

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья
УДК 681.7.014.3
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184064>
EDN: <https://www.elibrary.ru/JHSVYQ>

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ КАДРОВ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

Александр Сергеевич Чичканов

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

Воронеж, Российская Федерация

a_chichkanov1983@mail.ru

Аннотация. Входящие в состав беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в качестве полезной нагрузки (ПН) системы технического зрения (СТЗ) незаменимы при построении систем и комплексов мониторинга земной поверхности (МЗП). Получаемая от СТЗ видеоинформация в реальном масштабе времени (РМВ) передается на наземный пункт управления (НПУ) и используется, как для оценки окружающей обстановки, навигации и формирования управляющих команд оператора, так и для автоматической интерпретации видеоданных, полученных от телевизионных камер, с последующей идентификацией или классификацией объектов, наблюдаемых в контролируемом пространстве. Освобождение оператора от выполнения рутинных действий существенно повышает эффективность управления, однако при использовании автоматизированного комплекса остается

возможность вмешательства специалиста в экстренных или неоднозначных ситуациях. Этим объясняются повышенные требования, предъявляемые к качеству видеоизображения: система передачи видеоданных должна обеспечивать максимально достоверную и полную визуальную информацию при минимальных вносимых искажениях.

Ограниченная пропускная способность существующих каналов связи БЛА - НПУ не позволяет передавать без компрессии большие потоки видеоданных. Это объясняет необходимость синтеза новых методов обработки и кодирования динамически меняющихся изображений, позволяющих адаптироваться к изменению радиоэлектронной обстановки и объему передаваемой информации.

Целью данной работы является разработка и исследование эффективности способа адаптивного изменения частоты следования кадров (ЧСК) видеоинформации в зависимости от фоноцелевой обстановки (ФЦО) в секторе обзора БЛА. Применение данного способа позволит оптимизировать количество частотных составляющих и полосу частот, используемых OFDM сигналом, для передачи информации в канале связи БЛА-НПУ в зависимости от количества объектов интереса в секторе обзора бортовой системы технического зрения, то есть производить адаптивное изменение «активной» ширины полосы частот OFDM сигнала в зависимости от объема передаваемой в канале связи информации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мониторинг земной поверхности, фоноцелевая обстановка, частота следования кадров, объект интереса, частотный ресурс, наземный пункт управления

Для цитирования: Чичканов А.С. Разработка и исследование эффективности способа адаптивного изменения частоты следования кадров видеоинформации // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184064>

Original article

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF AN ALGORITHM FOR ADAPTIVE VARIATION OF THE FRAME RATE OF VIDEO INFORMATION

Alexander S. Chichkanov

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

Voronezh, Russian Federation

a_chichkanov1983@mail.ru

Abstract. Technical vision systems (TVS) included in unmanned aerial vehicles (UAVs) as a payload are indispensable in the construction of monitoring of the earth's surface systems and complexes. The real-time video information received from the TVS is transmitted to the ground control center (GCC) and is used both to assess the environment, navigate and form control commands for the operator, and for automatic interpretation of video data received from television cameras, followed by identification or classification of objects observed in a controlled space. Freeing operator from performing routine actions significantly increases the efficiency of management, however, when using an automated complex, it remains possible for a specialist to intervene in emergency or ambiguous situations. This explains the increased demands placed on the quality of the video image: the video data transmission

system must provide the most reliable and complete visual information with minimal distortion.

The limited bandwidth of existing UAV-GCC communication channels does not allow large streams of video data to be transmitted without compression. This explains the need to synthesize new methods for processing and encoding dynamically changing images, allowing them to adapt to changes in the electronic environment and the volume of information transmitted.

The purpose of this work is to develop and study the effectiveness of an algorithm for adaptive variation of the frame rate of video information depending on the photo-target environment in the UAV viewing area. The use of this method will optimize the number of frequency components and the frequency band used by the OFDM signal to transmit information in the communication channel of the UAV-GCC depending on the number of objects of interest in the field of view of the on-board vision system, that is, to adaptively change the "active" bandwidth of the OFDM signal depending on the volume transmitted in the communication channel. information.

Keywords: unmanned aerial vehicle, monitoring of the earth's surface, target environment, frame rate, object of interest, frequency resource, ground control center.

For citation: Chichkanov A.S. Development and research of the effectiveness of an algorithm for adaptive variation of the frame rate of video information. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184064>

Введение

Возросшая мобильность и маневренность войск сделали МЗП ключевым фактором к успеху в современном вооруженном конфликте, а применение комплексов с БЛА, способных своевременно, в любое время суток, с достаточной полнотой и достоверностью получать данные об окружающей обстановке, позволило вывести тактику ведения МЗП на качественно новый уровень [1-2]. Разработка современных БЛА сохраняет принципы получения информации о поверхности земли и расположенных на ней объектах, применяемых в пилотируемых разведывательных системах, а развитие радиоэлектроники стимулирует исследования и совершенствование принципов построения каналов связи в системе БЛА-НПУ [3].

Постановка задачи

К системам связи с БЛА в настоящее время помимо основополагающих [4] предъявляется множество требований, основными из которых являются требования по надёжности передачи командно-телеметрической информации и информации ПН на НПУ в РМВ с низкой вероятностью символьной ошибки. Для их реализации необходима разработка новых методов и способов обработки и передачи информации, позволяющих оптимизировать скорость и объем передаваемой в системе связи БЛА-НПУ информации, а также снизить вероятность обнаружения (ВО) БЛА в условиях ведения радио и радиотехнической разведки (РРТР) [5]. Рассмотрим поведение этих характеристик в зависимости от ЧСК видеоинформации в системе связи БЛА-НПУ.

Разработка способа адаптивного изменения частоты следования кадров в системе связи БЛА-НПУ

Эксперименты в области физиологии показали [6], что среднестатистический человек способен отслеживать на экране монитора одновременно движение восьми объектов. В связи с этим, оценивая возможности ОД НПУ в ходе решения БЛА задач МЗП, естественно предположить, что он может одновременно в РМВ контролировать на экране монитора динамику восьми объектов интереса (ОИ) без потери информации.

Как показывает опыт специальных подразделений [7], количественный состав сил и средств противоборствующих сторон, рисунок 1, при наступательных действиях сосредоточен на использовании диверсионных разведывательных групп и тактических групп малой численности, включающих до шести человек личного состава и 1-3 единицы техники, что соответствует верхней границе физиологических возможностей человека, указанных выше.

Предположим, что БЛА с СТЗ на борту в процессе движения к месту ведения МЗП выполняет полет с передачей видеоданных ПН с минимальной ЧСК. То есть до момента фиксации ОИ системой предварительной обработки информации (ПОИ) СТЗ БЛА передача видеоинформации на НПУ осуществляется с частотой 1 кадр в секунду. Данное обстоятельство позволит обеспечить максимальную скрытность БЛА-разведчика до момента появления объектов интереса в секторе обзора и снизить ВО БЛА средствами РРТР противника.

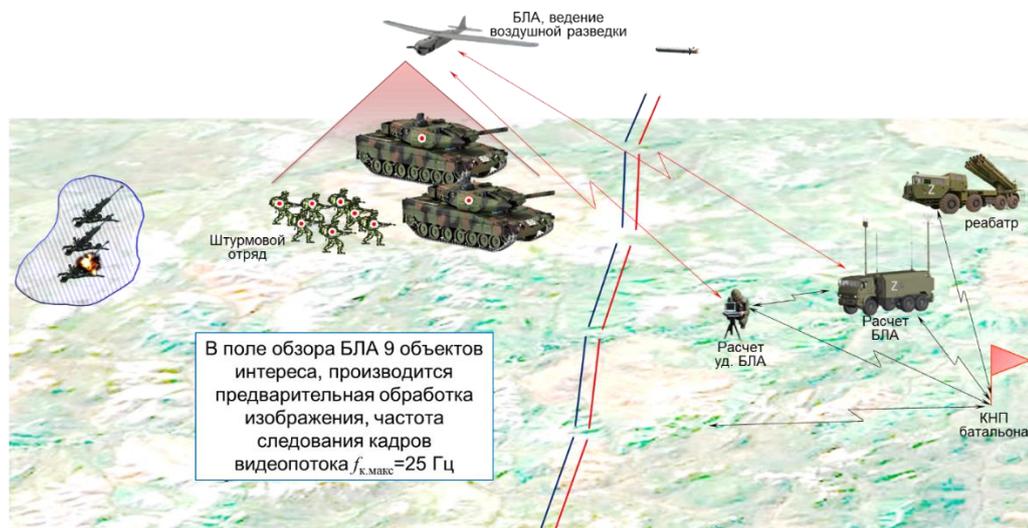


Рис. 1. Вариант использования ПОИ для обнаружения ОИ в секторе обзора БЛА

При появлении одиночного ОИ, на борту БЛА ПН в виде СТЗ осуществляется его обнаружение, определение координат и параметров движения. Для этой цели удобно использовать известные алгоритмы ПОИ на основе энергетического функционала (ЭФ) [8]. Для повышения наглядности и привлечения внимания ОД желательно подсвечивать обнаруженный объект окном автосопровождения или «блестящей» точкой. При этом, если объект движется, то для предотвращения утери разведывательной информации необходимо включить передачу видеопотока с борта БЛА на НПУ. Однако, рассмотренные выше возможности ОД позволяют предположить, что при наличии одного ОИ от передачи всего видеопотока можно отказаться, а передавать несколько кадров видео в секунду с подсветкой объекта. При увеличении количества объектов соответственно должно увеличиваться количество передаваемых кадров видеопотока в единицу времени и при достижении максимально возможных для ОД восьми объектов (и более), ЧСК должна соответствовать стандартному видеопотоку. При этом, в случае необходимости, оператор может самостоятельно дискретно увеличивать частоту кадров вплоть до максимальной.

Современная аппаратура обеспечивает ЧСК видеопотока равную 25 Гц (25 кадров в секунду). Будем обозначать ее максимальной частотой $f_{\text{макс}} = 25$ Гц и считать, что она используется при наличии на снимаемой сцене максимального количества ОИ $N_{\text{макс}} = 8$, которые способен обрабатывать ОД [9].

Положим, что при уменьшении текущего количества ОИ - $N_{\text{тек}}$ в секторе обзора бортовой СТЗ, текущая ЧСК $f_{\text{тек}}$ будет зависеть от максимальной ЧСК и максимального значения ОИ следующим образом:

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

где $N_{\text{тек}}$ – текущее количество ОИ в секторе обзора СТЗ БЛА.

Графическая зависимость ЧСК $f_{\text{тек}}$ от количества ОИ $N_{\text{тек}}$ представлена на рисунке 2. Из рисунка видно, что при целочисленных значениях $N_{\text{тек}}$ (от нуля до восьми) только при $N_{\text{тек}} = 0$ обеспечивается целочисленное значение $f_{\text{тек}}$. Предполагается, пользуясь математическими правилами, для каждой точки $N_{\text{тек}}$, начиная с единицы и до восьми округлять значение $f_{\text{к}}$ до меньшей или большей целочисленной величины. Вопрос влияния такого округления на качество работы ОД предлагается исследовать в следующих работах.

Необходимо учитывать, что вместе с видеoinформацией с бортовой СТЗ на НПУ передаются координаты и векторы движения целей, которые незначительно увеличивают объем передаваемого трафика, но обеспечивают оператору более наглядное представление фоноцелевой обстановки (ФЦО) местности (района введения МЗП). При количестве объектов $N_{\text{тек}} = 8$ и более передаётся видеопоток с максимальной частотой $f_{\text{макс}} = 25$ Гц.

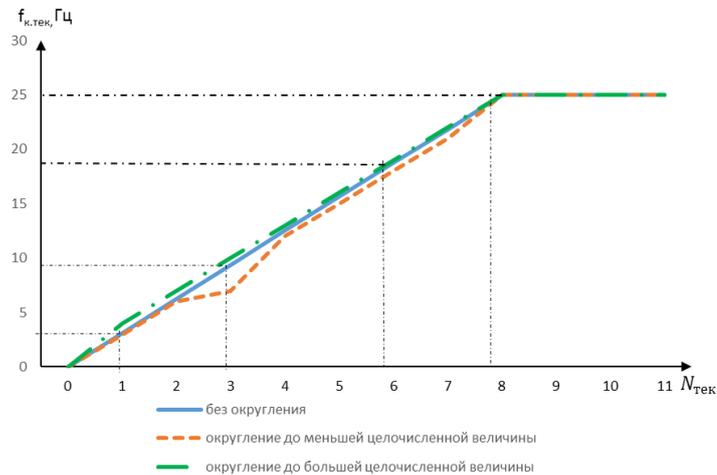


Рис. 2. Зависимость текущей ЧСК видеoinформации $f_{тек}$ от количества ОИ в секторе обзора БЛА $N_{тек}$.

Значительную роль в удовлетворении требований по пропускной способности каналов связи имеет выбор метода модуляции [10-11]. Канал связи БЛА-НПУ удобно описывать многолучевой моделью с явлениями переотражения, рассеяния и дифракцией [12]. Для борьбы с многолучевостью используется подробно рассмотренная выше технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), которая может эффективно применяться в современных беспроводных сетях [13-15]. При использовании OFDM сигналов можно значительно уменьшить активную ширину спектра сигнала, зависящую от числа формирующих его частотных составляющих (поднесущих). Это число, в свою очередь определяется объемом и скоростью передаваемой по каналу связи информации [16-17].

По формуле Шеннона пропускная способность - максимальная скорость передачи информации по каналу связи с шумом, определяется выражением [18]:

$$V_{\max} = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2)$$

где V_{\max} - максимальная скорость передачи информации по каналу связи,

$\frac{S}{N}$ – отношение сигнал-шум в канале связи;

ΔF - ширина полосы частот OFDM сигнала.

Из выражения (2) ширина полосы частот сигнала будет равна:

$$\Delta F = \frac{V_{\max}}{\log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)} \quad (3)$$

Так как с изменением ЧСК пропорционально будет изменяться объем и скорость передаваемой по каналу связи информации, то для ситуации, когда текущая ЧСК не равна максимальной, поток видеoinформации будет передаваться с текущей скоростью $V_{\text{тек}}$ определяемой выражением:

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

Тогда, с учетом (4), выражение для расчета полоса частот $\Delta F_{\text{тек}}$ этого сигнала будет иметь вид:

$$\Delta F_{\text{тек}} = \frac{V_{\max} f_{\text{тек}}}{\log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) f_{\max}}. \quad (5)$$

Необходимое число поднесущих N_{ofdm} (частотных составляющих) OFDM сигнала, при условии, что поднесущие разнесены друг от друга на величину $\Delta f = 10^3$ Гц будет равно:

$$N_{\text{ofdm}} = \frac{\Delta F_{\text{тек}}}{\Delta f}. \quad (6)$$

Из выражений 5 и 6 следует, что при изменении ФЦО и соответствующем дискретном уменьшении ЧСК видеoinформации пропорционально уменьшаются

ширина полосы частот и количество частотных составляющих спектра OFDM сигнала, необходимых для передачи заданного объема информации.

В результате проведенных исследований разработан способ адаптивного изменения ЧСК в системе связи БЛА-НПУ, который представлен на рисунке 3.

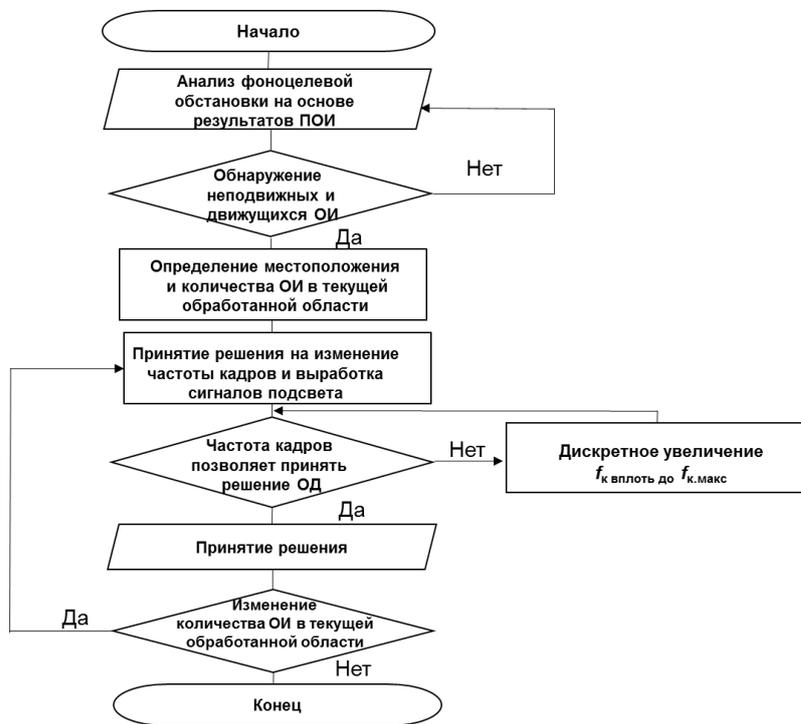


Рис. 3. Способ адаптивного изменения ЧСК в системе связи БЛА-НПУ

На рисунке 4 приведена структурная схема устройства, реализующего способ адаптивного изменения ЧСК видеоинформации в системе связи БЛА-НПУ.

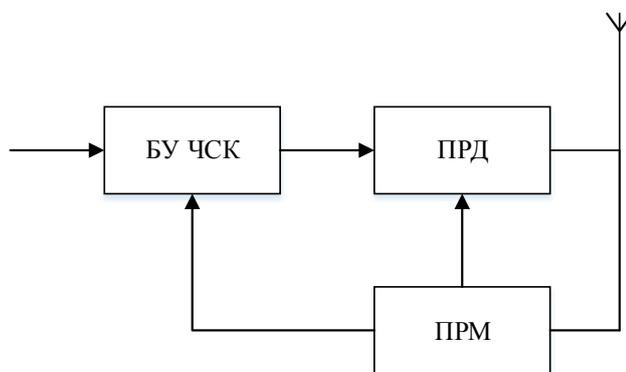


Рис 4. Структурная схема устройства, реализующего способ адаптивного изменения ЧСК видеоинформации в системе связи БЛА-НПУ

Схема функционирует следующим образом. В ходе выполнения задач МЗП непрерывно осуществляется анализ ФЦО. При обнаружении ОИ с помощью алгоритмов ПОИ на основе ЭФ, в блоке управления ЧСК (БУ ЧСК) определяется их количество, координаты и вектор движения, а также формируются сигналы их подсвета. Далее пропорционально количеству этих объектов производится изменение ЧСК видеопотока. При этом пропорционально частоте кадров изменяется объем передаваемой в канале связи информации, а также количество задействованных для этого «активных» поднесущих OFDM сигнала. В случае, если установленная ЧСК не позволяет ОД принять решение относительно обнаруженных ОИ, то он может осуществить ее дискретное увеличение (блок приемника (ПРМ)) вплоть до максимального значения 25 кадров в секунду. Далее сигнал поступает в передатчик (ПРД).

Таким образом, применение способа адаптивного изменения ЧСК позволит оптимизировать количество частотных составляющих и соответственно полосу используемых частот OFDM сигнала для передачи информации в канале связи БЛА-НПУ в зависимости от количества ОИ в секторе обзора бортовой видеокамеры, то есть производится адаптивное изменение «активной» ширины полосы частот сигнала в зависимости от объема передаваемой в канале связи информации.

Анализ эффективности разработанного способа в системе связи БЛА-НПУ

Так как основной задачей противодействия техническим средствам разведки является обеспечение скрытности истинных объектов, то основным показателем эффективности информационного уровня является ВО БЛА [19]. Рассмотрим

изменение данного параметра для автономного БЛА, выполняющего задачи МЗП в зависимости от ЧСК видеопотока, передаваемого на НПУ.

Согласно [20] вероятность обнаружения радиосигнала аппаратурой радиоразведки противника определяется выражением:

$$P_o = \Phi \left[\frac{q}{q+1} \sqrt{10^6 \Delta F T_v} - \frac{3,1}{1+q} \right], \quad (7)$$

где q - величина отношения мощности сигнала и мощности шума на входе радиоприемника средств РРТР,

Φ – функция интеграла вероятности;

T_v – время интегрирования при когерентном обнаружении сигнала, с;

Выше рассмотрен способ адаптивного изменения ЧСК при передаче разведывательной информации (РИ) в системе связи БЛА-НПУ, который показывает, что при низкоинтенсивной ФЦО (количество объектов интереса в секторе обзора БЛА мало или равно нулю) для передачи видеопотока с использованием OFDM сигнала можно задействовать не все его поднесущие, а только определенную часть, при этом ширина полосы частот передаваемого сигнала будет прямо пропорциональна ЧСК видеоинформации, передаваемой с использованием этого сигнала, выражение (3).

Подставляя в выражение (7) данные для ширины полосы частот из выражения (3), получим:

$$P_o = \Phi \left[\frac{q}{q+1} \sqrt{10^6 \frac{V_{\max}}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)} \frac{f_{\kappa, \text{тек}}}{f_{\kappa, \text{макс}}} T_v} - \frac{3,1}{1+q} \right] \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что вероятность обнаружения БЛА определяется, в том числе, ЧСК видеоизображения, передаваемого в канале связи БЛА-НПУ. Таким образом, уменьшая частоту кадров мы снижаем ВО БЛА и повышаем разведзащищенность и скрытность. Следовательно, ФЦО в секторе обзора БЛА в рассматриваемом нами случае определяет эти важнейшие характеристики, отражающие способность системы связи БЛА-НПУ работать в условиях ведения противником РРТР. Графическая зависимость ВО от ЧСК и отношения сигнал-шум (ОСШ) представлены на рисунке 5.

Из графика видно, что ВО БЛА возрастает по мере повышения ЧСК видеоинформации, которая, в свою очередь, определяется количеством ОИ в секторе обзора БЛА. Возрастание ОСШ на входе приемника средств РРТР также способствует повышению ВО.

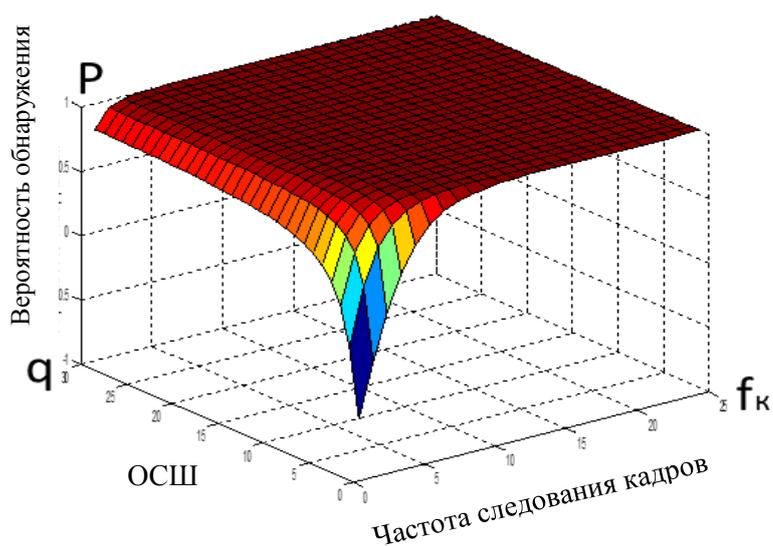


Рис. 5. Зависимость вероятности обнаружения от ЧСК и ОСШ.

На рисунке 6 представлена зависимость ВО БЛА от ЧСК при фиксированном значении ОСШ, равном 4,5 дБ. Графическая зависимость показывает, что при ЧСК равной 1 Гц ВО БЛА

минимальная и равняется 0,124. По мере возрастания ЧСК, ВО стремится к единице. При этом когда ЧСК находится в интервале от 1 до 12 Гц (количество ОИ соответствует от 1 до 4) наблюдается наиболее благоприятные условия для передачи информации.

Если рассмотреть динамику изменения ВО при различных значениях ЧСК и фиксированном значении ОСШ равном 4,5 дБ, то можно отметить, что разница в значениях ВО при ЧСК равной 1 Гц при отсутствии ОИ и ЧСК равной 25 Гц, при наличии 8 ОИ на наблюдаемой сцене (ВО БЛА равна 100%), составляет 87,6 %. Также важно, что при ОСШ на входе приемника РРТР равном 20 дБ эта разница составит 40,9% (таблица 1), но при этом ВО БЛА будет равна 100% при наличии 6 ОИ на наблюдаемой сцене. То есть, в рассматриваемом нами случае, ВО определяется количеством ОИ в секторе обзора БЛА и увеличивается с ростом ОСШ на входе приемника средств РРТР при фиксированных значениях ОИ.

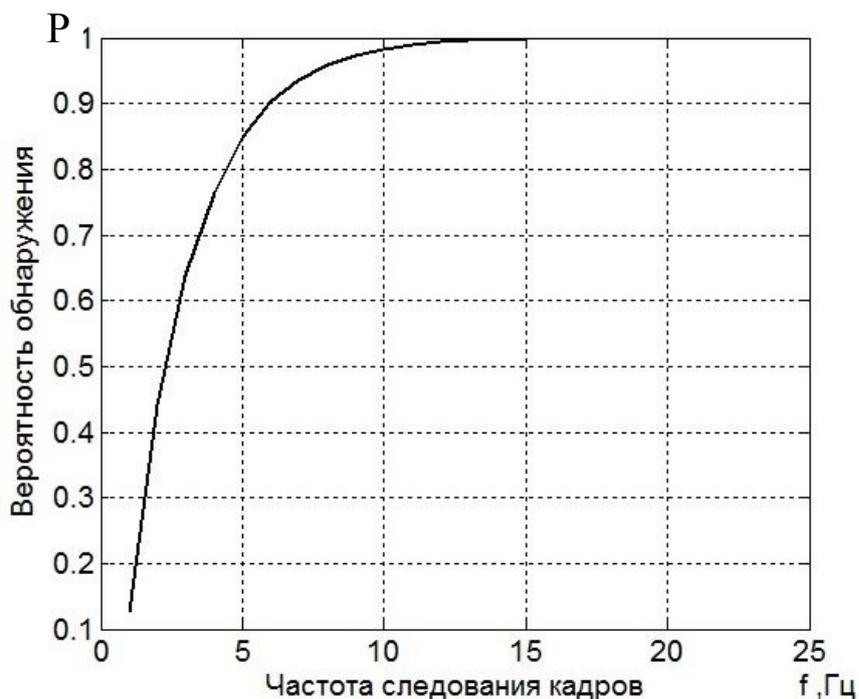


Рис. 6. Зависимость ВО БЛА от ЧСК при фиксированном значении ОСШ, равном 4,5 дБ

Таким образом, в благоприятной помеховой обстановке для приемника РРТР, ВО БЛА стремится к единице даже при низкоинтенсивной ФЦО в секторе обзора БЛА.

В таблице 1 приведены расчетные значения ВО БЛА в зависимости от ЧСК при указанных фиксированных значениях ОСШ на входе приемника средств РРТР противника. Согласно приведенным данным, существует пороговое значений ЧСК при фиксированном ОСШ, при превышении которого БЛА однозначно, при прочих равных условиях, будет обнаружен средствами РРТР противника.

Таблица 1. Зависимость ВО БЛА от ЧСК при фиксированных ОСШ на входе приемника РРТР противника

Значение ОСПШ, дБ	Количество объектов интереса в зоне обзора СТЗ БЛА/ частота следования кадров видеoinформации, Гц								
	0/1	1/3	2/6	3/9	4/12	5/15	6/18	7/21	8/25
4,5	12,4	63,8	90,2	97,4	99,3	99,8	99,9	99,9	100
10	47,4	90,4	96,6	99,3	99,8	99,9	99,9	100	100
15	55,2	87,1	97,5	99,5	99,9	99,9	100	100	100
20	59,1	88,5	97,9	99,6	99,9	99,9	100	100	100

Выводы

Ограниченная пропускная способность существующих КС БЛА – НПУ не позволяет передавать без компрессии большие потоки видео данных. Это объясняет необходимость разработки новых методов обработки и кодирования динамически меняющихся изображений, позволяющих адаптироваться к изменению радиоэлектронной обстановки и объему передаваемой информации. Разработан

способ адаптивного изменения ЧСК видеоинформации, который предполагает изменение объема передаваемой в системе связи БЛА–НПУ информации, а также активной ширины полосы частот OFDM сигнала при изменении количества ОИ в секторе обзора БЛА. Это позволит оптимизировать трафик, передаваемый в КС.

Проведенные расчеты и анализ способности системы связи БЛА-НПУ работать в условиях ведения противником РРТР показали, что в ходе выполнения задач МЗП с использованием БЛА, оснащенных бортовыми СТЗ, применение способа адаптивного изменения ЧСК видеоинформации позволит значительно снизить ВО БЛА, уменьшить утомляемость ОД в условиях отсутствия ОИ в секторе обзора БЛА (и, как следствие, увеличить время и качество его работы), что в конечном итоге создаст условия для более эффективного и качественного выполнения поставленных задач.

Список источников

1. Паршин С., Кожанов Ю. Современные тенденции в совершенствовании системы управления вооруженными силами ведущих зарубежных стран в информационную эпоху // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 7. С. 3-9.
2. 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.
3. Иванов М.С., Афонин И.Е., Макаренко С.И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными

аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92-134.

4. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Робототехнические комплексы на основе БЛА: монография - М.: Радиотехника, 2016. Кн. 2. - 824 с.

5. 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>

6. Люди могут следить за восемью движущимися объектами одновременно. URL: <https://newsland.com/post/3799320-liudi-mogut-sledit-za-vosemiu-dvizhushchimisia-obektami-odnovremen>

7. Тактика действий пехоты в СВО. URL: <https://topwar.ru/211291-taktika-dejstvij-pehoty-v-svo.html>

8. Богословский Е.А. и др. Прикладные задачи навигации, связи и управления. Методы анализа и синтеза: монография. - М.: Радиотехника, 2015. - 160 с.

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

10. Боев Н.М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2012. № 2 (42). С. 86-91.

11. Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.
12. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM: учеб. пособие для вузов. - М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2017. С 360-361.
13. Иванов Ю.А., Невструев И.А. Структура и помехоустойчивость систем беспроводного доступа с OFDM // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 3. С. 25-29.
14. 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)
15. Аганесов А.В., Иванов М.С., Попов С.А., Шунулин А.В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.
16. 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)
17. 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)

18. Журавлев В.И., Руднев А.В. Цифровая фазовая модуляция. - М.: Изд-во Радиотехника, 2012. - 208 с.
19. Николаев А.Е., Копичев О.А., Галов С.Ю. Анализ разведывательных возможностей формирований ТЗУ сухопутных войск США // Вестник академии военных наук. 2019. № 1 (66). С. 162-171.
20. Козирацкий Ю.Л., Афанасьева Е.М., Гревцев А.И. и др. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов: монография. - М.: Радиотехника, 2015. - 454 с.

References

1. Parshin S., Kozhanov Yu. Modern trends in improving the management system of the armed forces of leading foreign countries in the information age. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*. 2009. No. 7. P. 3-9. (In Russ.)
2. Ivanov M.S., Shushkov A.V., Makarenko S.I. Increasing the data transmission rate in the aerial radio control network 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.)
3. Ivanov M.S., Afonin I.E., Makarenko S.I. Increasing the stability of the automated control system of a complex with unmanned aerial vehicles under the influence of means of physical destruction and electronic suppression. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2022. No. 2. P. 92-134. (In Russ.)
4. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BLA: monografiya* (Complexes with unmanned

aerial vehicles. Book.2. Robotic complexes based on UAVs: monograph). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2016. 824 p.

5. Alieva G.V., Guseinov O.A. Issues of building an adaptive flight mode of a reconnaissance UAV. *Trudy MAI*. 2024. No. 134. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178471>

6. *Lyudi mogut sledit' za vosem'yu dvizhushchimisya ob'ektami odnovremenno* (People can follow eight moving objects at the same time). URL: <https://newsland.com/post/3799320-liudi-mogut-sledit-za-vosemiu-dvizhushchimisya-obektami-odnovremen>

7. *Taktika deistvii pekhoty v SVO* (Tactics of infantry actions in the SVO). URL: <https://topwar.ru/211291-taktika-dejstvij-pehoty-v-svo.html>

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

9. 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>

10. Boev N.M. Analysis of a command-telemetric radio link for communication with unmanned aerial vehicles. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M.F. Reshetneva*. 2012. No. 2 (42). P. 86-91. (In Russ.)

11. Makarenko S.I., Sapozhnikov V.I., Zakharenko G.I., Fedoseev V.E. *Sistemy svyazi* (Communication systems). Voronezh: VAIU Publ., 2011. 285 p.

12. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. *Tekhnologiya OFDM* (OFDM Technology). Moscow: Izd-vo «Goryachaya liniya-Telekom» Publ., 2017. P. 360-361.
13. Ivanov Yu.A., Nevstruev I.A. Structure and noise immunity of wireless access systems with OFDM. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy*. 2009. V. 5, No. 3. P. 25-29. (In Russ.)
14. Burenko E.A. Substantiation of the effectiveness of the use of signals with orthogonal frequency division multiplexing in aviation radio systems of 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)
15. Aganesov A.V., Ivanov M.S., Popov S.A., Shunulin A.V. Increasing the throughput of the aerospace radio network through the use of Mesh technologies in interconnection systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*. 2016. No. 2. P. 12-16. (In Russ.)
16. Shipko V.V. Noise-resistant complexing of multi-and hyperspectral images in optoelectronic information support systems for modern and prospective 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)
17. Voznyuk V.V., Kopalov YU.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM-signals in the conditions of unintentional 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)
18. Zhuravlev V.I., Rudnev A.V. *Tsifrovaya fazovaya modulyatsiya* (Digital phase modulation). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2012. 208 p.

19. Nikolaev A.E., Kopichev O.A., Galov S.Yu. Analysis of the reconnaissance capabilities of the formations of the United States Ground Forces. *Vestnik akademii voennykh nauk*. 2019. No. 1 (66). P. 162-171. (In Russ.)

20. Koziratskii Yu.L., Afanas'eva E.M., Grevtsev A.I. ets. *Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-elektronnykh sredstv, otsenka parametrov ikh signalov: monografiya* (Detection and coordination of optoelectronic devices, estimation of parameters of their signals: monograph). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2015. 454 p.

Статья поступила в редакцию 13.01.2025

Одобрена после рецензирования 15.01.2025

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 13.01.2025; approved after reviewing on 15.01.2025; accepted for publication on 25.02.2025