

Труды МАИ. 2023. № 128
Trudy MAI, 2023, no. 128

Научная статья
УДК 623.74
DOI: [10.34759/trd-2023-128-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-14)

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Алексей Вячеславович Коровин¹, Денис Игоревич Савин²✉

¹АО «Концерн «Созвездие»,

Воронеж, Россия

²ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

¹htotam2005@yandex.ru

²denissawi@yandex.ru✉

Аннотация. В работе предлагается способ определения координат наземных объектов с беспилотного летательного аппарата, который позволяет повысить точность определения местоположения наземных объектов. Предполагается полет воздушного судна по кругу с наблюдением за наземным объектом до достижения значения пространственного геометрического фактора менее 3. Повышение точности происходит за счет увеличения времени наблюдения за разведываемым наземным объектом и накопления измеренных до него дальностей при помощи лазерного дальномера. Собственные абсолютные координаты беспилотного летательного аппарата считаются известными в каждый момент времени

определения дальностей. Оценки абсолютных координат носителя получены с использованием навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Такой подход позволит определять координаты в труднодоступной и непроходимой местности с высокой точностью при решении различных задач.

Беспилотный летательный аппарат оснащается навигационной аппаратурой потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, которая является источником навигационной информации. Носитель также оборудуется лазерным дальномером на гиросtabilизированной платформе, который служит для определения дальностей до интересующего наземного объекта. Координаты наземного объекта определяются путем совместного использования угломерно-дальномерного и интегрального дальномерного методов определения координат. На начальных этапах координаты наземного объекта оцениваются с применением угломерно-дальномерного метода с некоторой недостаточной точностью. В последующем проводятся накопления измерений и уточнение координат наземного объекта с использованием интегрального дальномерного метода.

В статье проведены исследования влияния высоты полета, скорости беспилотного летательного аппарата и точности навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем на достигаемую точность получаемых оценок координат наземного разведываемого объекта. По результатам исследований даются практические рекомендации по пилотированию беспилотного летательного аппарата для достижения наибольшей точности оценок координат наземного разведываемого объекта. Также исследован вопрос необходимой

продолжительности наблюдений при различных высотах полета, радиусе облета для достижения наибольшей точности оценивания координат.

Ключевые слова: интегральный дальномерный метод, угломерно-дальномерный метод, беспилотный летательный аппарат, точность навигации, глобальная навигационная спутниковая система, лазерный дальномер.

Для цитирования: Коровин А.В., Савин Д.И. Способ определения координат наземных объектов беспилотным летательным аппаратом с использованием лазерного дальномера // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-14)

Original article

THE METHOD FOR DETERMINING THE COORDINATES OF GROUND OBJECTS BY AN UNMANNED AERIAL VEHICLE USING A LASER RANGEFINDER

Alexey V. Korovin¹, Denis I. Savin²✉

¹Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

²Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

¹htotam2005@yandex.ru

²denissawi@yandex.ru✉

Abstract. The article proposes a method for the ground objects coordinates determining from an unmanned aerial vehicle, which allows increasing the accuracy of of the ground objects location determining. The aircraft is supposed to fly in a circle with the ground

object observation until the achieved value of the spatial geometric factor is less than three. The accuracy increase occurs through the observation time increase for the object being explored, and accumulation of measured by the laser rangefinder ranges to it. The unmanned aerial vehicle absolute proper coordinates are assumed known in each moment of range measuring. Estimates of the carrier absolute coordinates were obtained with the navigation equipment of the global satellite navigation systems consumers. This approach will allow determining coordinates in hard-to-reach and impassable terrain with high accuracy when solving various tasks.

The unmanned aerial vehicle is being equipped with navigation equipment of global navigation satellite systems consumers being a source of navigation information. The carrier is also equipped with a laser rangefinder on a gyro-stabilized platform, which serves to determine distances to the ground-based object of interest. The coordinates of a ground-based object are being determined by the combined application of angle-rangefinder and integral rangefinder methods for coordinates determining. At the initial stages, the ground-based object coordinates are being estimated by the angle-rangefinder method with some insufficient accuracy. Further, accumulations of measurements and refinement of the coordinates of the ground-based object are performed by the integral rangefinder method.

The article presents the studies of the flight altitude, speed of an unmanned aerial vehicle and the accuracy of navigation equipment of consumers of global navigation satellite systems impact on the achieved accuracy of the obtained estimates of the coordinates of a ground-based reconnaissance object. Practical recommendations on the unmanned aerial vehicle piloting for achieving maximum accuracy of the coordinates of

the ground-based object being explored are given based on the results of the studies. The issue on the necessary monitoring duration at various flight altitudes and the fly-by radius to achieve the best accuracy of coordinates assessment was studied as well.

Keywords: integral rangefinder method, angle-rangefinder method, unmanned aerial vehicle, navigation accuracy, global navigation satellite system, laser rangefinder

For citation: Korovin A.V., Savin D.I. The method for determining the coordinates of ground objects by an unmanned aerial vehicle using a laser rangefinder. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-14)

Введение

В настоящее время карты местности составлены для любого региона страны и для любой местности. Но существуют задачи, когда стандартной точности определения координат того или иного объекта недостаточно [1-4].

Такая задача возникает при необходимости привязки конкретного объекта к карте местности, например, деревья, поляны в гуще леса или ориентиров по берегам реки для последующего наблюдения во время весеннего половодья. Решить ее можно путем использования специализированного оборудования геодезистов, но в условиях труднопроходимой местности или отдаленности необходимого объекта, куда проблематично попасть человеку вместе с оборудованием, возможно использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [5-12]. При определении координат объектов необходимо не только их наблюдать визуально, но измерить дальность до них с нескольких точек пролета [13,14]. Дальности возможно определить, используя лазерный дальномер.

Таким образом, для определения координат наземных объектов необходимо знать собственные абсолютные координаты БЛА, оцениваемые навигационной аппаратурой потребителей (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). На начальных этапах пролета наземного объекта координаты определяются угломерно-дальномерным методом, который не требует накоплений измерений, но обладает меньшей точностью по сравнению с дальномерным методом. В дальнейшем осуществляются накопления измеренных дальностей до объекта до достижения низкого значения пространственного геометрического фактора и высокоточное определение координат наземных объектов.

Совместное использование угломерно-дальномерного и интегрального дальномерного методов

Угломерно-дальномерный метод предназначен для оперативного определения координат наземных объектов, определяемых при помощи лазерного дальномера и аппаратуры потребителей ГНСС [14-16]. Он позволяет оценить координаты разведываемого или наблюдаемого объекта одновременно с начального момента времени. Далее применяется интегральный дальномерный метод, который производит накопление измеренных дальностей до объекта также с начального момента времени. Точность достигается высокая при достижении минимального значения пространственного геометрического фактора (примерно менее 3, как и для случая спутниковой навигации).

Для работы данных методов и исследования достигаемой точности необходимо задать: радиус облета, скорость облета, среднюю высоту полета БЛА,

изменение высоты полета БЛА, координаты объекта, а также величины ошибок НАП ГНСС, лазерного дальномера.

Учитывая случайный характер ошибок измерения дальностей до объекта, а вместе с ними и координат объекта, а также известность их статистических характеристик и закона распределения, следует для определения координат применять метод максимального правдоподобия [17]. Такой подход называют классическим.

$$\hat{x}^{MФП}(y) = \arg \max_x \ln f(y / x), \quad (1)$$

где $\hat{x}^{MФП}(y)$ – оценка неизвестного параметра по максимуму логарифма правдоподобия (в данном конкретном исследовании неизвестным параметром являются координаты разведываемого наземного объекта). Уравнение для вычисления геометрической дальности от объекта до БЛА представлено следующим выражением

$$D_{geom} = \sqrt{(x_{БЛА} - x_n)^2 + (y_{БЛА} - y_n)^2 + (z_{БЛА} - z_n)^2}, \quad (2)$$

где $x_{БЛА}, y_{БЛА}, z_{БЛА}$ – координаты БЛА, x_n, y_n, z_n – координаты наземного разведываемого объекта.

Логарифм функционала максимального правдоподобия имеет вид

$$\mathbf{L}(x_n, y_n, z_n, t) = (\mathcal{D}_{геом}(t) - \mathcal{D}_{изм}(t))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathcal{D}_{геом}(t) - \mathcal{D}_{изм}(t)), \quad (3)$$

где $\mathcal{D}_{изм}(t)$ – измеренная дальность от БЛА до наземного объекта с использованием лазерного дальномера; \mathbf{R}^{-1} – матрица ковариаций ошибок оценивания координат.

Метод максимума правдоподобия при допущении о нормальном законе распределения ошибок измерения дальностей от БЛА до наземного разведываемого объекта позволяет получить эффективную, состоятельную, оптимальную по критерию минимума квадратичной функции потерь оценку. Также при нормальном законе распределения метод максимального правдоподобия эквивалентен методу наименьших квадратов [2,17]. Для поиска оценок координат наземного объекта или для решения навигационной задачи необходимо составить матрицу частных производных или матрицу направляющих косинусов

$$\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} \frac{x_{iБЛА} - x_{ин}}{\mathcal{D}_{изм}} & \frac{y_{iБЛА} - y_{ин}}{\mathcal{D}_{изм}} & \frac{z_{iБЛА} - z_{ин}}{\mathcal{D}_{изм}} \\ & \dots & \\ \frac{x_{nБЛА} - x_{nn}}{\mathcal{D}_{низм}} & \frac{y_{nБЛА} - y_{nn}}{\mathcal{D}_{низм}} & \frac{z_{nБЛА} - z_{nn}}{\mathcal{D}_{низм}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где i, n – текущий и конечный моменты времени.

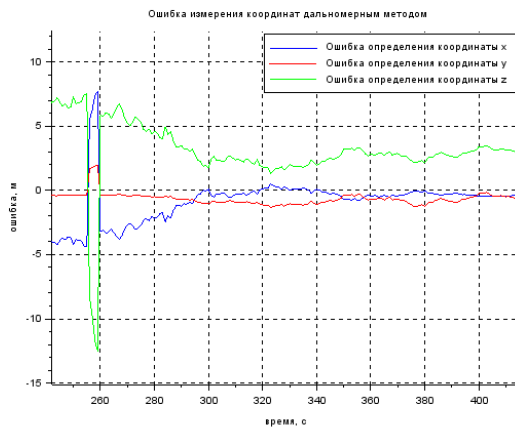
Конечное уравнение выглядит так

$$(x_n, y_n, z_n)_n = (x_n, y_n, z_n)_{n-1} + (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (D_{geom} - D_{изм}). \quad (5)$$

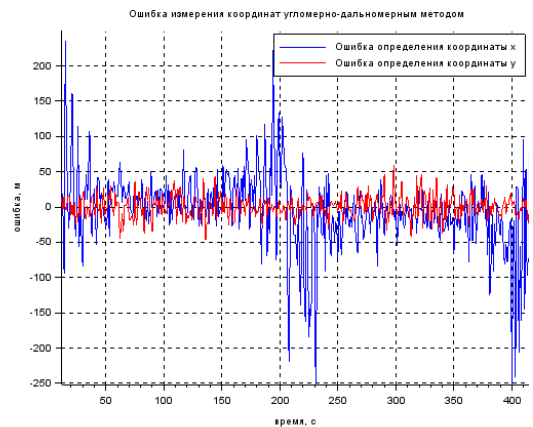
Исследования проводились на ПЭВМ с использованием пакета прикладных программ Scilab [17,18]. Движение БЛА, выполняющего определение координат наземного объекта, осуществлялось по окружности. Радиус окружности R изменялся с шагом 500 метров от 1000 до 5000 метров. Скорость БЛА V=15 м/с. Ошибка определения координат БЛА при помощи аппаратуры потребителей ГНСС задавалась величиной среднеквадратического отклонения (СКО) и равной 10 метрам для плановых координат и 30 метрам для координаты z. Ошибка измерения дальности при помощи лазерного дальномера составляла 5 метров. Изменение высоты полета БЛА было равным 20 метрам. Также были заданы значения СКО при определении углов (азимута и угла места) 1 градус [14,15,20].

Исследования проводились с целью определения точности оценивания координат наземного объекта с использованием угломерно-дальномерного и интегрального дальномерного методов, а также зависимости времени сходимости алгоритмов от высоты или радиуса облета.

На рисунке 1 представлены графики зависимостей ошибок определения координат наземного объекта от времени при высоте полета 500 метров и радиусе облета R=1000 метров



а)

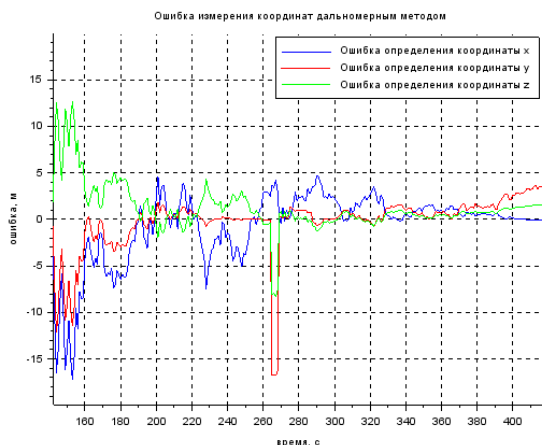


б)

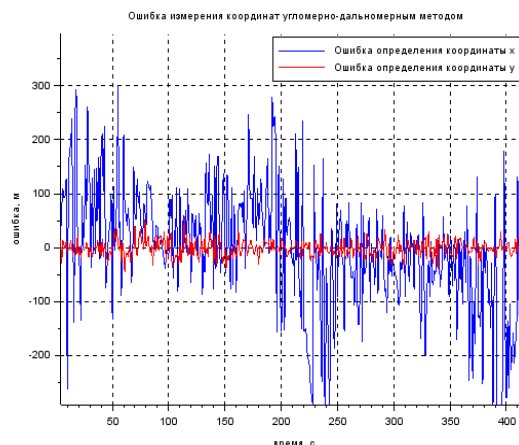
Рисунок 1 – Ошибка измерения координат при радиусе облета объекта $R=1000$ м и высоте полета 500 метров: а) дальномерным методом; б) угломерно-дальномерным методом

Из рисунка 1 а) видно, что интегральный дальномерный метод позволил достичь высокую точность (СКО 5,5 м), а время сходимости или достижения установившегося режима составляет около 250 секунд. Из рисунка 1 б) видно, что точность для угломерно-дальномерного метода не меняется на протяжении всего сеанса измерений и СКО составляет 27 метров, время сходимости при этом составило 22 секунды.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей ошибок определения координат наземного объекта от времени при высоте полета 1500 метров и радиусе облета $R=1000$ метров



а)

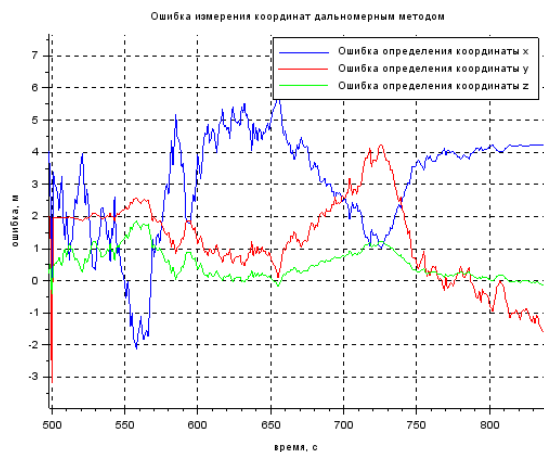


б)

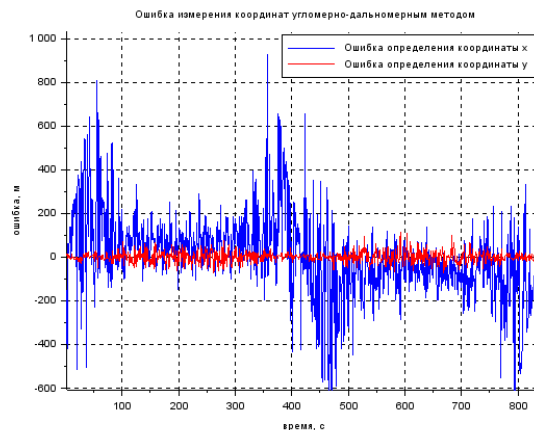
Рисунок 2 – Ошибка измерения координат при радиусе облета объекта $R=1000$ м и высоте полета 1500 метров: а) дальномерным методом; б) угломерно-дальномерным методом

Из рисунка 2 а) видно, что интегральный дальномерный метод позволил достичь высокую точность (СКО 7,2 м), а время сходимости или достижения установившегося режима составляет около 140 секунд. Из рисунка 2 б) видно, что точность для угломерно-дальномерного метода не меняется на протяжении всего сеанса измерений и СКО составляет 29 метров, время сходимости при этом составило 24 секунды.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей ошибок определения координат наземного объекта от времени при высоте полета 5000 метров и радиусе облета $R=1000$ метров



а



б

Рисунок 3 – Ошибка измерения координат при радиусе облета объекта $R=1000$ м и высоте полета 5000 метров: а) дальномерным методом; б) угломерно-дальномерным методом

Из рисунка 3 а) видно, что интегральный дальномерный метод позволил достичь высокую точность (СКО 5,2 м), а время сходимости или достижения установившегося режима составляет около 500 секунд. Из рисунка 3 б) видно, что точность для угломерно-дальномерного метода не меняется на протяжении всего сеанса измерений и СКО составляет 32 метра, время сходимости при этом составило 38 секунд.

На рисунке 4 представлена траектория движения БЛА в виде точек, в которых проводились измерения

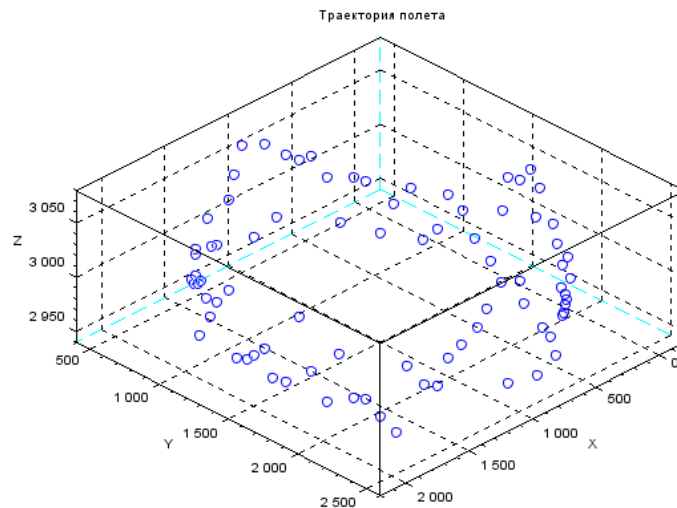


Рисунок 4 – Траектория полета БЛА

Разработанный программно-алгоритмический комплекс планируется к реализации на БЛА. Прототип данного БЛА уже разработан в ВУНЦ ВВС «ВВА» совместно с предприятием промышленности. На рисунке 5 представлен наглядный вариант применения способа с использованием разработанного программно-алгоритмического комплекса.

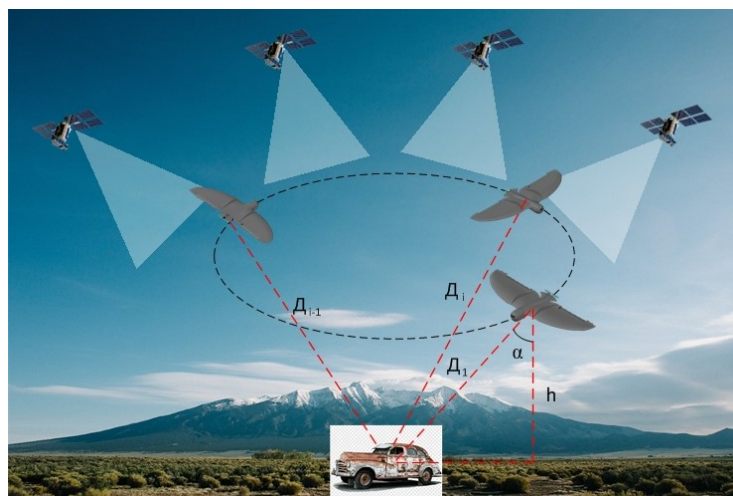


Рисунок 5 – Наглядное представление применения БЛА при определении координат наземного объекта

Точность улучшается при увеличении высоты полета БЛА, так как это влияет на значение пространственного геометрического фактора. Но для угломерно-дальномерного метода увеличение высоты приводит к увеличению ошибки определения углов (угла места и азимута).

Учитывая данное обстоятельство, в начальные моменты времени необходимо осуществлять полет на небольших высотах (для уменьшения ошибки определения углов), а затем при переходе на интегральный дальномерный метод осуществлять облет объекта на большей высоте.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что интегральный дальномерный метод позволяет получить более высокую точность по сравнению с угломерно-дальномерным методом (в 5–7 раз). При этом существенным недостатком является увеличенное время сходимости алгоритма оценки координат интегральным дальномерным методом. Время сходимости возможно уменьшить, увеличив количество разведывательных БЛА. Для получения оценок координат разведываемых объектов целесообразно использовать два метода совместно, что позволяет достичь высокой точности и получать оценки координат уже с начальных моментов времени определения координат наземных объектов [3,18,19].

Заключение

Таким образом, проведены исследования по определению точности оценивания координат разведываемого объекта предложенными угломерно-дальномерным и интегральным дальномерным методами при изменении высоты полета БЛА. Способ позволяет определять координаты практически сразу, а с

увеличением времени наблюдения перейти на интегральный дальномерный метод и повысить точность оценивания координат наземных объектов.

Совместное использование угломерно-дальномерного и интегрального дальномерного методов позволяет определить координаты разведываемого объекта с достаточно приемлемой точностью с первых секунд начала облета. Параллельно необходимо производить накопление измеренных дальностей до наземного объекта и при достижении необходимого значения пространственного геометрического фактора (менее 3) выдавать потребителю координаты объекта, полученные при помощи интегрального дальномерного метода. Так достигается высокая точность оценивания координат (СКО около 4,5 м).

Список источников

1. Верба В.С. *Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Роль и место в составе общегосударственной единой информационно-управляющей системы военного назначения. Системы радиуправления. Кн.1 Состояние и тенденции развития систем радиуправления: монография.* - М.: Радиотехника, 2013. С. 128-131.
2. Перов А.И., Харисов В.Н. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования.* - М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
3. Коровин А.В., Савин Д.И. Исследование способов определения координат наземных объектов с БЛА // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Авионика» (Воронеж, 12–13 марта 2020): сборник трудов. - Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 44-55.

4. Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Особенности угломерно-дальномерного метода определения местоположения цели в просветных бистатических радиолокаторах // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/1/text.pdf>
5. Пикалов С.А. Исследование дальномерного способа оперативного определения координат наземной цели на борту авиационных комплексов // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29148>
6. Буслов И.А., Гордеев А.Е., Доррер Г.А., Кобыжакова С.В., Яровой С.В. Система управления борьбой с природными пожарами на базе беспилотных летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2-3. С. 858-863.
7. Великанов А.В., Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Осипов В.С., Дьякова Н.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для проведения химической разведки грунта на зараженных территориях // Научный вестник ГОСНИИ ГА. 2022. № 40. С. 154-163.
8. Левин А.В., Ковальчук В.А. Исследование вопросов применения беспилотных летательных аппаратов для корректирования огня артиллерии // Научный резерв. 2018. № 3 (3). С. 63-69
9. Шеренков А.Г. Многоцелевой мобильный комплекс для обеспечения радиосвязи и видеомониторинга на местности // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2011. № 1. С. 243-246.
10. Лапиньш В.В., Северов Н.В. Оценка применения дистанционно пилотируемых летательных аппаратов для разведки районов чрезвычайных ситуаций // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2008. № 7. С. 61-64.

11. Родионов А.В., Потоцкий М.В. Возможность применения беспилотного летательного аппарата для экологического мониторинга // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2013. № 1. С. 25-29.
12. Егоров А.А., Сурков Д.А., Васильев Н.М. МАИ представляет мобильный комплекс оперативного мониторинга ЛЭП на базе беспилотного летательного аппарата нового поколения // Автоматизация и IT в энергетике. 2016. № 12 (89). С. 42-47.
13. Терсин В.В. Измерение дальности и частоты Доплера суммарно-дальномерными станциями разнесённого приёма при воздействии активных и пассивных помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 4 (40). С. 23-32.
14. Коровин А.В., Савин Д.И. Определение координат наземных объектов с использованием метода максимального правдоподобия // XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов. – Воронеж: ВГУ, 2020. С. 249-253.
15. Кирюшкин В.В., Коровин А.В., Савин Д.И. Определение координат наземных объектов с использованием группировки беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 6. С. 127-140.
16. Костин А.А., Костин В.А., Губенко М.Л., Сосновский А.В., Осадчик А.А. Угломерно-дальномерный метод местоопределения источника радиоизлучения в декаметровом диапазоне длин волн на основе измерения параметров фронта радиоволны в точке приема // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 1. С. 5-10.

17. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 509 с.
18. Савин Д.И., Коровин А.В., Николенко Д.А., Паршуков Н.В. Программа определения координат наземных объектов с БЛА угломерно-дальномерным методом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665604, 27.11.2020.
19. Савин Д.И., Коровин А.В., Николенко Д.А., Паршуков Н.В. Программа определения координат наземных объектов с БЛА интегральным дальномерным методом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665640, 27.11.2020.
20. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Программный комплекс алгоритмов автономного определения параметров углов ой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167100>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-17

References

1. Verba V.S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Rol' i mesto v sostave obshchegosudarstvennoi edinoi informatsionno-upravlyayushchei sistemy voennogo naznacheniya. Sistemy radioupravleniya. Kn.1 Sostoyanie i tendentsii razvitiya sistem radioupravleniya* (Aviation complexes of radar patrol and guidance. The role and place in the composition of the national unified information and control system for military purposes // Radio control systems. Book 1 The state and trends in the development of radio control systems), Moscow, Radiotekhnika, 2013, pp. 128-131.

2. Perov A.I., Kharisov V.N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and functioning), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p.
3. Korovin A.V., Savin D.I. *IV Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Avionika»: sbornik trudov*. Voronezh, VUNTs VVS «VVA», 2020, pp. 44-55.
4. Kovalev F.N., Kondrat'ev V.V. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/1/text.pdf>
5. Pikalov S.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29148>
6. Buslov I.A., Gordeev A.E., Dorrer G.A., Kobyzhakova S.V., Yarovoi S.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 2-3, pp. 858-863.
7. Velikanov A.V., Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Osipov V.S., D'yakova N.A. *Nauchnyi vestnik GOSNII GA*, 2022, no. 40, pp. 154-163.
8. Levin A.V., Koval'chuk V.A. *Nauchnyi rezerv*, 2018, no. 3 (3), pp. 63-69
9. Sherenkov A.G. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'*, 2011, no. 1, pp. 243-246.
10. Lapin'sh V.V., Severov N.V. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik*, 2008, no. 7, pp. 61-64.
11. Rodionov A.V., Pototskii M.V. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo*, 2013, no. 1, pp. 25-29.
12. Egorov A.A., Surkov D.A., Vasil'ev N.M. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2016, no. 12 (89), pp. 42-47.

13. Tersin V.V. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2020, no. 4 (40), pp. 23-32.
14. Korovin A.V., Savin D.I. *XXVI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'»: sbornik trudov*. Voronezh, VGU, 2020, pp. 249-253.
15. Kiryushkin V.V., Korovin A.V., Savin D.I. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 127-140.
16. Kostin A.A., Kostin V.A., Gubenko M.L., Sosnovskii A.V., Osadchik A.A. *Radiotekhnika*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 5-10.
17. Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii. Ch. 1. Vvedenie v teoriyu otsenivaniya* (Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 1. Introduction to the theory of estimation). Saint Petersburg, GNTs RF OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor», 2010, 509 p.
18. Savin D.I., Korovin A.V., Nikolenko D.A., Parshukov N.V. *Programma opredeleniya koordinat nazemnykh ob"ektov s BLA uglomerno-dal'nomernym metodom. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM 2020665604, 27.11.2020*. (Program for determining the coordinates of ground objects with UAV angle-rangefinder method. Certificate of registration of the computer program 2020665604), 11.27.2020.
19. Savin D.I., Korovin A.V., Nikolenko D.A., Parshukov N.V. *Programma opredeleniya koordinat nazemnykh ob"ektov s BLA integral'nym dal'nomernym metodom. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM 2020665640, 27.11.2020*. (Program for determining the

coordinates of ground objects with UAV integral rangefinder method. Certificate of registration of the computer program 2020665640), 27.11.2020.

20. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167100>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-17

Статья поступила в редакцию 13.12.2022

Одобрена после рецензирования 20.12.2022

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 13.12.2022; approved after reviewing on 20.12.2022; accepted for publication on 27.02.2023