

УДК 629.7.054.07

Метод вычисления параметров линейного движения беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия сигналов спутниковых радионавигационных систем на этапе посадки

Исаев М. А., Исаев А. М., Линец Г. И.

Актуальность: беспилотные летательные аппараты (БЛА) мультироторного типа используются как элемент комплексов охраны и мониторинга удалённых стационарных объектов. Ключевой особенностью данных БЛА является их высокая автономность, которая достигается за счёт автоматизации всех этапов полётно-заданного, таких как взлёт, полет по маршруту и посадка. Наиболее сложным и ответственным этапом является посадка в контейнер автономного базирования, что требует высокой точности оценки параметров линейного движения БЛА. Однако, эксплуатируемые системы охраны и мониторинга не обеспечивают требуемой точности оценки местоположения БЛА на этапе посадки в условиях отсутствия сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), что не позволяет размещать контейнеры автономного базирования БЛА вблизи промышленных или природных объектов, затеняющих или искажающих сигналы навигационных спутников. **Целью работы** является повышение точности позиционирования БЛА мультироторного типа на этапе посадки в контейнер автономного базирования в условиях отсутствия сигналов навигационных спутников за счёт использования предложенной системы локального позиционирования для замены данных бортового приёмника СРНС в контуре коррекции параметров линейного движения БЛА. **Используемые методы:** для мультиплексирования данных инерциальных измерителей и данных бортового приёмника СРНС или локальной системы позиционирования использован фильтр Калмана. Вычисление координат БЛА относительно посадочной площадки в условиях отсутствия достоверных сигналов СРНС выполняется с применением алгебры кватернионов. **Новизна:** впервые для определения координат БЛА мультироторного типа относительно посадочной площадки использован квадрантный датчик, установленный на 3-х осевом гиросtabilизированном подвесе. Предложен способ сканирования области предполагаемого нахождения инфракрасного маяка, а также его сопровождения в режиме реального времени по сигналам 4-х фоточувствительных элементов квадрантного датчика. В отличие от известных методов оценки местоположения мультироторного БЛА относительно посадочной площадки, применена алгебра кватернионов и предложен метод коррекции навигационной системы БЛА с бесшовным переключением между различными источниками корректирующей информации. **Результат:** использование предложенного метода позволяет обеспечить погрешность оценки местоположения БЛА мультироторного типа на этапе посадки не хуже 0,19 м в условиях отсутствия достоверных сигналов СРНС. **Практическая значимость:** решение задачи посадки БЛА мультироторного типа на ограниченную площадку в условиях отсутствия достоверных сигналов навигационных спутников позволяет удовлетворить требования практики к размещению контейнеров автономного базирования БЛА и повысить оперативность реагирования комплекса на сигнал тревоги.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, инерциальная навигационная система, локальная системы позиционирования БЛА, спутниковые радионавигационные системы.

Библиографическая ссылка на статью:

Исаев М. А., Исаев А. М., Линец Г. И. Метод вычисления параметров линейного движения беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия сигналов спутниковых радионавигационных систем на этапе посадки // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 67-89. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-67-89.

Reference for citation:

Isaev M. A., Isaev A. M., Linets G. I. Method for calculating the parameters of linear motion of an unmanned aerial vehicle in the absence of signals from satellite radio navigation systems at the landing stage. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 67-89 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-67-89.

Введение

В настоящее время мультироторные беспилотные летательные аппараты (БЛА) все чаще используются в качестве подсистемы комплекса охраны и мониторинга удалённых стационарных объектов [1-4].

Задачи мониторинга и реагирования на сигнал тревоги требуют минимального времени подлёта к зоне наблюдения и поиска, что достигается за счёт размещения БЛА внутри контейнера автономного базирования, установленного на охраняемой территории. Контейнер базирования обеспечивает постоянную готовность БЛА к вылету и защиту от воздействий неблагоприятных факторов внешней среды.

Фактическое размещение контейнера базирования БЛА должно выбираться исходя из анализа инфраструктуры охраняемого объекта таким образом, чтобы уменьшить издержки эксплуатации комплекса, а также минимизировать время подлёта БЛА к наиболее вероятным зонам проникновения нарушителя.

Практика использования БЛА для охраны и мониторинга удалённых объектов предъявляет высокие требования к автоматизации процессов взлёта, посадки, заряда или замены аккумуляторной батареи. Самым сложным этапом полёта является автоматическая посадка БЛА на площадку контейнера базирования, которая должна быть обеспечена в любое время суток в широком диапазоне погодных условий.

Существующие комплексы с базированием БЛА в контейнере, такие как: Nightingale, Dronehub, SENSYN Drone Hub, COEX Пеликан, Smart Aerial Monitoring Systems SAMS, Percepto Air Mobile и др. [5-17] обеспечивают необходимую для этапа посадки точность позиционирования в условиях хорошей освещённости, минимальном уровне дождя, а также при наличии достоверных сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Однако, при их затенении, искажении или переотражении не обеспечивается требуемая точность позиционирования при посадке на ограниченную площадку, что накладывает существенные ограничения на место размещения контейнера базирования БЛА.

Таким образом, известные эксплуатируемые системы не позволяют размещать контейнер базирования вблизи сооружений, затеняющих сигналы СРНС и требуют хороших условий освещённости посадочной площадки.

Исходя из анализа существующих систем БЛА контейнерного базирования можно сделать вывод о том, что актуальной задачей является разработка локальной системы позиционирования БЛА на этапе посадки, обеспечивающей требуемую точность посадки в условиях отсутствия достоверных сигналов СРНС, а также в широком диапазоне погодных условий и освещённости посадочной площадки.

Анализ предыдущих работ в исследуемой предметной области

Существующие алгоритмы выработки навигационного решения, применяемые в системах управления БЛА мультироторного типа, комплексировать сигналы инерциальных измерителей и СРНС, обеспечивая точность, достаточную для взлёта и выполнения полётного задания. При комплексировании дан-

ных в качестве основного источника используется информация от бортовых инерциальных измерителей в соответствии с основным уравнением инерциальной навигации [18]:

$$\vec{p} = \int_0^t \int_0^t \vec{a} dt,$$

где: \vec{p} – вектор местоположения; \vec{a} – вектор линейных ускорений.

Возникающую при этом погрешность определения фактического местоположения БЛА периодически корректируют с использованием сигналов бортового приёмника СРНС, обеспечивая погрешность позиционирования до 5 м. Однако, для посадки на площадку контейнера базирования БЛА требуется более точное навигационное решение, погрешность которого не должна превышать 0,35–0,4 м относительно центра посадочной площадки.

Для увеличения точности позиционирования БЛА на этапе посадки применяется ряд методов [19-27].

Использование режима Real Time Kinematic (RTK) в бортовом приёмнике СРНС улучшает точность оценки координат до сантиметровых значений за счёт использования дополнительной информации от базовой станции коррекции. Однако, точность определения координат уменьшается с увеличением расстояния между БЛА и базовой станцией коррекции [19]. На практике использование локальной станции коррекции возможно только в том случае, когда она расположена в непосредственной близости от контейнера базирования. Для получения заявленной точности позиционирования БЛА при посадке требуется угол обзора до 30° над горизонтом и отсутствие препятствий на пути распространения сигналов навигационных спутников. Кроме того, на точность вычисления поправок RTK влияют различного рода помехи, создаваемые базовыми станциями мобильной связи, высоковольтными трансформаторами и т.д. [20].

В реальных условиях здания и другие препятствия мешают приёму сигналов СРНС и могут привести к их потере (эффект многолучевого распространения, электромагнитный шум, создаваемый активными излучателями). Переотражённый сигнал СРНС от металлических крыш строений, находящихся вблизи контейнера базирования, приводит к скачкообразному изменению определяемых координат и высоты полёта БЛА.

Таким образом, использование режима RTK обеспечивает требуемую для посадки точность позиционирования БЛА только в условиях отсутствия помех распространению сигналов СРНС и обеспечения условий угла обзора над горизонтом до 30°, что при эксплуатации БЛА контейнерного типа в определенных условиях может не выполняться.

Известен способ коррекции оценки местоположения БЛА на этапе посадки с применением системы IR-Lock [21], которая использует инфракрасный (ИК) маяк на посадочной площадке, размещённую на борту БЛА специализированную видеокамеру РИХУ [22] с матрицей 1280 × 800 пикселей, углом зрения 75° по горизонтали и 47° по вертикали. Методы обработки изображения используют алгоритмы фильтрации по цвету, оптимизированные для распозна-

вания ИК маяка и вычисления его координат по осям ХУ относительно центра кадра. Полученные координаты используются в алгоритме вычисления параметров движения в качестве корректирующей информации, что позволяет повысить точность определения местоположения БЛА относительно посадочной площадки до требуемых значений. Однако, в условиях отсутствия сигналов СРНС данная система обеспечивает отклонение БЛА более 1 м от точки размещения ИК маяка при высоте полёта 5 м [23], что недостаточно для выполнения точной посадки БЛА в контейнер базирования. Видимость ИК маяка ограничена углом обзора камеры и требует достаточно точного выхода БЛА в зону посадки. Жёсткое крепление видеокамеры к корпусу БЛА приводит к увеличению ошибки позиционирования при усилении ветровой нагрузки.

В работах [11-17] представлены способы, использующие системы технического зрения (СТЗ) в качестве источника корректирующей информации на этапе посадки БЛА в контейнер базирования. На посадочную площадку наносятся специализированные маркеры ArUco и AprilTag. При помощи штатной, стабилизированной по трём осям бортовой видеокамеры происходит отслеживание маркеров на этапе посадки. В наземном или бортовом вычислителе производится распознавание и оценка положения маркера в кадре, определения высоты и курсового угла относительно посадочной площадки [24]. Полученная информация используется для коррекции оценки местоположения БЛА. Однако, обработка видеопотока требует наличия высокопроизводительного компьютера на борту БЛА, что является трудно реализуемым. В случае выполнения обработки изображения наземным оборудованием, в контуре системы управления БЛА появляется дополнительная транспортная задержка, что не позволяет обеспечить требуемую точность в условиях ветровой нагрузки и отсутствия достоверных данных от СРНС. Системы, использующие методы распознавания образов, чувствительны к уровню освещённости и оптическим помехам в виде теней, лёгкого тумана, снегопада слабой интенсивности.

Для повышения точности позиционирования в [25] используется информация от СТЗ, которая применяется в расширенном векторе пространства состояний фильтра Калмана (ФК). Однако, заявленная точность обеспечивается только при наличии достоверных сигналов навигационных спутников, что не позволяет применять данный метод для эксплуатации БЛА контейнерного типа в условиях недостоверных сигналов СРНС.

В патенте [26] информация о положении БЛА относительно центра кадра применяется для формирования корректирующих команд в контуре системы управления, обеспечивая наведение на центр посадочной площадки с помощью «виртуального пилота». При таком подходе повышение точности позиционирования БЛА достигается только в условиях достоверных сигналов СРНС, но при их искажении или отсутствии требуемая точность не обеспечивается.

В работе [27] авторы используют инерциальные измерители и СТЗ для оценки местоположения, однако предложенный способ не обеспечивает вычисление навигационного решения вне зоны видимости посадочной площадки и не позволяет выполнять полет по заданному маршруту в автоматическом режиме.

Таким образом, основным недостатком известного научно-методического аппарата является невозможность обеспечения требуемой точности позиционирования БЛА в условиях отсутствия достоверных сигналов СРНС для выполнения посадки на площадку контейнера базирования.

Необходимо разработать метод, обеспечивающий требуемую точность позиционирования БЛА для посадки в контейнер базирования в условиях отсутствия достоверных сигналов СРНС в широком диапазоне погодных условий в любое время суток.

Постановка задачи

Будем считать, что для решения задачи вычисления местоположения с использованием модели плоской Земли используются следующие системы координат:

- земная система координат F^l – начало которой совпадает с опорной точкой, заданной при формировании полётного задания. Ось OX направлена на географический Север, ось OY – на Восток, ось OZ – вниз по местной вертикали.
- подвижная земная система координат БЛА F^U – начало расположено в центре масс БЛА, оси совпадают по направлению с осями земной системы координат F^l ;
- связанная с БЛА система координат F^b – начало расположено в центре масс БЛА, ось OX – расположена в плоскости симметрии БЛА и направлена к носовой его части. Ось OY – перпендикулярна плоскости симметрии БЛА и направлена к правой его части. Ось OZ – расположена в плоскости симметрии и направлена к нижней части БЛА.

Требуется разработать метод, обеспечивающий вычисление параметров линейного движения БЛА контейнерного базирования в следующих условиях:

- наличия достоверных сигналов СРНС;
- отсутствия достоверных сигналов СРНС;
- отсутствия достоверных сигналов СРНС при использовании данных от локальной системы позиционирования контейнера базирования.

В качестве ограничения при решении задачи будем использовать погрешность позиционирования БЛА на этапе посадки, которая не должна превышать $\Delta p_{land}^{err} = r_{land} - r_{gear}$, где: r_{land} – радиус вписанной в посадочную площадку окружности; r_{gear} – радиус окружности описанной вокруг посадочного шасси БЛА.

Для уменьшения погрешности перепроектирования географических координат в плоские координаты предлагается использовать в качестве опорной координаты целевую навигационную точку полётного задания.

Решение

Для управления полётом мультироторного БЛА его навигационная система должна выполнять оценку параметров вращательного и линейного движения. В работах [28] данная задача решается в едином алгоритме, что увели-

чивает точность оценки параметров вращательного и линейного движения за счёт использования большого объёма данных от бортовых датчиков и учёта их перекрёстных связей. Однако, в случае искажения сигналов СРНС возрастает погрешность оценки углов ориентации, что снижает адекватность управляющего воздействия. В случае раздельного решения задач вычисления параметров вращательного и линейного движения недостоверные данные СРНС не влияют на определение пространственной ориентации БЛА.

Для описания пространственной ориентации БЛА по измерениям датчиков угловой скорости, линейных ускорений и напряжённости магнитного поля Земли предлагается использовать подход, описанный в [29].

Ориентация связанной с БЛА системы координат F^b относительно подвижной Земной системы координат F^U описывается кватернионом Λ , который используется для отображения измерений датчика линейных ускорений из F^b в F^U .

Основным режимом работы навигационной системы является использование сигналов СРНС для коррекции оценки скорости и местоположения БЛА. При попадании БЛА в зону подавления или искажения сигналов СРНС используется только инерциальный метод счисления пути. Для выполнения посадки в контейнер базирования вместо данных бортового приёмника СРНС используется локальная система позиционирования.

Для вычисления параметров линейного движения требуется осуществлять их прогноз [30]:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k, \\ P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \end{cases} \quad (1)$$

где: $x_{k|k-1}$ – вектор пространства состояний, содержащий оценку параметров движения инерциальным методом; F_k – матрица перехода состояний, которая применяется к состоянию за предыдущий квант времени $x_{k-1|k-1}$; u_k – вектор управления; B_k – матрица перехода вектора управления в вектор пространства состояний; $P_{k|k-1}$ – априорная ковариационная матрица; Q_k – матрица шумов шага прогноза.

При наличии достоверных данных от СРНС используем шаг коррекции [30]:

$$\begin{cases} \tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}; \\ S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k; \\ K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}; \\ \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k; \\ P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \end{cases} \quad (2)$$

где: \tilde{y}_k – вектор невязки измерений; z_k – вектор, содержащий измерения бортового модуля СРНС; H_k – матрица приведения вектора $\hat{x}_{k|k-1}$ к

размерностям вектора z_k ; S_k – ковариационная матрица вектора ошибки; R_k – матрица шумов измерителя; K_k – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления.

На шаге прогноза (1) используется основное уравнение инерциальной навигации для обновления оценки вектора скорости и местоположения БЛА [31]. Для шага коррекции необходимо обеспечить согласование измерений бортового приёмника и инерциального метода счисления пути в модели плоской Земли. С этой целью выполним проекцию географических координат, полученных от бортового приёмника СРНС в модель плоской Земли [31]:

$$\left\{ \begin{array}{l} d\mu = \mu - \mu_0; \\ d\iota = \iota - \iota_0; \\ R_N = \frac{R}{\sqrt{1 - (2c - c^2)\sin^2 \mu}}; \\ R_M = R_N \frac{1 - (2c - c^2)}{1 - (2c - c^2)\sin^2 \mu}; \\ P_x = \frac{d\mu}{\arctan\left(\frac{1}{R_M}\right)}; \\ P_y = \frac{d\iota}{\arctan\left(\frac{1}{R_N \cos(\mu_0)}\right)}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где: μ_0 и ι_0 – опорные значения долготы и широты соответственно; μ и ι – значения долготы и широты, проекцию которых необходимо выполнить в модель плоской Земли; c – коэффициент «сплющивания» планеты; R – экваториальный радиус Земли; R_N и R_M – вспомогательные коэффициенты для выполнения проекции; P_x и P_y – проекция долготы и широты в модель плоской Земли относительно опорных координат μ_0, ι_0 .

Полученные координаты P_x и P_y используются в (2) как измерения местоположения БЛА в векторе z_k . Выполнение проекции географических координат в плоские координаты за пределами фильтра Калмана позволяет упростить его реализацию, а также использовать другие источники информации о местоположении для уточнения параметров линейного движения.

Погрешность проекции при переходе из географических координат в плоские увеличивается с удалением БЛА от опорной точки. Для минимизации погрешности перехода из географических координат в плоские, координаты целевой точки полётного задания используются в качестве опорной.

Для обновления координат опорной точки, необходимо выполнить переход от плоских координат в географические [31]:

$$\begin{cases} \mu_{uav}^{old} = P_x^{old} \arctan\left(\frac{1}{R_M}\right) + \mu_0^{old}; \\ \nu_{uav}^{old} = P_y^{old} \arctan\left(\frac{1}{R_N \cos(\mu_0)}\right) + \nu_0^{old}. \end{cases} \quad (4)$$

Далее вычислим значения опорных координат μ_0^{new} , ν_0^{new} и выполним проекцию географических координат μ_{uav}^{old} , ν_{uav}^{old} в плоские координаты относительно значений координат новой опорной точки:

$$\begin{cases} d\mu^{new} = \mu_0^{new} - \mu_{uav}^{old}; \\ d\nu^{new} = \nu_0^{new} - \nu_{uav}^{old}; \\ P_x^{new} = \frac{d\mu^{new}}{\arctan\left(\frac{1}{R_M}\right)}; \\ P_y^{new} = \frac{d\nu^{new}}{\arctan\left(\frac{1}{R_N \cos(\mu_0)}\right)}, \end{cases} \quad (5)$$

где: P_x^{new} – оценка местоположения в плоских координатах по оси X; P_y^{new} – оценка местоположения в плоских координатах по оси Y.

Обновление оценки параметров линейного движения происходит с частотой дискретизации инерциального измерителя согласно уравнению (1). При наличии достоверных данных для коррекции от бортового приёмника СРНС используется уравнение (3) для перехода из географических в плоские координаты и, затем, уравнение (2) для уточнения оценки параметров линейного движения БЛА.

В случае отсутствия достоверных данных СРНС (искажение, затенение, глушение и т.д.), навигационное решение обновляется в штатном режиме с нарастающей во времени ошибкой определения местоположения из-за погрешностей измерений датчиков угловой скорости и линейных ускорений. При появлении достоверных данных СРНС, возобновляется вычисление шага коррекции с использованием фильтра Калмана, что обеспечивает минимизацию ошибки оценки параметров линейного движения БЛА.

На этапе посадки БЛА в качестве опорной точки используются географические координаты центра посадочной площадки. Поскольку в фильтре Калмана коррекция параметров линейного движения выполняется в плоских координатах относительно опорной точки, возможно выполнить замену данных бортового приёмника СРНС данными локальной системы позиционирования, которая определяет координаты относительно центра посадочной площадки. С этой целью введём локальную систему позиционирования, обеспечивающую

вычисление местоположения БЛА относительно центра посадочной площадки. Для посадки БЛА в контейнер автономного базирования необходимо знать кратчайшее расстояние от центра БЛА до центра посадочной площадки (линия визирования), а также её проекцию на оси СК F^U .

Пусть ориентация связанной с линией визирования правосторонней системы координат F^v относительно подвижной Земной системы координат F^U описывается кватернионом M . Начало F^v совпадает с центром масс БЛА, ось X совпадает с линией визирования (рис. 1).

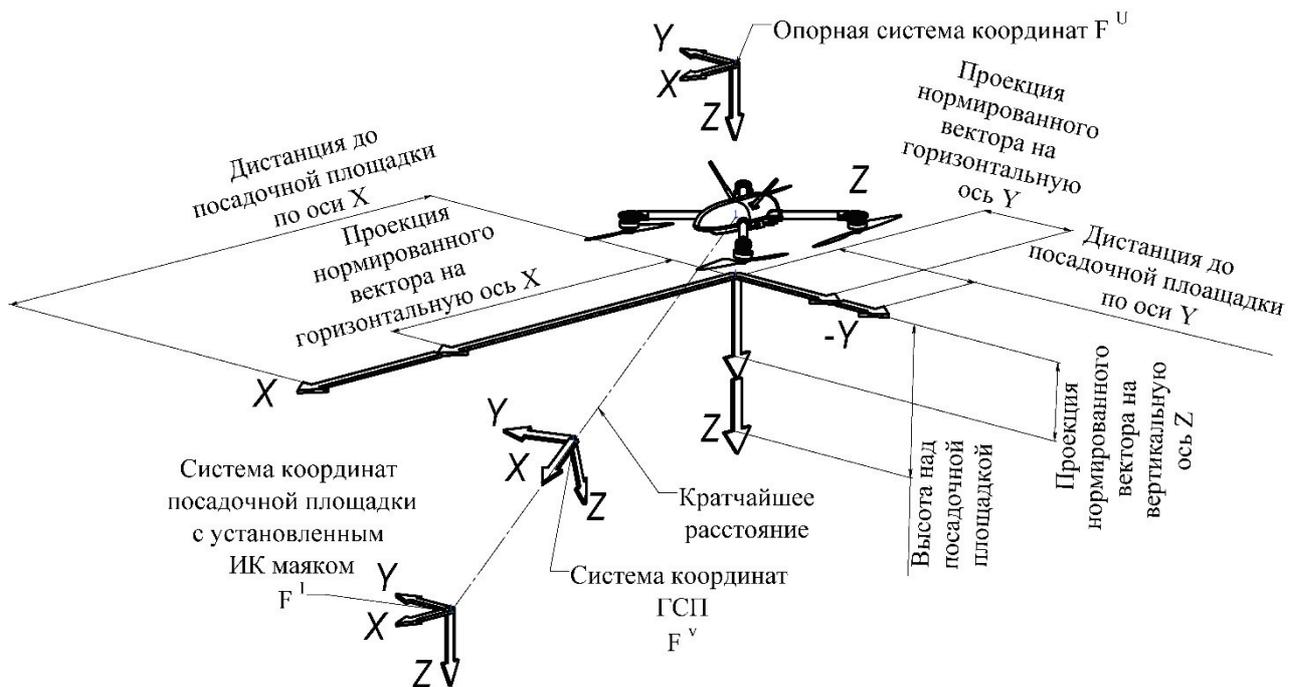


Рис. 1. Определение координат БЛА относительно посадочной площадки

Кратчайшее расстояние в проекции на оси F^v выражается вектором:

$$\vec{R}^v = (l, 0, 0), \tag{6}$$

где: l – расстояние от центра БЛА до центра посадочной площадки.

Определим проекцию линии визирования на оси подвижной Земной СК:

$$\vec{R}^U = \tilde{M} \circ \vec{R}^v \circ M, \tag{7}$$

где: \vec{R}^U – искомые координаты БЛА относительно посадочной площадки; \circ – символ, обозначающий операцию умножения кватернионов [28, 29];

Однако, в условиях реальной эксплуатации БЛА параметр l неизвестен.

Поэтому необходимо по косвенным измерениям оценить вектор \vec{R}^U . Для этого выполним проекцию единичного вектора на оси подвижной Земной СК:

$$\vec{r}^u = \tilde{M} \circ \vec{r}^v \circ M, \tag{8}$$

где $\vec{r}^v = (1, 0, 0)$.

Осуществим переход от проекции единичного вектора \vec{r}^u на оси F^U к искомым координатам относительно посадочной площадки \vec{R}^U :

$$\vec{R}^U = \vec{r}^u \cdot b, \tag{9}$$

где: b – масштабный коэффициент.

Зная значение любой из компонент вектора \vec{R}^U можно вычислить коэффициент b . Вертикальную компоненту вектора \vec{R}_z^U определим с помощью высотомера (барометрического, лазерного, ультразвукового). Тогда:

$$b = R_z^U / r_z^U, \quad (10)$$

где: r_z^U – высота БЛА над посадочной площадкой.

Таким образом, уравнение (8) используется для проекции единичного вектора на оси подвижной Земной СК, уравнение (10) – для нахождения масштабного коэффициента b , уравнение (9) – для вычисления координат БЛА относительно центра посадочной площадки.

Для реализации предложенного метода на практике, предлагается использовать:

- ИК маяк, размещённый в центре посадочной площадки;
- размещённый на БЛА гиросtabilизированный подвес (ГСП), имеющий 3 вращательные степени свободы;
- квадрантный датчик.

Квадрантный датчик состоит из 4-х фоточувствительных элементов с взаимно перекрывающимися диаграммами направленности (рис. 2), что позволяет выполнить его наведение на источник инфракрасного излучения по сигналам фоточувствительных элементов.

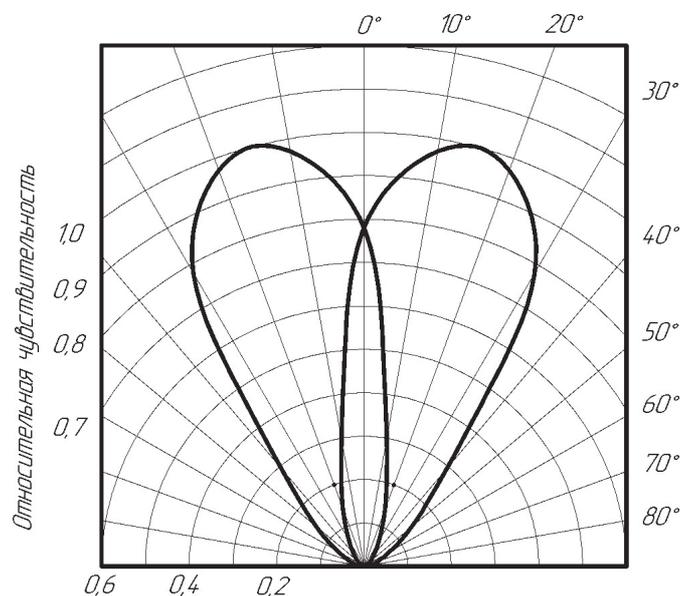


Рис. 2. Диаграмма направленности квадратного датчика в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Гиросtabilизированный подвес является электромеханическим устройством, выполняющим удержание заданного углового положения независимо от перемещений БЛА. С целью определения ориентации линии визирования на ИК маяк в режиме реального времени, установим квадрантный датчик на ГСП.

При выходе БЛА в зону посадки на заданной высоте необходимо выполнить поиск ИК маяка и его сопровождение для обеспечения вычисления место-

положения относительно центра посадочной площадки без использования сигналов СРНС.

Задача поиска посадочной площадки гиростабилизированным подвесом сводится к формированию его движения способом, обеспечивающим сканирование области предполагаемого нахождения ИК маяка.

Чтобы обеспечить полное перекрытие зоны предполагаемого нахождения ИК маяка, необходимо изменять заданные углы тангажа ϑ и азимута ψ гиростабилизированного подвеса. Значения углов $\vartheta_{\min}, \vartheta_{\max}$ и ψ_{\min}, ψ_{\max} , а также скорости их изменения ω_{ϑ} и ω_{ψ} зависят от диаграммы направленности квадрантного датчика, высоты БЛА над сканируемой поверхностью и диаграммы направленности ИК маяка (рис. 2).

Углы ϑ и ψ задаются в земной подвижной системе координат БЛА F^U следующим образом:

$$\begin{cases} \vartheta_n = \vartheta_{n-1} + \omega_{\vartheta}^U \cdot \Delta t_s; \\ \varphi_n = \varphi_{n-1} + \omega_{\varphi}^U \cdot \Delta t_s; \\ \psi_n = \psi_{n-1} + \omega_{\psi}^U \cdot \Delta t_s, \end{cases} \quad (11)$$

где: ϑ_n, φ_n и ψ_n – заданные углы тангажа, крена и азимута соответственно; $\omega_{\vartheta}^U, \omega_{\varphi}^U$ и ω_{ψ}^U – заданные угловые скорости по тангажу, крену и азимуту соответственно; Δt_s – период вычисления заданных углов тангажа и азимута.

В режиме поиска угол крена φ_n и угловая скорость ω_{φ}^U равны 0.

В системе стабилизации полезной нагрузки используется управление по компонентам кватерниона рассогласования, вычисленного в Земной подвижной системе координат F^U [32,33]:

$$M_{err} = M \circ \tilde{M}_d, \quad (12)$$

где: M – кватернион текущей пространственной ориентации полезной нагрузки; \tilde{M}_d – сопряжённый кватернион заданной пространственной ориентации;

Тогда, для формирования заданного кватерниона пространственной ориентации используем [33]:

$$\begin{cases} M_d = R \circ P \circ Y; \\ R = (1, 0, 0, 0); \\ P = \left(\cos \frac{\vartheta_n}{2}, 0, \sin \frac{\vartheta_n}{2}, 0 \right); \\ Y = \left(\cos \frac{\psi_n}{2}, 0, 0, \frac{\psi_n}{2} \right), \end{cases} \quad (13)$$

где: R, P и Y – кватернионы, описывающие поворот на угол крена, тангажа и азимута соответственно, ϑ_n и ψ_n – заданные углы тангажа и азимута.

Критерием завершения сканирования и перехода в режим сопровождения является идентификация ИК маяка, осуществляемая по сигналам 4-х фотоприёмников квадрантного датчика.

Режим сопровождения обеспечивает совмещение оптической оси квадрантного датчика с прямой, проходящей через начало связанной с ГСП системой координат F^v и началом системы координат F^l , связанной с посадочной площадкой (рис. 1).

Заданная ориентация ГСП формируется таким образом, чтобы уровни сигналов λ_i фоточувствительных элементов квадрантного датчика $i \in [1;4]$ оказались равны. Определим сигналы рассогласования в связанной с ГСП системе координат F^v :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } (\lambda_1 + \lambda_2) > (\lambda_3 + \lambda_4), \text{ то } \gamma_y = \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{\lambda_1 + \lambda_2}; \\ \text{если } (\lambda_1 + \lambda_2) < (\lambda_3 + \lambda_4), \text{ то } \gamma_y = -\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_3 + \lambda_4}; \\ \text{если } (\lambda_2 + \lambda_3) > (\lambda_1 + \lambda_4), \text{ то } \gamma_z = \frac{\lambda_1 + \lambda_4}{\lambda_2 + \lambda_3}; \\ \text{если } (\lambda_2 + \lambda_3) < (\lambda_1 + \lambda_4), \text{ то } \gamma_z = -\frac{\lambda_1 + \lambda_4}{\lambda_2 + \lambda_3}, \end{array} \right. \quad (14)$$

где: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – амплитуды сигналов 4-х фоточувствительных датчиков; γ_y – сигнал рассогласования по тангажу; γ_z – сигнал рассогласования по азимуту.

Для формирования угловой скорости в режиме сопровождения ИК маяка воспользуемся функцией наведения [34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_\varphi^g = 0; \\ \omega_\theta^g = f \cdot \text{sgn}(\gamma_y) (1 - |\gamma_y|)^k; \\ \omega_\psi^g = f \cdot \text{sgn}(\gamma_z) (1 - |\gamma_z|)^k, \end{array} \right. \quad (15)$$

где: ω_θ^g и ω_ψ^g – заданная с помощью функции наведения угловая скорость по тангажу и азимуту соответственно в связанной с ГСП СК F^v ; k – показатель степени в диапазоне $0,5 < k < 1$; f – положительный коэффициент; $\text{sgn}(\cdot)$ – кусочно-постоянная функция, возвращающая -1 при отрицательном значении аргумента, 0 при нулевом значении аргумента, $+1$ при положительном значении аргумента.

Для применения полученных значений угловой скорости в (11) необходимо выполнить проекцию вектора $\vec{\omega}^g = (\omega_\varphi^g, \omega_\theta^g, \omega_\psi^g)$ из F^v в Земную подвижную систему координат F^U :

$$\vec{\omega}^U = \mathbf{M} \circ \vec{\omega}^g \circ \tilde{\mathbf{M}}. \quad (16)$$

Уравнения (11-13) используются для управления гиросtabilизированным подвесом. В режиме сопровождения ИК маяка угловые скорости движения гиросtabilизированного подвеса вычисляются с использованием уравнений (14-16).

В режиме сопровождения кватернион, описывающий ориентацию ГСП, соответствует кватерниону M , который используется в уравнении (7). Таким образом, зная высоту БЛА над посадочной площадкой, возможно вычислить местоположение БЛА относительно ИК маяка с использованием уравнений (8-10).

Данные, полученные от предложенной системы позиционирования, используются в фильтре Калмана в уравнении (2) для выполнения коррекции инерциального метода счисления пути. С целью повышения точности оценки местоположения БЛА, необходимо в фильтре Калмана использовать измеренную скорость, для получения которой применяется численное дифференцирование местоположения \vec{R}^U .

Пример

Для апробации разработанного метода проведено полунатурное моделирование с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы БЛА мультироторного типа «Альбатрос СКФУ».

На первом этапе коррекция инерциального метода счисления пути выполнялась по сигналам бортового приёмника СРНС в условиях отсутствия препятствий на пути распространения сигналов навигационных спутников. Максимальная погрешность оценки местоположения БЛА составила 1,93 м рис. 3.

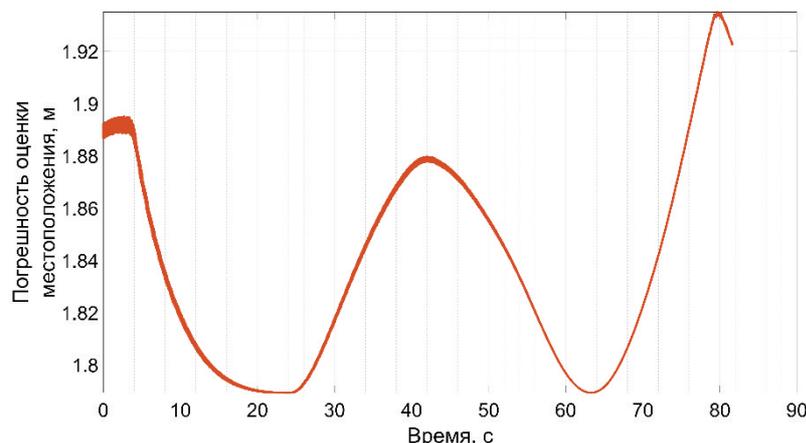


Рис. 3. Погрешность оценки местоположения бортовой навигационной системой БЛА в условиях достоверных сигналов СРНС

На втором этапе, бортовой модуль навигационной системы с приёмником СРНС размещался между промышленными зданиями с металлическими скатными крышами, что явилось причиной появления эффекта многолучевого распространения сигналов навигационных спутников. Максимальная погрешность оценки местоположения составила 13,85 м рис. 4.

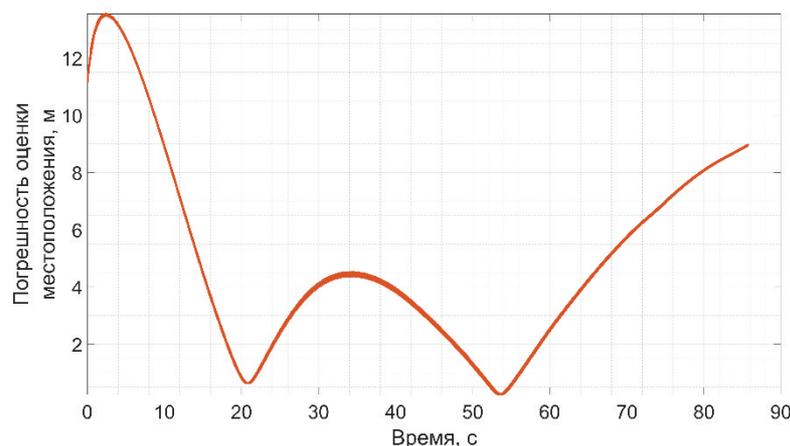


Рис. 4. Погрешность оценки местоположения бортовой навигационной системой БЛА в условиях искажения сигналов СРНС

На третьем этапе полунатурного моделирования в качестве корректирующего источника информации использовались данные системы локального позиционирования с установленным на ГСП квадрантным датчиком. Максимальная погрешность оценки местоположения БЛА составила не более 0,19 м (рис. 5).

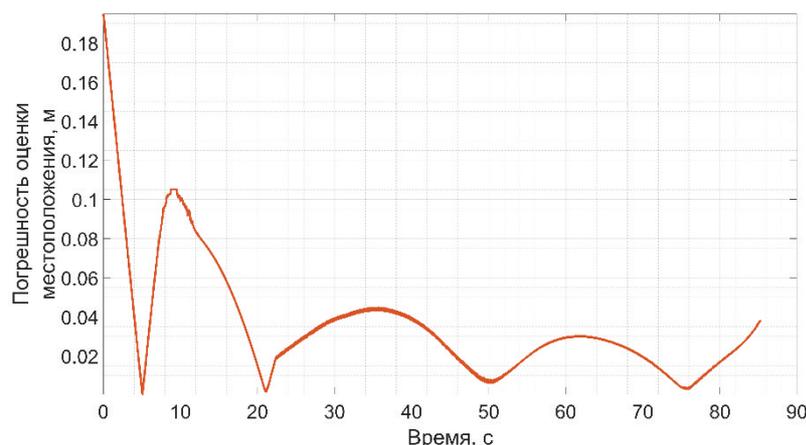


Рис. 5. Погрешность оценки местоположения бортовой навигационной системой БЛА при использовании предложенного метода без использования сигналов СРНС

Анализ полученных данных показал, что предложенная система обеспечивает точность позиционирования на этапе посадки без использования сигналов СРНС не хуже 0,19 м, что для практики эксплуатации БЛА является приемлемым решением.

Таким образом, повышение точности позиционирования БЛА мультироторного типа с использованием предложенного метода составило 1,74 м относительно случая коррекции по сигналам СРНС без препятствий на пути распространения сигналов навигационных спутников и 13,66 м относительно случая коррекции по сигналам СРНС в условиях многолучевого распространения. Сравнительная оценка погрешностей определения местоположения БЛА для

различных условий функционирования навигационной системы представлена на рис. 6.

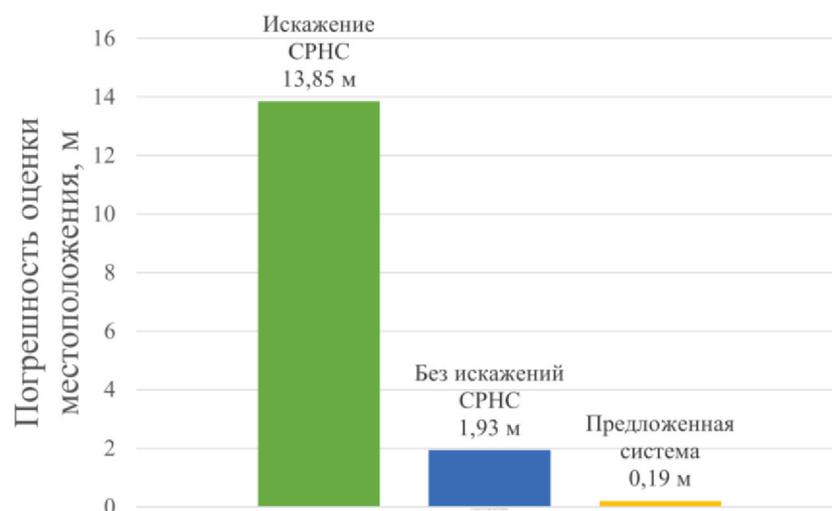


Рис. 6. Сравнительная оценка погрешностей определения местоположения БЛА

Выводы

Предложен метод, позволяющий обеспечить посадку мультироторного БЛА в контейнер автономного базирования в условиях отсутствия сигналов СРНС.

Впервые для определения местоположения БЛА мультироторного типа относительно посадочной площадки использован квадрантный датчик, размещённый на гиросtabilизированном подвесе. Введена дополнительная система координат F^v (рис. 1) и разработан способ формирования заданной пространственной ориентации гиросtabilизированного подвеса для сканирования области предполагаемого нахождения ИК маяка на посадочной площадке, а также его сопровождения по сигналам квадрантного датчика в режиме реального времени. В отличие от известных методов вычисления локальных координат [5-11, 21-25], применена алгебра кватернионов для определения местоположения БЛА относительно ИК маяка, расположенного на посадочной площадке. Особенностью предложенного метода является обеспечение 3-х режимов работы бортовой навигационной системы с бесшовным переключением между ними: без коррекции по сигналам СРНС; с использованием коррекции по сигналам СРНС; с использованием коррекции данных на этапе посадки БЛА от локальной системы позиционирования. Бесшовное переключение позволяет в рамках одного полетного задания выполнять навигацию как при наличии полного приборного обеспечения, так и в условиях отсутствия достоверных сигналов навигационных спутников. При этом, в отличие от методов [21-25], не накладываются ограничения на последовательность переключения режимов что позволяет:

а) избежать ввода дополнительных состояний в системе управления БЛА и, тем самым, повысить надежность эксплуатируемого комплекса;

б) уменьшить сложность интеграции предложенного метода в существующие навигационные системы.

Для апробации метода использована навигационная система БЛА «Альбатрос СКФУ». Анализ полученных результатов показал, что данные локальной системы позиционирования на этапе посадки для коррекции инерциального метода счисления пути позволяют обеспечить точность оценки местоположения БЛА не хуже 0,19 м. Полученный результат удовлетворяет практическим требованиям эксплуатации БЛА мультиторного типа, предназначенных для размещения в контейнерах автономного базирования.

Применение предложенного метода возможно в навигационных системах малых БЛА мультиторного типа с установленным 3-х осевым гиросtabilизированным подвесом. Зная географические координаты ИК маяка на посадочной площадке, возможно выполнить проекцию данных локальной системы позиционирования из плоских координат в географические, что позволяет интегрировать данное решение в различные навигационные системы аналогичных БЛА.

В дальнейшем, целесообразно разработать метод, обеспечивающий полет БЛА внутри охраняемого периметра без использования сигналов СРНС на всех этапах полётного задания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90010.

Литература

1. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26–29.
2. Анализ компании рынка Аэронет – производителей и эксплуатантов беспилотных авиационных систем // Официальный сайт рабочей группы Аэронет [Электронный ресурс]. 20.02.2022. – URL: <http://nti-aeronet.ru/wp-content/uploads/2020/03/Analiz-kompanij-rynka-Ajeronet-proizvoditelej-i-jekspluatantov-bespilotnyh-aviacionnyh-sistem.pdf> (дата обращения: 20.02.2022).
3. Жаринов Д. А. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для охраны военных аэродромов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 5. С. 54–59.
4. Стоянов Ю. П., Евдокимов А. Н. Применение БЛА для охраны объектов // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: Сборник докладов и статей по материалам II научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами». – Коломна: 924 ГЦ БпА МО РФ, 2017. – С. 311–315.
5. Nightingale // Nightingale security [Электронный ресурс]. 20.03.2022 – URL: <https://www.nightingalesecurity.com/defense> (дата обращения: 20.03.2022).
6. Dronehub is the autonomous game-changer for inspection and monitoring [Электронный ресурс]. 20 03 2022. – URL: <https://dronehub.ai> (дата обращения: 20 03 2022).

7. SENSYN Drone Hub // SENSYN ROBOTICS [Электронный ресурс]. 22.03.2022. – URL: <https://www.sensyn-robotics.com/en/product/drone-hub> (дата обращения: 22.03.2022).

8. Квадрокоптер COEX Пеликан // Коптер Экспресс [Электронный ресурс]. 22.03.2022. – URL: <https://ru.coex.tech/pelican> (дата обращения: 22.03.2022).

9. Smart Aerial Monitoring Systems SAMS // Easy Aerial [Электронный ресурс]. 22.03.2022. – URL: <https://www.easyaerial.com> (дата обращения: 22.03.2022).

10. Percepto Air Mobile // Percepto [Электронный ресурс]. 22.03.2022. – URL: <https://percepto.co/air-mobile/> (дата обращения 22.03.2022).

11. All-in-One Automation Software for Drone Docking Stations // Flytnow [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://flytnow.com/auto> (дата обращения: 23.03.2022).

12. Skuport DP5 drone box hangar Autonomous charging for unattended drone deployments // Skycharge [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://www.skycharge.de/drone-box-hangar> (дата обращения: 23.03.2022).

13. Полностью автоматизированные дронапорты для регулярного мониторинга // Компания HIVE [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://hive.aero> (дата обращения: 23.03.2022).

14. FOXIT RESPONSE Autonomous Drone Base Station // Foxit [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://foxit.co.za/foxit-mini> (дата обращения: 23.03.2022).

15. HEISHA DNEST2 // Heisha Technology [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://www.heishatech.com/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution> (дата обращения: 23.03.2022).

16. Hextronics Global Advanced: The Drone Station for All // Hextronics [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://www.hextronics.tech> (дата обращения: 23.03.2022).

17. Комплекс контроля прилегающей территории на основе беспилотного летательного аппарата «Скайрон П2» // Компания Стилсофт [Электронный ресурс]. 23.03.2022. – URL: <https://stilsoft.ru/products/skyron-p2> (дата обращения: 23.03.2022).

18. Селиванова Л. М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы. Часть 1. Одноканальные инерциальные навигационные системы: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 46 с.

19. ZED-F9P module u-blox F9 high precision GNSS module // u-blox [Электронный ресурс]. 26.03.2022. – URL: <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module> (Дата обращения 26.03.2022).

20. The Here3 GPS is a high precision GNSS system // CubePilot [Электронный ресурс]. 26.03.2022. – URL: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/here-3/here-3-manual> (дата обращения: 26.03.2022).

21. IR-LOCK Precision Landing Tutorial // IR-LOCK [Электронный ресурс]. 20.03.2022. – URL: <https://irlock.readme.io/v2.0/docs> (дата обращения: 20.03.2022).

22. Introducing Pixy2 // Pixy [Электронный ресурс]. 26.03.2022. – URL: <https://pixycam.com/> (дата обращения: 26.03.2022).

23. GPS-denied Position-hold 3DR Solo // You Tube [Электронный ресурс]. 26.03.2022. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=R1WV7Gu-DW0> (дата обращения: 26.03.2022).

24. Закиев А. А., Шабалина К. С., Цой Т. Г., Магид Е. А. Пилотные виртуальные эксперименты по сравнению систем координатных меток Aruco и AprilTag на устойчивость к вращению // Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019): Труды семинара (Санкт-Петербург, 22–24 мая 2019 г.). – Переславль-Залесский: Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация искусственного интеллекта», 2019. – С. 210-220.

25. Kolosov K., Miller A., Miller B. Robust Data Fusion of UAV Navigation Measurements with Application to the Landing System // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 23. doi: 10.3390/rs12233849.

26. Стоянов Ю. П., Исаев А. М., Фоминов Е. И., Сазанов А. А. Способ точной посадки беспилотного летательного аппарата на посадочную платформу // Патент на изобретение RU 272252 C1, опубл. 01.06.2020, бюл. № 16. – URL: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=8176&DocNumber=02722521&TypeFile=html (дата обращения 26.03.2022).

27. Wu Y., Niu X., Du J., Chang L., Tang H., Zhang H. Artificial Marker and MEMS IMU-Based Pose Estimation Method to Meet Multirotor UAV Landing Requirements // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 24. doi: 10.3390/s19245428.

28. Shin E. H., EL-Sheimy N. An Unscented Kalman Filter for In-motion Alignment of Low-cost IMUs // Records – IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium. 2004. P. 273-279. doi: 10.1109/PLANS.2004.1309005.

29. Исаев М. А., Исаев А. М., Кудинов Н. В., Мироненко Р. С. Алгоритм начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации в параметрах Родрига-Гамильтона // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. № 18 (2). С. 238-245. doi: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245.

30. Raitoharju M., Nurminen H., Piché R. Kalman filter with a linear state model for PDR+WLAN positioning and its application to assisting a particle filter // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2015. doi: 10.1186/s13634-015-0216-z.

31. Isaev M. A., Linets G.I., Nikulin V. I., Melnikov S. V., Isaev A. M. Increasing fast estimation of assessment of navigation parameters for the UAV based on a linear Kalman filter // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. P. 1-8. doi: 10.1063/5.0035917.

32. Isaev A. M., Isaev M. A., Adamchuk A. S., Amirokov S. R., Grazhdankin M. A. Mathematical modelling of the stabilization system for a mobile base video camera using quaternions // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2254. P. 51-62.

33. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 319 с.

34. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. Монография / под общ. ред. В. А. Бесекерского. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

References

1. Fedoseeva N. A., Zagvozdkin M. V. Perspektivnye oblasti primeneniia bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Promising areas of application for unmanned aerial vehicles]. *Nauchnyi zhurnal*, 2017, vol. 9, no. 22, pp. 26–29 (in Russian).

2. Analysis of Aeronet market companies, manufacturers and operators of unmanned aerial systems. *Official website of the working group Aeronet*, 20 march 2022. Available at: <http://nti-aeronet.ru/wp-content/uploads/2020/03/Analiz-kompanij-rynka-Ajeronet-proizvoditelej-i-jekspluatantov-bespilotnyh-aviacionnyh-sistem.pdf> (accessed 20 march 2022) (in Russian).

3. Zharinov D. A. O vozmozhnosti primeneniia bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlia okhrany voennykh aerodromov [On the possibility of using unmanned aerial vehicles to protect military airfields]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriia i praktika*, 2018, vol. 5, pp. 54–59 (in Russian).

4. Stoianov Iu. P., Evdokimov A. N. Primenenie BLA dlia okhrany ob"ektov [The use of UAVs for the protection of objects] *Perspektivy razvitiia i primeneniia kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami: Sbornik dokladov i statei po materialam II nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Collection of reports and articles based on the materials of the II scientific and practical conference "Prospects for the development and application of complexes with unmanned aerial vehicles"]. Kolomna, State Center of Unmanned Aviation of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2017, pp. 311-315 (in Russian).

5. Nightingale. *Nightingale security*, 20 march 2022. Available at: <https://www.nightingalesecurity.com/defense/> (accessed 20 march 2022).

6. Dronehub is the autonomous game-changer for inspection and monitoring, 20 march 2022. Available at: <https://dronehub.ai/> (accessed 20 march 2022).

7. SENSYN Drone Hub. *SENSYN ROBOTICS*, 22 march 2022. Available at: <https://www.sensyn-robotics.com/en/product/drone-hub> (accessed 22 march 2022).

8. Quadcopter COEX Pelican. *Copter Express official website*, 22 march 2022. Available at: <https://ru.coex.tech/pelican> (accessed 22 march 2022) (in Russian).

9. Smart Aerial Monitoring Systems SAMS, *Easy Aerial*, 22 march 2022. Available at: <https://www.easyaerial.com> (accessed 22 march 2022).

10. Percepto Air Mobile, *Percepto*, 22 march 2022. Available at: <https://percepto.co/air-mobile/> (accessed 22 march 2022).

11. All-in-One Automation Software for Drone Docking Stations. *Flytnow*, 23 march 2022. Available at: <https://flytnow.com/auto/> (accessed 23 march 2022).

12. Skyport DP5 drone box hangar Autonomous charging for unattended drone deployments. *Skycharge*, 23 march 2022. Available at: <https://www.skycharge.de/drone-box-hangar> (accessed 23 march 2022).

13. Fully automated drone ports for regular monitoring. *Official website of the company HIVE*, 23 march 2022. Available at: <https://hive.aero> (accessed 23 march 2022) (in Russian).

14. FOXIT RESPONSE Autonomous Drone Base Station, *Foxit*, 23 march 2022. Available at: <https://foxit.co.za/foxit-mini> (accessed 23 march 2022).

15. HEISHA DNEST2. *Heisha Technology*, 23 march 2022. Available at: <https://www.heishatech.com/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (accessed 23 march 2022).

16. Hextronics Global Advanced: The Drone Station for All. *Hextronics*, 23 march 2022. Available at: <https://www.hextronics.tech> (accessed 23 march 2022).

17. Complex for monitoring the adjacent territory based on the Skyron P2 unmanned aerial vehicle. *Official website of Stilsoft company*, 23 march 2022. Available at: <https://stilsoft.ru/products/skyron-p2> (accessed 23 march 2022) (in Russian).

18. Selivanova L. M., Shevcova E. V. Odnokanal'nye inercial'nye navigacionnye sistemy [Single channel inertial navigation systems]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2012. 46 p. (in Russian).

19. ZED-F9P module u-blox F9 high precision GNSS module. *U-blox*, 26 march 2022. Available at: URL: <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module> (accessed 26 march 2022).

20. The Here3 GPS is a high precision GNSS system. *CubePilot*, 26 march 2022. Available at: URL: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/here-3/here-3-manual> (accessed 26 march 2022).

21. IR-LOCK Precision Landing Tutorial. *IR-LOCK*, 26 march 2022. Available at: <https://irlock.readme.io/v2.0/docs> (accessed 26 march 2022).

22. Introducing Pixy2. *Pixy*, 26 march 2022. Available at: <https://pixycam.com> (accessed 26 march 2022).

23. GPS-denied Position-hold 3DR Solo. *You Tube*, 26 march 2022. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=R1WV7Gu-DW0> (accessed 26 march 2022).

24. Zakiev A. A., Shabalina K. S., Tsoi T. G., Magid E. A. Pilotnye virtual'nye eksperimenty po sravneniiu sistem koordinatnykh metok Aruco i AprilTag na ustoichivost' k vrashcheniiu [Pilot virtual experiments comparing Aruco and AprilTag fiducial systems for rotation stability]. *Piatyi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta" ("BTS-II-2019"): Trudy seminara*. [Fifth All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence" ("UV-AI-2019")]. Pereslavl-Zalessky, Russian Association for Artificial Intelligence, 2019, pp. 210-220 (in Russian).

25. Kolosov K., Miller A., Miller B. Robust Data Fusion of UAV Navigation Measurement with Application to the Landing System. *Remote Sensing*, 2020. doi: 10.3390/rs12233849.

26. Stoianov Ju. P., Isaev A. M., Fominov E. I., Sazanov A. A. *Sposob tochnoi posadki bespilotnogo letatel'nogo apparata na posadochnuiu platformu* [Method for precise landing of an unmanned aerial vehicle on a landing platform]. Patent Russia, no. RU 2722521 C1. Publish. 01.06.2020, bul. no. 16. Available at: URL:

https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=8176&DocNumber=02722521&TypeFile=html (accessed 26 march 2022) (In Russian).

27. Wu Y., Niu X., Du J., Chang L., Tang H., Zhang H. Artificial Marker and MEMS IMU-Based Pose Estimation Method to Meet Multirotor UAV Landing Requirements. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 24. doi: 10.3390/s19245428.

28. Shin E. H., El-Sheimy N. An Unscented Kalman Filter for In-motion Alignment of Low-cost IMUs. *Record – IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*, 2004, pp. 273-279. doi: 10.1109/PLANS.2004.1309005.

29. Isaev M. A., Isaev A. M., Kudinov N. V., Mironenko R. S. Algoritm nachal'noi initsializatsii kvaterniona prostranstvennoi orientatsii v parametrakh Rodriga-Gamil'tona [Algorithm for initialization of spatial orientation quaternion in Rodrigues-Hamilton parameters] *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 238-245. doi: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245 (in Russian).

30. Raitoharju M., Nurminen H., Piché R. Kalman filter with a linear state model for PDR+WLAN positioning and its application to assisting a particle filter. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2015. doi: 10.1186/s13634-015-0216-z.

31. Isaev M. A., Linets G. I., Nikulin V. I., Melnikov S. V., Isaev A. M. Increasing fast estimation of assessment of navigation parameters for the UAV based on a linear Kalman filter. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, pp. 1-8. doi: 10.1063/5.0035917.

32. Isaev A. M., Isaev M. A., Adamchuk A. S., Amirokov S. R., Grazhdankin M. A. Mathematical modelling of the stabilization system for a mobile base video camera using quaternions. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2254, pp. 51-62.

33. Branets V. N., Shmyglevsky I. P. *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela*. [Application of quaternions in solid orientation problems]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 320 p. (in Russian).

34. Besekerskii V. A., Popov E. P. *Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia* [Theory of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 768 p. (in Russian).

Статья поступила: 24.06.2022 г.

Информация об авторах

Исаев Михаил Александрович – аспирант кафедры инфокоммуникаций. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: системы навигации малых беспилотных летательных аппаратов, системы управления малых беспилотных летательных аппаратов, имитационное моделирование. E-mail: mrraptor26@gmail.com

Исаев Александр Михайлович – кандидат технических наук. Руководитель опытно-конструкторского бюро БЛА. ООО «Стилсофт». Область научных интересов: автономные системы навигации малых беспилотных летательных ап-

паратов, имитационное моделирование, системы управления следящими устройствами. E-mail: quaternion77@gmail.com

Линец Геннадий Иванович – доктор технических наук, доцент. Заведующий кафедрой инфокоммуникаций. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: синтез мультисервисных сетей; исследование влияния свойств самоподобного трафика на количественные и качественные показатели современных сетей; повышение эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа. E-mail: kbytw@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Method for calculating the parameters of linear motion of an unmanned aerial vehicle in the absence of signals from satellite radio navigation systems at the landing stage

M. A. Isaev, A. M. Isaev, G. I. Linets

Relevance: *unmanned aerial vehicles (UAVs) of a multi-rotor type are used as an element of a complex for the protection and monitoring of remote stationary objects. The key feature of these systems is their high autonomy, which is achieved by automating all stages of the flight task, such as takeoff, en route flight and landing. The most difficult and critical stage is landing in an autonomous container, which requires high accuracy in estimating the UAV linear motion parameters. However, the security and monitoring systems in operation do not provide the required accuracy in estimating the location of the UAV at the landing stage in the absence of reliable signals from global navigation satellites system (GNSS), which does not allow placing autonomous UAV containers near industrial or natural objects that obscure or distort the signals of navigation satellites. The aim of the work is improving the positioning accuracy of a multi-rotor UAV at the stage of landing in an autonomous-based container in the absence of reliable signals from navigation satellites by using the proposed local positioning system to replace the data of the onboard GNSS receiver in the UAV linear motion parameters correction loop. Methods:* A Kalman filter is used to multiplex inertial meter data and data from an onboard GNSS or local positioning system receiver. The calculation of the UAV coordinates relative to the landing site in the absence of reliable GNSS signals is performed using the quaternion algebra. **Novelty:** *for the first time, a quadrant sensor mounted on a 3-axis gyro-stabilized suspension was used to determine the coordinates of a multi-rotor UAV relative to the landing site. A method is proposed for scanning the area of the supposed location of the IR beacon, as well as its tracking in real time according to the signals of 4 photosensitive elements of the quadrant sensor. In contrast to the known methods for estimating the location of a multi-rotor UAV relative to the landing site, quaternion algebra is applied and a method for correcting the UAV navigation system with seamless switching between different sources of corrective information is proposed. Result:* the use of the proposed method makes it possible to provide an error in estimating the location of a multi-rotor UAV at the landing stage no worse than 0.19 m in the absence of reliable GNSS signals. **Practical significance:** *solving the problem of landing a multi-rotor UAV on a limited area in the absence of reliable signals from navigation satellites makes it possible to satisfy the practical requirements for the placement of UAV autonomous-based containers and increase the speed of the complex's response to an alarm signal.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, inertial navigation system, UAV local positioning system, satellite navigation systems.*

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number № 20-37-90010.

Information about Authors

Mikhail Alexandrovich Isaev – Doctoral Student. The postgraduate student of the North Caucasus Federal University of Infocommunications Department. Field of research: UAV navigation system, UAV control system, hardware in the loop modeling. E-mail: mrraptor26@gmail.com

Alexander Mikhailovich Isaev – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of experimental design bureau of UAV. Limited Liability Company «Stilsoft». Field of research: autonomous navigation systems for small unmanned aerial vehicles, hardware in the loop modeling, control systems for tracking devices. E-mail: quaternion77@gmail.com

Gennadiy Ivanovich Linets – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor. Head of Infocommunications Department. Field of research: synthesis of multiservice networks; study of the influence of the properties of self-similar traffic on the quantitative and qualitative indicators of modern networks; improving the efficiency of multi-rotor unmanned aerial vehicles. E-mail: kbytw@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkin Street, 1.