

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья
УДК 681.7.014.3
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183458>
EDN: <https://www.elibrary.ru/PIPSEX>

ВАРИАНТ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТИ ВОЗДУШНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Александр Сергеевич Чичканов

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

Воронеж, Россия

a_chichkanov1983@mail.ru

Аннотация. В настоящее время все большее внимание уделяется техническому совершенствованию и разработке новых форм и способов применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Тип полезной нагрузки определяет перечень задач, решаемых ими при ведении вооруженной борьбы, в интересах охраны государственной границы и морского пограничного пространства, в интересах обеспечения общественной безопасности и ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также гражданского сектора экономики. Немаловажным фактором в ходе выполнения этих задач является возможность организации высокоскоростной передачи данных полезной нагрузки с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления с целью своевременной обработки информации всеми категориями заинтересованных лиц. Одновременно с возрастанием интенсивности

применения беспилотных летательных аппаратов выявляются проблемные технические аспекты их эксплуатации и управления. Одним из таких аспектов является несоответствие принципов организации связи в сетях воздушной радиосвязи современным требованиям по скорости передачи данных на наземный пункт управления. В статье рассмотрен вариант повышения скорости передачи информации в сети воздушной радиосвязи с использованием OFDM сигналов, учитывающий нестационарность передаваемого трафика на конечных этапах выполнения задач воздушной разведки с применением беспилотных летательных аппаратов. Повышение скорости осуществляется за счет высвобождаемого частотного ресурса, который формируется с использованием алгоритма адаптивного изменения частоты следования кадров видеопотока в системе связи беспилотный летательный аппарат - наземный пункт управления в зависимости от фоноцелевой обстановки в секторе обзора бортовой видеокамеры.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, сеть воздушной радиосвязи, мониторинг земной поверхности, фоноцелевая обстановка, частота следования кадров, объект интереса, частотный ресурс, скорость передачи информации

Для цитирования: Чичканов А.С. Вариант повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183458>

Original article

AN OPTION TO INCREASE THE DATA TRANSFER RATE IN THE AIR RADIO NETWORK

Alexander S. Chichkanov

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

a_chichkanov1983@mail.ru

Abstract. Currently, more and more attention is being paid to technical improvement and the development of new forms and methods of using complexes with unmanned aerial vehicles. The type of payload determines the list of tasks solved by UAVs in the conduct of armed struggle, in the interests of protecting the state border and maritime border space, in the interests of ensuring public safety and emergency response, as well as in the interests of the civilian sector of the economy. An important factor in the course of performing these tasks is the possibility of organizing high-speed data transmission of the payload from an unmanned aerial vehicle to a ground control point in order to timely process information by all categories of interested parties. Simultaneously with the increasing intensity of the use of unmanned aerial vehicles, problematic technical aspects of their operation and management are being identified. One of these aspects is the inconsistency of the principles of the organization. The article considers a variant of increasing the speed of information transmission in the air radio network using OFDM signals, taking into account the non-stationarity of the transmitted traffic at the final stages of performing aerial reconnaissance tasks using unmanned aerial vehicles. The speed increase is carried out due to the released

frequency resource, which is formed using an algorithm for adaptive change in the frame rate of the video stream in the communication system of an unmanned aerial vehicle - a ground control point, depending on the phono-target situation in the field of view of the on-board video camera.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aerial radio communication network, monitoring of the Earth's surface, phono-target environment, frame rate, object of interest, frequency resource, information transfer rate

For citation: Chichkanov A.S. An option to increase the data transfer rate in the air radio network. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183458>

Введение

Анализ процессов управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) в ходе решения типовых задач беспилотной авиацией показывает, что сеть воздушной радиосвязи (СВРС) является основным средством управления одиночными и групповыми действиями БЛА. В этой сети осуществляется передача команд с наземного пункта управления (НПУ) на борт БЛА и между БЛА, как абонентами одной сети, их воспроизведение для решения задач траекторного управления, информационного обеспечения, передачи данных целевой нагрузки (ЦН) и управления аппаратурой БЛА [1]. Интенсивность передачи в канале связи БЛА-НПУ (КС) при следовании в район выполнения поставленных задач может быть

невысокой, однако она значительно возрастает при входе в зону проведения мониторинга земной поверхности (МЗП) [2].

С увеличением интенсивности использования БЛА становятся очевидными некоторые технические аспекты, связанные с их эксплуатацией и управлением. Одним из таковых является несоответствие принципов организации СВРС, которая включает в себя группу БЛА-абонентов, выполняющих задачи в определенном районе, современным требованиям к скорости передачи разведывательных данных на наземные пункты управления (НПУ) [3]. Это особенно заметно в случае рассмотрения БЛА, осуществляющих МЗП. При этом актуальным является учет нестационарности трафика, передаваемого в системе связи БЛА-НПУ в зависимости от фоноцелевой обстановки (ФЦО) – количества объектов интереса (ОИ) в секторе обзора БЛА в текущий момент времени.

Постановка задачи

В [4] предложен алгоритм адаптивного изменения частоты следования кадров (ЧСК) при передаче разведывательной видеоинформации в системе связи БЛА-НПУ. Алгоритм подразумевает, что частота их следования изменяется от 1 до 25 кадров в секунду в зависимости от количества находящихся в зоне обзора БЛА ОИ. Эта частота выбирается после выполнения предварительной обработки видеоинформации на борту БЛА, для производства которой целесообразно использование известных алгоритмов на основе энергетического функционала [5]. Максимальная ЧСК используется при количестве ОИ равном восьми и более с учетом физиологических возможностей человека и вариантов ФЦО [6-8]. При этом, если ОИ

отсутствуют, то достаточно передачи одного кадра в секунду для иллюстрации сцены наблюдения оператору БЛА. С увеличением количества ОИ для исключения потери разведывательной информации соответственно увеличивается текущая ЧСК вплоть до максимального значения (25 кадров в секунду). Она будет определяться выражением [4]:

$$f_{тек} = f_{макс} \frac{N_{тек}}{N_{макс}} \quad (1)$$

где $N_{тек} = 1 \dots 8$ – текущее количество ОИ;

$f_{макс}$ - максимальная ЧСК ($f_{макс} = 25$ Гц);

$N_{макс} = 8$ - максимальное количество ОИ.

Пропорционально ЧСК будет изменяться объем передаваемой по КС информации в единицу времени, то есть трафик будет варьироваться в зависимости от ФЦО, иметь нестационарный характер, что не учитывается в современных технических средствах СВРС. Отсутствие учета нестационарного характера трафика в КС ведет к появлению неучтенной задержки передачи команд и данных в СВРС на наиболее важных этапах выполнения БЛА поставленных задач.

Возможным выходом из данной ситуации является повышение скорости передачи данных в СВРС за счет внедрения адаптивного распределения частотно-временного ресурса СВРС по отдельным КС с учетом ФЦО в зоне ведения МЗП и в зависимости от интенсивности передаваемого по ним трафика.

В данной работе принят за основу общий подход, представленный в работах [9-13], однако в дополнение к нему следует учесть дополнительные возможности, появляющиеся, в том числе, вследствие изменения ЧСК:

- высвобождение частотного ресурса в результате изменения ЧСК видеоинформации в системе связи БЛА-НПУ и передача его в СВРС;
- распределение временного ресурса путем адаптивного изменения паузы захвата канала множественного доступа (КМД) СВРС;
- адаптивное использование высвобождаемого частотного ресурса, в случае если суммарные требования по скоростям всех КС не могут быть обеспечены распределением временного ресурса СВРС.

Цель работы - повышение скорости передачи данных в СВРС за счет адаптивного распределения временного и частотного ресурсов с учетом ФЦО и интенсивности передаваемого трафика.

Использование OFDM сигналов при передаче данных в СВРС

В [14] представлена методика повышения скорости передачи данных, которая может быть обобщена на случай КС СВРС. Она основывается на прогнозируемых значениях интенсивности трафика и позволяет увеличить скорости передачи данных в тех КС, в которых она недостаточна для своевременной передачи команд управления и данных информационного обеспечения. Это осуществляется за счет каналов, в которых скорость передачи данных избыточна относительно передаваемой интенсивности трафика.

Вся совокупность канального ресурса СВРС может быть представлена множеством отдельных частотных каналов, каждый из которых представляет собой КМД. Ресурс каждого КМД разделяется между абонентами (отдельными БЛА) по времени в соответствии с алгоритмом случайного множественного доступа.

В случае, если адаптивного распределения временных ресурсов СВРС, окажется недостаточно для обеспечения необходимой абонентам скорости передачи данных, методикой предусмотрено выделение дополнительных частотных ресурсов за счет выделения дополнительных частотных каналов (которые соответствуют дополнительным КМД) для абонентов СВРС с повышенной интенсивностью передачи трафика.

Однако данной методике присущ существенный недостаток, заключающийся в том, что в результате увеличения количества частотных каналов, используемых каждым абонентом, увеличивается полоса используемых СВРС частот, и, как следствие, снижается спектральная эффективность передаваемых сигналов, что является негативным фактором, пренебрегать которым нельзя. Наиболее удобно в данном случае, с учетом удовлетворения требований по пропускной способности каналов связи, использовать алгоритм адаптивного изменения ЧСК в зависимости от ФЦО с применением технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) [15].

Если рассматривать OFDM сигнал как совокупность ортогональных частотных составляющих-поднесущих [16], то весь объем информации, передаваемой по каналу связи БЛА-НПУ, будет делиться между этими поднесущими и характеризоваться определенной скоростью передачи данных на отдельной поднесущей в единицу времени V_{OFDM_k} . Сумма этих скоростей будет равна общей пропускной способности КС.

$$V_{\text{макс}} = V_{OFDM} = \sum_{n=1}^N V_{OFDM_n}, \quad (2)$$

где n - количество частотных составляющих (поднесущих) в полосе частот канала связи БЛА-НПУ.

Преимуществом OFDM-сигнала является возможность восстановления информации с применением вариантов помехоустойчивого кодирования при подавлении помехой части спектра частот [17]. Использование OFDM сигналов позволяет адаптивно, в зависимости от объема передаваемой по каналу связи информации, изменять «активную» ширину спектра сигнала - количество частотных составляющих, на которых в данный момент времени производится передача информации. При этом, если количество ОИ в секторе обзора БЛА менее восьми [4], то в полосе частот OFDM сигнала за счет изменения ЧСК появляются незадействованные для передачи (свободные) частотные составляющие. Они формируют высвобождаемый частотный ресурс, который может быть использован для повышения скорости передачи информации в СВРС путем предоставления дополнительной пропускной способности абонентам сети с высокой интенсивностью трафика.

Расчет максимальной скорости передачи данных в канале связи БЛА-НПУ

Выделяемый в СВРС трафик характеризуется $V_{высв}$ - скоростью потока данных, высвобождаемых в результате изменения ЧСК видеопотока, передаваемого в системе связи БЛА-НПУ. Максимальная скорость передачи информации в канале связи с использованием OFDM сигналов равна сумме скоростей потока данных, передаваемых ЦН БЛА на НПУ относительно текущей обстановки в зоне обзора $V_{тек}$ и высвобождаемого потока данных $V_{высв}$:

$$V_{макс} = V_{тек} + V_{высв}, \quad (3)$$

Максимальная и текущая скорость передачи информации зависят от частоты следования кадров видеопотока и связаны выражением [4]:

$$V_{тек} = V_{макс} \frac{f_{тек}}{f_{макс}}. \quad (4)$$

С учетом выражения (1) текущая скорость будет равна:

$$V_{тек} = V_{макс} \frac{N_{тек}}{N_{макс}} \quad (5)$$

Подставив (5) в (3), получим выражение для расчета $V_{высв}$ в зависимости от количества ОИ:

$$V_{высв} = V_{макс} - V_{тек} = V_{макс} \left(1 - \frac{N_{тек}}{N_{макс}}\right) \quad (6)$$

По теореме К. Шеннона [18] максимальная скорость передачи данных по каналу с шумом равняется:

$$V_{макс} = \Delta F_{макс} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right), \quad (7)$$

где S/N – соотношение сигнал-шум в канале (ОСШ);

$\Delta F_{макс}$ - ширина полосы частот исходного сигнала.

С учетом (6) и (7) получим выражение для расчета ширины полосы частот $\Delta F_{тек}$, соответствующей основному каналу передачи разведывательной информации и полосы частот $\Delta F_{высв}$ потока данных, высвобождаемого в результате изменения ФЦО, соответственно:

$$\Delta F_{тек} = \frac{N_{тек}}{N_{макс}} \Delta F_{макс}, \quad (8)$$

$$\Delta F_{высв} = \left(1 - \frac{N_{тек}}{N_{макс}}\right) \Delta F_{макс}. \quad (9)$$

Так как одна из основных задач БЛА - выполнение МЗП, то, для обеспечения стабильности качества связи с НПУ необходимо рассмотреть одинаковые значения ОСШ на каждой поднесущей OFDM сигнала в полосе частот основного канала передачи разведывательной информации, и соответствующие им значения M информационной емкости [14]. Информационная емкость определяется количеством бит, передаваемых на одной поднесущей за один тактовый интервал в зависимости от сигнально-кодовой конструкции (СКК) и ОСШ. С учетом этого, а также теоремы Шеннона, текущая скорость передачи информации с использованием OFDM сигнала будет равна:

$$V_{тек} = \Delta F_{тек} \log_2(1 + Q)M, \quad (10)$$

где Q – отношение сигнал-шум в полосе частот канала передачи разведывательной информации БЛА-НПУ.

В рассматриваемом случае, высвобождаемый в результате адаптивного изменения ЧСК частотный ресурс передается в интересах СВРС с пакетной передачей информации, в которой предусмотрен вариант организации обходных (резервных) маршрутов передачи сетевой информации, в случае «выпадания» из сети БЛА в качестве абонента-донора. При этом возможен более гибкий подход к использованию этого ресурса, предусматривающий адаптивное изменение вариантов СКК на каждой поднесущей в зависимости от ОСШ.

Предлагается рассмотреть вариант, при котором каждая поднесущая OFDM сигнала образует отдельный подканал с соответствующим ему значением ОСШ. Тогда, скорость потока данных, формируемых отдельным подканалом, будет вычисляться выражением:

$$V_{\text{высв } k} = \Delta F_{\text{высв } k} \log_2(1 + q_k) M_k, \quad (11)$$

где $\Delta F_{\text{высв } k}$ - ширина отдельного подканала в полосе высвобождаемых частот;

M_k - информационная емкость k – того подканала.

С учетом вышеизложенного и выражения (2), скорость передачи всего высвобождаемого трафика $V_{\text{высв}}$ будет равна сумме скоростей информационных потоков, формируемых каждым подканалом:

$$V_{\text{высв}} = \sum_{k=1}^K \Delta F_{\text{высв } k} \log_2(1 + q_k) M_k. \quad (12)$$

Обозначим Δf частотный интервал между поднесущими OFDM сигнала, тогда выражение, определяющее размер полосы частот отдельного k -того подканала будет иметь вид:

$$\Delta F_{\text{высв } k} = k \Delta f. \quad (13)$$

Следовательно, ширина высвобождаемой полосы частот равна:

$$\Delta F_{\text{высв}} = k \Delta f. \quad (14)$$

С учетом (14) выражение (12) примет вид:

$$V_{\text{высв}} = \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + q_k) M_k. \quad (15)$$

Максимальная ширина полосы частот, при условии, что n -количество поднесущих в полосе частот исходного сигнала (без выделения частотного ресурса в СВРС), будет равна:

$$\Delta F_{\text{макс}} = n \Delta f. \quad (16)$$

Тогда выражение (9) можно записать в виде:

$$\Delta F_{\text{высв}} = \left(1 - \frac{N_{\text{тек}}}{N_{\text{макс}}}\right) \Delta F_{\text{макс}} = \left(1 - \frac{N_{\text{тек}}}{N_{\text{макс}}}\right) n \Delta f. \quad (17)$$

Используя выражения (14) и (17), получим:

$$\kappa = n \left(1 - \frac{N_{\text{тек}}}{N_{\text{макс}}}\right) \quad (18)$$

Максимальная скорость передачи на основании (3), (10) и (15) будет равна:

$$V_{\text{макс}} = \Delta F_{\text{тек}} \log_2(1 + Q)M + \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + q_k)M_k \quad (19)$$

Используя выражения (8) и (16), получим:

$$V_{\text{макс}} = \frac{N_{\text{тек}}}{N_{\text{макс}}} n \Delta f \log_2(1 + Q)M + \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + q_k)M_k \quad (20)$$

Так как $\Delta F_{\text{макс}}$ задается параметрами КС, то согласно (15) скорость потока данных, высвобождаемого в результате адаптивного изменения ЧСК, определяется количеством ОИ в секторе обзора БЛА-разведчика, количеством поднесущих и ОСШ в каждой поднесущей.

Выражение (20) показывает, что максимально достижимая скорость суммарного трафика, получаемого при сложении потока данных разведывательной информации и высвобождаемого потока данных будет определяться следующими динамически изменяющимися параметрами:

- количеством объектов интереса в секторе обзора ЦН БЛА;
- ОСШ в полосе частот канала передачи разведывательной информации;
- информационной емкостью каждого подканала.

В таблице 1 приведены результаты расчета скорости потока данных $V_{высв}$, высвобождаемых в результате изменения ЧСК видеоинформации в зависимости от ФЦО, сформированные на основании выражения (15) для исходного сигнала с полосой частот 5 МГц при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в перспективном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи. Расчеты показывают, что с увеличением количества ОИ в зоне обзора СТЗ БЛА скорость высвобождаемого потока данных уменьшается и наоборот. Представленные в таблице различные варианты СКК, ориентированные на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС для гауссовской модели распространения радиоволн, позволяют повысить скорость передачи данных на отдельных поднесущих OFDM сигнала в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки [19, 20].

Таблица 1. Итоговая зависимость высвобождаемой скорости передачи данных от ФЦО, Мбит/с

Значение ОСШ, дБ	Тип сигнала, скорость кодирования	Количество объектов интереса в зоне обзора СТЗ БЛА/ частота следования кадров видеоинформации, Гц								
		0/1	1/3	2/6	3/9	4/12	5/15	6/18	7/21	8/25
4,5	QPSK, $R=1/2$	24,6	21,5	18,4	15,3	12,3	9,2	6,1	3,0	0
10	QPSK, $R=2/3$	59,2	51,7	44,4	36,9	29,6	22,1	14,8	7,3	0
13	16QAM, $R=2/3$	97,3	85,0	72,9	60,7	48,6	36,4	24,3	12,1	0
16	16QAM, $R=3/4$	138,1	120,7	103,6	86,2	69,1	51,6	34,5	17,1	0
18	64QAM, $R=2/3$	180,6	157,8	135,4	112,7	90,3	67,5	45,1	22,3	0

20	64QAM, $R=3/4$	224,5	196,2	168,4	140,1	112,2	83,9	56,1	27,8	0
22	64QAM, $R=5/6$	269,7	235,8	202,3	168,3	134,9	100,9	67,4	33,4	0
26	64QAM, $R=7/8$	317,3	277,3	237,9	198,5	158,7	118,7	79,3	39,3	0

В таблице 2 представлены данные, отражающие скорости потоков трафика, формируемого техническими средствами разведки на борту БЛА наблюдения [19]. Сравнительный анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2 показывает, что даже при фиксации ЦН БЛА семи ОИ при различных значениях ОСШ, размер высвобождаемого при этом частотного ресурса, предоставляемого в СВРС, позволит с его помощью передавать данные аппаратуры разведки любого типа.

Таблица 2. Потоки трафика, формируемые техническими средствами разведки на борту БЛА наблюдения

Тип аппаратуры разведки	Кол-во аппаратуры	Интенсивность потока данных с учетом предварительного сжатия
ТВ-камера	1-4	2-6 Мбит/с
Фотокамера	1-4	до 4 Мбит/с
Тепловизионная аппаратура	1-4	до 0,5 Мбит/с
Лазерная аппаратура	1	до 0,5 Мбит/с
РЛС	1	до 10 Мбит/с

РТР аппаратура (с обработкой сигналов РЛС на борту)	1	0,2-1 Мбит/с
РР аппаратура (с обработкой сигналов связных РЭС на борту, без передачи радиопереговоров)	1	0,2-1 Мбит/с

Выводы

Итогом работы является формирование варианта повышения скорости передачи трафика в КС управления и передачи данных ПН БЛА при работе в СВРС за счет адаптивного распределения временного и частотного ресурсов, который учитывает следующие факторы:

- интенсивность передаваемого в СВРС трафика;
- помеховую обстановку в полосе частот OFDM сигнала;
- особенности ФЦО в секторе обзора БЛА.

Повышение суммарной скорости передачи информации в СВРС позволит расширить возможности по применению БЛА различного класса и назначения и более эффективно решать следующие задачи:

- выделение трафика под канал управления при постановке отдельной задачи группе БЛА, первоначально действующей в составе роя;
- предоставление дополнительного канала связи с НПУ для выполнения попутной доразведки местности БЛА, выполняющими задачи в составе роя;
- организация каналов связи с пилотируемой авиацией;
- включение в СВРС дополнительных НПУ для более эффективного обмена РИ

и т.д.

Использование высвобождаемого частотного ресурса предоставит дополнительные возможности по увеличению скорости передачи информации для абонентов СВРС с различной интенсивностью трафика, что в конечном итоге позволит повысить вероятность выполнения БЛА поставленных задач.

Список источников

1. Макаренко С.И., Иванов М.С. Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы: монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2018. – 898 с.
2. Чичканов А.С., Богословский Е.А. Адаптивное изменение частоты следования кадров видеоинформации в системе связи беспилотный летательный аппарат-наземный пункт управления // XII Международная научно-практическая конференция «Научные чтения имени А.С. Попова» (Воронеж, 13-15 марта 2024): сборник статей. - Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2024. С. 223-231.
3. Богословский Е.А. и др. Прикладные задачи навигации, связи и управления. Методы анализа и синтеза: монография. - М.: Радиотехника, 2015. - 160 с.
4. Петровичев Е.И. Нейросетевая технология в системах искусственного интеллекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. S11. С. 135-146.
5. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. - М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
6. Люди могут следить за восемью движущимися объектами одновременно. URL: <https://newsland.com/post/3799320-liudi-mogut-sledit-za-vosemiu-dvizhushchimisya-obektami-odnovremenno>

7. Новиков Е.А., Павлов А.Р., Зиннуров С.Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 14-23.
8. Топорков И.С., Ковальский А.А., Зиннуров С.Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании разнородного нестационарного трафика // Известия Института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 37-47.
9. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79-86.
10. Новиков Е.А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 78-83.
11. Зиннуров С.Х., Ковальский А.А., Митряев Г.А. Решение задачи оптимального планирования радиоресурса спутниковой системы связи для сеансов управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 67-74.
12. Иванов М.С., Пономорев А.В., Макаренко С.И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104-139. DOI: [10.24412/2410-9916-2022-1-104-139](https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-1-104-139)

13. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. - М.: Издательство «Горячая линия-Телеком», 2017. - 360 с.
14. Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 2. Исследование достигаемого повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 220-243.
15. Макаренко С.И., Бородинов Р.В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. № 1 (73). С. 65-79.
16. Буренко Е.А. Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)
17. Шипко В.В. Помехоустойчивое комплексирование мульти- и гиперспектральных изображений в оптико-электронных комплексах информационного обеспечения современных и перспективных вертолетов // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112863>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-12)
18. Алиева Г.В., Гусейнов О.А. Вопросы построения адаптивного режима полета разведывательного беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178471>
19. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех // Труды

МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174611>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)

20. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Кн.1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: монография. - М.: Радиотехника, 2016. - 512 с.

References

1. Makarenko S.I., Ivanov M.S. *Setetsentricheskaya voina – printsipy, tekhnologii, primery i perspektivy* (Setecentricheskaya vojna – principy, tekhnologii, primery and perspektivy). Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii Publ., 2018. 898 p.

2. Chichkanov A.S., Bogoslovskii E.A. Adaptive change in the frequency of video information frames in the communication system unmanned aerial vehicle-ground control point. *XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauchnye chteniya imeni A.S. PopovA»* (Voronezh, 13-15 March, 2024): sbornik statei. Voronezh: VUNTS VVS «VVA» Publ., 2024. P. 223-231.

3. Bogoslovskii E.A. et al. *Prikladnye zadachi navigatsii, svyazi i upravleniya. Metody analiza i sinteza* (Applied tasks of navigation, communication and management. Methods of analysis and synthesis). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2015. 160 p.

4. Petrovichev E.I. Neural network technology in artificial intelligence systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2008. S11. P. 135-146. (In Russ.)

5. Forsait D., Pons Zh. *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyi podkhod* (Computer vision. A modern approach). Moscow: Vil'yams Publ., 2004. 928 p.

6. *People can monitor eight moving objects at the same time.* URL: <https://newsland.com/post/3799320-liudi-mogut-sledit-za-vosemi-dvizhushchimisia-obektami-odnovremenno>
7. Novikov E.A., Pavlov A.R., Zinnurov S.Kh. Method of operational planning of the time-frequency resource of a repeater satellite with a non-stationary input stream of messages. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2014. No. 5. P. 14-23. (In Russ.)
8. Toporkov I.S., Koval'skii A.A., Zinnurov S.Kh. Model and algorithm for managing the process of reserving a satellite communication network resource when servicing heterogeneous non-stationary traffic. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki*. 2016. V. 1, No. 39. P. 37-47. (In Russ.)
9. Novikov E.A. Operational distribution of the radio resource of a repeater satellite with a non-stationary input stream of messages, taking into account the delay in control. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2014. No. 2 (69). P. 79-86. (In Russ.)
10. Novikov E.A. Application of structural dynamics models in solving the problem of distribution of the time-frequency resource of a satellite communication network based on the DVB-RCS standard. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2013. No. 3. (64). P. 78-83. (In Russ.)
11. Zinnurov S.Kh., Koval'skii A.A., Mitryaev G.A. Solving the problem of optimal planning of the radio resource of a satellite communication system for control sessions of an orbital grouping of spacecraft. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*. 2018. V. 4, No. 1. P. 67-74. (In Russ.)
12. Ivanov M.S., Ponamarev A.V., Makarenko S.I. Methodology for increasing the data transmission rate in the aerial radio communication network of aircraft control due to the

adaptive distribution of the network time-frequency resource, taking into account the intensity of the transmitted traffic. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2022. No. 1. P. 104-139. (In Russ.). DOI: [10.24412/2410-9916-2022-1-104-139](https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-1-104-139)

13. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. *Tekhnologiya OFDM* (OFDM technology). Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2017. 360 p.

14. Ivanov M.S., Shushkov A.V., Makarenko S.I. Increasing the data transmission rate in the aerial radio communication network of aircraft control due to the adaptive use of energy, signal and frequency network resources. Part 2. Investigation of the achieved increase in data transfer rate. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2023. No. 1. P. 220-243. (In Russ.)

15. Makarenko S.I., Borodinov R.V. Analysis of technologies for ensuring the quality of service in multiservice ATM networks. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya*. 2012. No. 1 (73). P. 65-79. (In Russ.)

16. Burenko E.A. Substantiation of the effectiveness of using signals with orthogonal frequency division of channels in aviation radio systems for information transmission. *Trudy MAI*. 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)

17. Shipko V.V. Noise-resistant integration of multi- and hyperspectral images in optoelectronic complexes of information support for modern and promising helicopters. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112863>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-12)

18. Alieva G.V., Guseinov O.A. Issues of building an adaptive flight mode of a reconnaissance unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*. 2024. No. 134. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178471>
19. Voznyuk V.V., Kopalov YU.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM signals in conditions of unintended narrowband noise interference. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174611>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)
20. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Kn.1. Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA* (Complexes with unmanned aerial vehicles. Kn.1. Principles of construction and features of the use of complexes with UAVs). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2016. 512 p.

Статья поступила в редакцию 16.10.2024

Одобрена после рецензирования 29.10.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 16.10.2024; approved after reviewing on 29.10.2024; accepted for publication on 25.12.2024