

СПОСОБ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Кандидат техн. наук **Попов А.С., Усмонов Ё.М., Сухачев Н.В.**
(Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)

METHOD OF NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON TECHNICAL VISION SYSTEM

A.S. Popov, Ph.D. (Tech.), E.M. Usmonov, N.V. Sukhachev
(Military Air Force Training and Research Center “Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”)

Аннотация. Проведен анализ систем навигации беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа. Представлен разработанный авторами способ навигации, основанный на применении системы технического зрения и нескольких активных инфракрасных ориентиров.

Abstract. The paper analyzes the navigation systems of helicopter-type unmanned aerial vehicles. A navigation method developed by the authors based on the use of a vision system and several active infrared landmarks is presented.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, навигация, система технического зрения, инфракрасный ориентир.

Keyword: unmanned aerial vehicle, navigation, vision system, infrared landma.

С развитием мировых технологий внимание человечества концентрируется на арктических регионах нашей планеты, которые богаты полезными ископаемыми и привлекательны для изучения изменения климата на Земле. Для обеспечения жизнедеятельности арктических экспедиций и аэрофотосъемки все чаще используют беспилотные летательные аппараты БПЛА различных типов и классов [1].

Выполнение задач комплексами с БПЛА в арктических регионах связано с трудностями использования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [2], а как известно основу навигационных систем беспилотных летательных аппаратов составляют приёмники ГНСС в сочетании с инерциальными датчиками пространственной ориентации [3].

Инерциальная навигация – метод навигации (определения координат и параметров движения различных объектов – судов, самолётов, ракет и др.) и управления их движением, основанный на свойствах инерции тел, являющийся автономным, то есть не требующим наличия внешних ориентиров или поступающих извне сигналов [4].

Рассмотрим основные преимущества инерционных навигационных систем: отсутствие зависимости от внешних источников сигнала, высокая точность, помехозащищённость, независимость от метеоусловий.

Применение высокоточных инерциальных навигационных систем также полностью не решает проблему по следующим причинам. Такие системы обладают высокой стоимостью (от 30-50 тыс. долларов), масса инерциальной системы «средней точности» на лазерных или волоконно-оптических гироскопах составляет от 8 кг, что делает проблематичным их использование на БПЛА малой и средней дальности так же, принципиальным

ограничением инерциальных навигационных систем является рост ошибки определения координат с течением времени автономной работы [5].

При использовании на БПЛА инерциальной системы (особенно на БПЛА ближнего действия) отсутствие корректирующих сигналов от ГНСС может привести к «развалу» инерциальной системы и аварии БПЛА. Как следствие, основным способом борьбы с беспилотными летательными аппаратами является подавление ГНСС.

Рассмотрим основные преимущества применения ГНСС для навигации беспилотных летательных аппаратов: высокая точность определения координат, большая высота полетов спутников, позволяющая принимать сигнал на всем земном шаре при достаточно простом антенном устройстве на воздушном судне и на земле, нахождение спутника в пределах прямой видимости позволяет использовать наиболее устойчивый помехам диапазон радиоволн и передавать сигнал с наименьшим искажением и неограниченная пропускная способность.

Применение одних только датчиков глобальной спутниковой навигации не решает проблему по следующим причинам: чувствительность к умышленным, промышленным и атмосферным помехам, возможность полного подавления средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), уязвимость к подмене сигнала принимаемого антенной, относительно низкая скорость.

Комплексирование блоком инерциальных датчиков пространственной ориентации с приёмниками ГССН обеспечивает достаточно точное определение координат БПЛА (среднее квадратичное отклонение до 15 м) при наличии незатруднённого приёма сигналов ГНСС. Следует отметить, что такие инерциальные системы не в состоянии осуществлять автономное счисление коор-

динат ввиду низкой точности гироскопических датчиков. Лучшие образцы способны поддерживать точность в течении нескольких минут [6].

Таким образом, наличие сигналов ГНСС является в настоящее время необходимым условием выполнения беспилотными летательными аппаратами поставленных задач. Отсутствие сигнала ГНСС приводит к невозможности точно определить собственные координаты и как следствие, выполнить полёт по заданному маршруту, а в некоторых случаях привести к потере или крушению.

Таким образом, мы имеем типичное противоречие: методы, которые приводят к улучшению точности навигации, одновременно приводят к потере системой автономности и помехоустойчивости к средствам радиоэлектронного подавления и низкой точностью. Современные производители беспилотных систем развитых стран (США и Израиль) на протяжении длительного времени занимаются исследованиями и разработками, направленными на увеличение автономности применения БПЛА в условиях отсутствия систем спутниковой навигации, на основе альтернативных источников данных поступающих с бортовых видео и фотокамер дневного и инфракрасного диапазонов установленных на БПЛА [7-9]. Такие системы используются в условиях применения противником систем подавления сигналов спутниковой навигации

Применение системы технического зрения (СТЗ) совместно с инфракрасными (ИК) ориентирами обладают существенными достоинствами: высокая точность определения линейных координат (горизонтальная и вертикальная погрешности менее 0,5 м), возможность использования системы в условиях применения противником систем РЭБ и подмены сигналов, отсутствие привязки системы к наземному пункту управления, экономичность и надежность в эксплуатации, система не демаскирует место посадки и размещения объекта, автономность, полное исключение дистанционного несанкционированного доступа к системе позиционирования, относительно низкие габариты и масса системы как на борту БПЛА так и на земле, возможность использования на необорудованных площадках [10].

Недостатками данной системы является сложность алгоритмов, зависимость от метеоусловий и времени суток.

Таким образом, проблема заключается в том, что, существующие и разрабатываемые системы навигации обладают существенными недостатками, несовместимыми с современными требованиями, при этом навязывается убеждение о том, что эти системы являются безальтернативными.

Для решения вышеуказанных проблем навигационных систем в условиях крайнего севера предлагается способ определения координат БПЛА относительно наземных инфракрасных ориентиров посредством системы технического зрения (СТЗ) размещенной на борту.

Задачей исследования является разработка способа определения координат БПЛА с помощью инфракрасной системы технического зрения и контрастных ориентиров, в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем.

Рассмотрим отдельную задачу по позиционированию БПЛА вертолетного типа над местом посадки или объектом (автомобиль, БТР, комплекс РЭБ) к которому «привязан» БПЛА в условиях отсутствия или искажения сигналов ГНСС. Выполнение задачи должно происходить в автоматическом режиме, без участия оператора, так как его действия могут быть недостаточно точными в условиях воздействия таких внешних факторов как порывистый ветер, не равномерное движение объекта преследования и т.д.

Инфракрасная система навигации и позиционирования основана на определении координат с использованием бортовой системы технического зрения и ИК ориентирах, устанавливаемых на земле. Эти методы аналогичны методам, используем человеком для ориентации в пространстве. Система состоит из бортовой цифровой видеокамеры с установленным интерференционным узкополосным светофильтром и цифрового вычислителя со специальным программным обеспечением. Наземная часть состоит из трех наземных инфракрасных ориентиров (маяков) (рис. 1). Бортовая система способна осуществить поиск, захват, распознавание и ориентирование по ИК-маякам, расчет линейных координат БПЛА относительно установленных маяков для вычисления и формирования в нем управляющих сигналов, обеспечивающих точное позиционирование БПЛА относительно ИК-ориентиров.

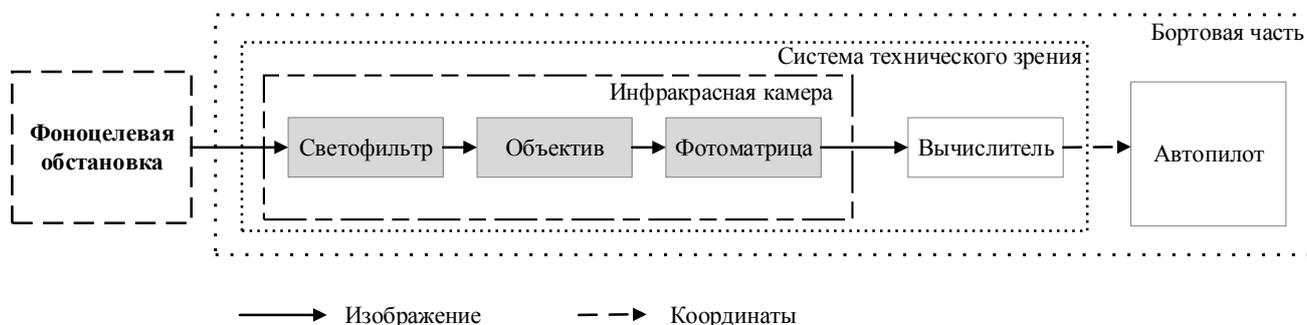


Рис. 1. Структурная схема и состав оборудования системы

Точность навигации и спектр вычисляемых навигационных параметров зависит от количества инфракрасных ориентиров (рис. 2). Более подробно рассмотрим навигацию по одному и трем инфракрасным маякам.

В случае решения полной навигационной задачи с вычислением трех линейных и трех угловых координат

необходимо 3 инфракрасных ориентира, данный вариант может применяться для решения задачи автоматического захода и точной посадки беспилотного летательного аппарата в системах их хранения и обслуживания.

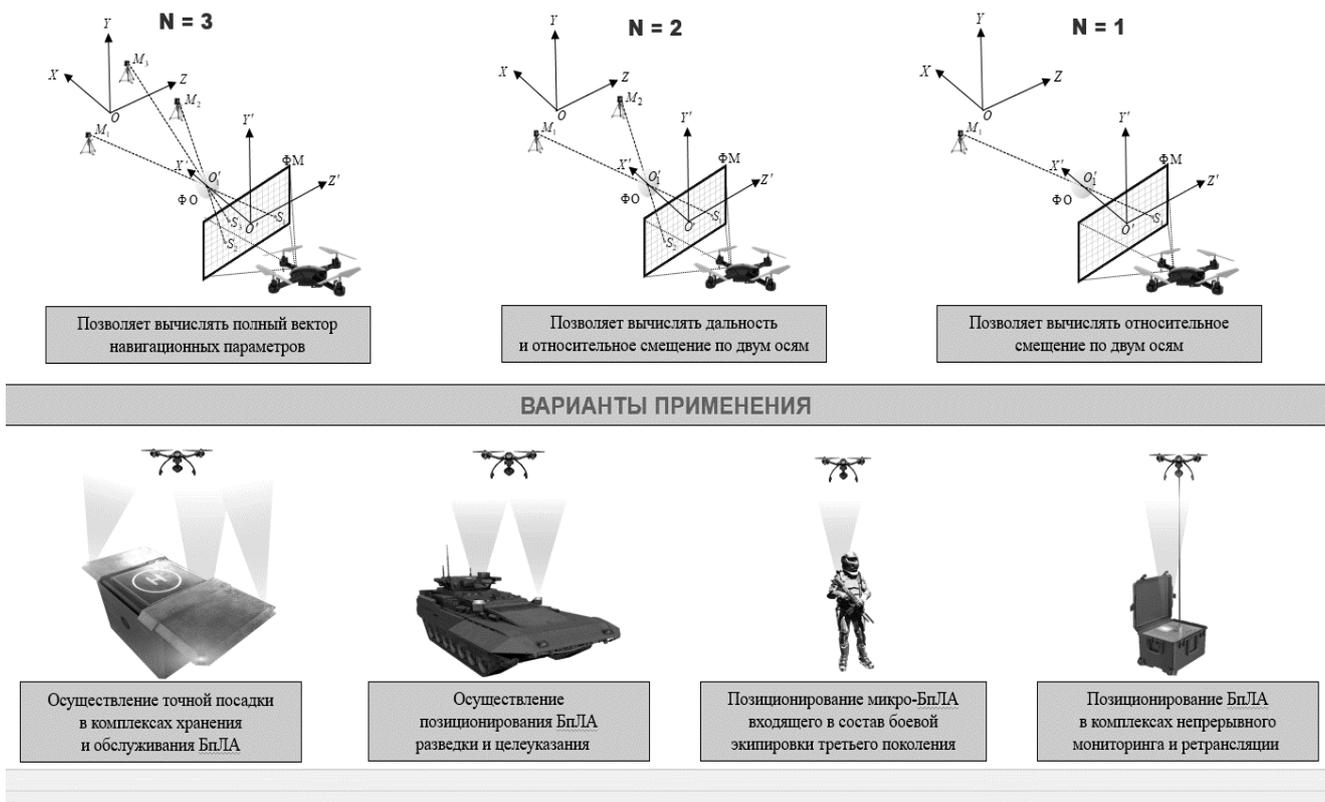
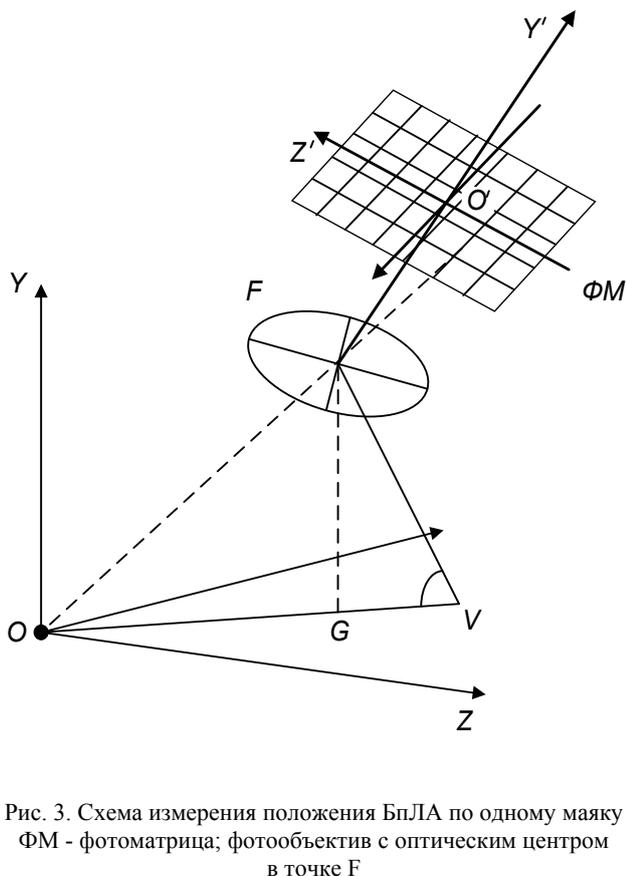


Рис. 2. Решение задачи позиционирования и варианты применения



Для решения задачи позиционирования по одному ИК маяку, разместим его в точке O (рис. 3) и бортовую фотокамеру, измерение положения изображения $S(x'_M, z'_M)$ маяка на которой обеспечивает возможность фор-

мирования сигналов управления. Задача по стабилизации линейного положения ЛА может быть решена при наличии на борту дополнительного источника информации - измерителя углов крена γ , тангажа ν , курса ψ и высоты (наклонной дальности до земной поверхности), полагаем ЛА оснащенным инерциальной навигационной системой и датчиком высоты. В качестве датчика высоты будем использовать два варианта: 1 - измеритель дальности до маяка по его энергетической яркости, определяемой по изображению маяка на фотоматрице; 2 - лазерный дальномер, жестко связанный с корпусом БПЛА. Применение активного источника излучения вместо пассивных особых точек на объекте сопровождения делает процесс измерения и последующего сопровождения существенно более устойчивым и менее чувствительным к воздействию метеоусловий и факторам искусственного происхождения.

Преобразование координат произвольного вектора из горизонтальной системы координат $OXYZ$ в связанную систему координат $O'X'Y'Z'$, осуществляется посредством известного соотношения, учитывающего только взаимное угловое положение систем координат. Связь между старыми и новыми координатами вектора для случая, когда оба базиса являются ортонормированными, задается следующей формулой:

$$\begin{pmatrix} x'_M \\ y'_M \\ z'_M \end{pmatrix} = (A)^T \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\nu + \nu_0) & -\sin(\nu + \nu_0) & 0 \\ \sin(\nu + \nu_0) & \cos(\nu + \nu_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos(\nu + \nu_0) & \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma & \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma \\ \sin(\nu + \nu_0) & \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) & -\cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos(\nu + \nu_0) & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma \end{pmatrix}$$

- матрица, описывающая преобразование координат совпадает с осью $O'Y'$ связанной системы координат. вектора между связанной системой координат и горизонтальной, ν_0 - угол отклонения оси фотокамеры от Связь между ортами систем координат, запишем на основании (1): продольной оси ЛА, при $\nu_0 = 0$ ось фотокамеры

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos(\nu + \nu_0) & \sin(\nu + \nu_0) & -\sin \psi \cos(\nu + \nu_0) \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma & \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma & -\cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i \cos \psi \cos(\nu + \nu_0) + j \sin(\nu + \nu_0) - k \sin \psi \cos(\nu + \nu_0) \\ i[\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma] + j \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) + k[\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma] \\ i[\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma] - j \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma + k[\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma] \end{pmatrix}$$

Выразим векторы \overline{OF} и \overline{FS}

$$\overline{OF} = ix + jy + kz$$

$$\overline{FS} = j'f - i'x' - k'z'$$

Учитывая коллинеарность этих векторов и отношение их модулей $\frac{OF}{FS}$, запишем

$$\frac{ix + jy + kz}{OF} = \frac{j'f - i'x' - k'z'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} \quad (3)$$

Подставим из (2) в соотношение (3) выражения для ортов i', j', k' получим

$$\frac{ix + jy + kz}{OF} \sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2} = -i'x' + j'f - k'z' = -[i \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) + j \sin(\nu + \nu_0) - k \sin \psi \cos(\nu + \nu_0)]x' +$$

$$+ \{i[\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma] + j \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) + k[\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma]\} f -$$

$$- \{i[\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma] - j \sin \gamma \cos(\nu + \nu_0) + k[\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma]\} z'$$

Записывая это соотношение в проекциях на оси системы координат $OXYZ$, выразим искомые координаты x, y, z

$$x = -OF \frac{\cos \gamma \cos(\nu + \nu_0)x'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} + OF \cdot f \frac{\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} -$$

$$- OF \cdot z' \frac{\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} \quad (4)$$

$$y = OF \frac{-\sin(\nu + \nu_0)x' + \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0)f + \sin \gamma \cos(\nu + \nu_0)z'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} \quad (5)$$

$$z = OF \frac{x' \sin \psi \cos(\nu + \nu_0)}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} + OF \cdot f \frac{\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} -$$

$$- OF \cdot z' \frac{\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}} \quad (6)$$

При измерении расстояния до земной поверхности лазерным дальномером, установленным на ЛА параллельно оси $O'Y'$ известным параметром следует считать модуль вектора $\overline{GF} = GF \cdot j'$.

Найдем углы $\angle OGF = \angle VFG + \frac{\pi}{2}$ и $\angle GOF = \frac{\pi}{2} - \angle VFO$ треугольника OGF

$$\angle VFG = \arccos(j \cdot j') \quad \angle VFO = \arccos\left(j \cdot \frac{j'f - i'x' - k'z'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}}\right),$$

откуда следует

$$\sin(\angle OGF) = -(j \cdot j'), \quad \sin(\angle GOF) = \left(j \cdot \frac{j'f - i'x' - k'z'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}}\right).$$

Из соотношения (2) получим

$$\sin(\angle OGF) = -\cos \gamma \cos(\nu + \nu_0)$$

$$\sin(\angle GOF) = \left(j \cdot \frac{j'f - i'x' - k'z'}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}}\right) = \frac{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma}{\sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}}.$$

Применяя теорему синусов для треугольника OGF , получим

$$OF = GF \frac{\sin(\angle OGF)}{\sin(\angle GOF)} = -GF \frac{\cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) \sqrt{f^2 + x'^2 + z'^2}}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma} \quad (7)$$

Подставляя это выражение в (4,5,6), получим

$$x = GF \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) x' \frac{\cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) x' + z' [\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma]}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma} -$$

$$-GF \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) x' \frac{f [\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma]}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma}, \quad (8)$$

$$y = GF \frac{\cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) [\sin(\nu + \nu_0) x' - \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) f - \sin \gamma \cos(\nu + \nu_0) z']}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma}, \quad (9)$$

$$z = GF \frac{z' [\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \sin \gamma] \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0)}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma} -$$

$$-GF \frac{x' \sin \psi \cos(\nu + \nu_0) + f [\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin(\nu + \nu_0) \cos \gamma]}{f \cos \gamma \cos(\nu + \nu_0) - x' \sin(\nu + \nu_0) + z' \cos(\nu + \nu_0) \sin \gamma}. \quad (10)$$

Таким образом, задача точной стабилизации положения БПЛА по одному наземному маяку может быть решена путём применения дополнительного бортового лазерного дальномера.

Очевидно, что точность стабилизации может быть достигнута более высокая, если в окрестности маяка нет области, имеющей другую высоту (например, маяк расположен на автомобиле, катере и т.д.).

В случае решения полной навигационной задачи с вычислением трех линейных и трех угловых координат необходимо 3 инфракрасных ориентира. Данный вариант может применяться для решения задачи автоматического захода и точной посадки беспилотного летательного аппарата в системах их хранения и обслуживания.

Рассмотрим задачу определения местоположения БПЛА при выполнении захода на посадку с произвольного направления. Для целей навигации будем использовать три наземных инфракрасных маяка, расположенных в окрестности посадочной площадки, а на бор-

ту БПЛА размещена цифровая фотокамера, оптическая ось которой параллельна продольной оси БПЛА.

Уравнения навигации. БПЛА, выполняя заход на посадку, попадает в область излучения инфракрасных маяков (рис. 4), расположенных в вершинах равностороннего треугольника, лежащего в горизонтальной плоскости.

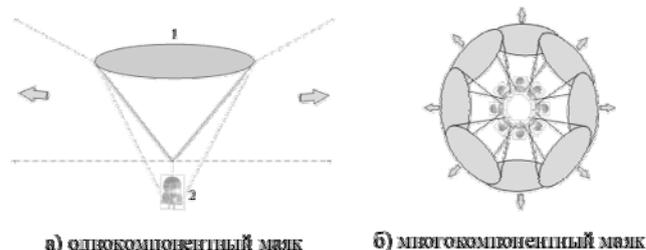


Рис. 4. Устройство всеракурсного инфракрасного маяка
1 – коническое отражающее зеркало; 2 – источник излучения

Область излучения каждого маяка формируется в виде всенаправленного конусообразного тела вращения с вертикальной осью симметрии. Таким образом, траектория снижения БПЛА с любого направления оказывается в области излучения всех трех маяков (рис. 5).



Рис. 5. Взаимное расположение инфракрасных маяков
1 – всеракурсное улавливающее устройство;
2,3,4 – всенаправленные лазерные маяки, 5 – БПЛА

Излучение трех инфракрасных маяков, посредством фотообъектива, формирует изображение весьма малых габаритов на чувствительных элементах фотоматрицы. По координатам «засвеченных» элементов на фотоматрице (y_k, z_k) $k = 1...3$, определяются пространственное и угловое положение БПЛА относительно системы маяков (рис. 6).

Для описания взаимного положения системы маяков и БПЛА введем в рассмотрение горизонтальную прямоугольную систему координат $OXYZ$, связанную с системой источников излучения (базис i, j, k), начало координат расположено в центре окружности, описывающей маяки, ось OY совпадает с вертикалью, ось OX проходит через дальний от БПЛА маяк, а ось OZ образует правую систему координат.

Система координат $O'X'Y'Z'$ – подвижная система, связанная с геометрическим центром фотоматрицы, где ось $O'X'$ направлена по оптической оси объектива, ось $O'Y'$ направлена вверх перпендикулярно горизонтальной стороне фотоматрицы, ось $O'Z'$ перпендикулярна осям $O'X'$, $O'Y'$, образуя с ними правую систему координат с базисом i', j', k' , представленными на рис. 6.

$$A = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \nu & (\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \nu) & (\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \nu) \\ \sin \nu & \cos \gamma \cos \nu & -\cos \nu \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \nu & (\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \nu \sin \psi) & (\cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \nu \sin \psi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i'i & j'i & k'i \\ i'j & j'j & k'j \\ i'k & j'k & k'k \end{pmatrix},$$

где ψ – угол рыскания, ν – угол тангажа, γ – угол крена.

Вектор, описывающий геометрический центр объектива в системе $OXYZ$ (точка O_1), то есть пространственное положение объектива относительно k -го маяка, обозначим G_k :

$$(G_k) = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - l_{xk} \\ y - l_{yk} \\ z - l_{zk} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} G'_{kx} \\ G'_{ky} \\ G'_{kz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (x - l_{xk}) \\ (y - l_{yk}) \\ (z - l_{zk}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x - l_{xk})a_{11} + (y - l_{yk})a_{21} + (z - l_{zk})a_{31} \\ (x - l_{xk})a_{12} + (y - l_{yk})a_{22} + (z - l_{zk})a_{32} \\ (x - l_{xk})a_{13} + (y - l_{yk})a_{23} + (z - l_{zk})a_{33} \end{pmatrix}.$$

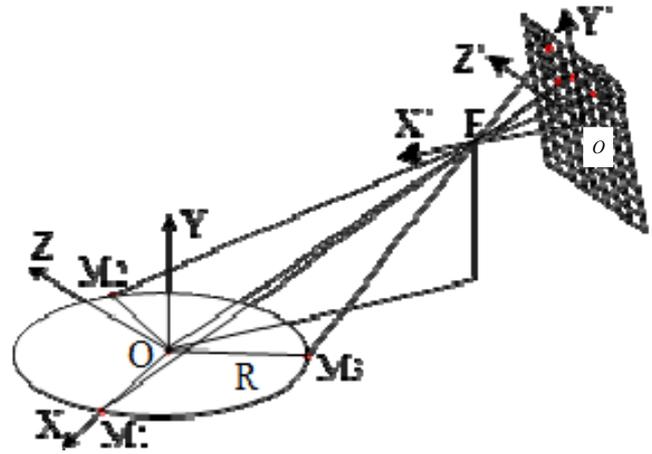


Рис. 6. Оптическая схема измерения
 M_1, M_2, M_3 – источники лазерного излучения,
 S_1, S_2, S_3 – изображения маяков на фотоматрице

Преобразование координат произвольного вектора из системы координат $OXYZ$ в систему координат $O'X'Y'Z'$, осуществляется посредством известного соотношения, учитывающего только взаимное угловое положение систем координат. Связь между старыми и новыми координатами вектора для случая, когда оба базиса являются ортонормированными, задается следующей формулой:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где A – матрица направляющих косинусов, имеющая вид:

где x_k, y_k, z_k – координаты геометрического центра объектива, x, y, z – искомые координаты маяка, l_{xk}, l_{yk}, l_{zk} – проекции вектора \vec{G}_k на соответствующие оси системы координат $O'X'Y'Z'$.

Вычислим проекции вектора $\vec{G}_k = i(x - l_{xk}) + j(y - l_{yk}) + k(z - l_{zk})$ на оси системы координат $O'X'Y'Z'$, для чего используем соотношение (1)

Вектор $\overline{O_1S}$ в системе координат $O'X'Y'Z'$ выражается следующим образом

$$\overline{FS_k} = fi' - y_kj' - z_kk'.$$

Запишем вектор $\overline{FO} = \frac{1}{3}(\overline{G_1} + \overline{G_2} + \overline{G_3})$.

При этом $\overline{G_1} = (fi' - y_1j' - z_1k')\frac{G_{x1}}{f}$, $\overline{G_2} = (fi' - y_2j' - z_2k')\frac{G_{x2}}{f}$, $\overline{G_3} = (fi' - y_3j' - z_3k')\frac{G_{x3}}{f}$.

Вектора $\overline{G_k}$ и $\overline{FS_k}$ лежат на одной прямой, поэтому должны удовлетворять условию коллинеарности

$$\begin{vmatrix} i' & j' & k' \\ f & -y_k & -z_k \\ G'_{kx} & G'_{ky} & G'_{kz} \end{vmatrix} = 0.$$

В скалярном виде это условие переписывается:

$$\begin{aligned} [(x-l_{xk})a_{12} + (y-l_{yk})a_{22} + (z-l_{zk})a_{32}]z_k - [(x-l_{xk})a_{13} + (y-l_{yk})a_{23} + (z-l_{zk})a_{33}]y_k &= 0, \\ [(x-l_{xk})a_{13} + (y-l_{yk})a_{23} + (z-l_{zk})a_{33}]f + [(x-l_{xk})a_{11} + (y-l_{yk})a_{21} + (z-l_{zk})a_{31}]z_k &= 0, \\ [(x-l_{xk})a_{12} + (y-l_{yk})a_{22} + (z-l_{zk})a_{32}]f + [(x-l_{xk})a_{11} + (y-l_{yk})a_{21} + (z-l_{zk})a_{31}]y_k &= 0. \end{aligned}$$

Поскольку полученные уравнения линейно-зависимы, что легко проверяется, то отбросим первое из них и преобразуем второе и третье следующим образом:

$$\begin{aligned} (a_{13}f + a_{11}z_k)(x-l_{xk}) + (a_{23}f + a_{21}z_k)(y-l_{yk}) + (a_{33}f + a_{31}z_k)(z-l_{zk}) &= 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_k)(x-l_{xk}) + (a_{22}f + a_{21}y_k)(y-l_{yk}) + (a_{32}f + a_{31}y_k)(z-l_{zk}) &= 0. \end{aligned}$$

При наличии шести неизвестных двух полученных уравнений недостаточно для решения задачи об определении местоположения ЛА, поэтому используем три разнесенных маяка, которые не расположены на одной прямой, и запишем для них полученные соотношения:

$$\begin{cases} (a_{13}f + a_{11}z_1)(x-l_{x1}) + (a_{23}f + a_{21}z_1)(y-l_{y1}) + (a_{33}f + a_{31}z_1)(z-l_{z1}) = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_1)(x-l_{x1}) + (a_{22}f + a_{21}y_1)(y-l_{y1}) + (a_{32}f + a_{31}y_1)(z-l_{z1}) = 0, \\ (a_{13}f + a_{11}z_2)(x-l_{x2}) + (a_{23}f + a_{21}z_2)(y-l_{y2}) + (a_{33}f + a_{31}z_2)(z-l_{z2}) = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_2)(x-l_{x2}) + (a_{22}f + a_{21}y_2)(y-l_{y2}) + (a_{32}f + a_{31}y_2)(z-l_{z2}) = 0, \\ (a_{13}f + a_{11}z_3)(x-l_{x3}) + (a_{23}f + a_{21}z_3)(y-l_{y3}) + (a_{33}f + a_{31}z_3)(z-l_{z3}) = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_3)(x-l_{x3}) + (a_{22}f + a_{21}y_3)(y-l_{y3}) + (a_{32}f + a_{31}y_3)(z-l_{z3}) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Выведем соотношения для координат l_{xk} , l_{yk} , l_{zk} из предположения, что все маяки расположены в горизонтальной плоскости $O'X'Z'$

$$\begin{cases} l_{xk} = R \cos \frac{2\pi(k-1)}{3} \\ l_{yk} = 0 \\ l_{zk} = R \sin \frac{2\pi(k-1)}{3} \end{cases}, \quad (14)$$

где $k = 1...3$.

Для решения этой системы уравнений важно выполнить нумерацию маяков, от которой зависит положение системы координат $O'X'Y'Z'$, а в ней в свою очередь описывается местоположение БЛА. На рис. 5 ось OX проходит через маяк M_1 , а последующая нумерация маяков выполняется по часовой стрелке, именно этому необходимо следовать при программной реализации алгоритма вычисления координат. Тогда уравнения видеонавигации (13) принимают следующий вид

$$\begin{cases} (a_{13}f + a_{11}z_1)(x - R) + (a_{23}f + a_{21}z_1)y + (a_{33}f + a_{31}z_1)z = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_1)(x - R) + (a_{22}f + a_{21}y_1)y + (a_{32}f + a_{31}y_1)z = 0, \\ (a_{13}f + a_{11}z_2)(x + \frac{R}{2}) + (a_{23}f + a_{21}z_2)y + (a_{33}f + a_{31}z_2)(z - R\frac{\sqrt{3}}{2}) = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_2)(x + \frac{R}{2}) + (a_{22}f + a_{21}y_2)y + (a_{32}f + a_{31}y_2)(z - R\frac{\sqrt{3}}{2}) = 0, \\ (a_{13}f + a_{11}z_3)(x + \frac{R}{2}) + (a_{23}f + a_{21}z_3)y + (a_{33}f + a_{31}z_3)(z + R\frac{\sqrt{3}}{2}) = 0, \\ (a_{12}f + a_{11}y_3)(x + \frac{R}{2}) + (a_{22}f + a_{21}y_3)y + (a_{32}f + a_{31}y_3)(z + R\frac{\sqrt{3}}{2}) = 0. \end{cases}$$

Таким образом, получив уравнение видеонавигации мы можем определить положение БПЛА относительно установленных маяков

Полунатуральное моделирование

Для выявления и решения широкого круга проблем при интеграции системы технического зрения с бортовым автопилотом на реальные БПЛА был разработан

комплекс программных и аппаратных средств, позволяющих проводить полунатурное моделирование предложенной системы позиционирования. В основу комплекса положена мета-операционная система для роботов с открытым исходным кодом ROS. Она позволяет строить модульную архитектуру СТЗ, что очень важно при отладке и дальнейшем применении таких систем в робототехнических комплексах. (рис. 7)

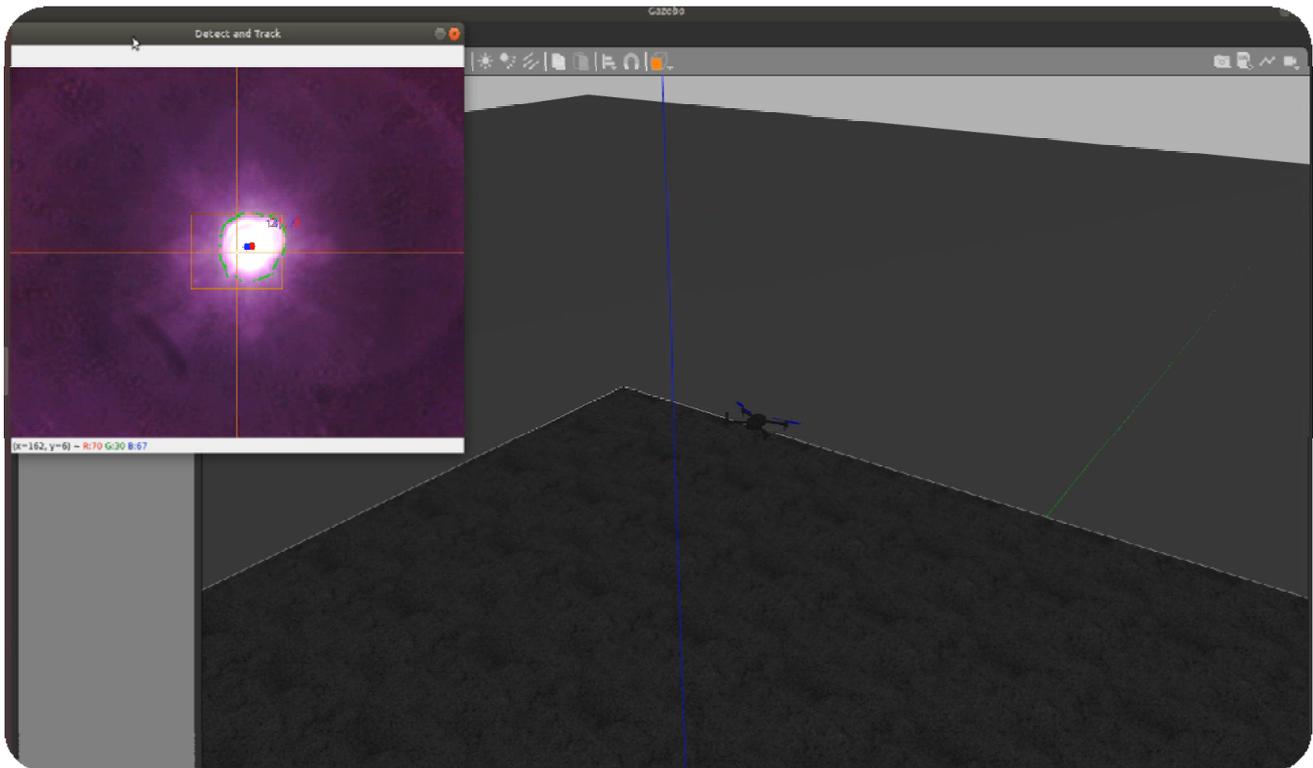


Рис. 7. Моделирование системы с СТЗ на БПЛА

Демонстрация работы системы проводилась на примере БПЛА компаньона в роли DJI Tello с установленной камерой и светофильтром, который должен автоматически следовать за инфракрасными ориентирами, установленными на автомобиле носителя (рис. 8). Система производит захват и распознавание контрастных

ориентиров, рассчитывает относительное положение БПЛА и вводит корректировки отклонения в автопилот.

Также демонстрируется возможность автоматической посадки беспилотного летательного аппарата на машину носитель, с помощью предложенного способа в улавливающее устройство.



Рис. 8. Демонстрационный комплекс

Заключение

В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что применение системы позиционирования беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем возможно. Применение инфракрасной системы навигации и позиционирования эффективно решает проблему отсутствия или подмены сигналов спутниковых навигационных систем. Посредством представленных алгоритмов возможно эффективное повышение точности позиционирования, что многократно повысит эффективность использования комплексов с БПЛА для решения широкого круга задач в районах крайнего севера.

Литература

1. Попов А. С., Агеев А. М., Волобуев М. Ф. Принципы построения бортовых комплексов управления БЛА различного класса надежности // Военная мысль 2018. № 11. С. 61-70.
2. Черноус С.А., Шагимурагов И.И., Вульфович Б.А., Калитёнков Н.В., Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния // Вестник МГТУ. 2016. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/navigatsiya-gps-glonass-v-arktike-i-polyarnye-siyaniya> (дата обращения: 11.12.2021).
3. Хаметов, Р. С. Автономная система навигации и ориентирования беспилотных летательных аппаратов для полётов в городе: задачи и требования функционирования / Р. С. Хаметов, Я. А. Темник, П. Е. Шведов, В. К. Исламов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. - 2018. - № 45 (231). - С. 37-42. — URL: <https://moluch.ru/archive/231/53568/> (дата обращения: 11.12.2021).
4. ГОСТ РВ 52 339-2005. Системы бесплатформенные инерциально-навигационные на лазерных гироскопах, М., 2005, 15 стр.

5. Семенова Л.Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-navigatsii-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 11.12.2021).

6. Купервассер О.Ю., Рубинштейн А.А. Система навигации беспилотных летательных аппаратов с помощью видео. **IV конференция "ТРИЗ. Практика применения методических инструментов"** 2012 г. - № 45 (231). - С. 37-42.

7. Seeger U., Seeger R. Fast corner detection in grey-level images // Pattern Recogn. Lett. – 1994. – № 15(7). – P. 669–675.

8. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision // Cambridge University Press, 2004.

9. Zhang B., Li Y. F. Automatic Calibration and Reconstruction for Active Vision Systems, Intelligent Systems, Control, and Automation // Science and Engineering. V. 57, Springer, 2012. – P. 175.

10. Пат. 2700908 РФ, МПК В 64F 1/18. Способ определения координат летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы [Текст] / Агеев А.М., Бондарев В.Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В., Проценко В.В., Смирнов Д.А. (РФ); заявители и патентообладатели ВУНЦ ВВС «ВВА». № 2018112532; заявл. 06.04.2018 11 с.: ил.

Сведения об авторах:

Попов Александр Сергеевич, начальник научно-исследовательского отдела.

Усмонов Ёкубджон Махмадисуфович, Сухачев Никита Владимирович – курсанты.

Все авторы: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»).

Телефон 89805545946,
e-mail saga30@yandex.ru.