

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

УДК 629.7.014, 349.6

Оценка дальности полёта и передачи видеoinформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях

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

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Современные беспилотные летательные аппараты разнообразных видов обеспечивают возможность выполнения различных задач оперативного сбора информации, контроля за состоянием окружающей среды, технологических объектов и территорий, обновление данных об этих объектах, а также для проведения разведки и наблюдения за их состоянием.

Целью исследования является установление значения максимальной дальности полёта БПЛА при организации канала связи, по которому будут передаваться потоки видеоизображения и команд управления полётом с использованием методов модуляции КАМ-16 и применением помехоустойчивого кодирования Turbo 3/4, между наземным комплексом управления и беспилотным летательным аппаратом в условиях сложной метеорологической обстановки.

Методы опираются на основы радиоэлектроники, диагностики и прогнозирования технического состояния летательных аппаратов. Применялись методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Использованы принципы передачи видеоизображения с беспилотных средств, используемых для мониторинга чрезвычайных ситуаций. Проведена критическая оценка максимальной дальности полёта беспилотного летательного аппарата в условиях сложной метеорологической обстановки.

Результаты. Представлены аналитические модели для определения энергетического потенциала канала передачи данных при прямой видимости. Приведены графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между беспилотным летательным аппаратом и наземным комплексом управления, дающие возможность определить максимальные расстояния для передачи видеоизображения в FullHD качестве в диапазоне 2,4 ГГц. На основе комплексных аналитических выражений проведены расчеты и построены графические зависимости дальности полета микроБПЛА от скорости попутного и встречного ветра. Рассчитана максимальная скорость встречного ветра, не позволяющая использовать микроБПЛА в условиях метели.

Заключение. Перспективным направлением изучения применения беспилотных летательных аппаратов при мониторинге чрезвычайных ситуаций являются коптеры класса микро, способные обнаруживать пострадавших с помощью передачи видеoinформации с тепловизора во время поисково-спасательных операций в сложных метеоусловиях, таких как, например, метели.

Ключевые слова: мониторинг; чрезвычайная ситуация; беспилотный летательный аппарат; дальность полета; вид модуляции; сложные метеорологические условия.

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

Для цитирования: Оценка дальности полёта и передачи видеоинформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 21–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>.

Поступила в редакцию 16.04.2024

Подписана в печать 14.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Assessment of flight range and transmission of video information when monitoring emergency situations from an unmanned aircraft in difficult meteorological conditions

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

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. Modern unmanned aerial vehicles of various types provide the ability to perform various tasks of operational information collection, monitoring the state of the environment, technological facilities and territories, updating data on these facilities, as well as for reconnaissance and monitoring their condition.

The purpose of the study is to establish the maximum flight range and distance necessary for the organization of a communication channel through which the video stream and flight control commands using the KAM-16 Turbo ¾ method will be transmitted between the ground control complex and the unmanned aerial vehicle in a difficult meteorological situation.

Methods are based on the basics of radio electronics, diagnostics and forecasting of the technical condition of aircraft. The methods of multicriteria analysis, parametric and structural synthesis were used. The principles of transmitting video images from drones used to monitor emergency situations were studied. A critical assessment of the maximum flight range of an unmanned aerial vehicle in a difficult meteorological situation was carried out.

Results. Analytical formulas for determining the energy potential of a data transmission channel in line of sight are presented. Graphs of the dependence of the energy reserve in the data transmission channel between the unmanned aerial vehicle and the ground control system are presented, which make it possible to determine the maximum distance for transmitting video images in Full HD quality in the 2.4 GHz band. Calculations were carried out on the basis of complex analytical expressions and graphical dependences of the flight range of a micro UAV on the speed of tailwind and headwind were constructed. The maximum headwind speed is calculated, which does not allow the use of micro UAVs in blizzard conditions.

Conclusion. A promising area of study of the use of UAV in emergency monitoring are micro-class copters capable of detecting victims by transmitting video information from a thermal imager during search and rescue operations in difficult weather conditions, such as snowstorms.

Keywords: monitoring; emergency; unmanned aerial vehicle; flight range; type of modulation; difficult meteorological conditions.

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. Methods for assessing renal hemodynamics after minimally invasive treatment of urolithiasis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024; 14(2): 21–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

Received 16.04.2024

Accepted 14.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Совершенствование конструкции и основных служебных подсистем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), уменьшение их массогабаритных характеристик привели к существенному снижению стоимости и, как следствие, к массовому применению БПЛА, особенно мультироторного типа, в различных прикладных задачах оперативного сбора видеоданных, дистанционного мониторинга за объектами и территориями в зоне непосредственной видимости оператора [1].

Будучи высокоманевренными подвижными объектами, имея достаточно высокую скорость (50–80 км/ч) передвижения, мультироторные БПЛА находят применение для видеомониторинга ситуаций в горных ущельях, дистанционного облета и видеофиксации высоковольтных линий электропередач, дистанционного контроля объектов инфраструктуры жизнеобеспечения (водозаборы, электрические подстанции, газонефтехранилища и др.), мест массового пребывания людей на стадионах, концертах [2]. БПЛА находят применение в строительно-архитектурных задачах: построение перспективных планов, поддержка геодезических работ, текущего контроля строительных работ, поиск опорных точек местности и др. [3].

Перспективы транспортных беспилотных летательных аппаратов весьма обширны, особенно в регионах с низкой

плотностью населения и слабо развитой транспортной инфраструктурой. БПЛА могут обеспечивать срочную доставку важных грузов гражданского назначения, таких как лекарства, продукты питания и другие товары первой необходимости [4]. Построение логистики на основе транспортных БПЛА имеет более выгодные экономические условия в сравнении с пилотируемыми аппаратами, так как почти каждый этап в полном логистическом цикле доставки товаров имеет более выгодные экономические оценки: минимальное время подготовки к взлету, лучшая удельная стоимость перелета, независимость от особенностей проходимости местности, исключение пилота, незначительные ограничения на погодные условия, необязательность посадки БПЛА, возможность полета по заданной карте [5].

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты обширно применяются для решения различных задач по контролю и мониторингу событий, объектов, в т. ч. при чрезвычайных ситуациях (ЧС).

В Российской Федерации активно применяются беспилотные летательные аппараты Министерством чрезвычайных ситуаций (МЧС) России, которое использует их не только для контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций, но и для поиска пострадавших людей и животных, для анализа и оценки нанесенного ущерба от ЧС.

Система аварийного мониторинга, основанная на платформе беспилотных летательных аппаратов, характеризуется высокой эффективностью работы, гибкостью и широким спектром мониторинга. Однако сотрудники МЧС России сталкиваются с рядом трудностей при использовании в широтах России. Погодные условия – немаловажный фактор, который надо учитывать при использовании БПЛА. В метель возникают крайне сложные условия для использования БПЛА, так как корпус беспилотника обледеневает, что приводит к изменению его технических характеристик. Ветер, возникающий во время метели, также оказывает влияние на БПЛА, воздействуя с разной интенсивностью. Вертикальный и встречный ветры влияют на высоту полёта БПЛА и его поступательную скорость соответственно. Боковой ветер вызывает отклонение БПЛА от намеченного курса.

Из существующих разновидностей конструкций БПЛА наибольшую популярность в Министерстве чрезвычайных ситуаций России имеют беспилотники вертолетного (коптерного) и самолетного типа. БПЛА с машущим крылом и аэростатические недостаточно развиты и эффективны, поэтому не могут выполнять поставленные МЧС России задачи лучше, чем БПЛА самолетного и вертолетного типа.

По приведенной статистике МЧС России на 2023 г. в использовании МЧС находятся более 1800 БПЛА коптерного типа и небольшое количество самолетных беспилотников – 60 единиц [6]. Наибольшую часть этих беспилотных летательных аппаратов

составляют именно микроБПЛА, согласно классификации AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International), так как они являются оптимальным вариантом для ведения мониторинга ЧС [7].

Целью статьи является анализ предельных характеристик беспилотных летательных аппаратов типа микровертолетного класса в заданных условиях, а именно определение максимальной возможной дальности связи, необходимой для управления полетом, и максимальной возможной дальности связи, необходимой для передачи видеoinформации FullHD качества, в условиях различной интенсивности метели.

Материалы и методы

Для передачи видеоизображения и команд управления с наземного комплекса управления (НКУ) на БПЛА используются два канала связи:

- канал командно-телеметрический (КТ);
- канал передачи видеoinформации (ПВИ).

Для организации линии связи БПЛА-НКУ на открытой местности принято использовать диапазон частот 2,4 ГГц из-за большой длины волны, чем у диапазона 5 ГГц. В условиях метели на БПЛА используют модуль тепловизора для поисково-спасательных операций, а также передачу видеoinформации в качестве FullHD.

В данной статье будем рассмотрен канал передачи видеoinформации (табл. 1). Канал управления БПЛА рассматриваться не будет, исходя из меньших требований к скорости передачи [8; 9].

Таблица 1. Основные параметры канала ПВИ**Table 1.** Main parameters of CT channel and PVI channel

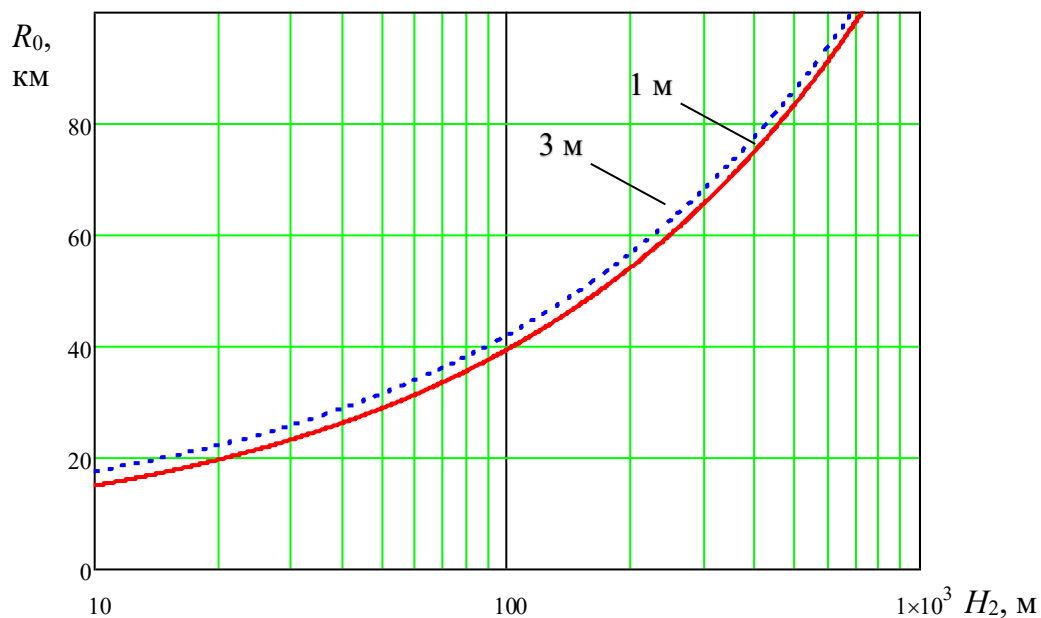
Наименование параметра линии радиосвязи	Канал ПВИ
Вид модуляции	КАМ-16
Максимально допустимая мощность передатчика, дБм	20
Максимальная скорость передачи видеоизображения, Мбит/с FHD (1920×1080, 24/25/30 p)	50 (H.265); 60 (H.264)
Вероятность битовой ошибки, не более	10^{-6}

В общем случае канал связи между БПЛА и наземным пунктом управления (НКУ) представляет собой канал с многолучевым распространением радиоволн (РРВ), характеризующийся отражениями, рассеянием и рефракцией, что вызывает различные виды замираний сигнала, особенно в метель. Максимальная дальность радиосвязи между НКУ и БПЛА (км) ограничивается прямой видимостью и определяется следующей формулой [10]:

$$R_0 = 3,57(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \quad (1)$$

где H_1 – высота подъема антенны НКУ, м; H_2 – высота подъема БПЛА, м.

Обычно антенна наземного комплекса управления мобильна и располагается на высоте от 1 до 3 метров (стандартные значения) [11]. Графики на рисунке 1 показывают максимальную дальность прямой видимости в зависимости от высоты подъёма БПЛА для типовых значений высоты антенны мобильного наземного комплекса управления.

**Рис. 1.** Графики зависимости дальности прямой видимости от высоты подъема БПЛА с учетом типовых значений подъема антенны НКУ**Fig. 1.** Graphs of the dependence of the line of sight range on the height of the UAV lift, taking into account the typical values of the NKU antenna lift

Согласно графикам, представленным на рисунке 1, максимальная дальность прямой видимости между БПЛА и НКУ слабо зависит от высоты подъема антенны мобильного НКУ. При высоте подъема БПЛА от 100 до 500 метров она составляет от 40 до 85 километров. Поэтому на практике высоту подъема антенны НКУ выбирают в первую очередь для минимизации воздействия многолучевого РРВ, принимая во внимание возможные препятствия на пути распространения сигнала [12]. Направленная антенна представляет собой вариант направленной ребристо-стержневой

антенны с дисковыми элементами, излучающая часть которой содержит: дефлектор для отражения волны в направлении стержня антенны, активный рефлектор-возбудитель (вибратор), к которому подводится передающий сигнал и набор пассивных дисков, задающих и формирующих волну передачи электромагнитного поля. Мощность передаваемого сигнала и геометрические размеры антенны и дисков определяют диаграмму направленности, коэффициент направленного действия (также коэффициент усиления) (рис. 2).

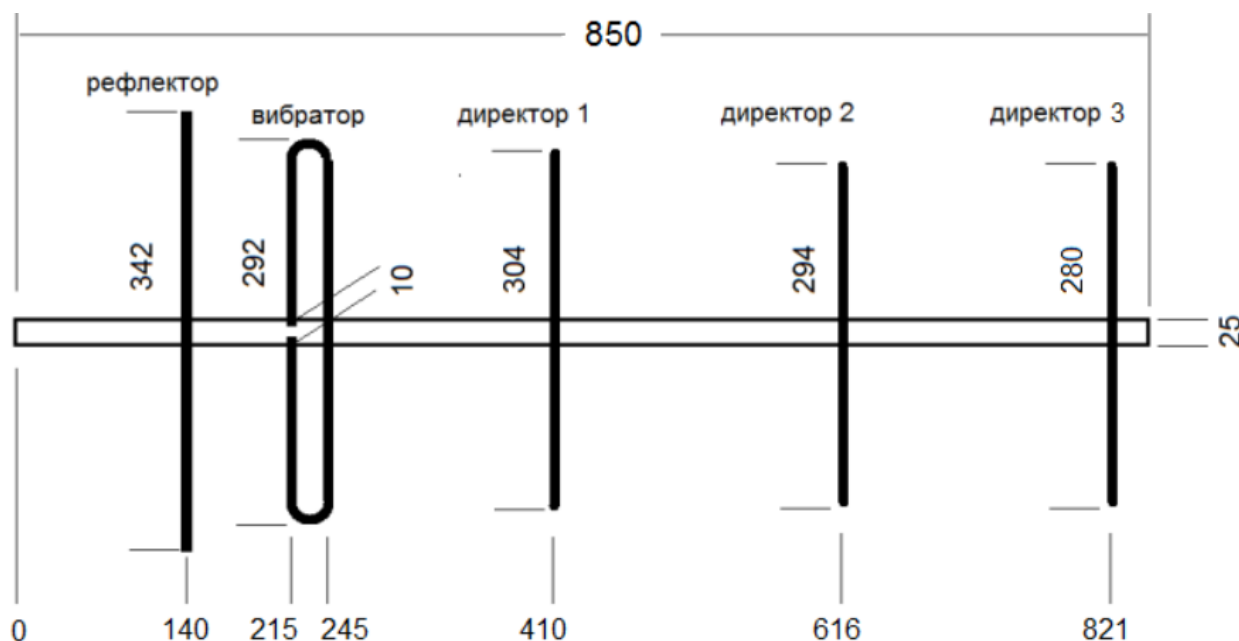


Рис. 2. Схема 5-элементной направленной антенны

Fig. 2. 5-element directional antenna circuit

Так, задавая частоту антенны f , длину антенны L как набор значений 0,3, 0,5, 0,7 и меняя отношение пропорции S/λ как набор значений 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, рассчитываются геометрические и

частотные характеристики антенны-пушки.

В сводной таблице 2 показаны расчетные базовые характеристики антенны для частоты $f = 2,4$ ГГц.

Таблица 2. Базовые характеристики антенны на частоте $f = 2,4$ ГГц**Table 2.** Basic antenna performance at $f = 2,4$ GHz

Частота, Гц	2400000000				
Длина антенны, м	0,3	0,5	0,7	0,9	1
Коэффициент замедления	1,208	1,125	1,089	1,069	1,063
КНД	17,28	28,8	40,32	51,84	57,6
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,2					
Период	0,125				
Количество дисков	12	20	28	36	40
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,006	0,005	0,005
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,5					
Период	0,0625				
Количество дисков	4,8	8	11,2	14,4	16
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,005
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,1					
Период	0,0125				
Количество дисков	24	40	56	72	80
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,006
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,3					
Период	0,0375				
Количество дисков	8	14	19	24	27
Радиус диска, м	0,011634336	0,008150159	0,006617157	0,005766308	0,005469525
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,4					
Период	0,05				
Количество дисков	6	10	14	18	20
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,005

Согласно полным данным при $0,1 < L < 1$ (м) с шагом 0,05 м, получен график зависимости коэффициента замедления (стоячей волны), который показывает его уменьшение практически

до оптимального значения [13], что определяет выбор большей длины антенны L при контроле потерь на боковые и задний лепестки в диаграмме направленности (рис. 3).

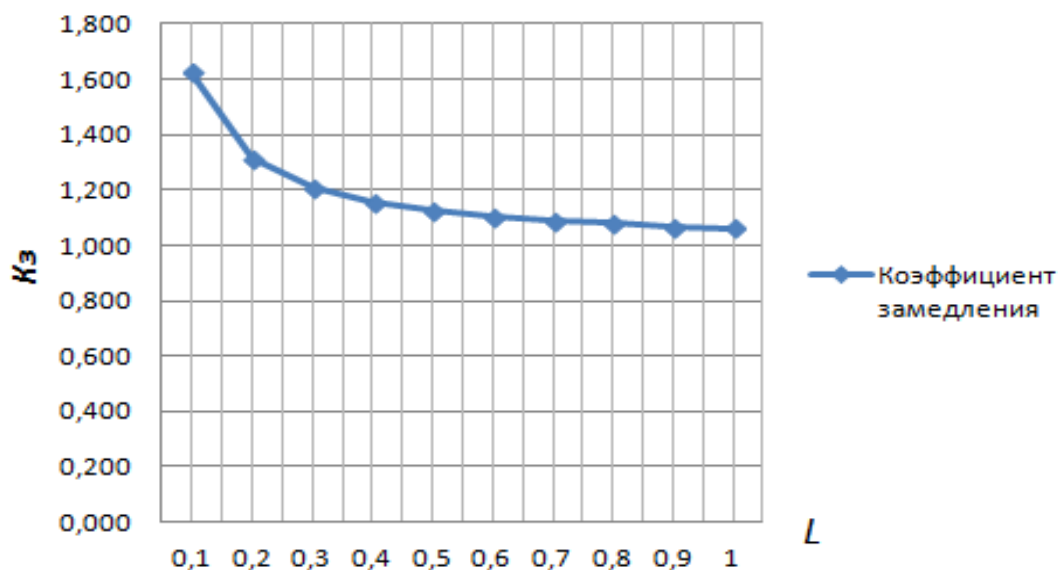


Рис. 3. График зависимости коэффициента замедления от длины L

Fig. 3. Deceleration factor vs. length L plot

При этом значение коэффициента направленного действия D линейно растет с увеличением длины L . Это свойство является следствием конструкции антенны-пушки, имеющей составную структуру в виде пассивных дисков, надетых с фиксированным периодом S на единый стержень антенны.

Принимая во внимание максимальную мощность сигнала 20 дБм и ограниченную дальность связи прямой видимостью, нужно определить максимальную дистанцию для передачи видео высокой чёткости (Full HD) с коптера на наземный пункт управления при эксплуатации в условиях чрезвычайной ситуации в метель [13].

Результаты и их обсуждение

Для проведения расчетов возьмем следующие значения параметров:

- коллинеарные антенны БПЛА и НКУ с коэффициентом усиления 8 дБи в диапазоне 2,4 ГГц;

- кодирование видеоизображения FullHD качества происходит с помощью видеокодера H.265 (HEVC);

- передача видеоизображения осуществляется с применением квадратурной амплитудной модуляцией КАМ-16 (QAM-16) и методов помехоустойчивого кодирования [14].

Мощность сигнала P_R на входе приемника НКУ определяется формулой

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L}, \quad (2)$$

где P_T – эффективно изотропно-излучаемая мощность, Вт; G_T – коэффициенты усиления передающей антенны; G_R – коэффициент усиления приемной антенны; L – энергетические потери сигнала в непрерывном канале связи ($L > 1$).

Мощность шума P_N , приведенная к входу приемника, вычисляется по следующей формуле:

$$P_N = N_0 B, \quad (3)$$

где $N_0 = kT_R$ – односторонняя спектральная плотность мощности шума, дБВт/Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; T_R – шумовая температура приемника, К; $B = 1/T$ – ширина полосы пропускания приемника при согласованной фильтрации, Гц; T – длительность символа, с.

Шумовая температура приемника НКУ определяется, прежде всего, шумовой температурой антенны, которая определяется по следующей формуле:

$$T_R \approx T_A = 290 \text{ К.} \quad (4)$$

Длительность передаваемого символа определяется по формуле

$$T = r_{FEC} \log_2 M / R, \quad (5)$$

где R – информационная скорость, бит/с; M – позиционность сигнала; r_{FEC} – результирующая кодовая скорость.

Таким образом, с учётом формул (2) – (5) ОШС на входе приёмника НКУ можно выразить следующим образом:

$$h^2 = \frac{P_R}{P_N} = \frac{E_S T}{N_0 B} = P_T G_T G_R \frac{r_{FEC} \log_2 M}{k T_R R L}, \quad (6)$$

где P_R – мощность сигнала; $P_N = N_0 B$ – мощность шума; $E_S = P_R T$ – средняя энергия символа.

Произведем расчет отношения сигнал / шум на входе приемника по следующей формуле [15]:

$$\begin{aligned} h_{[\text{дБ}]}^2 = & 228,6 + P_{T[\text{дБВт}]} + \\ & + G_{T[\text{дБи}]} + G_{R[\text{дБи}]} - 10 \lg T_R - \\ & - 10 \lg \frac{R}{r_{FEC} \log_2 M} - L_{[\text{дБ}]} . \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что для гарантии приёма с допустимой вероятностью ошибки P_{b0}

(10^{-6} для видеоинформации) необходимо, чтобы энергетический запас в линии связи Δh^2 превышал запас на общие замирания:

$$\Delta h^2 = h^2 - h_0^2 \geq h_{fad}^2, \quad (8)$$

где h_0^2 – ОШС, которое потенциально обеспечивает заданную вероятность битовой ошибки (пороговое отношение сигнал / шум), дБ; h_{fad}^2 – энергетический запас в линии связи на общие замирания, дБ. Запас на общие замирания примем равным 10 дБ, что применимо к большинству практических случаев.

Для сигналов КАМ-16 (QAM-16) пороговое отношение сигнал / шум составляет 20,6 дБ. Если использовать помехоустойчивое кодирование, то этот показатель может значительно уменьшиться. Например, если применять мощные корректирующие коды, такие как турбокоды Turbo 3/4 ($r_{FEC} = 0,75$) и Turbo 7/8 ($r_{FEC} = 0,875$) пороговое ОШС может быть уменьшено до 13,4 и 14,1 дБ соответственно [16].

Энергетические потери в непрерывном канале передачи рассчитываются по формуле как сумма энергетических потерь в различных условиях:

$$L = L_0 + L_g + L_r + L_p + L_c, \quad (9)$$

где L_0, L_g, L_r, L_p – энергетические потери: в свободном пространстве, в атмосферных газах, в гидрометеорах, из-за поляризационного рассогласования передатчика и приемника, в местах разъёмных соединений и фидере передатчика и приемника, соответственно в дБ.

Энергетические потери в свободном пространстве определяются из выражения [17]

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi \cdot 10^3 \cdot r}{\lambda} \right)^2 = 92,44 + 20 \lg r + 20 \lg f, \quad (10)$$

где r – длина канала передачи, км; $f = 0,3/\lambda$ – несущая частота сигнала, ГГц; λ – длина волны, м.

График зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния до беспилотного летательного аппарата в диапазоне частот 2,4 ГГц представлен ниже (рис. 4).

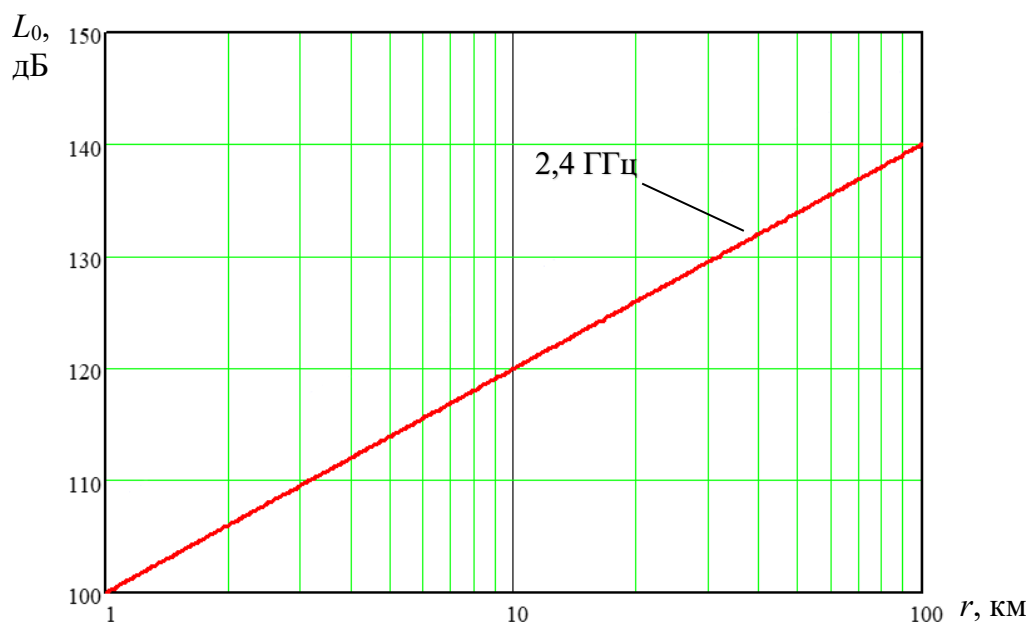


Рис. 4. График зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния между НКУ и БПЛА

Fig. 4. Graph of the dependence of energy losses in free space on the distance between the NKU and the UAV

На основе графика зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния между НКУ и БПЛА (рис. 4) можно сделать вывод, что энергетических потери составляют не более 120 дБ на протяженности до 10 км на частоте 2,4 ГГц.

Неидеальность частотных характеристик приемо-передающего радиотракта управления и приёма данных с БПЛА, пространственное и временное рассеяния сигнала в нерегламентированном

многолучевом канале распространения радиоволн приводят к появлению межсимвольной интерференции, которая является одним из основных факторов, препятствующих приему цифровых сигналов с требуемым качеством. Наиболее остро эта проблема стоит при приеме многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией, широко используемых в высокоскоростных цифровых линиях связи, где уровень межсимвольной помехи, как правило,

соизмерим или превышает уровень аддитивной гауссовской помехи.

Нестационарность многолучевого канала передачи сигнала обуславливает необходимость реализации при приеме сигналов адаптивной фильтрации в его демодуляторном устройстве, а в ряде случаев – и адаптивной поляризационной пространственно-временной обработки сигнала в антенном устройстве системы приема радиосигналов, что позволяет существенно снизить уровень межсимвольных искажений принимаемого сигнала. При этом в качестве критерия адаптации целесообразно использовать критерий минимума среднеквадратической ошибки. Характерной особенностью реализации указанного выше метода компенсации межсимвольных искажений является наличие в выходном сигнале остаточной межсимвольной помехи, которую нельзя характеризовать как аддитивный гауссовский шум, а следовательно, по отношению сигнал / помеха на входе устройства принятия решения однозначно судить о помехоустойчивости приема.

В связи с этим для задания требований к системам радиоприема по подавлению межсимвольных помех при приеме многопозиционных сигналов в нерегламентированном многолучевом канале целесообразно оценить влияние межсимвольной интерференции на помехоустойчивость поэлементного приема, при этом полагая, что устройство принятия решения реализует алгоритм,

оптимальный для канала без межсимвольных искажений.

Потери энергии из-за несоответствия поляризации составляют 3 дБ, а потери, не связанные с распространением радиоволн, равны 1 дБ. Кроме того, существуют потери, вызванные воздействием атмосферных газов и гидрометеоров в диапазоне до 6 ГГц, которыми можно пренебречь, т. к. они на расстоянии до БПЛА 10 км не превышают 0,1 дБ [18].

Графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD качества в диапазоне 2,4 ГГц с методами кодирования КАМ-16 Turbo 3/4 и 7/8, полученные с использованием формул (7) – (10), представлены ниже (рис. 5).

На основе графиков зависимости энергетического запаса в канале передачи между БПЛА и НКУ можно сделать следующие выводы:

- максимальное расстояние, на которое может передаваться видеоизображение FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 3/4 на частоте 2,4 ГГц, составляет 3,8 км;
- максимальное расстояние, на которое может передаваться видеоизображение FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 7/8 на частоте 2,4 ГГц, составляет 3,3 км.

В условиях метели существенное влияние на технические характеристики БПЛА оказывает ветер (табл. 3).

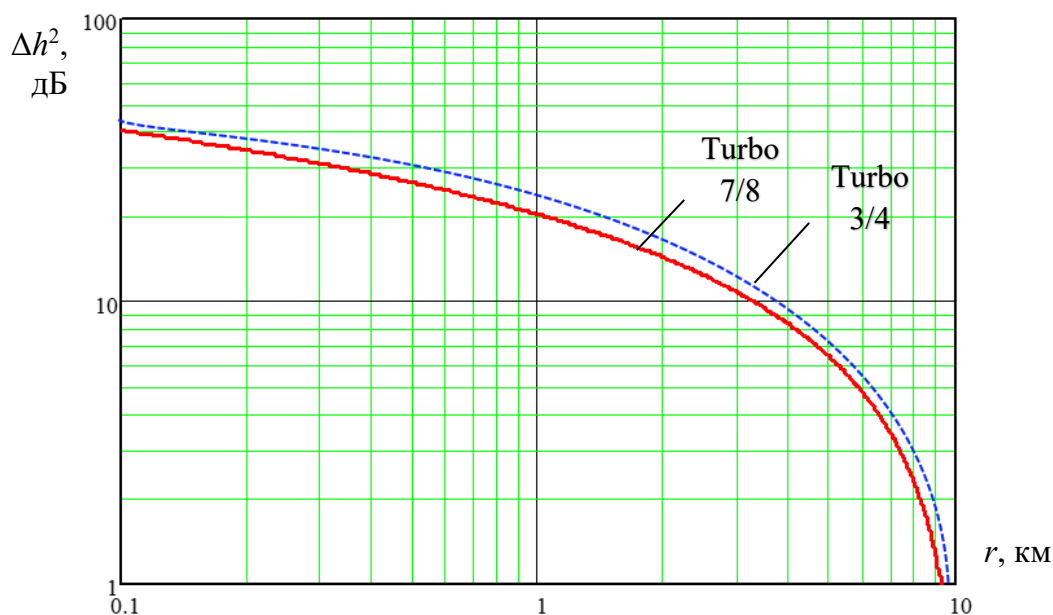


Рис. 5. Графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD (H.265) качества методом КАМ-16 Turbo 3/4 и 7/8 в диапазоне 2,4 ГГц

Fig. 5. Graphs of the dependence of the energy reserve in the transmission data channel between the UAV and the NKU when transmitting a video image Full HD (H.265) quality by КАМ-16 Turbo 3/4 and 7/8 in the 2.4 GHz band

Таблица 3. Основные параметры интенсивности метели [19]

Table 3. Main parameters of snowstorm intensity [19]

Интенсивность	Скорость ветра, м/с
Слабая	6–10
Обычная	10–20
Сильная	20–30
Очень сильная	30–40
Сверхсильная	40–90

Усиление ветра влияет на параметры БПЛА, такие как: максимальная удаленность БПЛА от НКУ, время функционирования БПЛА без подзарядки (дозаправки), максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде батареи (топливном баке) [20].

В качестве максимальной удаленности БПЛА от НКУ актуальнее использовать максимальную дальность передачи

видеоизображения FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 3/4 равное 3,8 км.

Максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде (топливном баке), зависит от направления ветра, где максимальное возможное расстояние достигается при попутном ветре, а минимальное – при встречном направлении

ветра. Рассчитываем максимальное расстояние по следующей формуле [21]:

$$a = \frac{V \cos \varphi + U \cos \varepsilon}{V}, \quad (11)$$

где V – скорость коптера, км/ч; U – скорость ветра, км/ч; ε – угол воздействия ветра в обычных условиях; φ – угол воздействия ветра в стандартных условиях.

При встречном ветре угол воздействия в обычных условиях на БПЛА

равен 180° , а в стандартных – 0° . При попутном ветре угол воздействия в обычных условиях на БПЛА равен 0° , а в стандартных – 0° .

Графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), БПЛА от скорости и направления ветра, полученные с использованием выражения (11), представлены ниже (рис. 6).

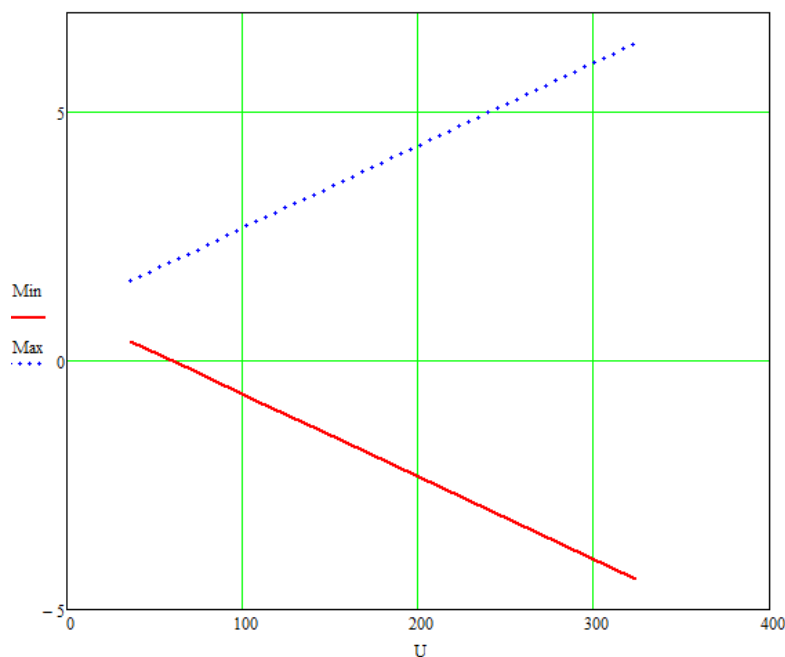


Рис. 6. Графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), БПЛА от скорости и направления ветра

Fig. 6. Graphs of the dependence of the maximum distance traveled by a single charge (fuel tank) of a UAV on wind speed and direction

Анализ графиков (рис. 6) демонстрирует следующее:

- максимальное расстояние, которое можно преодолеть на одном заряде (топливном баке), при попутном ветре составляет от 1600 до 6400 км при передаче видеоизображения методом КАМ-16 Turbo 3/4;

- максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде (топливном

баке), при встречном ветре составляет от 0 до 400 км при передаче видеоизображения методом КАМ-16 Turbo 3/4;

- при скорости ветра свыше 60 км/ч (16,7 м/с – средняя интенсивность) использование БПЛА в метель невозможно, поскольку риск авиационных происшествий достигает максимума. [22].

Выводы

Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что в данной статье получены следующие результаты:

1. Исследована максимальная дальность канала связи между БПЛА и НКУ, которая определяется прямой видимостью и слабо зависит от высоты подъёма антенны мобильного НКУ. При подъёме БПЛА на высоту от 100 до 500 м этот показатель составляет от 40 до 85 км.

2. Получены графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD качества методами КАМ-16 Turbo 3/4 и Turbo 7/8.

3. Исследованы максимальные расстояния для передачи видеоизображения

в формате FullHD, которые варьируются от 3,3 до 3,8 км на частоте 2,4 ГГц.

4. Получены графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), микроБПЛА от скорости и направления ветра.

5. Оценена максимальная скорость встречного ветра, не позволяющая использовать микроБПЛА в условиях метели, которая составляет от 16,7 м/с.

Результаты проведенных исследований в дальнейшем могут стать теоретической базой для последующего проектирования БПЛА разведывательного типа, целевая функция которых заключается в передаче видеоинформации качества FullHD.

Список литературы

1. Колосов П. Удалённый мониторинг водных ресурсов с помощью ИИ и БПЛА // Control Engineering Россия. 2022. № 1 (97). С. 58–59.
2. Костин П. И. Мониторинг лесных пожаров при помощи БПЛА // Вестник науки и образования. 2022. № 1-2 (121). С. 56–58.
3. Кутузов В. И., Андриянов Н. А. Разработка системы связи для систем мониторинга местности с использованием БПЛА // Радиоэлектронная техника. 2019. № 1 (12). С. 176–179.
4. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.
5. Зиновьев Е. С., Сатишев Р. П., Павленко С. А. Применение ГИС «Оператор» в комплексах с БПЛА для оперативной обработки и анализа геоинформационных данных // Вестник науки. 2023. Т. 1, № 12 (69). С. 821–829.

6. Попов Н. И., Ефимов С. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2012. № 1 (1). С. 149–151.

7. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научные технологии, 2022. 204 с.

8. Особенности построения связи по радиоканалу на современных БПЛА / Б. Э. Дажунц, А. А. Тазетдинов, И. Н. Бабушкин, И. В. Лушпай // Студенческий форум. 2022. № 17-2 (196). С. 65–66.

9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

10. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2017. 175 с.

11. Старовойтов Е. И. Навигационное обеспечение мониторинга подстилающей поверхности БПЛА с пассивным оптическим датчиком // Радиостроение. 2020. № 5. С. 13–41.

12. Чжоу В., Рентюк В. Использование программно-определяемого радио для передачи видео высокого разрешения в реальном масштабе времени в БПЛА-приложениях // Компоненты и технологии. 2017. № 6 (191). С. 82–87.

13. Основные направления создания высоконадёжной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Боцва, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.

14. Невзоров Ю. В., Фомина И. А. Управление БПЛА с учётом степени помехозащищённости связи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 44–46.

15. 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.

16. 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.

17. Диденко М. Г. Радиосигналы в спутниковых системах связи // Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание. Технологии и средства связи. 2004. № 5 (44). С. 76–82.
18. Разработка OCDM системы для организации информационного обмена группы БПЛА / Л. Н. Казаков, А. Б. Царев, Н. В. Соловьев, М. И. Махов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9, № 4. С. 51–56.
19. Айрапетов А. Б., Катунин А. В., Тимербулатов А. М. Аэродинамическое проектирование планера многоцелевого микроБПЛА // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 81–89.
20. Игнатов Р. А. Выбор протокола маршрутизации для беспроводной сенсорной сети БПЛА слежения за развитием лесных пожаров // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 3.
21. 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.
22. Карцев Н. В., Салыкова О. С. Планирование траектории полёта БПЛА // Образование и наука в современных условиях. 2016. № 1 (6). С. 266–268.

References

1. Kolosov P. Remote monitoring of water resources using AI and UAVs. *Control Engineering Rossiya = Control Engineering Russia*. 2022;(1):58–59. (In Russ.)
2. Kostin P.I. Monitoring forest fires using UAVs. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of Science and Education*. 2022; (1-2):56–58. (In Russ.)
3. Kutuzov V.I., Andriyanov N.A. Development of a communication system for terrain monitoring systems using UAVs. *Radioelektronnaya tekhnika = Radio-Electronic Engineering*. 2019;(1):176–179. (In Russ.)
4. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 204 p. (In Russ.)
5. Zinoviev E.S., Satishev R.P., Pavlenko S.A. Application of GIS «Operator» in complexes with UAVs for operational processing and analysis of geoinformation data. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2023;(12):821–829. (In Russ.)
6. Popov N.I., Efimov S.V. The use of unmanned aerial vehicles in the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsii = Problems of Ensuring Safety During Liquidation of Consequences of Emergency Situations*. 2016;(1):149–151. (In Russ.)

7. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. 204 p. (In Russ.)
8. Dazhunts B.E., Tazetdinov A.A., Babushkin I.N., Lushpay I.V. Features of building radio communications on modern UAVs. *Studencheskii forum = Student Forum*. 2022;(17-2):65–66. (In Russ.)
9. Sklyar B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application, 2nd ed. Moscow: Williams; 2003. 1104 p. (In Russ.)
10. Dovbnya V.G., Asiatsev V.E., Mikhailov S.N. Noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2017. 175 p. (In Russ.)
11. Starovoitov E.I. Navigation support for monitoring the underlying surface of a UAV with a passive optical sensor. *Radiostroenie = Radio Engineering*. 2020;(5):13–41. (In Russ.)
12. Zhou W., Rentyuk V. Using software-defined radio for transmitting high-resolution video in real time in UAV applications. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2017;(6):82–87. (In Russ.)
13. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsva V.V., Naumkin A.V. Main directions for creating a highly reliable communication and control system for UAVs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)
14. Nevzorov Yu.V., Fomina I.A. Control of UAVs taking into account the degree of communication noise immunity. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya = Systems and Means of Communication, Television and Radio Broadcasting*. 2013;(1-2):44–46. (In Russ.)
15. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Estimation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy-chislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)
16. Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhiev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N. Research of permutation decoding algorithms in UAV control systems. *Agrarnaya nauka = Agricultural Science*. 2022;(11):133–140. (In Russ.)
17. Didenko M.G. Radio signals in satellite communication systems. *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Tekhnologii i sredstva svyazi = Satellite Communications and Broadcasting*, 2004;(5):76–82. (In Russ.)

18. Kazakov L.N., Tsarev A.B., Solovyov N.V., Makhov M.I. Development of an OCDM system for organizing information exchange of a group of UAVs. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Systems for Synchronization, Generation and Signal Processing*. 2018;9(4):51–56. (In Russ.)
19. Airapetov A.B., Katunin A.V., Timerbulatov A.M. Aerodynamic design of a multi-purpose micro-UAV airframe. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2019;23(2):81–89. (In Russ.)
20. Ignatov R.A. Selection of a routing protocol for a wireless UAV sensor network for monitoring the development of forest fires. *APRIORI. Ceriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = APRIORI. Series: Natural and Technical Sciences*. 2018;(3):3. (In Russ.)
21. Sushchenko O.A., Bezkorovayny Yu.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.)
22. Kartsev N.V., Salykova O.S. Planning the flight path of a UAV. *Obrazovanie i nauka v sovremennykh usloviyakh = Education and Science in Modern Conditions*. 2016;1(6):266–268. (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

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

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

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

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@mai

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

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