

Научная статья

УДК 623.74

DOI: [10.34759/trd-2022-122-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-12)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА ЛЕГКОГО КЛАССА

Константин Дмитриевич Титов

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет,

Воронеж, Россия

titovkd@gmail.com

Аннотация. Описана актуальность и состояние разработки беспилотного летательного аппарата вертолетного типа легкого класса серии «Грач» отечественного производства. Исходя из специфики применения беспилотного вертолета с широкодиапазонной станцией радиоразведки в качестве целевой нагрузки сформулированы требования, предъявляемые к устанавливаемой на нем системе управления и передачи данных. Проанализировано соответствие установленной системы предъявляемым требованиям и показаны технико-экономические и эксплуатационные преимущества систем связи, базирующихся на сверхширокополосных сигналах. На основе ранее выполненных исследований, посвященных вопросам создания беспилотного летательного аппарата вертолетного

типа легкого класса, а также генерации, обработки и излучения сверхширокополосных сигналов, сформулированы особенности и принципы построения сверхширокополосного канала связи, определяющие технический облик и характеристики системы управления, передачи данных и локальной радионавигации, устанавливаемой на летательном аппарате. Проанализированы и обоснованы технические характеристики системы управления и передачи данных, связанные с генерацией и обработкой импульсов, их излучением и оценкой помехоустойчивости антенных систем, выбором частотного диапазона, ширины полосы и вида сигнала, вопросов размещения системы на летательном аппарате, а также оценки возможности интеграции локальной навигационной системы в систему связи. Сделаны выводы о влиянии обоснованных технических характеристик на тактические – дальность связи, время полёта, взлётная масса и т.д.

Ключевые слова: беспилотный вертолет, сверхширокополосный сигнал, помехозащищенность, скрытность

Для цитирования: Титов К.Д. Принципы построения сверхширокополосного канала связи на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-12)

PRINCIPLES FOR CONSTRUCTING AN ULTRA-WIDEBAND COMMUNICATION CHANNEL ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE OF A LIGHTWEIGHT HELICOPTER TYPE

Konstantin D. Titov

¹MESC Air Force “Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin”, Voronezh, Russia

²Voronezh State University,

Voronezh, Russia

titovkd@gmail.com

Abstract. The article describes the relevance and state of development of an unmanned aerial vehicle of a lightweight helicopter type of the home-produced “Grach” series. By reference to application specifics of the unmanned helicopter with a wide range radio reconnaissance station as a objective load application, the requirements imposed to the control and data transmission system place on it were formulated. The compliance of the installed system with the requirements is analyzed, and technical, economic and operational advantages of the communication systems based on ultra-wideband signals are demonstrated. Based on the earlier studies, devoted to the issues of creating a lightweight helicopter type unmanned aerial vehicle, as well as generating, processing and studying ultra-wideband signals, specifics and principles of a ultra-wide band communication channel design, which determine technical appearance of control, data transmission and local radio navigation system being installed on the aerial vehicle were formulated. Technical characteristics of the control and data transmission system, associated with pulses generation and processing; the signals radiation, and noise immunity assessment of antennae

systems; frequency range selection, signal width and type; the issues of the system placing on the flying vehicle, as well as assessing the possibility of local navigation system integration into the communication system were analyzed and proved. Inferences were drawn on the substantiated technical characteristics impact on the tactical characteristics such as communication range, flight time, takeoff mass etc.

Keywords: unmanned helicopter, ultra-wideband signal, noise immunity, stealth.

For citation: Titov K.D. Principles for constructing an ultra-wideband communication channel on an unmanned aerial vehicle of a lightweight helicopter type. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-12)

Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют завершённые разработки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертолётного типа (ВТ) лёгкого класса, прошедшие государственные испытания и удовлетворяющие требованиям Министерства обороны РФ по условиям эксплуатации. Вместе с тем с 2017 по 2020 годы в ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) проводились работы по обоснованию идеологии, принципов построения и достижимым характеристикам многофункционального БПЛА ВТ лёгкого класса, а с марта 2018 года под научным руководством ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) совместно с АО «Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина» (г. Арзамас Нижегородской обл.) организована кооперация из двух образовательных организаций и шести промышленных предприятий РФ, осуществляющих в инициативном порядке

разработку, изготовление и испытания экспериментальных образцов многофункционального БПЛА ВТ легкого класса серии «Грач» с одним из типов возможных вариантов целевых нагрузок – широкодиапазонной станции радиоразведки [1].

В работах [1, 2] показана актуальность использования БПЛА ВТ для расширения функциональных возможностей наземной мобильной техники различного назначения, а также детально рассмотрены его принципы построения. Внешний вид экспериментального образца БПЛА ВТ легкого класса серии «Грач» с одним из типов целевой нагрузки (широкодиапазонной станцией радиоразведки) в рабочем положении приведен на рисунке 1.

Процесс создания уникального летательного аппарата включает в себя множество нетривиальных научно-технических задач, начиная от выбора материалов для изготовления лопастей и фюзеляжа, и заканчивая вопросами алгоритмического обеспечения процессов управления полетом и целевой нагрузкой. В настоящее время БПЛА ВТ серии «Грач» прошел первичные летные испытания, и за исключением вопросов повышения надежности и улучшения летно-технических характеристик, можно считать, что сам летательный аппарат готов к дальнейшим циклам испытаний. Следующими по значимости встают вопросы управления, передачи данных и навигационного обеспечения летательного аппарата, которым посвящена данная работа.



Рисунок 1 – Внешний вид экспериментального образца БпЛА VT серии «Грач»

Требования к системе связи

Исходя из специфики применения БпЛА VT серии «Грач» со станцией радиоразведки в качестве целевой нагрузки, можно сформулировать следующие требования, предъявляемые к устанавливаемой на нем системе управления и передачи данных:

- скрытность канала управления и передачи данных (разведзащищенность), для обеспечения невозможности вскрытия радиолинии и определения координат БпЛА VT, а также выполнения требований по электромагнитной совместимости;
- помехоустойчивость, для недопущения перехвата управления БпЛА VT и доступа третьих лиц к передаваемым данным;

- низкие задержки, обеспечивающие возможность непрерывной работы в режиме реального времени;
- высокая пропускная способность канала передачи данных, характеризующаяся асимметрией прямого и обратного каналов, обеспечивающая передачу потокового видео с борта БПЛА в высоком разрешении и данных от широкодиапазонной станции радиоразведки (или других данных с целевой нагрузки);
- возможность работы в сложной электромагнитной обстановке, при наличии естественных и преднамеренных помех (помехозащищенность), в условиях многолучевого распространения сигналов;
- гибкость и адаптивность канала связи по скорости передачи информации, спектральной эффективности и выходной мощности, а также наличие режимов адаптации по излучаемой мощности, пропускной способности и частоте излучения в зависимости от помеховой обстановки и дальности связи;
- узконаправленный канал связи, для повышения скрытности и снижения негативного влияния на пеленгатор целевой нагрузки;
- частотный разнос системы управления и передачи данных с целевой нагрузкой радиоразведки, для снижения влияния на характеристики пеленгатора;
- высокая энергоэффективность, позволяющая увеличить продолжительность полета за счет экономии топлива летательного аппарата;

- низкий вес и компактность, для уменьшения взлетной массы и сохранения аэродинамики.

В настоящее время на беспилотном вертолете БПЛА ВТ серии «Грач» установлена отечественная система управления и передачи данных, разработанная АО «Каскад» (г. Зеленоград) [3], которая состоит из бортовой и наземной компонент, включающих радиомодемы, радиоориентеры и антенны. Система управления и передачи данных обеспечивает дуплексную передачу цифровой информации и передачу управляющих сигналов и измерительных сигналов специальной формы между наземной компонентой и одним или двумя бортовыми компонентами по соответствующим радионаправлениям с их частотным разделением. Скорость передачи данных в каждом радионаправлении: от БПЛА на наземный пункт управления (канал данных) не менее 1 МБит/с; от наземного пункта управления на БПЛА (канал управления) не менее 250 кбит/с. Система управления и передачи данных обладает традиционным для современных систем связи набором качеств: высокой помехоустойчивостью за счет алгоритма перезапроса потерянных пакетов, помехоустойчивого кодирования, режима адаптивной модуляции и режима адаптивной мощности [4]. Внешний вид основных элементов системы управления и передачи данных производства АО «Каскад» представлен на рисунке 2.

Исходя из описанного, очевидно, что наиболее прогрессивная отечественная система управления и передачи данных производства АО «Каскад» обладает весьма скромными характеристиками и не удовлетворяет большинству сформулированных выше требований. Единственным ее плюсом является доступность, позволяющая

использовать ее в составе БПЛА ВТ серии «Грач» в настоящее время.

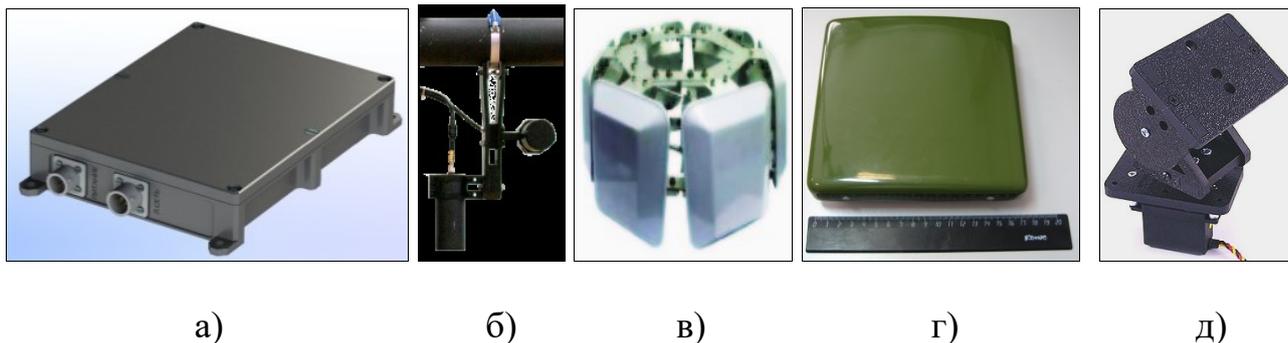


Рисунок 2 – Внешний вид радиомодема (а), бортовой двухполяризационной антенны (б), смарт-антенны (в), секторной антенны (г) и следящего привода (д) системы управления и передачи данных производства АО «Каскад»

Для существенного повышения качества, имеющегося на БПЛА ВТ серии «Грач» канала связи необходимо модернизировать существующую или разработать новую отечественную систему управления и передачи данных, удовлетворяющую указанным выше требованиям. Исходя из принципов построения существующей системы управления и передачи данных, разработанной АО «Каскад», можно сделать вывод, что её модернизация позволит только частично улучшить характеристики и не обеспечит удовлетворения всех предъявляемых требований.

Таким образом, оснащение БПЛА ВТ серии «Грач» системой управления и передачи данных, удовлетворяющей всем предъявляемым к ней требованиям, возможно только за счет разработки системы на новых физических принципах. Наиболее перспективным в настоящее время является принцип, заключающийся во внедрении новых способов, технических решений излучения и приема сверхширокополосных (СШП) сигналов [5], существенно превосходящих

возможности узкополосных и широкополосных (обычных) систем по скорости передачи информации, скрытности работы, устойчивости к внешним помехам и т.д.

Согласно определению Федеральной Комиссии связи США [6], система связи является СШП, если относительная ширина спектра излучения больше 0,25 или абсолютная ширина спектра, измеряемая по уровню -10 дБ относительно максимума излучения, более 500 МГц независимо от относительной ширины спектра.

В литературе существует следующая классификация СШП сигналов [7]: СШП видеосигналы или сверхкороткие импульсы (СКИ), описываемые знакопостоянными функциями времени, и СШП квазирадиосигналы (КРС), описываемые знакопеременными функциями времени. В каждом классе выделяют отдельные математические модели сигналов. Примерами СШП видеосигналов могут быть однополярные прямоугольные видеоимпульсы, видеоимпульсы колокольной формы и т.д., то есть сигналы, не обладающие гармоническим заполнением. Класс СШП КРС является более общим, поскольку включает в себя как видеоимпульсы (двуполярные видеоимпульсы, моноциклы Гаусса), так и импульсы с гармоническим заполнением, к которым, например, относится модель узкополосного сигнала.

Форма как СКИ, так и СШП КРС претерпевает существенные изменения на всех этапах его распространения: при передаче по фидерным трактам, при излучении, распространении в дисперсной среде, при отражении от объекта локации и приеме. Перечисленные особенности настолько существенны и принципиальны, что разработка радиосистем на основе сверхширокополосных сигналов выделяется в самостоятельное научно-техническое направление с собственными методами анализа и

нетрадиционными схемотехническими решениями.

Ввиду того, что структура СШП КРС подобна узкополосным радиосигналам, но условие относительной узкополосности для них не выполняется, в них отсутствуют недостатки, присущие СШП видеосигналам. Использование СШП КРС позволяет увеличить дальность эффективного использования аппаратуры связи и локации. Вместе с тем, методы решения задач генерации, синтеза и анализа алгоритмов обработки СШП КРС имеют свои особенности. Алгоритмы обработки СШП КРС отличаются как от аналогичных алгоритмов, разработанных для узкополосных сигналов, так и от алгоритмов, синтезированных для СШП видеоимпульсов.

Поскольку для обеспечения значительных дальностей связи при высокой пропускной способности канала связи, важным параметром является энергия излученного сигнала, в системе связи на БПЛА ВТ планируется использование СШП КРС. Для его формирования предлагается использовать суперпозицию смещенных во времени сверхкоротких видеоимпульсов. Смещение спектра за счет наличия гармонической составляющей в сверхвысокочастотную область позволит уменьшить геометрические размеры антенны без существенных потерь на излучение в низкочастотном диапазоне. Использование СШП сигналов позволяет расширить функционал системы управления и передачи данных БПЛА ВТ и создать единую систему управления, передачи данных и локальной радионавигации (СУПДЛР).

Преимущества СШП сигналов по сравнению с существующими системами радиосвязи вполне очевидны [8] и удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к устанавливаемой на БПЛА ВТ серии «Грач» СУПДЛР. Однако, существенным

минусом таких систем, является их технологическая сложность, и как следствие, недоступность к простому приобретению в настоящее время готового комплекта. При этом, последние несколько лет возросло количество научно-технических публикаций, описывающих теоретические и экспериментальные исследования, посвященные вопросам генерации [9, 10], обработки [11] и излучения сверхширокополосных сигналов [12], что говорит о потенциальной возможности создания уникальной сверхширокополосной системы связи, существенно превосходящей отечественные аналоги и удовлетворяющей всем предъявляемым СУПДЛР на БпЛА ВТ требованиям.

Принципы построения сверхширокополосного канала связи

Сформулируем основные принципы построения сверхширокополосного канала связи на БпЛА ВТ, определяющие технический облик и характеристики СУПДЛР.

1. Частотный диапазон

Аппаратура передачи данных производства АО «Каскад», установленная на экспериментальном образце БпЛА ВТ серии «Грач», имеет два возможных диапазона рабочих частот (в зависимости от модификации) – 3400-3600 и 5100-5900 МГц. Оба указанных частотных диапазона значительно перегружены и исходя из их ширины потенциально не могут обеспечить большие скорости передачи данных. Нижний частотный диапазон используется военными структурами, системами спутниковой связи и мобильными сетями 5-го поколения, число абонентских устройств которых ежегодно увеличивается по экспоненциальному закону. Диапазон 5100-5900 МГц Решением Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) [от 29 февраля 2016 г.](#)

[№ 16-36-03](#) выделен для работы оборудования беспроводных локальных сетей малого радиуса действия стандартов IEEE 802.11a, 802.11n, 802.11ac. Число таких устройств ежегодно растет, особенно с учетом существенного перенасыщения диапазона 2,4 ГГц. Решение ГКРЧ [от 15 июля 2010 г. № 10-07-02](#) описывает порядок получения разрешения на использование радиочастот или радиочастотных каналов и их электромагнитной совместимости с действующими и планируемыми для использования устройствами. Таким образом, в данном частотном диапазоне помимо множества маломощных мобильных устройств могут функционировать мощные базовые станции и радиомосты, создавая помехи системе связи на БПЛА ВТ.

Очевидно, что с ростом трафика беспроводных сетей диапазон ниже 6 ГГц оказался сильно перегруженным. С другой стороны, огромные области спектра в диапазоне 6–300 ГГц остаются в значительной мере неиспользованными. Последние годы происходит интенсивный процесс освоения нетрадиционных диапазонов радио- и оптических волн, в том числе СВЧ и ОВЧ, включая миллиметровые волны (ММВ), волны терагерцового диапазона, ближний ИК-диапазон.

Несколько десятков лет ММВ считались непригодными для практического использования из-за отсутствия элементной базы для генерации и приема таких электромагнитных колебаний, построения антенно-фидерного тракта в миллиметровом диапазоне, а также из-за отсутствия данных по распространению излучения в земной атмосфере и городской среде. Как показали проведенные исследования [13], на распространение электромагнитных волн миллиметрового диапазона влияют такие факторы, как затухание радиоволн, рассеяние, поглощение,

деполяризация, а также сезонный фактор. График зависимости затухания сигнала ММВ от частоты в логарифмическом масштабе при различных значениях относительной влажности воздуха (RH) и наличия тумана представлен на рисунке 3 [14].

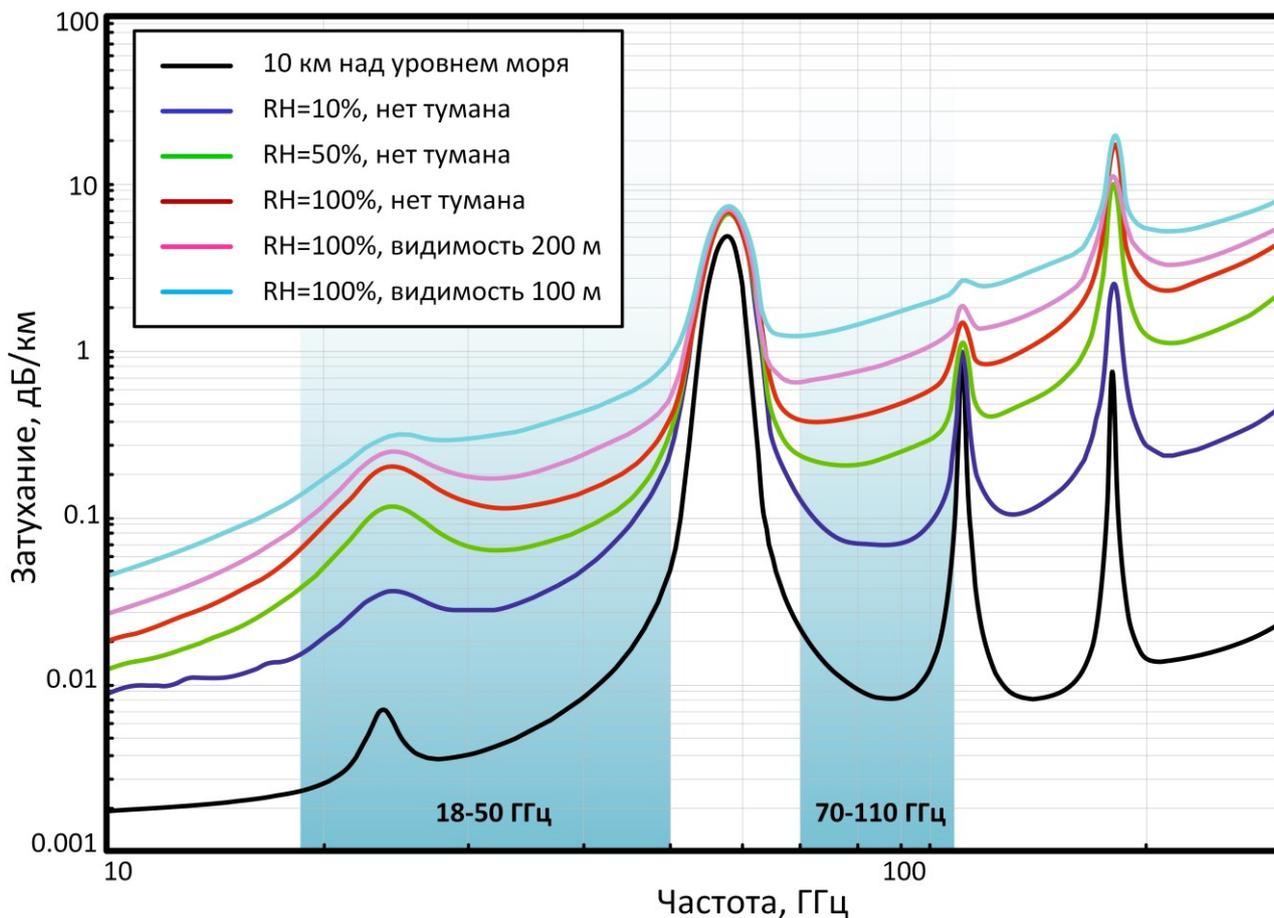


Рисунок 3 – График зависимости атмосферного затухания сигнала ММВ диапазона от частоты

Последние годы, активные исследования в области распространения ММВ позволили создавать миниатюрные адаптивные антенные решетки миллиметрового диапазона, пригодные для использования в мобильных устройствах [14, 15]. При этом в новых частотных диапазонах пока отсутствуют проблемы перегруженности выделенных каналов. Из рисунка 3 видно, что из частотного диапазона 10-300 ГГц

можно выделить два наиболее выгодных поддиапазона – 18-50 ГГц и 70-110 ГГц. Нижняя граница частотного диапазона в 18 ГГц обусловлена необходимостью частотного разнеса с диапазоном рабочих частот широкодиапазонной станции радиоразведки (целевой нагрузки БПЛА ВТ) и относительно небольшим затуханием.

Первый поддиапазон характеризуется более простыми и дешевыми техническими решениями приема-передающего тракта, а во втором поддиапазоне практическая реализация устройств в настоящее время более затруднительна, однако вносимое в атмосфере молекулярным кислородом ослабление сигнала на километр дальности составит не более 0,5 дБ, т.е. будет незначительно превышать ослабление на частотах традиционных радиорелейных систем диапазонов от 23 ГГц и выше. Создание и массовое внедрение приема-передающих отечественных устройств субтерагерцового диапазона в ближайшие несколько лет маловероятно, поэтому, хоть они обладают высоким потенциалом, рассматривать в данной постановке нецелесообразно.

Таким образом использование приема-передающих средств в диапазонах 18-50 и 70-110 ГГц приведет к несущественным потерям в дальности в несколько процентов относительно частотных диапазонов 3,4-3,6 и 5,1-5,9 ГГц при существенном уменьшении массогабаритных характеристик, расширении ширины полосы передаваемых сигналов, повышении скорости передачи данных и снижения негативного влияния других источников сигналов.

2. Дальность связи

Повышение частоты радиосигнала неизбежно приводит к уменьшению

дистанций связи. Использование сверхширокополосных сигналов с шириной полосы от 500 МГц в диапазонах сантиметровых или миллиметровых волн при излучении на всенаправленные антенны не позволит обеспечить требуемую дальность связи, определяемую дальностью полета БПЛА ВТ. Применение направленных, как правило рупорных, антенн с высоким коэффициентом усиления позволяет увеличить дальность связи до 200 км, однако их использование возможно только совместно с системами слежения с автоматической настройкой и юстировкой. Такие системы являются дорогостоящими, габаритными и тяжелыми, в связи с чем их использование нецелесообразно.

Таким образом, повышение диапазона рабочих частот СШП систем связи до 50 ГГц, а в перспективе и до 110 ГГц, позволяет уменьшить размеры антенных элементов и создавать компактные антенные решетки с коэффициентом усиления до 50 дБ и автоматическим управлением главным лепестком диаграммы направленности антенны, что обеспечивает возможность установки таких систем связи на мобильные объекты, в том числе и летательные аппараты, обеспечивая при этом дальность связи более 100 км.

Для определения коэффициентов усиления, вида диаграмм направленности, помехоустойчивости и массогабаритных характеристик антенных решеток в диапазоне ММВ было выполнено их имитационное моделирование в среде MATLAB [15]. На рисунке 4 в качестве примера представлены трехмерные диаграммы направленности 64-элементной (а) и 256-элементной (б) адаптивной антенной решетки (ААР) при заданном направлении на приёмник полезного сигнала в 45°

относительно плоскости ААР, показанном зеленой пунктирной линией.

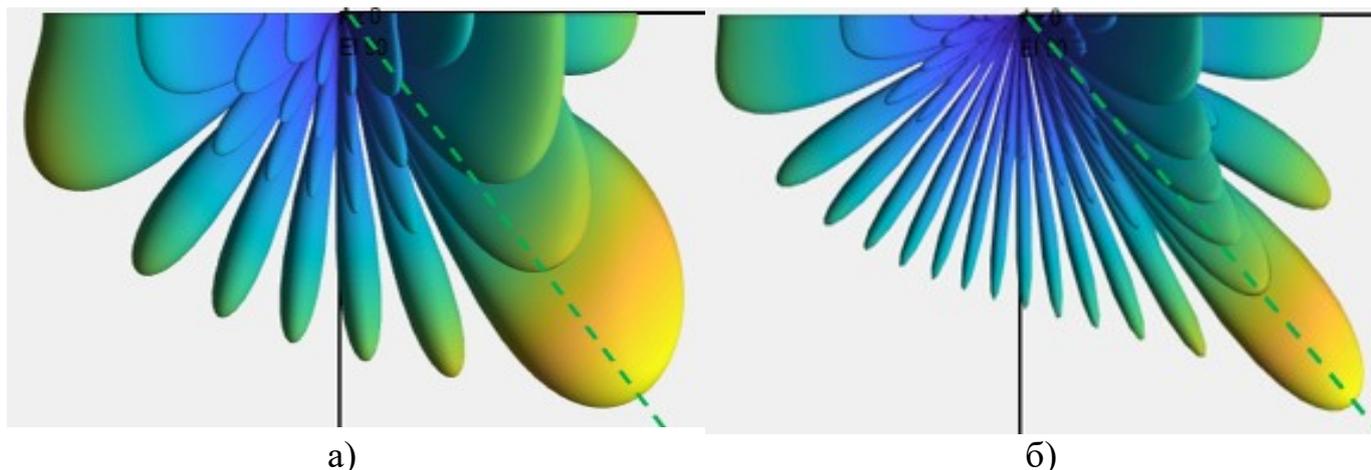


Рисунок 4 – Вид диаграммы направленности 64-элементной (а) и 256-элементной (б) ААР

Измеренные значения коэффициентов усиления в главном лепестке составляют 36 дБ для 64-элементной ААР и 48 дБ для 256-элементной ААР в диапазоне частот 18-50 ГГц. Ширина главного лепестка составляет 30° и 15° для 64- и 256- элементной ААР соответственно. При расстоянии между элементами ААР в полдлины волны геометрические размеры 64- или 256-элементных антенных решеток составляют от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, и вес в несколько десятков грамм [14, 15], что положительно сказывается на продолжительности полета и взлётной массе.

На основе анализа помехоустойчивости моделируемых ААР было установлено, что значительное снижение коэффициента усиления в главном лепестке диаграммы направленности возможно только при одновременном воздействии нескольких помех, в том числе обязательно наличие одной помехи с направления на источник полезного сигнала в диапазоне $\pm 15^\circ$ для 64-элементной ААР и $\pm 7^\circ$ – для 256-элементной ААР. Воздействие одной помехи полностью компенсируется ААР. Таким образом, использование приемо-передающих ААР в составе СУПДЛР позволит

обеспечить организацию канала связи с высокой помехоустойчивостью, удовлетворяющего предъявляемым требованиям.

Помимо частоты и параметров ААР, существенное влияние на дальность связи оказывает ширина полосы передаваемого сигнала. На рисунке 5 представлена зависимость ширины полосы сигнала от дистанции связи при различных несущих частотах сигнала для 64-элементной антенной решетки 50×50 мм² в условиях относительной влажности RH=50% и отсутствии тумана. Мощность передатчика составляет 12,5 Вт, эффективная изотропно излучаемая мощность в полосе составляет 62-70 дБм [14].

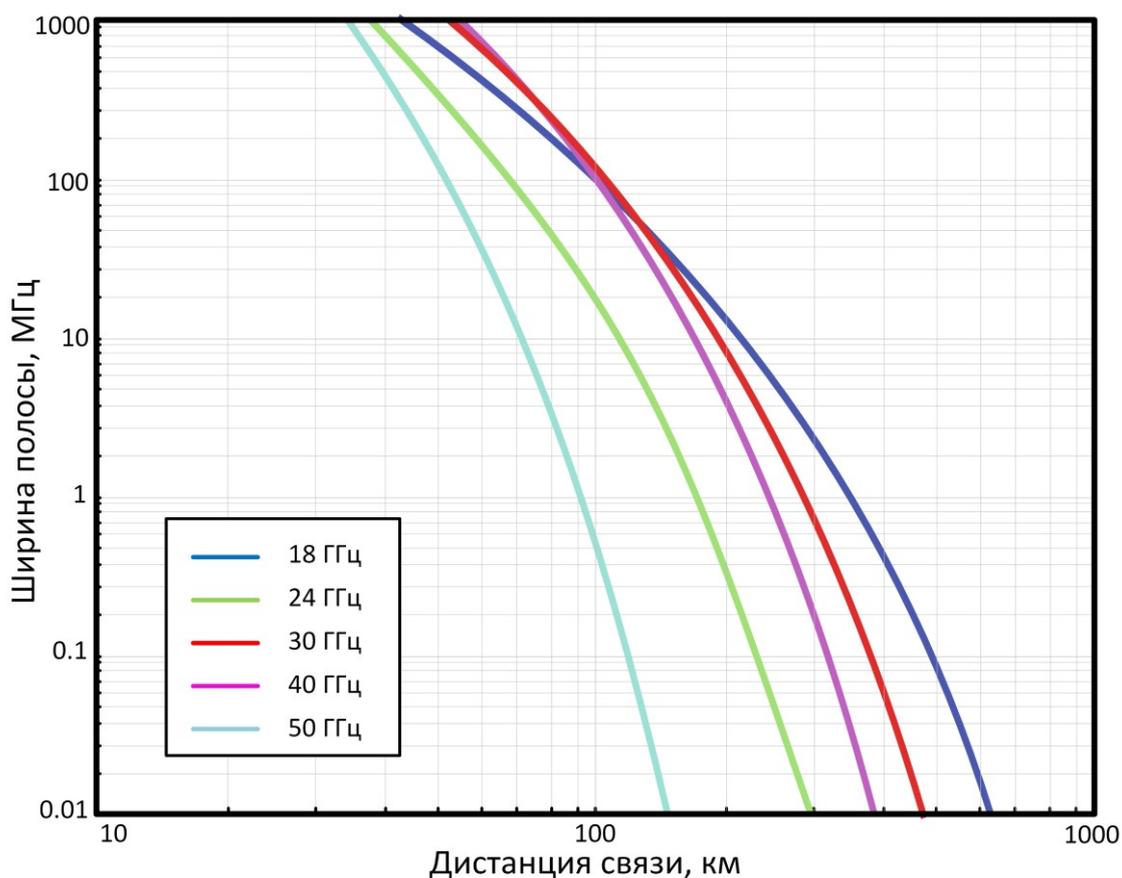


Рисунок 5 – Зависимость дистанции связи от ширины полосы сигнала

Из рисунка видно, что рассмотренная в качестве примера передающая антенная

система способна обеспечивать минимальную дистанцию связи в 35 км при ширине полосы сигнала в 1 ГГц, что превышает типовую зону полета БПЛА ВТ серии «Грач». При высоте полета БПЛА ВТ 3 км дальность прямой видимости составляет около 200 км, что указывает о необходимости уменьшения ширины полосы сигнала до 10 МГц для обеспечения требуемого качества канала связи. Адаптивное управление видом (уровнем) модуляции, скоростью кодирования, шириной полосы сигнала и т.д. позволит обеспечивать требуемые характеристики канала связи как в ближней (типовой) зоне, так и на предельных удалениях.

3. Позиционирование в пространстве

На БПЛА ВТ серии «Грач» устанавливается локальная угломерная радионавигационная система (ЛУНС) предназначенная для определения координат и угловой ориентации в пространстве БПЛА угломерным методом на основе азимутально-угломестного радиопеленгования с борта БПЛА одного или нескольких наземных радиоориентиров. В настоящее время данная система реализована с использованием отдельных приемо-передатчиков, излучающих сигналы на частотах 1 и 5,6 ГГц с шириной до 50 МГц.

Использование сверхширокополосных сигналов в канале связи позволит исключить из состава бортового оборудования аппаратуру ЛУНС как отдельный элемент за счет использования одного блока СУПДЛР, что приведет к снижению стоимости, взлетной массы, улучшению аэродинамики, уменьшению времени свертывания и развертывания БПЛА ВТ, а также повышению надежности за счет

упрощения конструкции.

Сверхширокополосные сигналы в настоящее время активно используются в высокоточных автономных системах локального позиционирования реального времени RTLS (Real-time Locating System) в промышленности, логистике и прочих областях. Использование СШП сигналов в СУПДЛР позволит увеличить точность и скорость изменения координат и угловой ориентации в пространстве за счет меньшей длительности импульсов (от 200 пс до 15 нс). При этом проводить измерение параметров возможно не по отдельному радиоканалу, а по результатам радиопеленгования сигнала канала передачи данных.

4. Генерация импульсов

Для генерации мощных наносекундных импульсов имеются два подхода, различающихся по способу накопления энергии. Это накопление в емкостных накопителях (малоиндуктивные конденсаторы и формирующие линии) с последующей передачей энергии в нагрузку через замыкающий ключ и накопление в магнитном поле индуктивного контура с током. В последнем случае для передачи энергии в нагрузку необходимо осуществить наносекундное размыкание большого тока. Второй метод представляет большой интерес для мощной импульсной техники, поскольку плотность запасаемой энергии в индуктивных накопителях на полтора-два порядка больше, чем в ёмкостных, существенно меньше стоимость накопителей. Кроме того, импульсное напряжение на нагрузке при обрыве тока может значительно превышать напряжение на предварительных ступенях формирования импульса. Однако, быстрый обрыв больших токов является более

сложным, чем быстрое замыкание. Для генерации СКИ желательно использовать полупроводниковые приборы с их практически неограниченным сроком службы и высокой стабильностью. Стоит отметить, что сочетание субнаносекундного времени размыкания и высокой импульсной мощности для полупроводниковых устройств является весьма нетривиальной задачей. С точки зрения исследования алгоритмов обработки СКИ и СШП КРС при наносекундном размыкании целесообразно использовать разрывную модель сигнала, что приводит к недифференцируемости решающей статистики.

В работе [9] показано, что для уменьшения длительности СКИ может быть использован обостритель спада на основе диода с накоплением заряда (ДНЗ). Его применение позволяет сократить длительность импульсов с 15 нс до 230 пс без снижения их амплитуды за счет использования выброса напряжения на нагрузке в качестве питающего напряжения для обострителя спада формируемого СКИ, а также использования диодов Шоттки для исключения выброса напряжения отрицательной полярности на нагрузке и сверхбыстрого восстановления высокого обратного сопротивления диодов. Использование особых схемотехнических решений [9] позволяет снизить влияние колебательных процессов в реактивных элементах схемы за счет блокирования положительных полуволн переходных колебаний и обеспечения их быстрого затухания, что позволяет повысить частоту повторения СКИ и снизить нелинейные искажения.

Альтернативным решением для снижения себестоимости изделия является использование менее дорогих диодов совместно с дополнительной линией,

позволяющей уменьшить длительность поступающих на ее вход импульсов. Так, нелинейные линии передачи (НЛП) являются хорошо известным и эффективным решением. Импульс, распространяющийся в НЛП, сужается за счет эффектов нелинейности и дисперсии. В работе [10] предложено использовать НЛП для уменьшения потерь в производительности генератора, вызванных использованием недорогих ДНЗ с относительно большим временем переключения. Было проведено экспериментальное исследование по сжатию пикосекундных импульсных сигналов с помощью НЛП, показавшее возможность уменьшения длительности импульса с 350 пс до 210 пс, сохраняя при этом его амплитуду практически неизменной.

Таким образом, в зависимости от требований по ширине спектра (длительности импульсов) и стоимости генератора, возможно подобрать одно из научно обоснованных схемотехнических решений [9, 10].

5. Алгоритмы обработки сигналов

Переход от узкополосных сигналов к нано- и субнаносекундным требует решения большого круга фундаментальных задач, связанных с тем, что принципы генерации СКИ, методы их излучения и приема, а также методы обработки сигналов и извлечения из них полезной информации, коренным образом отличаются от используемых в случае узкополосных сигналов. Алгоритмы обработки СШП КРС отличаются как от аналогичных алгоритмов, разработанных для узкополосных сигналов, так и от алгоритмов, синтезированных для СКИ.

В области приема и обработки СШП сигналов известны методы корреляционной обработки, однако не существует законченных методов и устройств,

позволяющих ее реализовывать. Также известны методы стробоскопического приема импульсов, обладающие низкой скоростью обработки. Целесообразным подходом является разработка СШП корреляционного приемника, который производил бы корреляционную обработку в СШП частотном диапазоне. В качестве активного элемента такого преобразователя планируется использовать ячейку Гилберта на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ транзисторов). Такой подход позволит повысить скорость обработки принимаемых сигналов и улучшить отношение сигнал/шум на выходе приемника.

В работе [11, 16, 17] создан необходимый задел в части алгоритмов обнаружения, различения и оценки параметров СШП КРС в условиях априорной неопределённости и воздействия мешающих воздействий. Развитие статистических алгоритмов, а также внедрение в них нейросетевых алгоритмов [18-20] позволят повысить эффективность обработки СШП сигналов в условиях сложной помеховой обстановки.

6. Размещение СУПДЛР на БпЛА ВТ

Размещение СУПДЛР целесообразно в одном из блоков целевой нагрузки (ЦН). Варианты размещения блоков (ЦН) на борту БпЛА ВТ серии «Грач» представлены в виде схемы БпЛА с ЦН на рисунке 6, где для их установки предусмотрены следующие места на борту БпЛА: в нижней части каркаса (крепление за горизонтальные балки); симметрично по бортам (крепление за вертикальные и горизонтальные балки); в хвостовой части (крепление за хвостовую балку снизу). Интегральная конструкция целевой нагрузки с шасси вертолета

является быстросъемной. При этом шасси вертолета, в зависимости от функционального назначения целевой нагрузки, выполняется из проводящего материала или диэлектрика.

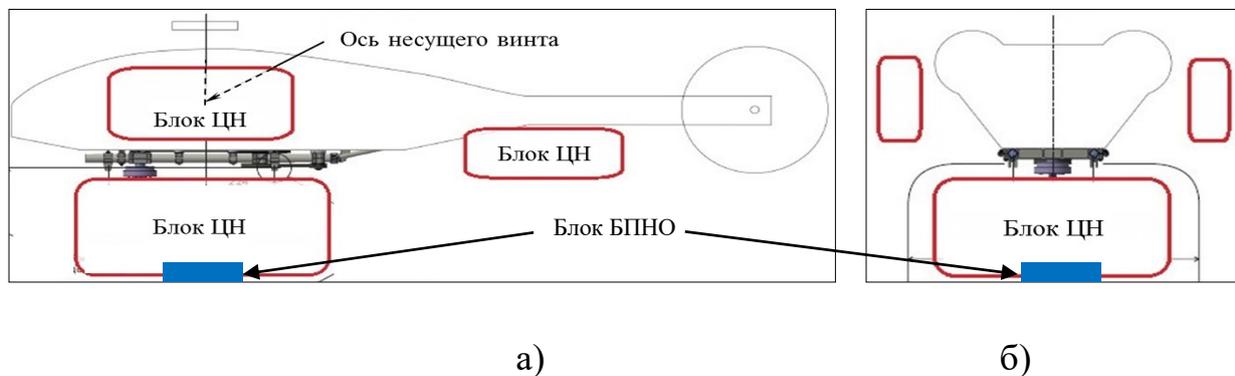


Рисунок 6 – Схема БПЛА ВТ серии «Грач» с вариантами размещения блоков ЦН на борту БПЛА: а) вид вдоль поперечной оси БПЛА; б) вид вдоль продольной оси БПЛА

Из рисунка 6 видно, что установка СУПДЛР только в нижней точке блока ЦН, расположенного под каркасом БПЛА ВТ, предотвращает перекрытие сигнала корпусом БПЛА ВТ при полете и маневрировании. Блок СУПДЛР на рисунке 14 схематически изображен синим цветом.

Выводы

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что существующая система связи и передачи данных существенно уступает по тактико-техническим характеристикам системе связи, базирующейся на сверхширокополосных сигналах. Оснащение БПЛА ВТ легкого класса серии «Грач» СУПДЛР позволит обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к изделию: увеличение дальности эффективного использования аппаратуры связи и локации, скорости передачи информации,

скрытности работы, устойчивости к внешним помехам, уменьшение массогабаритных характеристик, снижение негативного влияния других источников сигналов и т.д.

Основные принципы построения сверхширокополосного канала связи на БпЛА ВТ, определяющие технический облик и характеристики СУПДЛР, заключаются в следующем:

- канал связи должен быть организован с использованием сверхширокополосных квазирадиосигналов, создание которых возможно путем суперпозиции смещенных во времени сверхкоротких видеоимпульсов;
- оптимальным диапазоном рабочих частот является диапазон 18-20 ГГц, который в перспективе может быть расширен до 50 ГГц или смещен в область 70-110 ГГц;
- ширина спектра сигнала должна адаптивно изменяться в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц в зависимости от требований по пропускной способности и дальности связи, при этом типовой является ширина полосы 1 ГГц;
- в качестве приемо-передающих антенн должны использоваться адаптивные антенные решетки с 64 или 256 элементами;
- в структуре приемника должны быть дополнительно реализованы алгоритмы работы локальной угломерной радионавигационной системы для возможности создания единой СУПДЛР;
- для обработки сигналов должны быть использованы корреляционные приемники, структурно дополненные измерителями параметров и различителями сигналов, в том числе функционирующих на основе нейронных сетей, для обеспечения возможности функционирования СУПДЛР в условиях сложной помеховой обстановки;

- генераторы импульсов длительностью от 15 нс до 210 пс должны быть реализованы на основе диодов с накоплением заряда с обострителем спада или нелинейных линий передач;
- оптимальным вариантом размещения СУПДЛР на БпЛА ВТ является нижняя точка блока целевой нагрузки, расположенного под каркасом летательного аппарата.

Созданный в настоящее время научно-технический задел [9-11, 15-18] позволяет обосновать реализуемые требования и технический облик СУПДЛР и приступить к ее внедрению в БпЛА ВТ. Разработка и интеграция сверхширокополосной СУПДЛР в БпЛА ВТ серии «Грач» планируется при создании третьей версии летательного аппарата, летные испытания которого запланированы на 2022 год.

Список источников

1. Виноградов А.Д., Зайцев И.В., Молев А.А. Развитие наземной мобильной техники радиоподавления радиосвязи на основе ее оснащения беспилотными вертолетами // Военная мысль. 2017. № 4. С. 56-60.
2. Зибров Г.В., Лавричев О.В. Инициатива+интеграция=современное вооружение эффективное взаимодействие военно-воздушной академии с предприятиями оборонно-промышленного комплекса - фактор инновационного развития военной техники // Вестник военного образования. 2020. № 1 (22). С. 18-22.
3. Бархоткин В.А., Архипкин А.В., Петров В.Ф., Комченков В.И., Гурджи А.И.,

- Соколов А.Л. Направления совершенствования робототехнических комплексов военного назначения в части увеличения помехозащищенности при работе в условиях радиоэлектронного конфликта // Труды XII Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления". 2017. С. 517-522. URL: http://psct.ru/files/Sbornik_trudov_XII_VNPK_PSiZU_2017_Soderjanie.pdf
4. Гуревич О.С., Кессельман М.Г., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81143>
5. Удодов А.Н. Анализ возможностей построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей для мониторинга работы двигателей // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49303>
6. Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems // First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC 02-48, Feb., 2002. pp.1 - 118. URL: <https://www.fcc.gov/document/revision-part-15-commissions-rules-regarding-ultra-wideband>
7. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. – М.: Радиотехника, 2009. - 288 с.
8. Степанов А., Агейкин В., Семерунин Д. Перспективные технологии радиосвязи тактического звена // Радиоэлектронные технологии. 2019. № 3. С. 96-102.
9. Бобрешов А.М., Жабин А.С. и др. Обострение спада сверхкоротких импульсов // Радиолокация, навигация, связь. 2020. Т. 6. С. 62-69.
10. Бобрешов А.М., Жабин А.С. и др. Использование нелинейных линий передачи

- для сжатия пикосекундных импульсных сигналов // Радиолокация, навигация, связь. 2021. Т. 4. С. 150-157. URL: https://rlnc.ru/sites/default/files/conference/RLNC-2021_4.pdf
11. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Синтез и анализ алгоритмов обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. - 128 с.
12. Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Seregina E.A., Uskov G.K. Biconical antenna with inhomogeneous dielectric lens for UWB applications // Electronics Letters, 2020, vol. 56, no. 17, pp. 857-859. DOI: [10.1049/el.2020.1098](https://doi.org/10.1049/el.2020.1098).
13. Жижин В. Будущее широкополосной радиосвязи: миллиметровый диапазон // Беспроводные технологии. 2017. № 1(46). С. 51-55.
14. Dr. Timothy Hancock. Millimeter Wave Digital Arrays (MIDAS). DARPA MTO Program Manager, 2019. URL: https://mmwrcnece.wiscweb.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/678/2019/02/Keynote_2_Hancock_012919.pdf
15. Титов К.Д., Войнаровская М.С., Корнеева М.А. Моделирование адаптивных антенных решёток миллиметрового диапазона в условиях сложной помеховой обстановки // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 108.
16. Трифионов А.П., Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Эффективность обнаружения одного класса сверхширокополосных сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 8. С. 1235-1240. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/46315>

17. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Обнаружение сверхширокополосного квазирадиосигнала на фоне мешающих сигналов // Радиотехника. 2020. № 9. С. 72-82.
18. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г., Космодемьянский С.А. Обзор применения нейросетевых технологий в радиофизических приложениях // Системная инженерия и информационные технологии. 2021. Т. 3. № 1 (5). С. 81 - 95.
19. Малыгин И.В., Бельков С.А., Тарасов А.Д., Усвяцов М.Р. Применение методов машинного обучения для классификации радиосигналов // Труды МАИ. 2017. № 96.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?I=85797>
20. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Формирование оценки направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58786>

References

1. Vinogradov A.D., Zaitsev I.V., Molev A.A. *Voennaya mysl'*, 2017, no. 4, pp. 56-60.
2. Zibrov G.V., Lavrichev O.V. *Vestnik voennogo obrazovaniya*, 2020, no. 1(22), pp. 18-22.
3. Barkhotkin V.A., Arkhipkin A.V., Petrov V.F, Komchenkov V.I, Gurdzhi A.I., Sokolov A.L. *Trudy XII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya"*, 2017, pp. 517-522. URL: http://psct.ru/files/Sbornik_trudov_XII_VNPK_PSiZU_2017_Soderjanie.pdf

4. Gurevich O.S., Kessel'man M.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81143>
5. Udodov A.N. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49303>
6. *Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems*, First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC 02-48, Feb., 2002. pp.1 - 118. URL: <https://www.fcc.gov/document/revision-part-15-commissions-rules-regarding-ultra-wideband>
7. Radzievskii V.G., Trifonov P.A. *Obrabotka sverkhshirokopolosnykh signalov i pomekh* (Processing of ultra-wideband signals and interference), Moscow, Radiotekhnika, 2009, 288 p.
8. Stepanov A., Ageikin V., Semerunin D. *Radioelektronnye tekhnologii*, 2019, no. 3, pp. 96-102.
9. Bobreshov A.M., Zhabin A.S. et al. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'*, 2020, vol. 6, pp 62-69.
10. Bobreshov A.M., Zhabin A.S. et al. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'*, 2021, vol. 4, pp. 150-157. URL: https://rlnc.ru/sites/default/files/conference/RLNC-2021_4.pdf
11. Korchagin Yu.E., Titov K.D. *Sintez i analiz algoritmov obrabotki sverkhshirokopolosnykh kvaziradiosignalov* (Synthesis and analysis of algorithms for processing of ultra-wideband quasi-radio signals), Voronezh, Izdatel'skii dom VGU, 2019, 128 p.

12. Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Seregina E.A., Uskov G.K. Biconical antenna with inhomogeneous dielectric lens for UWB applications, *Electronics Letters*, 2020, vol. 56, no. 17, pp. 857-859. DOI: [10.1049/el.2020.1098](https://doi.org/10.1049/el.2020.1098).
13. Zhizhin V. *Besprovodnye tekhnologii*, 2017, no. 1(46), pp. 51-55.
14. Dr. Timothy Hancock. *Millimeter Wave Digital Arrays (MIDAS)*. DARPA MTO Program Manager, 2019. URL: https://mmwrcnece.wiscweb.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/678/2019/02/Keynote_2_Hancock_012919.pdf
15. Titov K.D., Voinarovskaya M.S., Korneeva M.A. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikatsii*, 2021, no. 4, pp. 108.
16. Trifonov A.P., Korchagin Yu.E., Titov K.D. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2018, vol. 88, no. 8, pp. 1235-1240. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/46315>
17. Korchagin Yu.E., Titov K.D. *Radiotekhnika*, 2020, no. 9, pp. 72-82.
18. Korchagin Yu.E., Titov K.D., Petrov Yu.G., Kosmodem'yanskii S.A. *Sistemnaya inzheneriya i informatsionnye tekhnologii*, 2021, vol. 3, no. 1 (5), pp. 81 - 95.
19. Malygin I.V., Bel'kov S.A., Tarasov A.D., Usvyatsov M.R. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85797>
20. Efimov E.N., Shevgunov T.Ya. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58786>

Статья поступила в редакцию 24.11.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 21.02.2022

The article was submitted on 24.11.2021; approved after reviewing on 15.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.