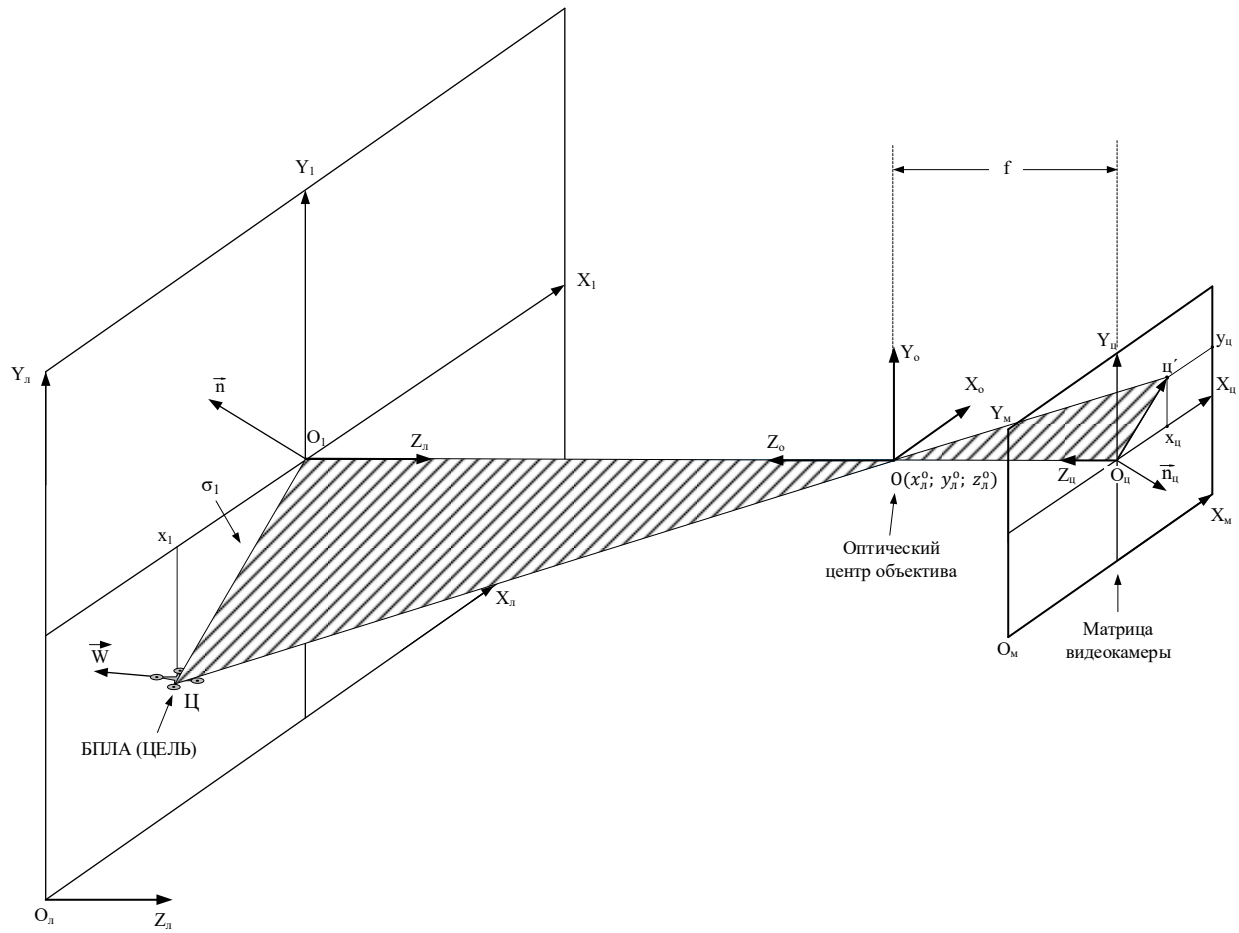


Рис. 2. Принцип определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры путем формирования одной плоскости пеленгования

На рис. 2 показана матрица видеокамеры и три связанных с ней системы координат: пространственная прямоугольная система координат матрицы $O_M X_M Y_M Z_M$, пространственная система координат цели $O_C X_C Y_C Z_C$ и пространственная система координат $O_L X_L Y_L Z_L$, совмещенная с оптическим центром объектива видеокамеры. В обозначенных системах координат координаты точек метрические и измеряются в долях метра.

Параллельно плоскости матрицы видеокамеры расположена плоскость цели. С плоскостью цели связаны две пространственные системы координат: локальная система координат $O_L X_L Y_L Z_L$ и вспомогательная система координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. В этих системах координат определяются пространственная ориентация и координаты центра матрицы видеокамеры, координаты оптического центра объектива видеокамеры $O(x_L^o; y_L^o; z_L^o)$, координаты вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования σ_1 (на рис. 1 плоскость пеленгования выделена штриховкой), текущие координаты БПЛА на матрице видеокамеры $(x_C^{бла}; y_C^{бла}; z_C^{бла})$.

В отличие от первого способа, во втором способе для построения одного вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования σ_1 необходимо знание двух координат цели $(x_C^{бла}; y_C^{бла})$, измеренных в системе координат цели $O_C X_C Y_C Z_C$.

Характерной особенностью второго способа построения вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования БПЛА σ_1 является его независимость от координат фокуса и фокусного расстояния видеокамеры. Как будет показано ниже, еще одним преимуществом второго способа является возможность построения направления плоскости пеленгования с одной видеокамеры в диапазоне от 0 до 360°.

Совмещение первого и второго способа дает возможность построить пеленгаторную базу, позволяющую однозначно определять пространственное положение (координаты) пеленгуемого объекта (БПЛА) в локальной системе координат $O_L X_L Y_L Z_L$, связанной с учебным полигоном тренажера

оператора БПЛА. Вариант построения пеленгаторной базы локальной системы позиционирования БПЛА представлен на рис. 3.

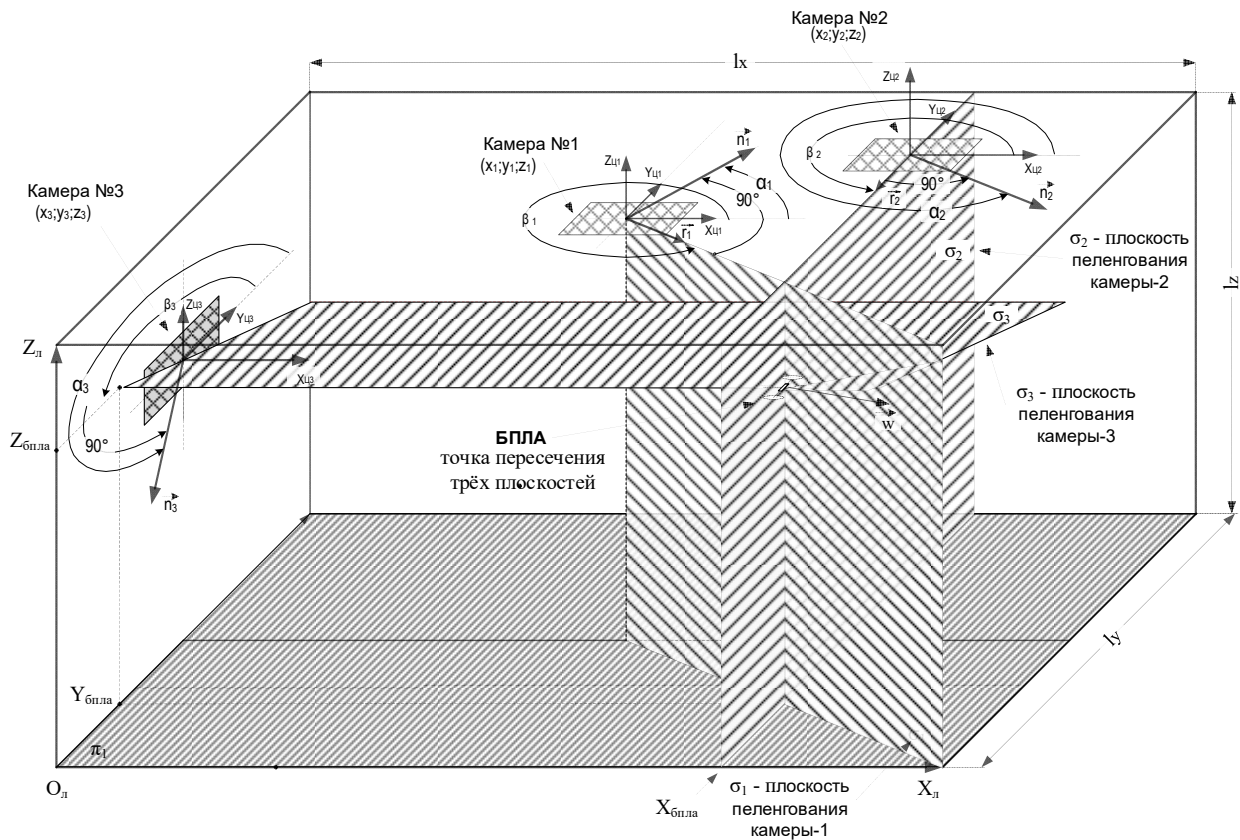


Рис. 3. Принцип построения пеленгаторной базы локальной системы пространственного позиционирования БПЛА, построенной на основе видеокамер

Координатную основу системы пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов конструкции БПЛА представляет локальная система прямоугольных пространственных координат $O_L X_L Y_L Z_L$. В этой системе задаются координаты центров видеоматриц, фокусов видеокамер, оптических центров объективов видеокамер, углы ориентации фотоматриц видеокамер, определяются пространственные границы области измерения и контроля координат БПЛА, собственно координаты БПЛА и параметры его движения.

В процессе работы системы пеленгования на матрицах видеокамер формируется изображение БПЛА, которое в реальном масштабе времени с помощью программного алгоритма преобразуется в точку с пиксельными $(x_{п_i}^{бла}; y_{п_i}^{бла})$ и соответствующими метрическими $(x_{м_i}^{бла}; y_{м_i}^{бла})$ координатами.

По определенным метрическим прямоугольным координатам характерной точки БПЛА в плоскости фотоматрицы определяются отклонения горизонтальных и вертикальных углов визирования на БПЛА относительно центральной точки фотоматрицы.

Определенные таким образом горизонтальные и вертикальные углы визирования БПЛА, а также координаты оптических центров объективов и фокусов видеокамер в локальной системе координат позволяют определить параметры плоскостей пеленгования БПЛА.

При определенных условиях (о них будет сказано ниже) пересечением трех таких плоскостей определяют точку в пространстве, координаты которой соответствуют координатам характерной точки БПЛА. На рис. 3 в локальной системе прямоугольных пространственных координат $O_L X_L Y_L Z_L$ показано пересечение трех плоскостей σ_1 , σ_2 и σ_3 , сформированных с помощью видеокамер № 1, 2 и 3.

Математическая модель и алгоритм определения локальных координат БПЛА

Плоскость пеленгования может быть однозначно определена в локальной системе координат $O_L X_L Y_L Z_L$, если заданы координаты вектора нормали к плоскости и координаты любой точки этой плоскости.

Графическая модель и алгоритм определения параметров плоскости пеленгования БПЛА относительно точки стационарного размещения видеокамеры показаны на рис. 4.

В нижней части рис. 4 показана зона измерения пространственных координат и параметров движения БПЛА. С этой зоной жестко связаны локальная система координат $O_L X_L Y_L Z_L$ и две вспомогательные системы координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ и $O_2 X_2 Y_2 Z_2$. Измерение пространственных координат БПЛА, координат центра матрицы видеокамеры, координат оптического центра объектива и фокуса видеокамеры, а также ориентация видеокамеры в пространстве задаются относительно локальной $O_L X_L Y_L Z_L$ системы координат.

Плоскость матрицы видеокамеры параллельна плоскости $X_L O_L Y_L$, а линия $O_C O_1$ перпендикулярна плоскости $X_L O_L Y_L$ локальной системы координат. Все объекты, находящиеся в поле зрения видеокамеры отображаются на ее матрице. Положение этих объектов на матрице определяется в пиксельной ($O_C X_C Y_C$) и метрической ($O_C X_M Y_M$) системах координат матрицы. Кроме того, для определения пространственной ориентации плоскости пеленгования используется система координат цели ($O_C X_C Y_C Z_C$). Оси этой системы координат параллельны осям пиксельной и метрической систем координат матрицы видеокамеры.

В пиксельной системе координат положение объекта определяется в пикселях матрицы, в метрической системе и системе координат цели положение объекта определяется в долях метра.

На рис. 4, в качестве примера, показано положение БПЛА в контролируемой области пространства и его отображение на матрице видеокамеры.

Характерная точка БПЛА (например, температурно-контрастный или цветоконтрастный маркер) на матрице видеокамеры имеет координаты цели (БПЛА) ($x_{ц}^{бла}; y_{ц}^{бла}$). На рис. 4 также показан вектор путевой скорости БПЛА (\vec{W}).

Положение БПЛА в пространстве и отображение его характерной точки на матрице видеокамеры находятся в одной плоскости. Эта плоскость на рис. 4 выделена заливкой серого цвета. Собственно, эта плоскость является плоскостью пеленгования БПЛА.

Азимутальное положение этой плоскости в пространстве однозначно определяется углом $\beta_{ц_i}^{бла}$, заключенным между осью $O_C X_C$ и отрезком $O_C \Pi$, соединяющим центр системы координат цели и точку, отображающую БПЛА на матрице видеокамеры.

Плоскость пеленгования однозначно задается в локальной системе координат $O_L X_L Y_L Z_L$ через координаты оптического центра видеокамеры, принадлежащей этой плоскости, и вектор нормали к этой плоскости \vec{n} . Вектор нормали \vec{n} показан на рис. 4 в плоскости $X_L O_L Y_L$, а его отображение в плоскости матрицы видеокамеры в системе координат цели $O_C X_C Y_C$.

Для нахождения направления вектора нормали \vec{n} к плоскости пеленгования алгоритмом пеленгования предусматривается предварительное нахождение направления $\beta_{ц_i}^{бла}$ вектора цели $\vec{O_C \Pi}$ в системе координат цели в плоскости матрицы.

Вектор цели $\vec{O_C \Pi}$ принадлежит одновременно двум плоскостям: плоскости матрицы видеокамеры и плоскости пеленгования.

Направление этого вектора в плоскости матрицы в системе координат цели определяется углом, отсчитываемым от положительного направления оси $O_C X_C$ против часовой стрелки в диапазоне от 0 до 2π .

Угол $\beta_{ц_i}^{бла}$ в системе координат матрицы $O_C X_C Y_C$ может быть рассчитан через метрические координаты характерной точки БПЛА ($x_{ц_i}^{бла}; y_{ц_i}^{бла}$) по формуле

$$\beta_{ц_i}^{бла} = 0,5 \left(\frac{\pm y_{ц_i}^{бла}}{|y_{ц_i}^{бла}|} + 1 \right) \arccos \left(\frac{\pm x_{ц_i}^{бла}}{\sqrt{(x_{ц_i}^{бла})^2 + (y_{ц_i}^{бла})^2}} \right) - 0,5 \left(\frac{\pm y_{ц_i}^{бла}}{|y_{ц_i}^{бла}|} - 1 \right) \left(\pi + \arccos \left(\frac{-(\pm x_{ц_i}^{бла})}{\sqrt{(x_{ц_i}^{бла})^2 + (y_{ц_i}^{бла})^2}} \right) \right), \quad (1)$$

где $x_{ц_i}^{бла}$, $y_{ц_i}^{бла}$ – метрические координаты характерной точки БПЛА на матрице видеокамеры.

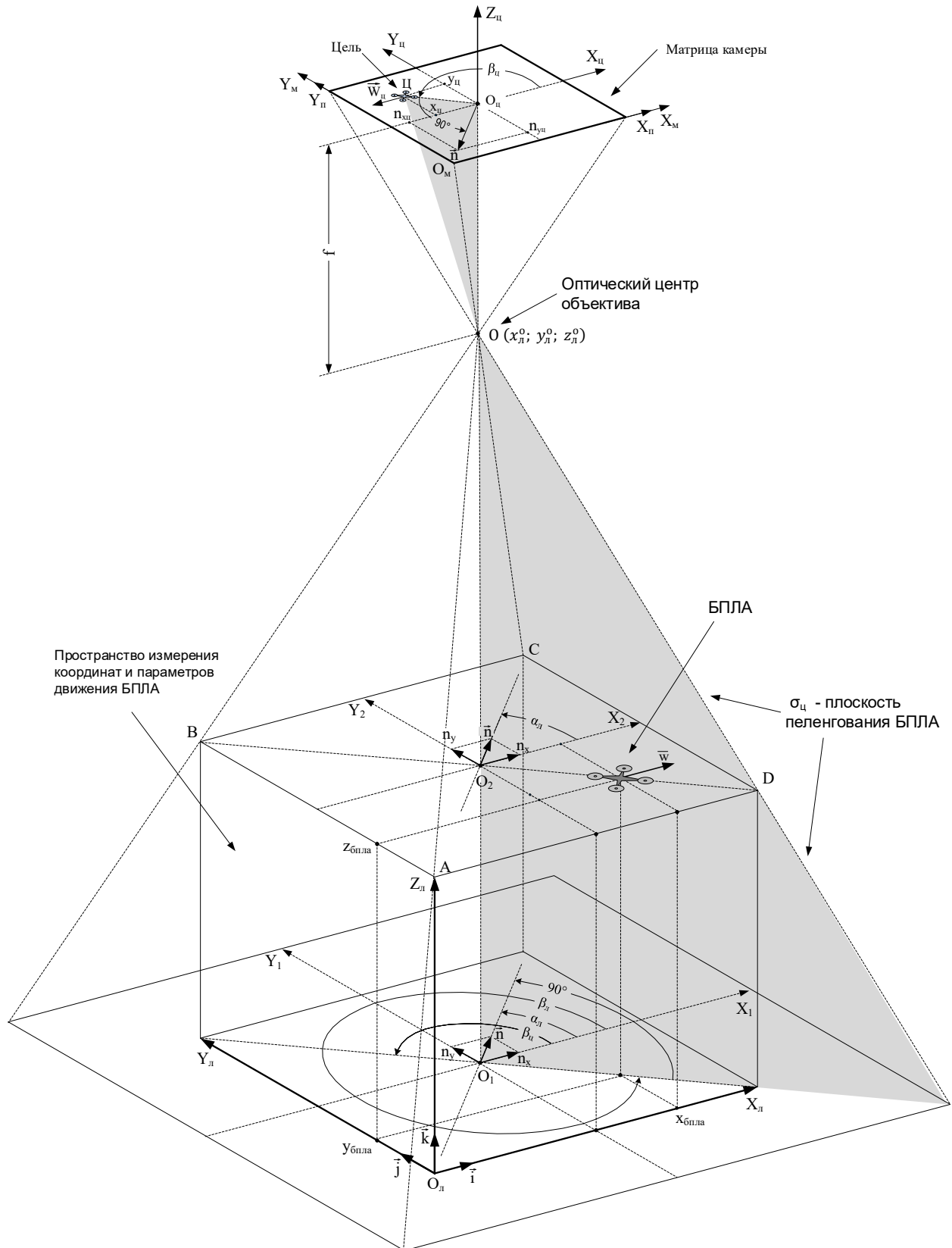


Рис. 4. Графическая модель и алгоритм определения параметров плоскости пеленгования БПЛА относительно точки стационарного размещения видеокамеры

Формула (1) является комбинацией двух формул скалярного произведения векторов в координатной форме [3].

По известному углу $\beta_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ определяется направление отображения вектора нормали \vec{n} в плоскости матрицы по формуле

$$\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}} = \beta_{\alpha_i}^{\text{бла}} + \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования, вычисленное по метрическим координатам характерной точки БПЛА на матрице видеокамеры; $\beta_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора цели $\overline{O_{\alpha_i}C}$ в системе координат цели в плоскости матрицы.

Из анализа рис. 4 следует, что направление вектора нормали к плоскости пеленгования в локальной системе координат $O_{\alpha_i}X_{\alpha_i}Y_{\alpha_i}Z_{\alpha_i}$ будет противоположным углу $\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ и определится формулой

$$\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}} = \alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}} + \pi, \quad (3)$$

где $\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования в локальной системе координат в плоскости $O_{\alpha_i}X_{\alpha_i}Y_{\alpha_i}$; $\alpha_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования в системе координат матрицы $O_{\alpha_i}X_{\alpha_i}Y_{\alpha_i}$.

Из анализа рис. 4 также следует, что координаты единичного вектора нормали \vec{n} к плоскости пеленгования могут быть определены как проекции этого вектора на оси локальной системы координат $O_{\alpha_i}X_{\alpha_i}Y_{\alpha_i}Z_{\alpha_i}$ по формулам

$$n_x = \cos \alpha_{\alpha_i}, \quad n_y = \sin \alpha_{\alpha_i}, \quad n_z = 0. \quad (4)$$

По известным координатам вектора нормали к плоскости пеленгования $n_0(n_x; n_y; n_z)$ и пространственным координатам оптического центра объектива видеокамеры $O(x_{\alpha_i}^o; y_{\alpha_i}^o; z_{\alpha_i}^o)$ или координатам центра матрицы видеокамеры $O_{\alpha_i}(x_{\alpha_i}^{O_{\alpha_i}}; y_{\alpha_i}^{O_{\alpha_i}}; z_{\alpha_i}^{O_{\alpha_i}})$ определяется уравнение плоскости пеленгования [4]:

$$n_x(x - x_{\alpha_i}^o) + n_y(y - y_{\alpha_i}^o) + n_z(z - z_{\alpha_i}^o) = 0. \quad (5)$$

После преобразования уравнения (5) получим общее уравнение плоскости пеленгования БПЛА в локальной системе координат $O_{\alpha_i}X_{\alpha_i}Y_{\alpha_i}Z_{\alpha_i}$:

$$n_x x_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_y y_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_z z_{\alpha_i}^{\text{бла}} - (n_x x_{\alpha_i}^o + n_y y_{\alpha_i}^o + n_z z_{\alpha_i}^o) = 0, \quad (6)$$

где $x_{\alpha_i}^{\text{бла}}, y_{\alpha_i}^{\text{бла}}, z_{\alpha_i}^{\text{бла}}$ – искомые координаты характерной точки БПЛА в локальной системе координат; n_x, n_y, n_z – координаты вектора нормали к плоскости пеленгования; $x_{\alpha_i}^o, y_{\alpha_i}^o, z_{\alpha_i}^o$ – координаты оптического центра объектива видеокамеры в локальной системе координат.

Вместо координат оптического центра объектива видеокамеры в уравнение (6) могут быть подставлены координаты центра матрицы $(x_{\alpha_i}^{\text{цм}}, y_{\alpha_i}^{\text{цм}}, z_{\alpha_i}^{\text{цм}})$. В этом случае уравнение плоскости будет иметь вид

$$n_x x_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_y y_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_z z_{\alpha_i}^{\text{бла}} - (n_x x_{\alpha_i}^{\text{цм}} + n_y y_{\alpha_i}^{\text{цм}} + n_z z_{\alpha_i}^{\text{цм}}) = 0. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) содержат три неизвестные координаты характерной точки БПЛА в локальной системе координат: $x_{\alpha_i}^{\text{бла}}, y_{\alpha_i}^{\text{бла}}, z_{\alpha_i}^{\text{бла}}$. Для нахождения координат БПЛА необходимо иметь систему из трех таких уравнений, определяющих три плоскости пеленгования.

Система уравнений трех плоскостей, содержащих пеленгуемую характерную точку БПЛА в локальной системе координат, представлена ниже:

$$\begin{cases} n_{x_1} x_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{y_1} y_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{z_1} z_{\alpha_i}^{\text{бла}} - (n_{x_1} x_{\alpha_i}^{\text{цм-1}} + n_{y_1} y_{\alpha_i}^{\text{цм-1}} + n_{z_1} z_{\alpha_i}^{\text{цм-1}}) = 0; \\ n_{x_2} x_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{y_2} y_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{z_2} z_{\alpha_i}^{\text{бла}} - (n_{x_2} x_{\alpha_i}^{\text{цм-2}} + n_{y_2} y_{\alpha_i}^{\text{цм-2}} + n_{z_2} z_{\alpha_i}^{\text{цм-2}}) = 0; \\ n_{x_3} x_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{y_3} y_{\alpha_i}^{\text{бла}} + n_{z_3} z_{\alpha_i}^{\text{бла}} - (n_{x_3} x_{\alpha_i}^{\text{цм-3}} + n_{y_3} y_{\alpha_i}^{\text{цм-3}} + n_{z_3} z_{\alpha_i}^{\text{цм-3}}) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $x_{л}^{бла}, y_{л}^{бла}, z_{л}^{бла}$ – координаты искомой характерной точки БПЛА в локальной системе координат; $n_{x_1}, n_{y_1}, n_{z_1}$ – координаты вектора нормали к первой плоскости пеленгования; $n_{x_2}, n_{y_2}, n_{z_2}$ – координаты вектора нормали ко второй плоскости пеленгования; $n_{x_3}, n_{y_3}, n_{z_3}$ – координаты вектора нормали к третьей плоскости пеленгования; $x_{л}^{цм-1}, y_{л}^{цм-1}, z_{л}^{цм-1}$ – координаты центра матрицы первой видеокамеры; $x_{л}^{цм-2}, y_{л}^{цм-2}, z_{л}^{цм-2}$ – координаты центра матрицы второй видеокамеры; $x_{л}^{цм-3}, y_{л}^{цм-3}, z_{л}^{цм-3}$ – координаты центра матрицы третьей видеокамеры в локальной системе координат.

Алгоритм функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА

Работа алгоритма позиционирования БПЛА обеспечивается компьютерной программой, позволяющей в реальном масштабе времени производить кадровую синхронную обработку видеопотока, получаемого с трех видеокамер.

Функциональная схема алгоритма функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА представлена на рис. 5.

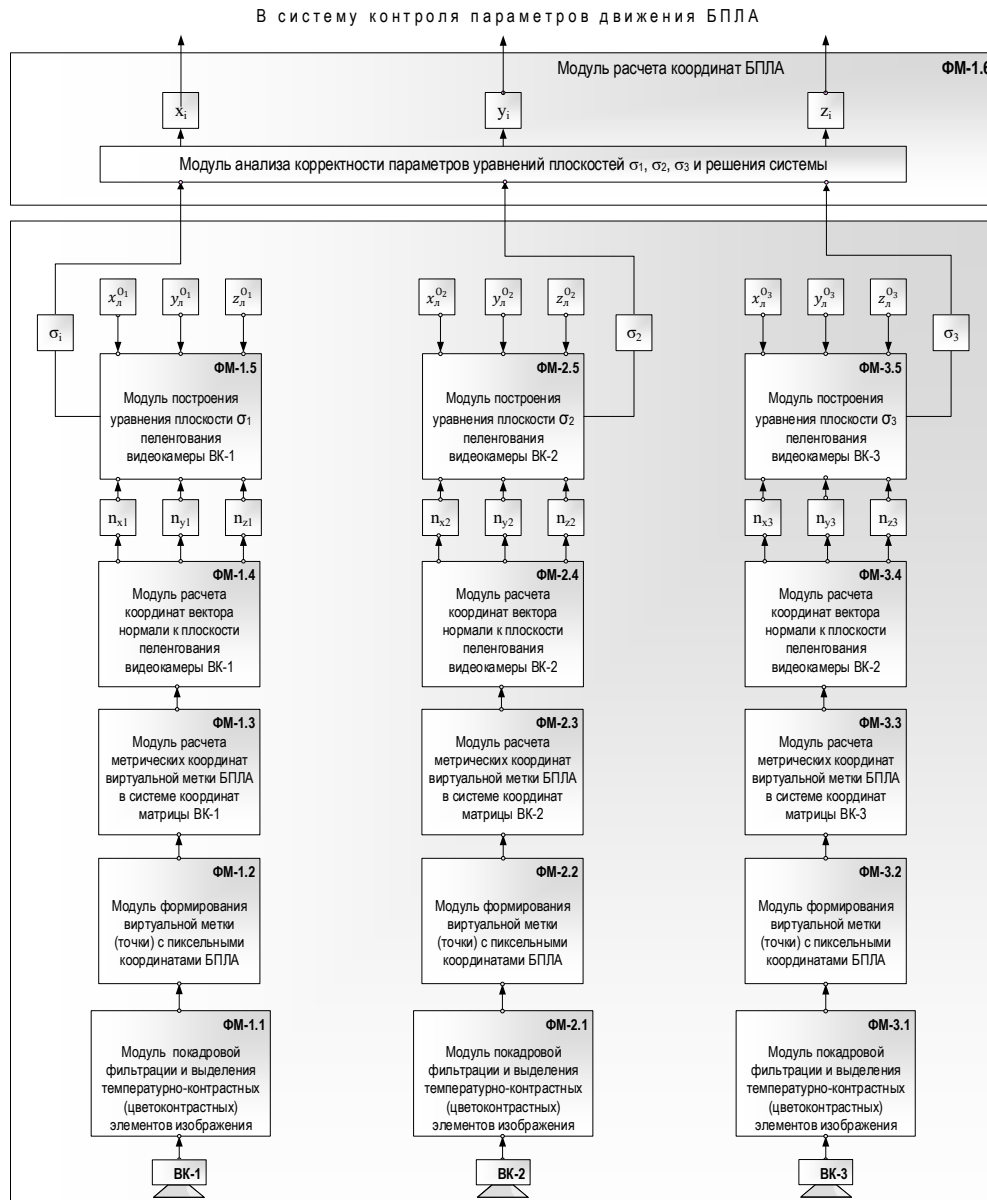


Рис. 5. Функциональная схема алгоритма функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА

Видеоизображение в реальном масштабе времени формируется видеокамерами ВК-1, ВК-2 и ВК-3. С помощью специального программного алгоритма обработки видеоизображения осуществляется покадровая фильтрация и выделение температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов изображения БПЛА (функциональные модули ФМ-1.1, ФМ-2.1 и ФМ-3.1).

С помощью специального алгоритма в каждом кадре видеопотока формируется виртуальная точка с пиксельными координатами, соответствующими фактическому проецированию характерной точки БПЛА на матрицу видеокамеры (функциональные модули ФМ-1.2, ФМ-2.2 и ФМ-3.2).

В свою очередь, пиксельные координаты сформированной характерной точки БПЛА на матрицах видеокамер преобразуются функциональными модулями ФМ-1.3, ФМ-2.3 и ФМ-3.3 в метрические координаты, выраженные в долях метра (в микрометрах).

По текущим значениям метрических координат БПЛА в системе координат матрицы рассчитываются координаты единичного вектора нормали к каждой из трех плоскостей пеленгования (функциональные модули ФМ-1.4, ФМ-2.4 и ФМ-3.4).

Далее в соответствии с алгоритмом по текущим значениям координат векторов нормалей и значениям координат фокусов видеокамер рассчитываются параметры уравнений трех плоскостей пеленгования σ_1 , σ_2 и σ_3 .

После процедуры проверки корректности параметров уравнений плоскостей производится циклическое решение системы уравнений. В результате процедуры циклического решения системы уравнений трех плоскостей формируется массив текущих значений координат БПЛА $(x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}})$ в локальной системе координат с дискретностью равной частоте кадров видеокамеры.

Аналитическое моделирование работы системы локального позиционирования

С целью проверки корректности работы алгоритма в рамках исследования проводилось аналитическое и практическое моделирование работы системы локального позиционирования.

С целью аналитического моделирования системы были заданы следующие исходные параметры:

- размер зоны контроля координат: длина: $l_x = 10$ м, ширина $l_y = 5$ м, высота $l_z = 5$ м;
- фактические локальные координаты БПЛА: $x_{\text{л}}^{\text{бла}} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{бла}} = 1,25$ м; $z_{\text{л}}^{\text{бла}} = 4$ м;
- размер пикселя фотоматрицы [5]: $0,006 \times 0,006$ мм;
- размер матрицы [5]: 3×4 мм;
- фокусное расстояние объектива камеры [5]: $f = 3,6$ мм;
- координаты оптического центра объектива первой видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_1} = 5$ м; $y_{\text{л}}^{O_1} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{O_1} = 4,9964$ м;
- координаты оптического центра объектива второй видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_2} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{O_2} = 3,75$ м; $z_{\text{л}}^{O_2} = 4,9964$ м;
- координаты оптического центра объектива третьей видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_3} = 0,0036$ м; $y_{\text{л}}^{O_3} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{O_3} = 3,5$ м;
- координаты центра матрицы первой видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 5$ м;
- координаты центра матрицы второй видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 3,75$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 5$ м;
- координаты центра матрицы третьей видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 0$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 3,5$ м.

Переход от координат $(x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}})$ локальной системы координат к координатам $(x_1; y_1; z_1)$ вспомогательной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ осуществлялся по формулам:

$$x_1 = x_{\text{л}} - a_x; y_1 = y_{\text{л}} - a_y; z_1 = z_{\text{л}} - a_z, \quad (9)$$

где $x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}}$ – координаты точки в локальной системе координат; x_1, y_1, z_1 – координаты точки во вспомогательной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$; a_x, a_y, a_z – линейные смещения начала вспомогательной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ относительно начала координат локальной системы $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$.

Переход от координат $(x_l; y_l; z_l)$ локальной системы координат к координатам $(x_2; y_2; z_2)$ вспомогательной системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ осуществляется по формулам:

$$x_2 = x_l - b_x; y_2 = y_l - b_y; z_2 = z_l - b_z, \quad (10)$$

где $x_l; y_l; z_l$ – координаты точки в локальной системе координат; x_2, y_2, z_2 – координаты точки во вспомогательной системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$; b_x, b_y, b_z – линейные смещения начала вспомогательной системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ относительно начала координат локальной системы $O_lX_lY_lZ_l$.

Моделирование фактических метрических координат $(x_{ц_1}^{бла}; y_{ц_1}^{бла}; z_{ц_1}^{бла})$ отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 1 как функций фактических локальных координат БПЛА $(x_l^{бла}; y_l^{бла}; z_l^{бла})$ производилось по формулам:

– видеокамера № 1:

координата $x_{ц_1}^{бла}$:

$$x_{ц_1}^{бла} = -\frac{f_1(x_l^{бла} - x_l^{вк-1})}{(l_z - z_l^{бла} - f_1)}; \quad (11)$$

координата $y_{ц_1}^{бла}$:

$$y_{ц_1}^{бла} = -\frac{f_1(y_l^{бла} - y_l^{вк-1})}{(l_z - z_l^{бла} - f_1)}; \quad (12)$$

координата $z_{ц_1}^{бла}$:

$$z_{ц_1}^{бла} = 0, \quad (13)$$

где $x_{ц_1}^{бла}, y_{ц_1}^{бла}, z_{ц_1}^{бла}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ матрицы видеокамеры № 1; $x_l^{бла}, y_l^{бла}, z_l^{бла}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_lX_lY_lZ_l$; f_1 – фокусное расстояние видеокамеры № 1.

Моделирование фактических метрических координат $(x_{ц_2}^{бла}; y_{ц_2}^{бла}; z_{ц_2}^{бла})$ отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 2 как функций фактических локальных координат БПЛА $(x_l^{бла}; y_l^{бла}; z_l^{бла})$ производилось по формулам:

– видеокамера № 2:

координата $x_{ц_2}^{бла}$:

$$x_{ц_2}^{бла} = -\frac{f_2(x_l^{бла} - x_l^{вк-2})}{(l_z - z_l^{бла} - f_2)}; \quad (14)$$

координата $y_{ц_2}^{бла}$:

$$y_{ц_2}^{бла} = -\frac{f_2(y_l^{бла} - y_l^{вк-2})}{(l_z - z_l^{бла} - f_2)}; \quad (15)$$

координата $z_{ц_2}^{бла}$:

$$z_{ц_2}^{бла} = 0, \quad (16)$$

где $x_{ц_2}^{бла}, y_{ц_2}^{бла}, z_{ц_2}^{бла}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ матрицы видеокамеры № 2; $x_l^{бла}, y_l^{бла}, z_l^{бла}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_lX_lY_lZ_l$; f_2 – фокусное расстояние видеокамеры № 2.

Моделирование фактических метрических координат $(x_{ц3}^{бла}; y_{ц3}^{бла}; z_{ц3}^{бла})$ отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 3 как функций фактических локальных координат БПЛА $(x_{л}^{бла}; y_{л}^{бла}; z_{л}^{бла})$ производилось по формулам:

– видеокамера № 3:

координата $x_{ц3}^{бла}$:

$$x_{ц3}^{бла} = 0; \quad (17)$$

координата $y_{ц3}^{бла}$:

$$y_{ц3}^{бла} = -\frac{f_3(y_{л}^{бла} - y_{л}^{вк-3})}{x_{л}^{бла} - f_3}; \quad (18)$$

координата $z_{ц3}^{бла}$:

$$z_{ц3}^{бла} = -\frac{f_3(z_{л}^{бла} - z_{л}^{вк-3})}{x_{л}^{бла} - f_3}, \quad (19)$$

где $x_{ц3}^{бла}, y_{ц3}^{бла}, z_{ц3}^{бла}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{ц}X_{ц}Y_{ц}$ матрицы видеокамеры № 3; $x_{л}^{бла}, y_{л}^{бла}, z_{л}^{бла}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_{л}X_{л}Y_{л}Z_{л}$; f_3 – фокусное расстояние видеокамеры № 3.

Моделирование текущих значений пеленгов БПЛА и угловых положений векторов нормалей к плоскостям пеленгования осуществлялось по формулам (1)–(3).

Моделирование текущих координат векторов нормалей \vec{n}_i к плоскостям пеленгования осуществлялось через расчет текущих значений проекций этих векторов на оси локальной системы координат $O_{л}X_{л}Y_{л}Z_{л}$ по формулам:

– для видеокамеры № 1:

$$n_{x_1} = \cos(\alpha_{лвк1}^{бла}); n_{y_1} = \sin(\alpha_{лвк1}^{бла}); n_{z_1} = 0; \quad (20)$$

– для видеокамеры № 2:

$$n_{x_2} = \cos(\alpha_{лвк2}^{бла}); n_{y_2} = \sin(\alpha_{лвк2}^{бла}); n_{z_2} = 0; \quad (21)$$

– для видеокамеры № 3:

$$n_{x_3} = 0; n_{y_3} = \cos(\alpha_{лвк3}^{бла}); n_{z_3} = \sin(\alpha_{лвк3}^{бла}). \quad (22)$$

Моделирование текущих пространственных положений плоскостей пеленгования осуществлялось по формуле (7).

В результате моделирования получена система трех уравнений с тремя искомыми координатами БПЛА. Решение системы уравнений трех плоскостей осуществлялось методом Крамера [4]. Результаты аналитического моделирования процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами представлены в табл. 1.

По вычисленным координатам векторов нормалей к плоскостям пеленгования БПЛА и координатам центров матриц трех видеокамер в соответствии с алгоритмом составлена система уравнений трех плоскостей:

$$\begin{cases} 0,447 \cdot x_{л}^{бла} + 0,894 \cdot y_{л}^{бла} + 0 \cdot z_{л}^{бла} - 4,472 = 0; \\ 1 \cdot x_{л}^{бла} + 0 \cdot y_{л}^{бла} + 0 \cdot z_{л}^{бла} - 7,5 = 0; \\ 0 \cdot x_{л}^{бла} - 0,37 \cdot y_{л}^{бла} - 0,93 \cdot z_{л}^{бла} + 4,18 = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Решение системы уравнений (23) однозначно определяет точку с координатами БПЛА:

$$x_{л}^{бла} = 7,5 \text{ м}, y_{л}^{бла} = 1,25 \text{ м}, z_{л}^{бла} = 4 \text{ м}. \quad (24)$$

Таблица 1
Результаты аналитического моделирования процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами

| Исходные данные | | | | | | | | | | | Расчетные данные | | | | | | |
|--------------------|---|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------------------|---|--------|-------------------------|---|--|---|---|----------|-----------|-----------|
| Номер видео-камеры | Фактические координаты в метрах в локальной системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$ | | | | | | Размер зоны контроля координат (м) | | | Фокусное расстояние (м) | Координаты БПЛА в метрах на матрице видеокамеры в системе координат цели $O_{ц} X_{ц} Y_{ц} Z_{ц}$ (радиан) | Угол пеленга цели в $O_{ц} X_{ц} Y_{ц} Z_{ц}$ (радиан) | Направление нормали к плоскости пеленгования в $O_{ц} X_{ц} Y_{ц} Z_{ц}$ (радиан) | Координаты вектора нормали к плоскости пеленгования | | | |
| | БПЛА | | | Центра матрицы | | | | | | | | | | | | | |
| | $x_{л}^{блн}$ | $y_{л}^{блн}$ | $z_{л}^{блн}$ | $x_{л}^{цмн}$ | $y_{л}^{цмн}$ | $z_{л}^{цмн}$ | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | | | | | 10 |
| 1 | 7,5 | 1,25 | 4 | 5 | 2,5 | 5 | 5 | 5 | 0,0036 | -0,009033 | 0,004516 | 0,000000 | 2,678 | 1,107 | 0,447214 | 0,894427 | 0,000000 |
| 2 | 7,5 | 1,25 | 4 | 7,5 | 3,75 | 5 | 5 | 5 | 0,0036 | 0,000000 | 0,009033 | 0,000000 | 1,571 | 0,000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,000000 |
| 3 | 7,5 | 1,25 | 4 | 0 | 2,5 | 3,5 | 5 | 5 | 0,0036 | 0,000000 | 0,000600 | -0,000240 | 5,903 | 4,332 | 0,000000 | -0,371391 | -0,928477 |

Таким образом, аналитическое моделирование процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами подтверждает работоспособность и корректность предложенного алгоритма определения текущих локальных координат БПЛА.

В настоящее время авторским коллективом проводятся исследования по практической реализации алгоритма с целью его экспериментальной проверки в тренажерной системе операторов БПЛА [6].

Заключение

С целью обеспечения тренажерной подготовки операторов беспилотных авиационных систем необходимо непрерывное определение точных фактических координат БПЛА. Это является необходимым условием как выполнения полетного задания, так и точной оценки действий оператора БАС. Для определения координат БПЛА в процессе тренажерной подготовки требуется относительно недорогая, автономная и достаточно точная система пространственного позиционирования.

В настоящее время разработано и используется для этих целей несколько таких автономных систем. В частности, к таким системам можно отнести ультразвуковую и инфракрасную локальные системы позиционирования. Эти системы решают задачу локального позиционирования БПЛА, но имеют ряд ограничений их применения в закрытом пространстве.

Таким образом, для целей тренажерной подготовки операторов БАС в закрытых помещениях существует необходимость разработки новых автономных локальных систем позиционирования БПЛА с высокими точностными характеристиками.

Предложенная концептуальная модель локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цвето-контрастных) элементов его конструкции является альтернативой существующим системам подобного рода.

Аналитическое моделирование процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами подтверждает корректность предложенной математической модели и алгоритмов функционирования локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Список литературы

1. Герасимов С. И., Костин В. И. Калибровка не метрических цифровых фото- и видеокамер для фотограмметрических измерений : учеб. пособие для студентов вузов. Саратов : СарФТИ, 2015. 71 с. URL: <https://golnk.ru/D8xKk> (дата обращения: 02.11.2024).
2. Рацен С. С., Симаков А. В., Симакова Т. В. [и др.]. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории : учеб. пособие. Тюмень : ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. 149 с. URL: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/racen.pdf> (дата обращения: 02.11.2024).
3. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. : Изд-во АСТ, 2019. 703 с.
4. Ключин В. Л. Высшая математика для экономистов : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2009. 448 с.
5. Рыжова В. А., Ярышев С. Н., Коротаев В. В. Интеллектуальные системы видеонаблюдения : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2021. 107 с.
6. Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование smart-технологий проектного управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 64–70.

References

1. Gerasimov S.I., Kostin V.I. *Kalibrovka ne metrisheskikh tsifrovyykh foto- i videokamer dlya fotogrammetricheskikh izmereniy: ucheb. posobiye dlya studentov vuzov = Calibration of non-metric digital photo and video cameras for photogrammetric measurements : a textbook for university students*. Saratov: SarFTI, 2015:71. (In Russ.). Available at: <https://golnk.ru/D8xKk> (accessed 02.11.2024).
2. Ratsen S.S., Simakov A.V., Simakova T.V. et al. *Fotogrammetriya i distantsionnoye zondirovaniye territorii: ucheb. posobiye = Photogrammetry and remote sensing of the territory : a textbook*. Tyumen: FGBOU VO GAU Severnogo Zaural'ya, 2023:149. (In Russ.). Available at: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/racen.pdf> (accessed 02.11.2024).
3. Vygodskiy M.Ya. *Spravochnik po vysshey matematike = Handbook of Higher Mathematics*. Moscow: Izd-vo AST, 2019:703. (In Russ.)
4. Klyushin V.L. *Vysshaya matematika dlya ekonomistov: ucheb. posobiye = Higher mathematics for economists : a textbook*. Moscow: INFRA-M, 2009:448. (In Russ.)

5. Ryzhova V.A., Yaryshev S.N., Korotayev V.V. *Intellektual'nyye sistemy videonablyudeniya: ucheb. posobiye = Intelligent video surveillance systems : a textbook*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2021:107. (In Russ.)
6. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Kuryshv R.E. Visual modeling of smart project management technologies. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:64–70. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Алексеевич Коваль

инженер кафедры информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет (Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: navigatorsystem@yandex.ru

Денис Алексеевич Капустин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет (Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: kap-kapchik@mail.ru

Геннадий Викторович Короп

кандидат технических наук, доцент, ведущий системный аналитик отдела развития и разработки информационных систем службы информационных технологий, ООО «Авиакомпания Волга-Днепр» (Россия, г. Москва, Международное шоссе, 28Б, стр. 3)
E-mail: korop_g@mail.ru

Светлана Владимировна Онопченко

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет (Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: osv260176@rambler.ru

Роман Николаевич Сентяй

старший преподаватель кафедры информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет (Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: sentyayroman@yandex.ru

Anatoliy A. Koval

Engineer of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University (2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Denis A. Kapustin

Doctor of technical sciences, associate professor, head of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University (2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Gennady V. Korop

Candidate of technical sciences, associate professor, leading systems analyst of the department of development and information systems of the information technology service, LLC "Volga-Dnepr Airlines" (build. 3, 28B Mezhdunarodnoye highway, Moscow, Russia)

Svetlana V. Onopchenko

Candidate of pedagogical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University (2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Roman N. Sentyay

Senior lecturer of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University (2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Вячеслав Владимирович Швыров

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры информационных образовательных
технологий и систем,
Луганский государственный
педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: slavik_asas@mail.ru

Viacheslav V. Shvyrov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of information educational
technologies and systems,
Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 14.05.2025

Принята к публикации/Accepted 04.06.2025