

Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях

М. Ю. Алемпьев¹, А. Е. Семенова¹, Д. С. Коптев¹ ✉,
В. Г. Довбня¹, А. С. Лазарев¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является согласование работы канала пеленгации радиомаяков с системами передачи данных и управления беспилотным летательным аппаратом с помощью пульта дистанционного управления.

Методы опираются на применение принципов радиоэлектроники, диагностики и анализа технического состояния летательных аппаратов. Использовались методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Изучены особенности пеленгации радиомаяков с беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для отслеживания чрезвычайных ситуаций. Выполнен анализ критической оценки максимальной дальности пеленгации радиомаяков с беспилотного летательного аппарата.

Результаты. Приведены аналитические формулы для расчета предельной дальности пеленгации радиомаяков с беспилотного летательного аппарата. Рассчитано максимальное расстояние пеленгации радиомаяков при использовании 2,4 и 5,8 ГГц внешних антенн на беспилотных летательных аппаратах, применяемых в МЧС России и оснащенных системой цифровой пеленгации.

Заключение. Использование систем пеленгации на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) предоставляет широкие возможности для применения в различных областях. Применение такой комбинации позволяет эффективно обнаруживать и отслеживать источники радиосигналов, что особенно полезно при проведении поисково-спасательных операций, мониторинге окружающей среды и безопасности. БПЛА, оснащенные пеленгаторами, могут быстро покрывать большие территории, обеспечивая точное определение местоположения сигналов, которые трудно или невозможно зафиксировать с Земли, что делает их незаменимыми в ситуациях, требующих оперативного реагирования и высокой точности. Кроме того, использование БПЛА с пеленгационными системами снижает риски для человеческой жизни, предоставляя возможность выполнять задачи в труднодоступных или опасных зонах.

Ключевые слова: видеотрансляция; совместимость каналов передачи; беспилотный летательный аппарат; пеленгация; радиомаяк; поисково-спасательные операции.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, А. С. Лазарев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 4. С. 129–145. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

Поступила в редакцию 17.10.2024

Подписана в печать 16.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Assessment of the possibility of using the direction finder of radio beacons on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations

Mikhail Y. Alempiev¹, Anastasia E. Semenova¹, Dmitry S. Koptev¹ ✉, Vitaly G. Dovbnya¹, Aleksey S. Lazarev¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to coordinate the operation of the direction finding channel of radio beacons with the data transmission systems and control of an unmanned aerial vehicle using a remote control.

Methods. Research methods are based on the application of principles of radio electronics, diagnostics and analysis of the technical condition of aircraft. Methods of multicriterial analysis, parametric and structural synthesis were used. The features of direction finding of radio beacons from unmanned aerial vehicles designed to track emergency situations were studied. An analysis of the critical assessment of the maximum range of direction finding of radio beacons from an unmanned aerial vehicle was performed.

Results. Analytical formulas are given for calculating the maximum range of radio beacon direction finding from an unmanned aerial vehicle. The maximum range of radio beacon direction finding is calculated when using 2.4 and 5.8 GHz external antennas on unmanned aerial vehicles used in the Russian Emergencies Ministry and equipped with a digital direction finding system.

Conclusion. The use of direction finding systems on unmanned aerial vehicles (UAVs) provides wide opportunities for application in various fields. This combination makes it possible to effectively detect and track radio sources, which is especially useful in search and rescue operations, environmental monitoring and safety. UAVs equipped with direction finders can quickly cover large areas, providing accurate location of signals that are difficult or impossible to capture from the ground. This makes them indispensable in situations requiring rapid response and high accuracy. In addition, the use of UAVs with direction finding systems reduces the risks to human life, providing the opportunity to perform tasks in hard-to-reach or dangerous areas.

Keywords: video broadcast; compatibility of transmission channels; unmanned aerial vehicle; direction finding; radio beacon; search and rescue operations.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Alempiev M.Y., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Lazarev A.S. Assessment of the possibility of using the direction finder of radio beacons on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations. *Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):129–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

Received 17.10.2024

Accepted 16.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Пеленгатор – это прибор, предназначенный для определения направления на источник радиосигнала [1]. Его работа основана на улавливании электромагнитных волн, испускаемых радиопередатчиком, и вычислении угла между направлением на источник и приемником. Основной принцип работы заключается в сравнении фаз радиосигналов, полученных на нескольких антеннах или на одной поворотной антенне [2]. Сигнал, который достигает антенны с определённого направления, позволяет вычислить угол и определить местоположение радиопередатчика. Пеленгация радиомаяков широко применяется в навигации и морском деле для определения местоположения судов и других объектов на море. Также пеленгация радиомаяков используется в авиации, геодезии, БПЛА и других областях, где необходимо определить точное направление на объект [3].

Интеграция пеленгаторов на беспилотные летательные аппараты существенно расширяет их возможности. БПЛА с пеленгаторами могут быстро и точно определять местоположение источников радиосигналов в труднодоступных или опасных для человека

районах. Такая точность определения критически важна в различных операциях, таких как поиск и спасение, разведка и мониторинг, обнаружение и подавление радиосигналов противника и т. д. Технология установки пеленгаторов на БПЛА требует внимательной интеграции с бортовой электроникой. Учитываются вес устройства, энергопотребление, совместимость с навигационными системами и программное обеспечение для управления аппаратом [4].

Первым шагом является выбор подходящего пеленгатора для БПЛА. Существует множество различных моделей и производителей, поэтому важно выбрать устройство, которое соответствует потребностям и требованиям. После выбора устройства необходимо приступить к интеграции пеленгатора в систему управления БПЛА путем программирования и настройки соединений между устройствами. Далее, следует провести тестирование установленного пеленгатора, чтобы убедиться в правильности его работы, а именно корректности определения направления на источник радиосигнала и передачи этой информации обратно в блок управления БПЛА [5].

Целью исследования является согласование применения канала пеленгации радиомаяков с системами передачи данных и управления беспилотным летательным аппаратом с помощью пульта дистанционного управления.

Материалы и методы

Одним из ключевых факторов, влияющих на систему навигации и управления, является обеспечение совместимости каналов пеленгации радиомаяков и передачи видеосигнала с летательных аппаратов [6]. Пеленгационные радиомаяки предназначены для определения координат объектов и передачи этой информации на наземные станции управления или в центр координации. Одновременно с этим передача видеоданных с БПЛА предоставляет оператору визуальное отображение местности в реальном времени, что позволяет быстро принимать решения на основе текущей обстановки [7].

Для обеспечения бесперебойной работы обоих каналов – радиопеленгации и видеопередачи – крайне важно корректно распределять частотный спектр. Каждый канал должен работать на своей частоте, чтобы избежать взаимных помех и минимизировать вероятность потерь данных. Важную роль играет также управление уровнем помехозащищённости и шумоподавления, что предотвращает снижение качества передачи информации. Это необходимо для обеспечения стабильности работы системы,

особенно в условиях повышенной радиозагруженности и в сложной среде, где много источников сигналов [8].

Для достижения максимальной эффективности можно использовать антенны с различными характеристиками направленности. Например, широконаправленные антенны можно применять для передачи видеоданных, чтобы оператор имел более широкое поле зрения, тогда как антенны с узкой диаграммой направленности лучше подходят для задач радиопеленгации, так как они обеспечивают более точное определение направления на радиомаяк. Такой подход помогает минимизировать взаимные помехи и повысить общую надёжность системы [9].

Для обеспечения оптимальной работы каналов пеленгации радиомаяков и передачи видеоданных с БПЛА необходимо также учитывать технические характеристики оборудования и программного обеспечения. Важно, чтобы оборудование было совместимо и работало стабильно на различных расстояниях и в различных условиях окружающей среды [10].

DJI Phantom 3 – беспилотный летательный аппарат производства компании DJI, который используется Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (рис. 1).



Рис. 1. БПЛА DJI Phantom 3

Fig. 1. DJI Phantom 3 UAV

БПЛА спроектирован для аэрофото-съемки и видеосъемки с воздуха, обеспечивая пользователям возможность получать качественные кадры с высоты. Его основное назначение – использование в различных сферах, таких как медиа, мониторинг территорий, картография и развлекательные проекты. С его помощью осуществляется детальный обзор как самих зданий и сооружений, так и их внутренних пространств, а также осмотр отдельных участков местности, мостов, дорог и других объектов [11]. Также подходит для выполнения воздушной разведки и определения путей для ввода наземных аварийно-спасательных команд. DJI Phantom 3 имеет классическую квадрокоптерную конструкцию с четырьмя пропеллерами, установленными на крестообразных опорах. Корпус изготовлен из прочного пластика, что обеспечивает защиту внутренних компонентов от повреждений. Одной из главных особенностей DJI Phantom 3 является его встроенная камера, способная снимать

видео в разрешении Full HD (1080p) и делать фотографии с разрешением до 12 мегапикселей. Камера установлена на стабилизированной 3-осевой системе, что обеспечивает получение плавных и стабильных видео и фотографий даже при неровных полетах. Система навигации и управления DJI Phantom 3 состоит из систем GPS и GLONASS для точного позиционирования и автоматической стабилизации полета [12]. Это позволяет выполнять автоматические взлет и посадку, а также возвращение в точку старта.

Управление DJI Phantom 3 осуществляется с помощью пульта дистанционного управления (ПДУ) в сочетании с мобильным устройством (смартфоном или планшетом), на котором установлено специализированное приложение. ПДУ имеет встроенный экран для отображения информации о полете и состоянии БПЛА. DJI Phantom 3 использует съемные литий-полимерные батареи, которые обеспечивают до 25 минут

полета на одном заряде. Время полета может варьироваться в зависимости от условий полета и использования камеры.

БПЛА оснащен системой передачи видеосигнала на расстояние до 2 км, что позволяет оператору видеть то, что видит камера в реальном времени. Также имеется возможность подключения к смартфону или планшету через приложение DJI Go для дополнительного контроля и настроек. DJI Phantom 3 работает на Wi-Fi частоте – 2,4 ГГц, которая используется как для канала передачи данных, так и для канала управления [13].

Радиопеленгаторы, устанавливаемые на БПЛА, представляют собой устройства, предназначенные для определения направления на источник радиосигнала. Эти системы широко применяются в поисково-спасательных операциях, военных миссиях, разведке и мониторинге. Благодаря радиопеленгаторам БПЛА может точно обнаруживать сигналы радиомаяков, которые излучаются объектами или людьми, находящимися в бедственном положении, передавать информацию на наземные станции и выполнять задачи в автономном режиме. Они могут быть различных типов и предназначены для решения разных задач:

1. Фазовые пеленгаторы используют разность фаз между сигналами, принимаемыми несколькими антеннами, для определения направления на источник сигнала. Реализовываются в виде фазированных антенных решеток

(ФАР), которые позволяют электронным способом изменять направление приема сигнала.

2. Амплитудные пеленгаторы используют разницу в амплитуде сигналов, принимаемых различными антеннами, для определения направления на источник. Реализовываются в виде круговых антенных систем или систем с несколькими разнесенными антеннами.

3. Гибридные пеленгаторы комбинируют методы фазовой и амплитудной пеленгации для повышения точности и надежности определения направления на источник сигнала.

4. Цифровые пеленгаторы используют цифровую обработку сигналов для определения направления на источник. Данные системы более компактны и энергоэффективны, что важно для БПЛА.

5. Стереопеленгаторы используют два или более приемников, разнесенных в пространстве, для определения направления на источник сигнала. Они могут быть использованы для более точного определения местоположения источника сигнала в трехмерном пространстве [14].

При установке пеленгаторов на БПЛА необходимо учитывать такие факторы, как размеры и вес пеленгатора, потребление энергии, точность пеленгации, рабочий диапазон частот и стоимость. Также важно, чтобы пеленгатор был совместим с системой управления БПЛА и мог интегрироваться с другими навигационными и сенсорными

системами. Исходя из этого наиболее подходящим является интеграция цифрового пеленгатора с БПЛА.

Перечислим основные особенности цифровых пеленгаторов:

1. Цифровые пеленгаторы обеспечивают высокую точность определения направления на источник радиосигнала благодаря современным алгоритмам обработки данных и использованию высококачественных антенн.

2. Цифровые технологии обеспечивают высокую устойчивость к радиопомехам, что особенно важно при работе в сложных условиях, где могут присутствовать источники помех.

3. Цифровые пеленгаторы более компактны и легки по сравнению с аналоговыми, что важно для их использования на БПЛА.

4. Цифровые пеленгаторы легко адаптируются для работы в различных частотных диапазонах и с различными типами сигналов за счет изменения программного обеспечения.

5. Цифровые пеленгаторы многофункциональны, позволяют выполнять обнаружение сигналов, классификацию источников, мониторинг спектра и т. д.

6. Многие процессы в цифровых пеленгаторах автоматизированы, что уменьшает потребность в ручном управлении и повышает эффективность работы. Также такие пеленгаторы могут передавать данные о направлении и расстоянии в реальном времени на наземные станции или управляющие центры,

что позволяет операторам оперативно принимать решения [15].

Примеры цифровых пеленгаторов включают системы, использующие методы быстрого преобразования Фурье (БПФ) для анализа спектра сигналов, алгоритмы корреляционной обработки для определения разности фаз между сигналами, принимаемыми различными антеннами, и другие методы цифровой обработки сигналов.

Одним из конкретных примеров цифрового пеленгатора является система Raven производства компании ELTA Systems, которая является подразделением корпорации Israel Aerospace Industries. Эта система предназначена для использования на БПЛА и обеспечивает высокоточное определение направления на источники радиоизлучения в реальном времени.

Основные характеристики системы Raven:

1. Антенная система состоит из нескольких антенн, которые могут быть установлены на БПЛА в различных конфигурациях для обеспечения широкого диапазона углов пеленгации.

2. Сигналы, принятые антеннами, преобразуются в цифровую форму с помощью высокоскоростных АЦП.

3. Цифровой сигнальный процессор обрабатывает цифровые сигналы с использованием алгоритмов БПФ, корреляционных методов и других технологий для определения направления на источник радиоизлучения.

4. Программное обеспечение реализует управление системой, настройку параметров обработки сигналов, визуализацию результатов пеленгации и интеграцию с другими системами управления БПЛА.

5. Интерфейс пользователя предоставляет оператору возможность мониторинга состояния системы, настройки её параметров и анализа результатов пеленгации через графический пользовательский интерфейс.

6. Система Raven разработана для установки на различные типы БПЛА, что делает ее удобной для использования в

полевых условиях и выполнения задач радиоэлектронной разведки.

7. Энергопотребление системы Raven для работы антенн, модуля управления и других компонентов совместимо с ресурсами БПЛА, на котором устанавливается система [16].

8. Система пеленгации Raven работает в S (2–4 ГГц) и C-диапазонах (4–8 ГГц) и требует дополнительного подключения внешней антенны.

Основные технические характеристики системы пеленгации Raven (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики системы пеленгации Raven

Table 1. Technical characteristics of the direction finding system Raven

Характеристика	Значение
Рабочий диапазон	20 MHz – 6 GHz
Дополнительный диапазон (опционально)	6 GHz – 18 GHz
Азимутальная точность	$\leq 1^\circ$ (в зависимости от частоты и других факторов)
Вертикальная точность	$:\leq 5^\circ$ (в зависимости от частоты и других факторов)
Время пеленгации одного источника	$:\leq 1$ с
Время пеленгации нескольких источников	≤ 2 с
Максимальное количество отслеживаемых источников	8
Тип антенны	Активная фазированная антенная решетка (AFAA)
Количество элементов антенны	128
Тип питания	28 В постоянного тока
Интерфейс управления	Встроенный дисплей, клавиатура и сенсорный экран
Интерфейсы связи	Ethernet, RS-232, USB
Совместимость с внешними системами	Совместима с системами управления и отображения, такими как карты и системы управления огнем
Температура окружающей среды	-10°C до $+50^\circ\text{C}$
Влажность	0% - 95% относительной влажности
Защита от воздействия окружающей среды	IP55

Для интеграции системы пеленгации Raven в работу DJI Phantom 3 необходимо соблюсти условие работы в разных частотных диапазонах. Так как БПЛА работает на частоте 2,4 ГГц, то внешние антенны системы пеленгации должны быть на другой частоте для исключения образования интерференции. В качестве внешней антенны для работы в С-диапазоне может быть использована направленная антенна 5,8 ГГц с усилением 20 дБ [17].

В условиях отсутствия помех заявленная производителем максимальное удаление DJI Phantom 3 от ПДУ составляет 2 км по горизонтали и 6 км по вертикали. Важно отметить, что реальные расстояния могут варьироваться в зависимости от окружающей среды, включая наличие зданий, деревьев, а также атмосферных условий, которые могут влиять на сигнал [18].

Чтобы рассчитать максимальное расстояние приёма сигнала на антенну 5,8 ГГц с усилением 20 дБ в условиях отсутствия помех, можно использовать формулу свободного пространства (дБ) [19]:

$$F_{SPL} = 20\lg(d) + 20\lg(f) + 20\lg(4\pi/c), \quad (1)$$

где d – расстояние, м; f – частота, Гц; c – скорость света, м/с.

Предположим, что мощность передатчика $P_t = 20$ дБ·м и чувствительность приемника $P_r = -90$ дБ·м известны, найдем F_{SPL} по формуле

$$F_{SPL} = P_t + G_t + G_r - P_r, \quad (2)$$

где G_t и G_r – усиление передающей и приемной антенн (в данном случае – $G_t = G_r = -20$ дБ·м).

Таким образом, подставив значения, получим $F_{SPL} = 150$ дБ·м. Исходя из этого получим, что максимальное расстояние приема сигнала в идеальных условиях составляет примерно 540 м.

В условиях города сигнал будет затухать сильнее из-за препятствий, таких как здания, застройки и другие конструкции. Для учета этого добавим к расчёту коэффициент затухания, который обычно составляет от 10 до 20 дБ в зависимости от плотности застройки [20]. Примем среднее значение дополнительного затухания равным 15 дБ, тогда $F_{SLP} = 165$ дБ·м. Таким образом, в условиях города максимальное расстояние приема сигнала составит приблизительно 306 м.

Чтобы рассчитать максимальное расстояние приема сигнала на антенну с частотой 2,4 ГГц с усилением 20 дБ в условиях отсутствия помех, используем формулу (1) для свободного пространства. Так же, как и для первого случая, при $F_{SPL} = 150$ дБ·м получим, что в идеальных условиях максимальное расстояние приёма сигнала составит примерно 1,32 км.

Чтобы учесть влияние передатчика БПЛА, работающего на частоте 2,4 ГГц с усилением 20 дБ·м на расстоянии 10 см от внешней антенны системы Raven, нужно рассмотреть возможные помехи, которые он может создавать.

Проведём расчёт уровня сигнала на расстоянии 10 см от внешней антенны (дБ·м):

$$R_{SPR} = P_t + G_t - 20\log_{10}(d), \quad (3)$$

где $P_t = 20$ дБ·м; $G_t = 0$ дБ (предполагаем без усиления антенны); $d = 0,1$ м.

Таким образом, уровень сигнала равен 40 дБ·м.

Предположим, что приемник может справиться с сигналами, превышающими его чувствительность, но уровень шума увеличится. Это может снизить чувствительность на величину сигнала помехи. Если уровень помехи составляет 40 дБ·м, а чувствительность приемника –90 дБ·м, то эффект будет значительным. Однако на практике приемники могут фильтровать такие помехи, если они имеют узкополосные фильтры. Если считать, что помеха уменьшается на 10 дБ из-за фильтрации, новая эффективная чувствительность будет равна $P_{r \text{ эфф}} = -80$ дБ·м, тогда с учетом выражения (2)

F_{SPL} составит 140 дБ. С учётом этого максимальное расстояние окажется равным $d = 0,42$ км. Таким образом, с учетом помех от передатчика максимальное расстояние приема сигнала может снизиться до примерно 420 м.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, исходя из проведенных расчётов становится возможным утверждать, что использование антенн 2,4 ГГц и 5,8 ГГц с системой Raven, установленной на БПЛА DJI Phantom 3, в виде внешнего модуля является

рациональным. Показано, что при использовании антенны 5,8 ГГц не возникает интерференции между системой пеленгации и каналами передачи данных БПЛА, однако максимальная дальность обнаружения радиометок составит 540 м на открытом пространстве и 306 м в городских условиях.

При использовании антенн 2,4 ГГц возникает эффект интерференции из-за использования этого же частотного диапазона БПЛА, поэтому максимальное расстояние, на котором возможно определить радиомаяк, составит 420 м.

Также стоит упомянуть другие известные модели БПЛА, которые используются сотрудниками МЧС России, такие как ZALA 421-22 и Supercam S-350.

ZALA 421-22 – российский беспилотный летательный аппарат, разработанный компанией ZALA Aero. Он предназначен для проведения разведывательных и наблюдательных операций, характеристики представлены ниже (табл. 2).

ZALA 421-22 имеет аналогичные характеристики приемо-передающего устройства, как у DJI Phantom 3, поэтому при использовании частоты 2,4 ГГц БПЛА и антенн 2,4 ГГц и 5,8 ГГц результаты по дальности пеленгации радиомаяков будут аналогичны DJI Phantom 3. Однако, если ZALA 421-22 используется на частоте 900 МГц, то, используя формулы (1) и (2), получим максимальное расстояние пеленгации с антенной 2,4 ГГц в идеальных условиях 1983 м.

Supercam S-350 – российский беспилотный летательный аппарат (БПЛА), разработанный для различных задач, таких как аэрофотосъёмка, мониторинг и

разведка. Supercam S-350 разработан с учётом российских климатических условий, что позволяет ему эффективно

работать в различных погодных условиях. Характеристики Supercam S-350 представлены ниже (табл. 3).

Таблица 2. Основные характеристики ZALA 421-22

Table 2. Main characteristics of ZALA 421-22

Характеристика	Значение
Размах крыла	Около 2,5 метров
Максимальная взлетная масса	До 10 кг
Продолжительность полета	До 3 часов
Радиус действия	До 50 км
Крейсерская скорость	Около 65–110 км/ч
Максимальная высота полета	До 5000 метров
Система управления	Автоматическая с возможностью ручного управления
Используемые частотные диапазоны	900 МГц и 2,4 ГГц
Тип БПЛА	Малогобаритный вертолетного типа

Таблица 3. Основные характеристики ZALA 421-22

Table 3. Main characteristics of ZALA 421-22

Характеристика	Значение
Максимальная дальность полёта	До 250 км
Время полёта	До 4 часов
Максимальная скорость	Около 120 км/ч
Полезная нагрузка	До 5 кг
Тип двигателя	Электрический
Рабочая температура	От –30°C до +50°C
Используемые частотные диапазон	2,4 ГГц
Тип БПЛА	Самолетного типа с неподвижным крылом

На основании информации о частотном диапазоне 2,4 ГГц можно сделать вывод, что при установки системы пеленгации Raven на Supercam S-350 максимальная дальность пеленгации будет такая же, как и БПЛА DJI Phantom 3.

Выводы

Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что в рамках данной статьи:

– оценена возможность использования системы цифровой пеленгации Raven на беспилотном летательном аппарате DJI Phantom 3, используемом МЧС России;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА с дополнительной антенной 5,8 ГГц и радиомаяком, которая определена при прямой видимости и составляет 540 м, а для городской местности – 306 м;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА с дополнительной антенной 2,4 ГГц и радиомаяком, составляющая 420 м;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА, работающим на частоте 900 МГц, с дополнительной антенной 2,4 ГГц и радиомаяком, составляющая 1983 м.

Таким образом, совместимость канала пеленгации радиомаяков с каналом

передачи видеоданных с БПЛА играет важную роль в обеспечении эффективной работы системы навигации и управления БПЛА. Правильный выбор оборудования, использование оптимальных частотных диапазонов и уровень защиты от помех позволяют обеспечить стабильность, надежность передачи данных и оперативное принятие решений оператором.

Список литературы

1. Старовойтов Е. И. Навигационное обеспечение мониторинга подстилающей поверхности БПЛА с пассивным оптическим датчиком // Радиостроение. 2020. № 5. С. 13–41.
2. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
3. Основные направления создания высоконадёжной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Бочва, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.
4. Исследование алгоритмов перестановочного декодирования в системах управления БПЛА / И. А. Сорокин, П. Н. Романов, Т. Е. Кондраненкова, В. А. Ружьев, Н. А. Стенина, Н. Н. Пушкаренко // Аграрная наука. 2022. № 11. С. 133–140.
5. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Фёдоров, И. А. Черноиваненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 3. С. 90–94.
6. Сущенко О. А., Безкоровайный Ю. Н., Голицын В. А. Использование инерциальных технологий в информационном обеспечении систем управления БПЛА // Современные средства связи. 2021. Т. 1, № 1. С. 95–99.
7. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

8. Тюльков М. В., Эмилбекова З. Э., Юрковская Г. И. Разработка проекта внедрения беспилотных летательных аппаратов в охранно-предупредительную деятельность телекоммуникационных компаний // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 2. С. 956–958.

9. Об одном способе определения направления на аварийный источник излучения (радиомаяк) с помощью фазового пеленгатора, установленного на поисково-спасательном квадрокоптере / М. Ф. Волобуев, М. А. Замыслов, А. М. Мальцев [и др.] // Проблемы безопасности полетов. 2023. № 12. С. 25–36.

10. Разностно-дальномерный метод определения координат радиомаяка с использованием беспилотных летательных аппаратов / С. В. Соколов, В. А. Погорелов, А. А. Манин, К. Т. Ломтатидзе // Автометрия. 2022. Т. 58, № 1. С. 91–103.

11. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Фёдоров, И. А. Черноиваненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 90–94.

12. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования / А. В. Азаров, М. Н. Караваев, С. С. Рожков, А. О. Славянский, К. А. Смолка // Труды МАИ. 2022. № 123. С. 12.

13. Способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием бортового радиопеленгатора беспилотного летательного аппарата вертолетного типа / А. В. Ашихмин, А. Д. Виноградов, А. М. Рембовский, В. А. Сладких // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 40–56.

14. Першин П. В. Варианты реализации радиопеленгаторных антенных решеток для малого беспилотного летательного аппарата // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 2. С. 77–82.

15. Реализация высокоомобильного комплекса пеленгации для БПЛА с применением виртуальных магнитных диполей / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, С. М. Федоров, И. А. Баранников // Труды учебных заведений связи. 2024. № 4. С. 48–61.

16. Паринов М. Л., Нистратов Р. С., Солайман К. Я. Исследование точности определения направления на источник излучения в условиях неопределенности в местоположении элементов антенной системы пеленгатора // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2022. № 21. С. 110–122.

17. Аджахунов Э. А., Николаев О. В. Комплекс перехвата управления бпла // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2021. № 2 (37). С. 35–41.

18. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Ботца, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.
19. Алаторцев Д. В. Анализ эффективных методов оценки дальности и алгоритмов обработки видеоинформации на БПЛА // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 255–261.
20. Лянгузов Д. А., Плюснин Н. И. Безопасность и уязвимость сетей беспилотных летательных аппаратов: обзор // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 528–531.

References

1. Starovoitov E.I. Navigation support for monitoring the underlying surface of a UAV with a passive optical sensor. *Radio Engineering*. 2020;(5):13–41. (In Russ.)
2. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles: monografiya. Saint-Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 204 p. (In Russ.)
3. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsova V.V., Naumkin A.V. The main directions of creating a highly reliable UAV communication and control system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)
4. Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N. Research of permutation decoding algorithms in UAV control systems. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*. 2022;(11):133–140. (In Russ.)
5. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M., Chernoiivanenko I.A. Application of virtual antenna array technology to increase the accuracy of an air-based direction finder. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022;18(3):90–94. (In Russ.)
6. Sushchenko O.A., Bezkorovainy Y.N., Golitsyn V.A. The use of inertial technologies in information support of UAV control systems. *Sovremennye sredstva svyazi = Modern Means of Communication*. 2021;1(1):95–99. (In Russ.)
7. Alempyev M.Y., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality in emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, in-formatika. Meditsinskoe priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

8. Tyulkov M.V., Emilbekova Z.E., Yurkovskaya G.I. Development of a project for the introduction of unmanned aerial vehicles into the security and preventive activities of telecommunications companies. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*. 2022;2:956–958. (In Russ.)
9. Volobuev M.F., Zamyslov M.A., Maltsev A.M., et al. On one method of determining the direction to an emergency radiation source (radio beacon) using a phase direction finder mounted on a search and rescue quadcopter. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of Flight Safety*. 2023;(12):25–36. (In Russ.)
10. Sokolov S.V., Pogorelov V.A., Manin A.A., Lomtadze K.T. The difference-range method for determining the coordinates of a radio beacon using unmanned aerial vehicles. *Avtometriya = Autometry*. 2022;58(1):91–103. (In Russ.)
11. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M., Chernoiivanenko I.A. Application of virtual antenna array technology to improve the accuracy of an air-based direction finder. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022;(3):90–94. (In Russ.)
12. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyansky A.O., Smolka K.A. Synthesis of a small-sized aircraft-based phase direction finder. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2022;(123):12. (In Russ.)
13. Ashikhmin A.V., Vinogradov A.D., Rembovsky A.M., Sladkikh V.A. A method for single-position location of radio sources using an on-board direction finder of a helicopter-type unmanned aerial vehicle. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communications and Security Systems*. 2021;(4):40–56. (In Russ.)
14. Pershin P.V. Implementation options for radio direction finding antenna arrays for small unmanned aerial vehicles. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2020;16(2):77–82.
15. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Fedorov S.M., Barannikov I.A. Implementation of a highly mobile direction finding system for UAVs using virtual magnetic dipoles. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communications*. 2024;(4):48–61. (In Russ.)
16. Parinov M.L., Nistratov R.S., Solaiman K.Y. Investigation of the accuracy of determining the direction to the radiation source under conditions of uncertainty in the location of the elements of the antenna system of the locator. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2022;(21):110–122. (In Russ.)
17. Adjakhunov E.A., Nikolaev O.V. UAV control interception complex. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antei» = Bulletin of the Almaz-Antey East Kazakhstan Region Concern*. 2021;(2):35–41. (In Russ.)

18. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsva V.V., Naumkin A.V. The main directions of creating a highly reliable UAV communication and control system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)

19. Alatortsev D.V. Analysis of effective methods for estimating the range and algorithms of video information processing on UAVs. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Tula State University. Technical Sciences*. 2020;(12):255–261. (In Russ.)

20. Lyanguzov D. A., Plyusnin N. I. Security and vulnerability of unmanned aerial vehicle networks: an overview. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(7):528–531. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Алемпьев Михаил Юрьевич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Mikhail Y. Alimpiev, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Семёнова Анастасия Евгеньевна, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

Anastasia E. Semenova, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit_georg@mail.ru

Лазарев Алексей Сергеевич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vapapan@yandex.ru

Vitaly G. Dovbnya, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit_georg@mai

Aleksey S. Lazarev, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vapapan@yandex.r