

УДК 621.39

## Модель формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотных транспортных систем в условиях помех

Будко Д. Д., Каретников В. В.

**Постановка задачи:** в настоящее время транспортная отрасль России опережающими темпами развивает беспилотные технологии на ключевых направлениях научного прогресса. При этом важно учитывать, что использование авиационных, космических, наземных, морских и речных беспилотных транспортных систем на глобальных дальностях или в черте города сопровождается применением беспроводных технологий на базе радиоканалов различных диапазонов волн, подвергаемых деструктивному воздействию шумов, помех, замираний и иных дестабилизирующих факторов. В свою очередь можно констатировать факт, что радиочастотный спектр уже давно разделен между лицензиатами и продолжает перегружаться в связи с взрывным ростом внедрения ведомствами автономных систем, особенно в крупных мегаполисах и транспортно-логистических узлах, портах и промышленных агломерациях. В тоже время, повышение числа высокоскоростных автономных систем, порою работающих на гиперзвуковых скоростях, требует от разработчиков новых подходов по доведению команд управления в режиме реального времени. В статье ставится задача на разработку модели формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами, передаваемых в режиме параллельной трансляции каждого бита по доступным радиоканалам, свободным от помех. **Цель работы:** разработка модели формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотных транспортных систем в условиях помех на основе применения интеллектуальных технологий. **Используемые методы:** методы динамического управления радиочастотным спектром на основе технологий расширения спектра с изменением рабочей частоты по псевдослучайному закону, расширением спектра методом прямой последовательности и расширением спектра методом линейной частотной модуляции, технологии когнитивных радиосистем и программно-определяемого радио. К основным **результатам исследования** можно отнести нормативно-правовое обоснование необходимости динамического управления частотным ресурсом в условиях помех, определение исходных данных на моделирование и непосредственно модель формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами в условиях помех, проверка предложенной модели на адекватность, схемная реализация формирователя многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами в условиях помех, а также предложения по направлениям дальнейшего исследования. **Новизна** состоит в представлении геометрической модели формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами при различных порогах уровня сигнала на фоне шумов и помех в командной радиолинии, а также расчете вероятности правильного приема сигнала команды управления с изменяющейся полосой частот сигнала в зависимости от соотношения ширины полос частот, находящейся под помехой и свободной от неё. **Практической значимостью** модели является использование ее при синтезе перспективной системы интеллектуального управления беспилотными транспортными средствами ведомства на основе данных мониторинга их состояния и среды функционирования.

**Ключевые слова:** беспилотные транспортные системы, когнитивные радиосистемы, программно-определяемое радио, радиочастотный спектр, технологии расширения спектра.

### Библиографическая ссылка на статью:

Будко Д. Д., Каретников В. В. Модель формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотных транспортных систем в условиях помех // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 1. С. 182-218. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-182-218

### Reference for citation:

Budko D. D., Karetnikov V. V. A model for generating multi-frequency control command signals for unmanned transport systems under interference conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 1, pp. 182-218 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-182-218

## Актуальность

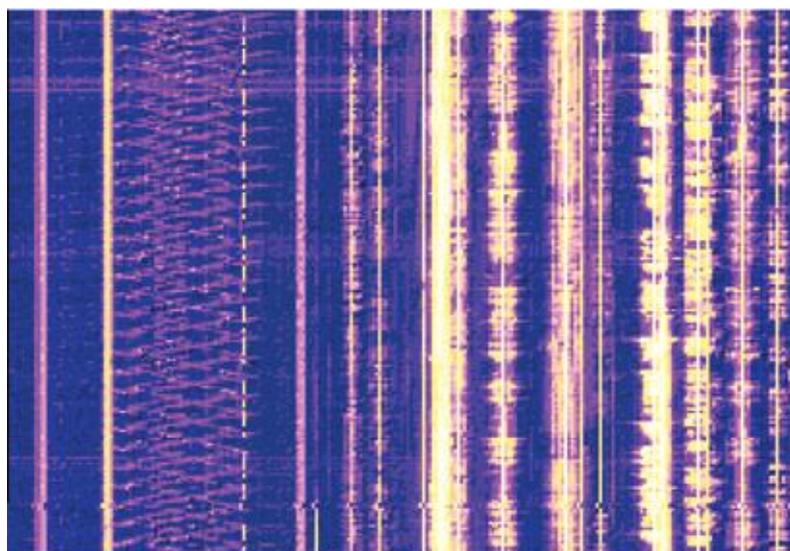
В последние годы транспортная отрасль России существенно нарастила исследования по внедрению беспилотных технологий на ключевых цифровых векторах развития, от электронного документооборота и формирования оптимальных мультимодальных маршрутов до электронных грузовых и пассажирских сервисов и технологий беспилотных транспортных систем (БТС).

В прошлом году успешно проведены тестовые перевозки автономными фурами без вмешательства человека по маршруту Москва – Тула – Москва (400 км) и Санкт-Петербург – Казань (1,6 тыс. км). При этом экономическая целесообразность состоит в том, что классическая грузоперевозка по тем же маршрутам требует в два раза больше времени из-за необходимости соблюдения для водителей режима труда и отдыха. Также в 2025 году в Московской области по Центральной кольцевой автодороге (ЦКАД) был осуществлено масштабное внедрение беспилотных перевозок. На сегодня уже более 100 беспилотных грузовиков эксплуатируются как с водителем в кабине (1 категория), так и без него (2 категория). Аэропорт Пулково впервые в России стал применять беспилотные тягачи для перемещения багажа. С 2025 года Московский метрополитен начал тестовую эксплуатацию беспилотного метropоезда на современном составе серии «Москва». Беспилотные технологии также развиваются и на водном транспорте. Несколько лет на Северо-Западе страны используются большие автономные паромы «Генерал Черняховский», «Маршал Рокоссовский», которые прошли уже 214 тыс. морских миль, переместив более 2 млн. тонн грузов. В 2025 году к ним добавилось третье автономное судно «Копорье». На сегодня в Минтрансе начал функционировать Экспертный совет по развитию автономного судоходства в России. Активно идет разработка безэкипажных катеров (БЭК) и транспортных судов (БЭС) различного класса. В настоящее время идет завершение формирования проекта Федерального закона о высокоавтоматизированных транспортных средствах (ВАТС), внедрение которого позволит БТС выйти на внутренние водные пути (ВВП) России и дороги общего пользования, а также станет важной вехой в создании национальной цифровой транспортно-логистической платформы [1].

Поднимая проблемы ускоренного и опережающего развития национальной индустрии беспилотных технологий на совещании по вопросам развития автономных систем 16 января 2026 года В.В. Путин указал, что в настоящее время в повестку дня уровня Правительства по данной предметной области должны включаться вопросы опережающего развития и создания транспортных, промышленных и сервисных систем, способных работать во всех средах: в воздухе, на земле, в космическом и водном пространствах, с использованием цифровых платформ и искусственного интеллекта [2].

Обратим внимание, что широкое внедрение в наш обход беспилотных технологий – это не дань моде, а непреложный факт времени, открывающий путь к обеспечению конкурентоспособности в мире, решению проблем социально-экономического развития на фоне демографический провалов и дефицита на рынке труда, укреплению безопасности и суверенитета России.

Важно отметить, что использование авиационных, наземных, морских и речных БТС на глобальных дальностях или в черте города сопровождается применением беспроводных технологий на базе радиоканалов различных диапазонов волн, подвергаемых деструктивному воздействию различных шумов, помех, замираний и иных дестабилизирующих факторов (ДФ). Это является существенным фактором, который необходимо учитывать, тем более, что в черте мощных индустриальных центров и крупных мегаполисов используемая для беспроводных технологий среда распространения радиоволн (РРВ) не только перегружена сосредоточенными помехами в виде частотных назначений, занятых первичными пользователями (ПП), так называемыми лицензиатами, но и подвергается беспрецедентной степени деструктивных воздействий различных ДФ, вызываемых на крупных промышленных предприятиях сложными производственными процессами и представленными импульсами и излучениями электромагнитной и электростатической индукции случайной природы, рис. 1. Особое беспокойство с точки зрения безопасности вызывают воздействие на радиочастотный спектр (РЧС) в каналах управления БТС различного рода дуговых разрядов контактных сетей железных дорог (электротранспорта) и прохождение грозового фронта через их маршруты, рис. 2.



Фрагмент А

Рис. 1. Спектрограмма типа «Водопад» реального диапазона волн с фрагментом постоянно действующего широкополосного источника излучения ( $\Delta f \approx 100$  кГц)

Другим важным учитываемым фактором при формировании каналов управления является оперативность доведения командной информации до БТС. На сегодня, в связи с взрывным ростом числа применяемых ведомствами высокоскоростных ВАТС, робототехнических комплексов (РТК) и платформ (РТП) как в интересах сферы услуг, хозяйственной деятельности, так и для решения специальных задач, кратно возрастает необходимость в доведении до них значительных объемов команд управления (КУ) и навигации в режиме реального вре-

мени (on-line). При этом следует отметить, что если для различных стационарных обитаемых объектов и пилотируемых мобильных глобально перемещающихся объектов (ГПО) объем информации и обеспечение режима on-line не так критичны, поскольку лицо, принимающее решение (ЛПР), находится непосредственно на объекте управления, то для необитаемых ГПО доведение КУ от ситуационного центра (СЦУ) или пункта управления (ПУ) крайне важен именно режим реального времени, влияющий на оперативность получения и правильность выполнения БТС заданных маневров в аварийной ситуации, и, следовательно, влияет на безопасность движения по маршруту, а также эффективность функционирования и выполнение миссии.

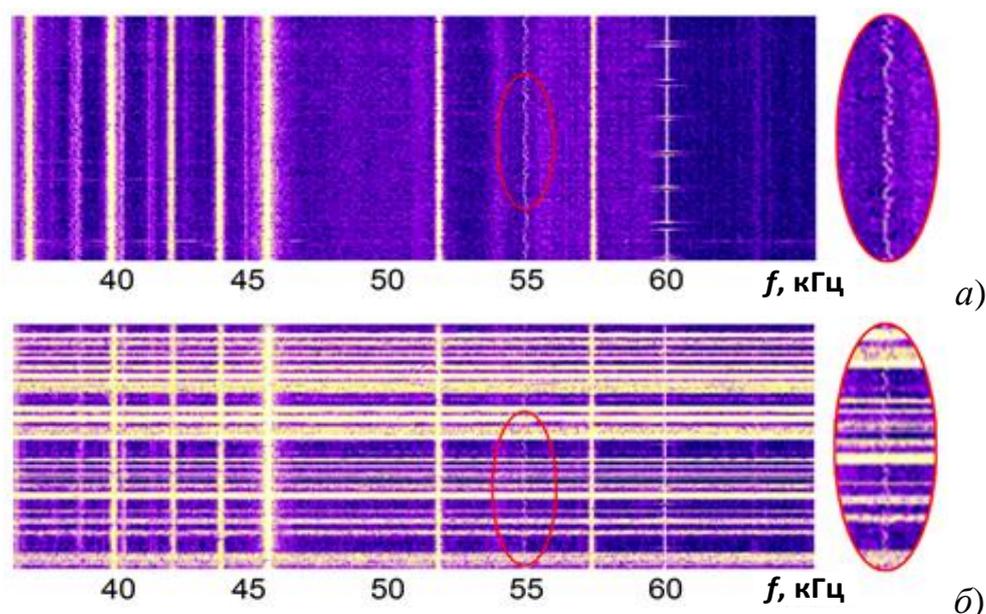


Рис. 2. Спектрограммы принимаемой команды управления: а) при слабых атмосферных шумах и мощности излучения сигнала  $P_{\text{изл}} \approx 0,1$  кВт; б) при прохождении грозового фронта на маршруте перемещения БТС ( $P_{\text{изл}} \approx 0,1$  кВт)

Высокий уровень востребованности и дефицит радиочастотного ресурса требует от научного сообщества проработки разных технологических решений и административных подходов, направленных на повышение эффективности использования РЧС. При анализе этого вопроса на Всемирных конференциях по радиосвязи в XXI веке [3-5] говорилось, что сам по себе процесс динамического управления спектром весьма сложен с технической точки зрения и может быть широко применим только в интеллектуальных радиосистемах, способных осуществлять прогноз состояния радиоканала, а также анализ и извлечение информации из окружающего радиопространства, рационально адаптируя предоставляемые пользователям радиосети сервисы в зависимости от загрузки диапазона частот, помеховой обстановки и изменений среды РРВ. Впервые для описания интеллектуальных радиосистем в 1999-2000 гг. Д. Митоллой был предложен термин «когнитивное радио» – Cognitive Radio Sistem (CRS)<sup>2</sup> [4].

<sup>2</sup> Здесь когнитивность используется в контексте «способности к познанию и самообучению».

Таким образом, возникает самостоятельная задача не только для Минтранса, но и для других министерств и ведомств РФ, и, прежде всего, для Минцифры, по созданию набора отечественных технологий в навигации и телекоммуникациях для полномасштабного развертывания систем интеллектуального управления БТС в режиме реального времени с предотвращением несанкционированного доступа к данным, которые они передают и получают на маршруте движения [2].

Эта задача может быть решена через разработку модели формирования многочастотных сигналов команд управления БТС в условиях помех на основе применения интеллектуальных технологий, что является *целью данной статьи*.

## 1. Основные термины и обозначения

В ходе выполнения процедур моделирования каналов управления БТС, в работе использованы следующие обозначения, таблица 1, и термины, таблица 2.

Таблица 1 – Основные обозначения и их физический смысл

Обозначение	Физический смысл обозначения
$\Delta F$	Заданная полоса частот радиолинии
$\Delta f$	Шаг сетки частот возбуждательного устройства радиопередающего устройства
$N$	Число программно формируемых радиоприемников в бортовом многоканальном радиоприемном устройстве беспилотного транспортного средства
$U_{\text{пор1}}, U_{\text{пор2}}$	Пороговые значения уровней сигнала
$\Delta F_{\text{п}}$	Участок полосы частот, занятый помехой
$\Delta F_0$	Участок полосы частот, свободный от помех
$\Delta f_{\text{с}}$	Полоса частот, занятая полезным сигналом
$p$	Вероятности правильного приема команды управления (сигнала)
$h_{\text{п}}$	Измеренный уровень помехи в радиолинии (на заданной частоте РЧС) методом энергетического обнаружителя
$h_{\text{доп}}$	Допустимым уровнем помех в радиолинии

Таблица 2 – Основной терминологический аппарат

Терминологический аппарат	Характеристика, описание, физический смысл сущностей, процессов, объектов и субъектов разрабатываемой модели
Первичный пользователь РЧС	Пользователь участка радиочастотного спектра (РЧС) (или частотного назначения) на основе лицензии на их распределение Государственной комиссии по радиочастотам
Вторичный пользователь РЧС	Пользователь участка РЧС (или частоты) на вторичной основе, в отсутствии штатной работы на излучение первичного пользователя
C2	Радиолиния управления и контроля полетом C2 (Command, Control) беспилотного летательного аппарата (БПЛА)
C3	Радиолиния передачи данных C3 (Command, Control, Communication), предназначена для управления, контроля и связи
BPSK	Двоичная фазовая манипуляция
QPSK	Квадратурная фазовая манипуляция

Терминологический аппарат	Характеристика, описание, физический смысл сущностей, процессов, объектов и субъектов разрабатываемой модели
FHSS	Режим перестройки рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ)
DSSS	Direct sequence spread spectrum (англ.) – расширение спектра методом прямой последовательности (ППС)
CSS	Chirp spread spectrum (англ.) – расширение спектра методом линейной частотной модуляции (ЛЧМ)
SDR	Software Define Radio (англ.) – программно определяемая радиосистема, радиопередатчик и (или) радиоприёмник, в которых компоненты, традиционно реализованные в аналоговых аппаратных средствах, выполняются с помощью программного обеспечения на компьютере или встроенной системе
CRS	Cognitive Radio System (англ.) – система когнитивного радио, это радиосистема, функционирующая на основе постоянного изучения окружающей электромагнитной среды и своего внутреннего состояния, использующая полученные знания для динамической корректировки своих эксплуатационных параметров и протоколов в интересах достижения поставленных целей
ЕС OpВД	Единая система организации воздушным движением России
Минтранс России	Министерство транспорта Российской Федерации структурно включает: Федеральное агентство воздушного транспорта – Росавиация; Федеральное агентство железнодорожного транспорта – Росжелдор; Федеральное агентств морского и речного транспорта России – Росморречфлот; Федеральное дорожное агентство – Росавтодор; Федеральную службу по надзору в сфере транспорта – Ространснадзор

## 2. Нормативно-правовое обоснование необходимости динамического управления частотным ресурсом в условиях помех

Говоря о нормативно-правовом регулировании использования РЧС в интересах применяемых на сегодня в различных отраслях экономики страны (и проектируемых к использованию в ближайшей перспективе) перечня наземных, авиационных, космических, морских и речных автономных систем и БТС, необходимо отметить, что только космические и беспилотные авиационные системы адекватно представлены пакетом законодательных актов международного и национального уровня. К ним всецело относятся различные национальные и международные Авиационные Правила и Стандарты, типа ГОСТ Р 56122-2014, ГОСТ Р 57258-2016, ГОСТ Р 59517-2021, ГОСТ Р 59518-2021, ГОСТ Р 59519-2021, ГОСТ Р 59751-2021, ГОСТ Р 59797-2021, ГОСТ Р 70569-2022, ISO/IEC-4005-1(2, 3, 4)-2023, документы ИКАО 328-AN190, в том числе стандарты и документы блока НАТО сер. STANAG, AEP, AAMEDP и др.

При этом для внедрения наземного и водного беспилотного транспорта в повседневную деятельность министерств и ведомств, а также в жизнь частного бизнеса, еще необходимо решить множество задач, и среди них, прежде всего:

- преодолеть административные барьеры и инерционность внесения изменений в национальное законодательство и в правовое поле не только актов по крупным БТС, но также по малым автономным устройствам, типа робот-доставщик;

- вопрос безопасности, предотвращения несанкционированного доступа (НСД) к управлению БТС, принимаемым и передаваемым ими данным;
- формирование правовой основы для сквозного управления БТС через спутники, а также внедрение их сквозной идентификации во всех средах и осуществление в реальном времени мониторинга состояния, что является шагом к созданию перспективной системы единого управления любым числом автономных объектов (ГПО), а фактически, так называемого бесшовного «цифрового неба», когда в единую сеть интегрированы наземные, воздушные, морские и космические РТК;
- организация и проведение сертификации разных типов БТС, а также определение для них исчерпывающих, однозначных и измеряемых требований, включая ответственность за транспортные происшествия;
- создание полного набора отечественных технологий в навигации и телекоммуникациях для полномасштабной системы интеллектуального управления БТС во всех средах: на земле, в небе, на море, в Космосе;
- развитие национальной индустрии БТС на суверенной технологической и производственной платформе с использованием собственных инженерно-научных школ, включая механизмы подготовки кадров;
- потребность в создании экономики БТС и выход на мировые рынки [2].

Основываясь на публикациях последних десятилетий мирового научного сообщества [3-10] и эксплуатантов радиоэлектронных систем (РЭС), а также на результатах наблюдений Федеральной комиссии связи США, можно сказать, что на сегодня весь РЧС уже распределен между первичными пользователями и лицензирован, но при этом его задействование не в полной мере отвечает запросам времени [6]. Повысить эффективность применения РЧС возможно через механизм динамического управления спектром, согласно которому вторичные пользователи, не имеющие лицензионного назначения частоты, могут передавать на радиочастотах первичных пользователей при отсутствии их штатной работы. Еще в 2011 году такой механизм был закреплён в стандарте IEEE 802.22 Международным союзом электросвязи (МСЭ).

Сама по себе технология динамического управления РЧС весьма сложна при технической реализации и может быть осуществима лишь в когнитивных радиосистемах. При этом применимы и административно-правовые решения, повышающие эффективность распределения РЧС на вторичной основе.

Сегодня производители РЭС, совместно с учеными активно ведут поиск инструментов построения систем широкополосного радиодоступа телевизионного диапазона частот 54 – 862 МГц. Именно для чего на принципах когнитивного радио (CRS-радиосистем) и разрабатывался стандарт IEEE 802.22 беспроводной передачи данных [5], позволяющий совместно и безлицензионно использовать частотный спектр на вторичной основе, рис. 3.

В тоже время в правовом поле РФ нет конкретной установки на фиксацию по времени использования РЧС на вторичной основе CRS-радиосистемами – секунды, минуты, часы или сутки. Все зависит от специфики выбранного диапазона, динамического состояния среды РРВ, параметров используемых сигналов и режимов работы пользователя, а также руководящих документов Государственной

комиссии по радиочастотам (ГКРЧ). При этом основным требованием для такой ситуации остается непреложное освобождение используемой частоты в случае начала работы ПП. Поэтому к одной из функций CRS-радиосистемы относят наличие задачи спектрального зондирования среды РРВ, а также разработку процедур адаптации, чтобы исключить создание помехи работе ПП. Обычно это регулируется техническими регламентами и Правилами ведения радиосвязи, а также принципами, прописанными в ФЗ «О связи» [12]:

- отсутствие активной работы – вторичному пользователю разрешено работать на передачу пока лицензиат (ПП) не использует эту полосу;
- динамический доступ – любая когнитивная радиосистема должна работать по принципу listen-before-talk («чувствуй и уходи»).

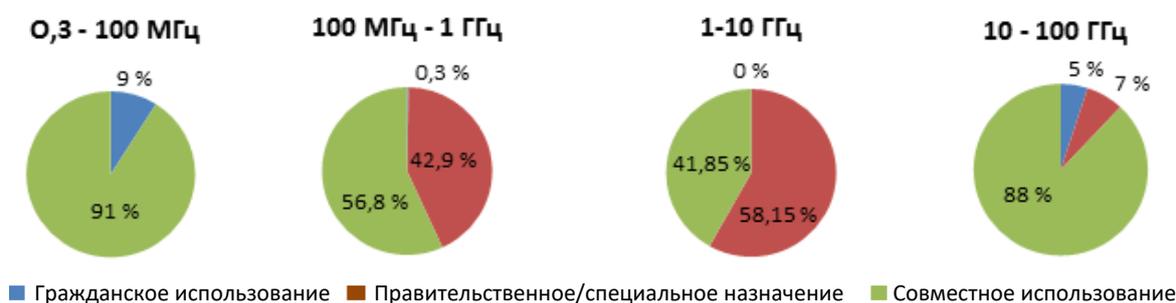


Рис. 3. Разделение радиочастотного спектра по категориям пользователей [11]

По данным специалистов Cisco и Veal Labs, каждые два года объемы передаваемого мобильного трафика в мире возрастает более чем в 20 раз. Это дает основание считать, что радиочастотные ресурсы давно исчерпаны даже в региональных радиосетях, не говоря о крупных городских и промышленных агломерациях. При этом, как отмечает ETSI (Европейский институт электросвязи), всестороннее внедрение когнитивного радио (CRS-радиосистем) пока еще нереализуемо повсеместно [3], в то время как по оценке специалистов в будущем такие радиосистемы будут работать в диапазоне от 9 кГц до 300 ГГц [5].

### 3. Определение исходных данных на моделирование процесса формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами в условиях помех

Прежде чем приступить к моделированию канала управления БТС в условиях помех, необходимо определиться с какими радиоканалами мы будем иметь дело. А поскольку, как было отмечено выше, в нормативно-правовом поле по формированию пакета национальных ГОСТов и Правил для наземных, морских (речных) БТС пока, по большей части, наблюдается некоторое отставание (в сравнение с беспилотными авиационными системами – БАС), то рассмотрим рекомендации национальных и международных организаций в области беспилотной авиации для последующей возможной их трансляции (тиражирования) при использовании и возможном применении данных технологических подходов в области каналов управления другими видами БТС.

На сегодня Решением ГКРЧ от 27.09.2023 г. № 23-68-02 определены полосы радиочастот для использования РЭС линий управления БАС гражданского назначения и их контроля. Также Федеральными авиационными правилами, утв. приказом Минтранса России от 24.04.2025 г. № 142 «Об утверждении Федеральных авиационных правил (ФАП) [13] «Порядок организации и обеспечения функционирования линий управления беспилотными авиационными системами и контроля беспилотных авиационных систем» определено применение радиолинии (РЛ) С2/С3 беспилотных летательных аппаратов (БПЛА):

- радиокомандная линия управления и контроля полета – линия С2 (Command and Control) обеспечивает функции с возможностью внешнему пилоту БПЛА в реальном масштабе времени управлять полетом.
- линия передачи данных С3 (Command, Control, Communication) предназначена для управления, контроля и связи. Для управления полетом БПЛА могут использоваться несколько пунктов дистанционного пилотирования (ПДП), причем в каждый заданный момент времени БПЛА управляется только одним ПДП, связанным с пунктом дистанционно-пилотируемой авиационной системой (ДПАС) в регионах. Введенные только в 2025 году ФАП требования по развертыванию наземной инфраструктуры ПДП и ДПАС пока вызывает много вопросов, в связи с отсутствием канального и аппаратного ресурса для обеспечения всех потребителей услуг т. н. «малой авиации» [14]. В настоящее время функцию ДПАС выполняют зональные центры Единой системы организации воздушным движением (ЕС ОрВД). При этом линия С3 (управления, контроля и связи) должна обеспечить соединение внешнего пилота ПДП с ДПАС, а фактически решение задачи управления полетом при симплексном или дуплексном взаимодействии с ЕС ОрВД. Подобные трудности Росавиации по всей видимости будут проявляться и при развертывании наземной инфраструктуры в Росавтодоре и Росморречфлоте при связи с едиными центрами управления движением.

Командная радиолиния С2/С3 для БПЛА может быть организована:

- по прямому каналу связи – между внешним пилотом ПДП и БПЛА, в том числе через входящие в состав системы ретрансляторы;
- по каналам связи поставщика услуг – при нахождении ПДП внешнего пилота и БПЛА вне зоны действия общей радиолинии обмен командами управления происходит через сеть поставщика услуг связи.

Линии С2 и линии С3 условно можно разделить на 3 категории [15]:

- радиолинии ближнего радиуса действия (дальность передачи данных от десятков до сотен метров);
- радиолинии среднего радиуса действия (передача данных на дальности прямой радиовидимости);
- радиолинии дальнего радиуса действия (обеспечение работы на расстоянии, превышающие дальность прямой радиовидимости);

Обширная территория нашей страны, большая протяженность ее континентальных и водных границ, при наличии стратегических интересов в других зонах мирового океана, включая Арктику, делает задачу доведения команд

управления до ГПО и БТС крайне важной. Тем более это актуально учитывая современную непредсказуемость военно-политической обстановки и неопределенность с деградацией некоторых правил Конвенции по морскому праву в отношении свободного судоходства. Решение этой задачи видится путем комплексного применения спутниковых, сверхдлинноволновых (СДВ), декаметровых<sup>3</sup> (ДКМВ), а в зоне прямой радиовидимости – и каналов связи ультракоротких волн (УКВ). При этом более загруженным и в какой-то степени специфичным диапазоном РЧС, в силу ряда причин, выделяется ДКМВ, (как сказано в старом мультфильме «Теленок мал, на всех не хватит...»).

Поскольку управление БТС в зоне функционирования радиолиний ближнего и среднего радиуса действия особых сложностей не вызывает, в связи с их использованием ограничено, как правило, в цеху, на складской или заводской территории, в порту или на площади крупного логистического центра и пр., т. е. в зоне прямой радиовидимости, то для моделирования выберем наиболее сложную радиолинию дальнего радиуса действия – линию передачи данных СЗ, способную обеспечить через технические средства СЦУ или ПУ ведомства (например, Росморречфлота, Росавиации), или через сеть поставщика услуг связи (например, в интересах Росавтодора, Росжелдора) с множеством базовых станций операторов связи вдоль сети автомобильных и железных дорог.

Также выбор рабочего диапазона частот в интересах каналов управления БТС должен учитывать помимо дальности действия радиолинии еще и требования к массогабаритным и энергетическим характеристикам бортового комплекса связи. К примеру, для управления БПЛА малого класса наиболее подходящим является диапазон сверхвысоких частот (СВЧ). Что позволит иметь на борту антенну малых размеров. В тоже время, для управления беспилотными автомобильными грузоперевозками по территории страны и безэкипажными судами в ближней морской, дальней морской и океанской зонах на удалении свыше 12 тыс. км наиболее применимы ДКМВ и спутниковые каналы связи.

Решение вопроса дефицита частотного ресурса на ДКМВ возможно путем перехода (миграции) на другие диапазоны при наличии технической возможности на СЦУ (ПУ) и в бортовом комплексе связи БТС. При этом также для повышения вероятности доведения команд управления до БТС ответственного назначения применимо комплексное использование каналов различных диапазонов в параллельном режиме передачи. При этом в интегрированном бортовом комплексе связи БТС эти команды управления могут быть приняты по разным каналам параллельно и идентифицированы с использованием принципов мажоритарной обработки элементов сообщения для повышения надежности доведения в условиях помех, либо при отсутствии связности в каком-либо канале.

Еще одним из требований к применимости радиолинии С2/С3 в интересах построения каналов управления БТС является применение энергетически

---

<sup>3</sup> В русскоязычных научных публикациях часто применяют название диапазона волн как «коротковолновый» (КВ), учитывающий реальные требования по помехоустойчивости связи и ее дальности на применяемых рабочих частотах 1,5 ÷ 60 МГц и выше, что отличается от рассматриваемого в статье ДКМВ диапазона 3 ÷ 30 МГц (длина волны – 100 м ÷ 10 м).

выгодных видов модуляции, типа двоичной (BPSK) и квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) на больших дальностях связи [15].

Также возможными к применению построения сигнально-кодовых конструкций (СКК), в интересах формирования каналов управления БТС выступают алгоритмы, в основе которых лежат технологий расширения спектра [16, 17], призванные в условиях сложной помеховой обстановки существенно поднять эффективность доведения КУ до БТС за счет увеличения базы сигнала. В технологиях расширения спектра на сегодня применяю три основных метода:

- перестройка рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ), (FHSS), осуществляется путем периодической смены рабочей частоты по известной только для передающей и приемной сторон некоторой псевдослучайной последовательности (ПСП). Такой подход весьма широко применяется в технологии Bluetooth. В GSM данный метод применим, но с более редкой заменой частот (Slow frequency hopping). Преимуществом метода является простота реализации, а недостатком – задержки потока данных при смене частот;
- расширение спектра методом прямой последовательности (ППС), (DSSS, direct sequence spread spectrum). По своей эффективности данный метод превосходит режим ППРЧ, но является сложным в реализации. Его сущность состоит в повышении тактовой частоты модуляции, при которой каждому из бинарных символов «0» или «1» передаваемого информационного сообщения соответствует некоторая длинная ПСП. Алгоритм реализации метода построен на основе стандарта IEEE 802.11, который применим в системах CDMA и Wi-Fi;
- расширение спектра методом линейной частотной модуляции (ЛЧМ) (CSS, chirp spread spectrum). Алгоритм метода предполагает изменение несущей частоты по линейному закону. ЛЧМ-сигналы активно используются в радиолокации, при зондировании состояния ионосферы, а также в некоторых радиомодемах.

Подобные технологии в последнее время стали все чаще использоваться в современных информационно-телекоммуникационных сетях (ИТКС) для снижения интенсивности побочных электромагнитных излучений, влияющих на эффективность группового использования БТС в группе (рое), а также для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Примером может служить технология SSCG – Spread-spectrum clock generation, заключающаяся в том, что частоты тактовых генераторов в высокочастотных синхронных схемах постоянно меняются в диапазоне 30-250 кГц. К подобным примерам можно также отнести DisplayPort, SATA и пр.

Традиционно отрасль БТС зарождалась из робототехники, и прежде всего, из космической робототехники (первый искусственный спутник Земли (ИСЗ), «Луноход-1», «Буран», транспортные «Прогрессы» и пр.), работающей на космических скоростях, что требовало обеспечения управления такими ГПО в режиме реального времени. Современные РТК и БТС воздушного, морского и наземного базирования также функционируют на высоких скоростях (порой на гиперзвуке и космических скоростях), что требует обеспечения оперативного

вмешательства пилота (водителя) для предотвращения нештатных ситуаций, дорожных происшествий и катастроф. Следовательно, обеспечение в управлении беспилотными транспортными системами режима on-line является следующим требованием к каналу связи, о чем уже шла речь выше.

Важными вопросами, при управлении БТС на больших расстояниях от СЦУ ведомства являются вопросы обеспечения безопасности информации или перехвата управления (предотвращения НСД), что достижимо использованием методов расширения спектра (рассмотрены выше) за счет применения ПСП, известной только передающей и приемной стороне.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, исходными данными для моделирования канала управления БТС являются:

- прототип радиолинии – командная радиолиния С2/С3 БПЛА [14];
- диапазон частот – ДКМВ, как обеспечивающий глобальную дальность доведения команд управления до БТС;
- оперативность доведения команд управления – режим мягкого реального времени;
- режим управления частотным ресурсом – динамический, на вторичной основе, за счет использования технологий CRS-радиосистем;
- обеспечение помехоустойчивости – за счет использования помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций для условий промышленных шумов, случайных и преднамеренных помех;
- режим работы радиолинии – с перестройкой рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ).

При этом необходимо отметить, что в соответствии с исследованиями режимов работы различных РЛ одним из положительных свойств ППРЧ РЛ, помимо указанных выше, является переход от пакетирования ошибок в ДКМВ канале к каналу со случайными ошибками, что влияет в целом на повышение помехоустойчивости при использовании более эффективных кодов [19, 20].

### **SDR-технологии как базис моделирования многоканальных радиоприемных устройств в интересах мониторинга частотного диапазона**

Характеристика CRS-радиосистем была подробно описана в Резолюции МСЭ-R2117, где наряду с механизмом динамического управления РЧС рассмотрены и аспекты организации радиосвязи на основе SDR-технологий (Software Define Radio – программно определяемая радиосистема), таблица 2.

Базовые схемы радиоприема с цифровой обработкой сигнала (ЦОС), применяемой в SDR-технологиях, приведены на рис. 4.

По представленным выше схемам в настоящее время строятся многие трансиверы. При этом DSP (Digital Signal Processing – цифровая обработка сигнала) начинается только на низкой промежуточной частоте (ПЧ), т. е. на частотах  $10 \div 40$  кГц, в то время как начало приёмного тракта выполнено по классической схеме супергетеродинного приёмника. Такая схемная реализация характерна для большинства современных трансиверов YAESU и ICOM, хотя это пока еще в чи-

стом виде не SDR-технология. Здесь еще сохраняются недостатки супергетеродинов, хотя частично и компенсируются, за счёт ЦОС низкочастотного (НЧ) сигнала. Основными элементами схемы, определяющими параметры радиоприёма, являются ПЧ фильтры и смесители, рис. 4 (а) – SDR-приемник первого поколения, хотя ЦОС и повышает качество приема сигнала. В следующем поколении SDR-устройств в качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) используется звуковая карта, рис. 4 (б), которая предопределяет основные параметры приёма, чем выше скорость и разрядность АЦП – тем лучше основные параметры приёма. На рис. 4 (в) показана еще одна разновидность схемной реализации SDR-технологии на основе трансиверной приставки к персональному компьютеру SDR-1000 или SunSDR, см. рис. 4 (в). Это уже более современная реализация, в которой отсутствует смеситель и ПЧ. Принятый в антенне радиосигнал сразу подвергается прямой оцифровке, поскольку АЦП работает на приёмной частоте. Следовательно, характеристики радиоприёмника во многом определяет именно АЦП, после которого ЦОС производится программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС). Таким образом, основной принцип SDR-технологии основан на оцифровке принятого сигнала и дальнейшей его обработке в цифровой форме [8].

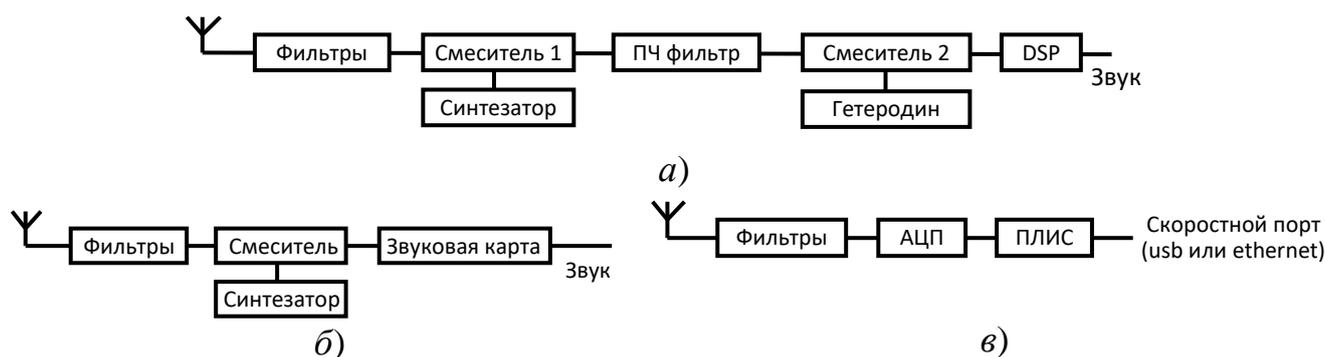


Рис. 4. Базовые схемы ЦОС с переходом на SDR-технологии:

- а) классическая схема супергетеродинного приемника с цифровой обработкой;
- б) SDR-приемник ЦОС с переносом спектра на нижние частоты супергетеродина;
- в) SDR-радиоприемник с ЦОС на принимаемой частоте

Варианты схемных решений перепрограммируемых SDR-радиоустройств, позволяющих осуществлять перенос спектра на низкие частоты и графически отображать радиосигналы в виде спектрограмм, на сегодня используются практически во всех современных профессиональных анализаторах спектра.

Так, на рис. 5 (а) показан тракт ЦОС в анализаторе спектра реального времени (АСРВ) R&S FPS [21], позволяющий делать выборку сигнала ПЧ 128 МГц и после кадрирования во временной области пересчитывать ее со скоростью до 250 000 спектров в секунду в частотное представление. При этом отдельные спектры объединяют в детекторе – квадратурные составляющие  $I$  и  $Q$  радиосигнала. А поскольку зрение человека не может воспринимать такое большое число спектральных изображений, то АСРВ вводит ограничение на их обновление до скорости 30 кадров в секунду. В данной схеме с помощью АЦП и блока памяти

сигнал ПЧ оцифровывается, запоминается и детектируется цифровым детектором с использованием быстрого (короткого) оконного преобразования Фурье (БПФ), когда рассматриваемый участок спектра последовательно анализируется коротким временным окном с представлением спектрограммы в плоскости «время-частота». На рис. 5 (б) приведена также 3D спектрограмм «время-частота-амплитуда» где цветом показана амплитуда [21].

Использование для анализа РЧС высокоскоростной ЦОС, процедур БПФ, а также применение технологии цифрового фосфора с имитацией на дисплее послесвечения и хранение спектров реального времени в памяти позволяют АСРВ нарастить достоинства предыдущих поколений анализаторов спектра с прежними достижениями в обработке сигналов, открывая возможность анализа нестационарных сигналов с изменяемыми во времени параметрами, типа ППРЧ.

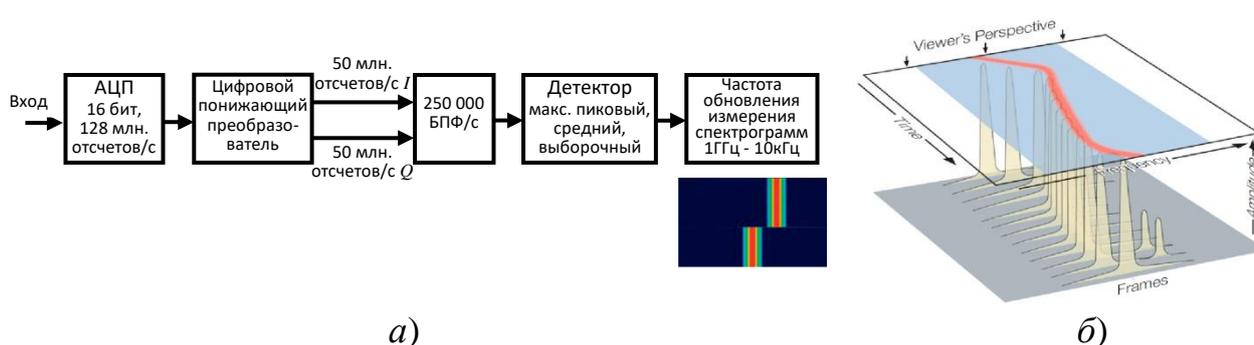


Рис. 5. Схемная реализация ЦОС и построение спектрограмм на основе БПФ

В обычных анализаторах спектра (в отличие от АСРВ) спектр строится в плоскости «амплитуда-частота», что крайне неэффективно, поскольку не дает привязки его компонентов ко времени при анализе нестационарных сигналов. При этом принцип параллельно-последовательного частотного анализа РЧС не всегда позволяет фиксировать кратковременные импульсы. Также динамический диапазон таких анализаторов как правило не превышает 100 дБ, что недостаточно для исследования нестабильных сигналов в ДКМВ диапазоне.

В тоже время, современные достижения в области синтеза SDR-радиосистем уже позволяют серийно выпускать многоканальные (32(64)-канальные) радиоприёмные устройства (РПУ) с высоким динамическим диапазоном и чувствительностью с независимыми параллельными каналами приёма [22]. Так, анализ возможностей эффективных алгоритмов ЦОС и перспективной элементной базы показывает, что вполне возможно реализовать РПУ в стандарте Евромеханики (19 дюймов, 4(8) U), что крайне важно для мобильных БТС, с числом обработки независимых каналов до 50 – 100 тысяч в режиме параллельного приёма. Поэтому при шаге сетки установки рабочих частот РПУ в 100 Гц двумя многоканальными РПУ может быть перекрыт диапазон до 20 МГц, чего вполне достаточно для реализации ДКМВ связи.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что появляется возможность реализации нового подхода в доведении команд управления до ГПО и удаленных БТС по ДКМВ каналу связи без знания частоты их передачи (без доведения ПСП номиналов применяемых рабочих частот на бортовой комплекс

связи БТС), позволяющего вести передачу и прием в радиолинии управления на оптимальной рабочей частоте (ОРЧ) для заданной дальности и времени суток.

Определение области ОРЧ в реальном масштабе времени возможно реализовать с использованием аппаратно-программного комплекса (АПК) типа «Мицар» [23], рис. 6, где обеспечивается выбор оптимальных рабочих частот с использованием метода наклонно-возвратного зондирования (НВЗ) ионосферы при помощи ЛЧМ-сигналов. При этом данный способ в предлагаемом АПК «Мицар» целесообразно дополнить алгоритмом выбора области ОРЧ по данным вертикального зондирования на рассматриваемой радиотрассе [23].

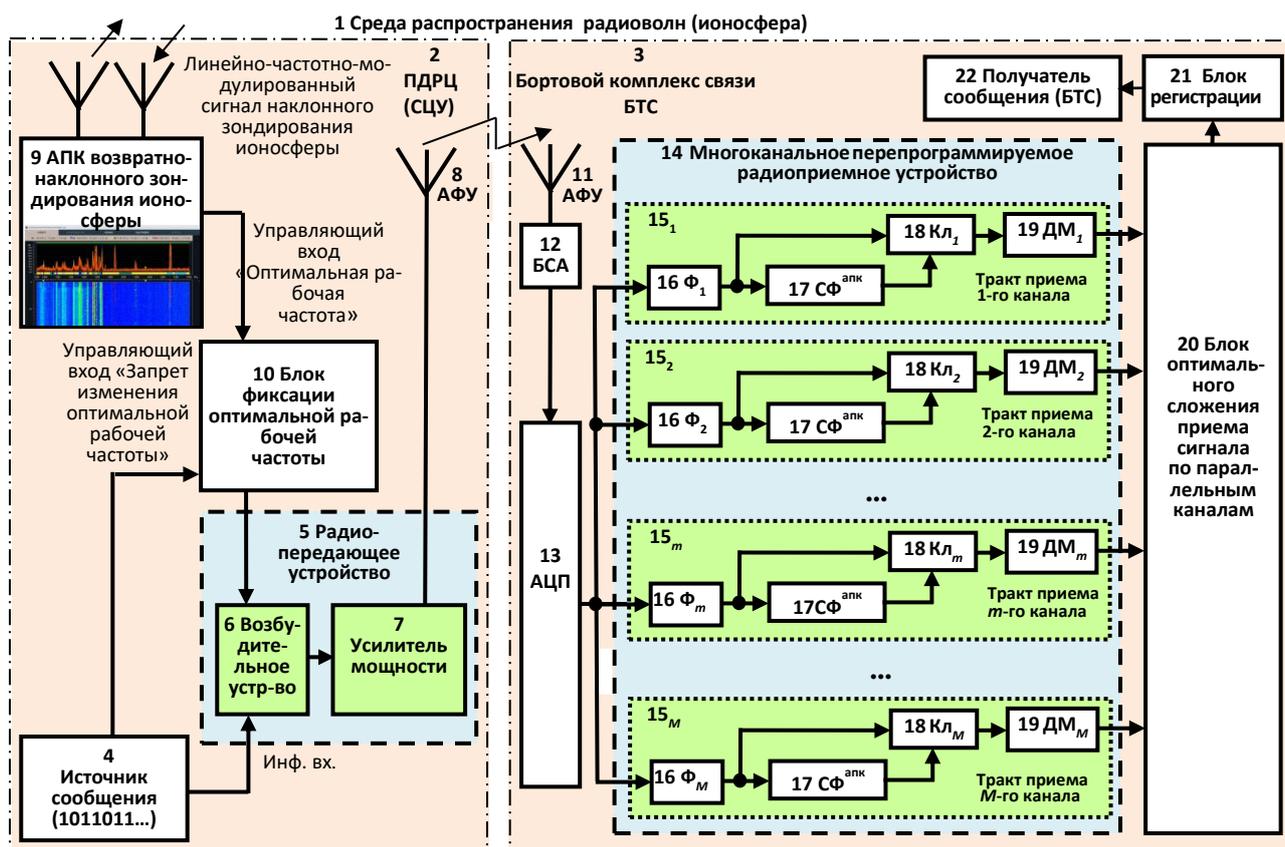


Рис. 6. Структурная схема радиолинии, построенной на предлагаемом методе: БСА – блок согласования с антенной; Ф – фильтр, ДМ – демодулятор, СФ – согласующий фильтр на автопусковую комбинацию (АПК); Кл – ключ; АФУ – антенно-фидерное устройство; ПДРЦ – передающий радиоцентр (СЦУ)

Преодолеть проблему жесткого закрепления за каждым каналом (передатчиком) своего РПУ можно путем наращивания аппаратных затрат, увеличивая число РПУ до количества рабочих частот, используемых в РЛ управления БТС. До недавнего времени данная задача была не разрешима, тем более в ограниченных объемах приемного бортового комплекса связи БТС. Однако с появлением многоканальных программно-настраиваемых SDR-радиоустройств, ее решение видится все отчетливее. Использование компьютера в практике построения радиолиний управления в последние годы постоянно совершенствуется. Совсем недавно оно ограничивалось только ведением аппаратного журнала, ЦОС и управлением трансивера по RIG-интерфейсу. Миниатюризация элементной базы

и стремительный рост вычислительных мощностей позволило встраивать микрокомпьютеры в бортовые трансиверы БТС. В начале этого процесса ограничивались обработкой детектированного НЧ сигнала. Затем уже на низкой ПЧ ( $12 \div 48$  кГц) стали его оцифровывать, и далее кодировали/декодировали любые виды модуляции программно. При этом принцип обработки сигнала остался такой же, как и 80 лет назад (обработка сигнала на ПЧ). Остались и старые сложности с нелинейными искажениями множества каскадов обработки сигнала, балансировкой усиления по каскадам, качеством фильтрации и побочными каналами приёма, существенно увеличивающие внутренние шумы радиоприема.

Особенность схемной реализации рис. 6 состоит в том, что на ПДРЦ выбор оптимальной рабочей частоты, используемой для передачи КУ в интересах БТС осуществляется автоматически с учетом частотно-временной матрицы и географии РЛ, в то время как в бортовом комплексе связи БТС предварительной установки частоты приема и учета координат ПДРЦ не требуется. Этой особенностью предлагаемый способ отличается от активно используемых с прошлого века частотно-адаптивных радиолиний [24, 25].

В случае построения радиолинии (как показано на рис. 6) при известных координатах ПДРЦ, прием КУ на борту БТС осуществляется путем ЦОС на основе SDR-технологий с использованием предварительной пространственной селекции. Если же сведения о географии размещения ПДРЦ отсутствуют, то необходимо применение блока формирования веера диаграмм направленности. В данном случае рабочие частоты приема будут определяться автоматически на основе существующих алгоритмов методик функционирования штатных АПК мониторинга РЧС, например, типа «Мицар» [23]. Практически в таком многоканальном радиоприемном устройстве (РПУ) происходит формирование множества радиоприемников программно, по числу разрешенных фиксированных рабочих частот для данной радиолинии, работающей без знания частот радиопередающего устройства (РПДУ), т. е. инвариантно к частоте передачи

$$N = \Delta F / \Delta f, \quad (1)$$

где  $\Delta F$  – заданная полоса частот радиолинии;  $\Delta f$  – шаг сетки частот возбуждательного устройства РПДУ;  $N$  – число программно формируемых радиоприемников в бортовом многоканальном РПУ БТС.

Используя SDR-технологии шаг перестройки сетки частот, а также вид РЛ, может меняться программно по требованию абонента или оператора.

В данном случае под видом радиолинии подразумевается автопусковая комбинация (последовательность), которая предшествует началу передачи сообщения и, соответственно, идентифицирует её, являясь фактически отличительным признаком РЛ. При этом на передающей стороне РЛ шаг сетки частот возбуждательного устройства можно обеспечить, например, с кратностью до 10 Гц или даже до 1 Гц. Все зависит от величины многоканальности программно конфигурируемых РПУ на программно-логических интегральных схемах.

Снижение вероятности ложного приема АПК в РЛ до требуемого уровня, из-за большого числа каналов одновременного приема в многоканальном РПУ, возможно за счет увеличения длительности автопусковой комбинации.

## Модель формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами в условиях помех

Развитие беспилотных транспортных технологий на современном этапе в России относится к приоритетным государственным задачам [1, 2]. При этом новые разработки в данной области любого министерства (ведомства) от БПЛА и роботов-доставщиков до беспилотных автомобилей, трамваев, метропоездов, БЭК (БЭС) и пр. предполагают со стороны ГКРЧ выделения достаточного ресурса рабочих частот. Однако, как было отмечено выше, в крупных городских агломерациях рост в геометрической прогрессии числа используемых автономных систем не только государственными структурами и спецпотребителями [12], но также частным бизнесом и физическими лицами, значительно насыщает наиболее востребованные частотные полосы в области ОРЧ, вызывая их дефицит. Здесь же необходимо заметить, что обеспечение режима помехозащиты всегда сопряжено с выделением не одной фиксированной рабочей частоты  $f_p$ , а полосы рабочих частот  $\Delta f_p$ , например, для радиолиний, работающих по технологии расширения спектра, рис. 7, что еще создает дополнительную нагрузку в целом на РЧС. А поскольку каждая занятая радиоэлектронным средством фиксированная частота выступает в качестве сосредоточенной по спектру помехи для других пользователей, то необходим поиск новых подходов к выбору полос частот, пригодных к использованию в условиях воздействия помех на вторичной основе [5-9], или как назван этот подход в [18], через применение «белых пятен» спектра.

Рассмотрим подробнее реализацию модели формирования многочастотных сигналов команд управления БТС в условиях помех на основе *CRS*-радиосистем, осуществляющих поиск свободных участков РЧС для назначения КСРЧ в виде ПСП передаваемой команды управления в режиме ППРЧ, рис. 8.

В современных системах радиосвязи режим ППРЧ достаточно активно используется в диапазоне ДКМВ [8, 16, 20], что объяснимо ослаблением действия как случайных, так и преднамеренных помех на качество функционирования РЛ в связи со снижением вероятности возникновения явления группирования ошибок в принимаемых сообщениях, которое проявляется из-за наличия замираний сигнала в ионосфере. Дополнительного эффекта в повышении эффективности функционирования РЛ диапазона ДКМВ, не теряя скорости передачи сообщений, возможно добиться путем использования многоканальной передачи [26] и параллельной трансляции элементов КУ БТС в режиме ППРЧ с представлением каждого из дискретов узкополосными (или сверхузкополосными) сигналами [27]. Однако при этом выдвигается требование по наличию информации о состоянии среды РРВ в реальном масштабе времени и на основании этих знаний эффективном изменении РЧС с определением свободных от работы первичных пользователей частотных полос. Причем важно отметить, что режим ППРЧ всегда относился к ресурсоемким режимам в части радиочастотного обеспечения.

Для разработки модели формирования частотного ресурса в интересах ППРЧ радиолинии рассмотрим интервал диапазона ДКМВ в виде типовой спектрограммы, показанной на рис. 9 (а), где приведена загрузка РЧС в области ОРЧ работающими радиостанциями.

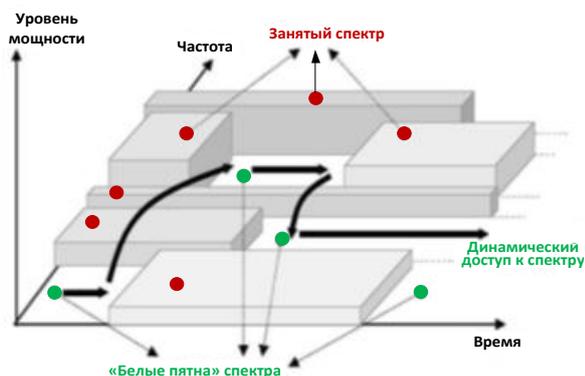


Рис. 7. Условная интерпретация режима ППРЧ декаметрового РЛ с применением в РЧС «белых пятен»

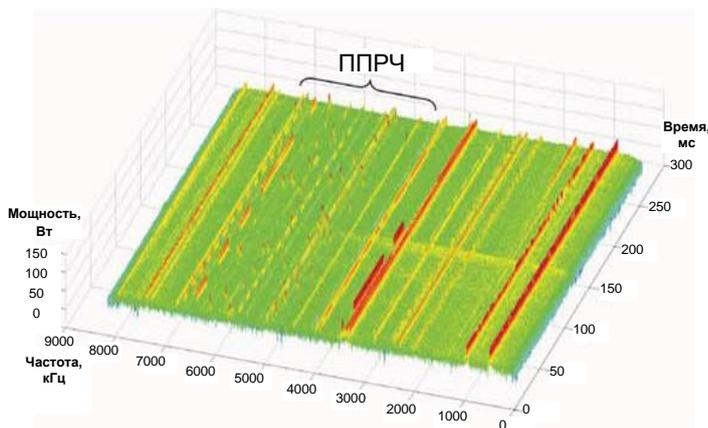


Рис. 8. 3D-проекция спектрограммы действующей в режиме ППРЧ радиолинии управления

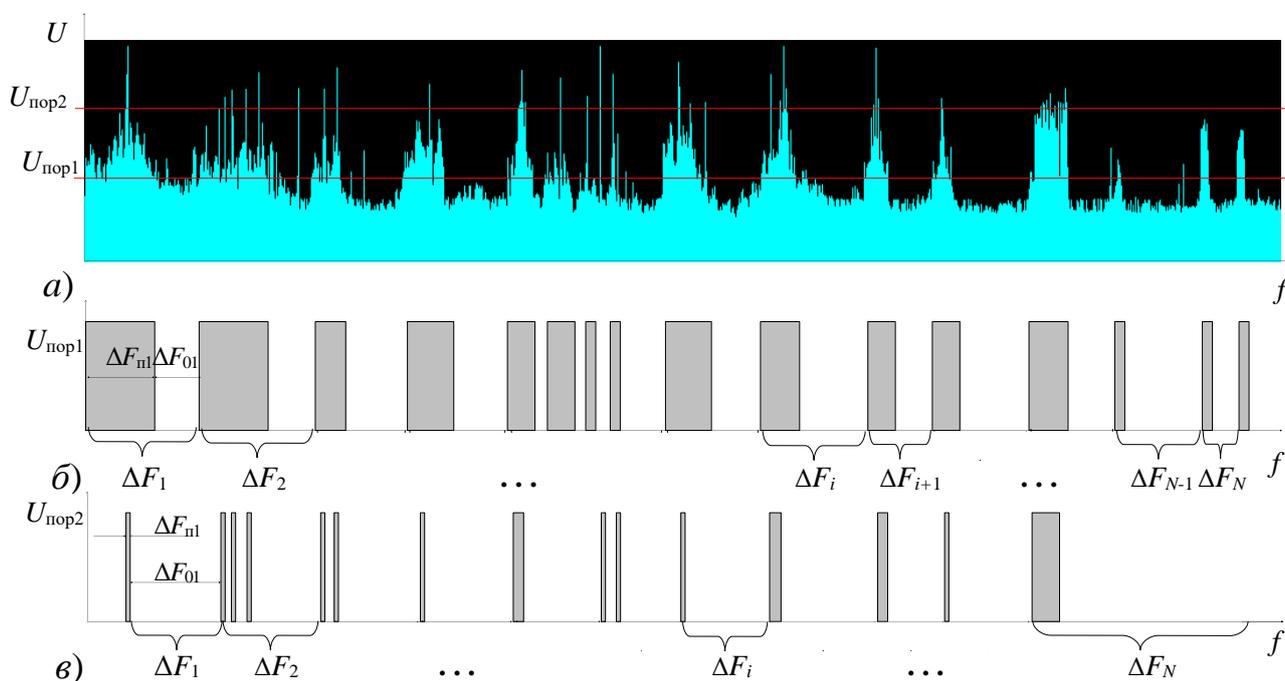


Рис. 9. Геометрическая модель формирования многочастотных сигналов команд управления БТС в интересах ППРЧ РЛ: а) вариант представления амплитудно-частотной характеристики участка РЧС в полосе ОРЧ; б) при пороге уровня сигнала  $U_{пор1}$ ; в) при пороге уровня сигнала  $U_{пор2}$

Данную спектрограмму диапазона ДКМВ условно интерпретируем геометрической моделью, рис. 9 (б) и (в) с отдельными свободными от работы ПП участками полосы частот  $\Delta F_0$ , обеспечивающими требуемое качество приема КУ, а также занятыми помехами  $\Delta F_{п}$  участками полосы частот, где значение соотношения сигнал-помеха ведет к существенному снижению качества приема элемента сообщения (КУ) с полосой частот  $\Delta f_c$ .

Произведем разбиение представленного на спектрограмме рис. 9 (а) участка вблизи оптимальных рабочих частот  $F_{ОРЧ}$  ДКМВ диапазона на  $N$  ячеек с частотной полосой

$$\Delta F_i = \Delta F_{пi} + \Delta F_{0i}, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

При этом примем первое допущение, что каждый элемент сообщения в виде бинарной посылки (бита) или частотного чипа передаваемой КУ [27] с высокой вероятностью попадет в одну из этих ячеек, рис. 10. Вторым допущением условно посчитаем, что заданное качество приема сигнала будет обеспечено только если частотная полоса сигнала  $\Delta f_c$  не выйдет за полосу  $\Delta F_0$  между двумя соседними ячейками занятыми сосредоточенными помехами.

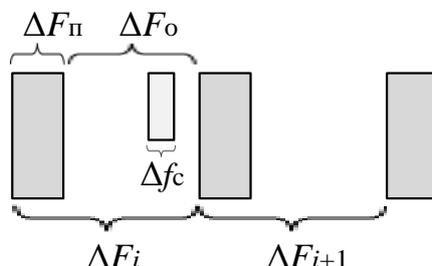


Рис. 10. Геометрическая интерпретация полосы ОРЧ

Для этой геометрической модели рассчитаем значение вероятности правильного приема, в случае если полоса частот сигнала  $\Delta f_c$  находится в полосе  $\Delta F_0$ , свободной от работы других радиостанций в виде сосредоточенных помех.

$$p = \begin{cases} \frac{(\Delta F_0 - \Delta f_c)}{(\Delta F_\pi - \Delta F_0)}, & \Delta f_c < \Delta F_0, \\ 0, & \Delta f_c \geq \Delta F_0. \end{cases} \quad (3)$$

### Расчетный пример проверки адекватности предложенной модели

Расчетный пример работы формулы (3) и проверка адекватности предложенной модели формирования многочастотных сигналов КУ БТС для РЛ, функционирующей в режиме ППРЧ представлен на графиках рис. 11.

Проведенный анализ графиков зависимости, показанный на рис. 11, указывает на то, что при сокращении полосы частот занимаемых сообщением в два раза по отношению к частотной полосе, занятой помехой

$$\Delta F_0 > 2\Delta F_\pi, \quad (4)$$

или сокращении полосы частот, занимаемой элементом сигнала (единичным частотным чипом ППРЧ) менее  $1/10 F_\pi$  несущественно влияет на вероятность его нахождения в свободном от сосредоточенных по спектру помех участке диапазона. Все это ведет к тому, что при усреднении занятыми помехами участков частотной полосы величиной в  $\Delta F_\pi \approx 200 \div 300$  Гц для повышения вероятности правильного приема  $p$  необходимо и достаточно уменьшить частотную полосу, занимаемую сигналом до значения в  $\Delta f_c \approx 20 \div 30$  Гц.

В дальнейшем существенное снижение полосы частот, занимаемой сигналом  $\Delta f_c$  будет целесообразным в случаях:

- предъявления требований по ЭМС командной РЛ с другими системами радиосвязи бортового комплекса БТС;
- при функционировании командной радиолинии с малой мощностью излучения сигнала;

- в условиях сложной помеховой обстановки, при воздействии преднамеренных помех и иных ДФ, когда поиск сигнала для радиоподавления осуществляется с применением широкополосного энергетического обнаружителя [28].

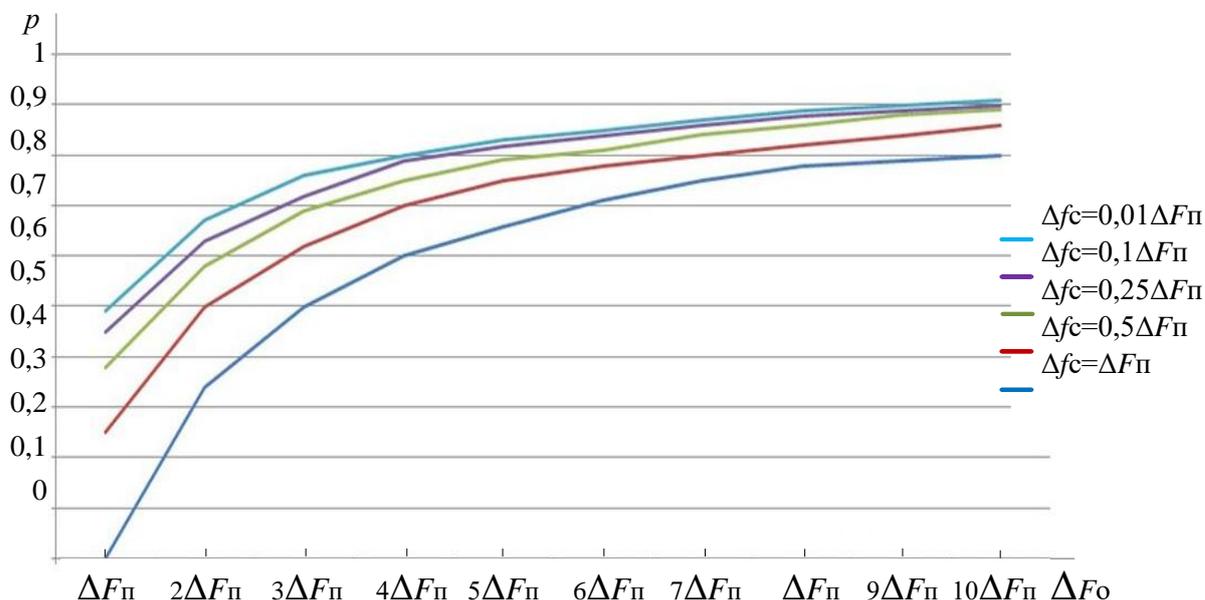


Рис. 11. Зависимость вероятности правильного приема  $p$  сигнала КУ, занимающего полосу частот  $\Delta f_c$ , от соотношения ширины полос частот, находящейся под помехой  $\Delta F_{\Pi}$  и свободной от неё  $\Delta F_{\text{O}}$

### Схемная реализация формирователя многочастотных сигналов команд управления беспилотными транспортными системами в условиях помех

Для проверки адекватности разработанной модели предложена схемная реализация формирователя многочастотных сигналов команд управления БТС в условиях помех, рис. 12, которая содержит: последовательно параллельный регистр записи сообщения 1 на  $N$  ячеек записи; блок управления ключами 2; блок формирования набора рабочих частот 3, состоящий из ПАК мониторинга РЧС 3.1, модуля требований по помехоустойчивости и ЭМС 3.2, модуля оценки уровня помех 3.3, модуля проверки выполнения требований по уровню помех 3.4, модуля формирования матрицы свободных частот 3.5, модуля расчета ЭМС и минимально необходимого частотного разнеса 3.6 и базы данных КСРЧ 3.7; системы единого времени (СЕВ) и синхронизации 4; генератор ПСП 5; блок установки рабочих частот 6; блок электронных ключей 7, включающий  $N$  пар электронных ключей «Ключ 1» и «Ключ 0» в каждой паре; сумматора кодов частот 8, содержащий  $r$  суммирующих блоков  $8.r$ , где  $r = 0, 1, \dots, \log_2 N$ , каждый  $r$ -й из которых состоит из  $N/2^r$  двухвходовых сумматоров  $9.1, \dots, 9.N/2^r$ , выход каждого из которых подключен к входу соответствующего регистра памяти  $10.1, \dots, 10.N/2^r$  попарно; цифро-аналоговый преобразователь 11; полосовой фильтр 12; усилитель мощности 13; блок согласования с антенной 14 и антенно-фидерную подсистему 15, передающую 15.1 и приемную 15.2 антенны.



поступают данные (в зависимости от настроек ПАК): от ионосферно-волновой (ИВС) и частотно-диспетчерской (ЧДС) служб ведомства; от ПАК наклонного зондирования ионосферы ведомств; от международных центров зондирования ионосферы; от мощных вещательных радиостанций мира; от любых других энергетически доступных излучателей; от зарегистрированных абонентов ДКМВ радиосетей. ПАК мониторинга РЧС осуществляет непрерывный радиомониторинг состояния заданного диапазона волн на предмет его занятости работой первичных пользователей, за которыми участки частотных полос и отдельные частоты распределены и закреплены на лицензионной основе. Внешний вид интерфейса ПАК мониторинга РЧС показан на рис. 12 (3.1), где на верхнем фрагменте интерфейса показана амплитудно-частотная характеристика контролируемого участка диапазона волн, а на нижнем – его спектрограмма типа «водопад»: по оси абсцисс – частота, по оси ординат – время, по оси аппликат – мощность сигнала (в гамме – от синего цвета до красного). В данном случае ПАК мониторинга РЧС выступает в качестве интеллектуального агента-датчика [29] для последующей обработки результатов контроля среды РРВ. В предлагаемом устройстве формирования многочастотного сигнала мониторинг состояния занятости РЧС необходим для выбора свободных участков диапазона в режиме реального времени, из которых в последующем рассчитывается КСРЧ для второго этапа функционирования устройства. Причем, исходя из того, что в настоящее время весь частотный диапазон уже лицензирован и распределен, однако используется недостаточно эффективно [7-11], такой выбор предложено осуществлять на вторичной основе с использованием механизма динамического управления РЧС [4-7], когда сообщения передают на радиочастотах первичного пользователя в то время пока его штатное радиосредство не излучает.

Для формируемого многочастотного сигнала под конкретную радиолинию любая работающая станция в заданной полосе частот (участке диапазона волн) рассматривается как мешающая станция, т. е. ее сигнал рассматривается как сосредоточенная по спектру помеха, в связи с чем, оценка помеховой обстановки происходит в модуле оценки уровня помех 3.3, рис. 12, выступающего в качестве своего рода интеллектуального агента-преобразователя [29], реализуя агентный подход. При этом для объективной оценки помеховой обстановки на другой вход модуля оценки уровня помех 3.3 от модуля требований по помехоустойчивости и ЭМС 3.2 должны поступить «Исходные данные радиолинии» в виде географических координат пунктов передачи и приёма, типа антенно-фидерной подсистемы (АФП) радиопередатчика и радиоприемника, вида модуляции и режима передачи информации, излучаемой мощности, необходимого соотношения сигнал/помеха в точке приёма [9]. Геометрическая интерпретация процесса оценки уровня помех в модуле 3.3 представлена на рис. 9, в виде фрагмента амплитудно-частотной характеристики участка диапазона волн в полосе ОРЧ, (а), модели полосы ОРЧ с порогами уровня сигнала  $U_{пор1}$  (б) и  $U_{пор2}$ , (в). Формируемая в режиме реального времени в модуле 3.3 оценка уровня помех сравнивается в модуле проверки выполнения требований по уровню помех 3.4, рис. 12, с допустимым уровнем помех, получаемой по второму выходу модуля требований по помехоустойчивости и ЭМС 3.2. Результат проверки путем сравнения измеренного уровня

помехи ( $h_{п}$ ) за время наблюдения с заданной пороговой величиной – допустимым уровнем помех ( $h_{доп}$ ) методом энергетического обнаружителя [28] по каждому номиналу частот установленной сетки частот контролируемого диапазона фиксируются в виде информационной единицы «1» – если частота занята  $h_{п} > h_{доп}$ , или в виде информационного нуля «0» – если частота свободна  $h_{п} \leq h_{доп}$ . Данные информационные биты («1» или «0») с соответствующих выходов модуля проверки выполнения требований по уровню помех 3.4 записываются в модуль формирования матрицы свободных частот 3.5, наполняя строки первичной матрицы индексами единичных и нулевых элементов по позициям шага сетки частот. Из первичной матрицы синтезируется матрица, в которой индексы нулевых элементов выстраиваются по частотным позициям в строку, как показано на рис. 13, где индексы строк по вертикали означают временные интервалы (отсчеты) процедур сравнения (циклов контроля) РЧС.

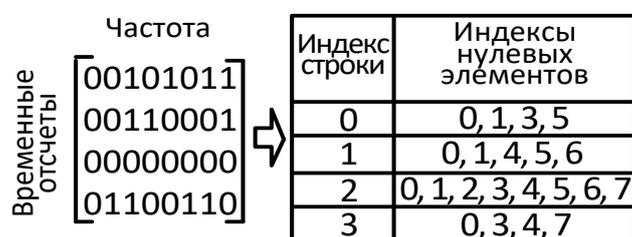


Рис. 13. Принцип формирования матрицы свободных частот

Далее список свободных частот из модуля 3.5 (рис. 12) поступает в модуль расчета ЭМС и минимально необходимого частотного разноса 3.6, на второй вход которого из модуля требований по помехоустойчивости и ЭМС поступают требования по ЭМС в виде ширины полосы частот, норм электромагнитных помех для заданных уровней сигналов и пр. Фактически в программном модуле расчета электромагнитной совместимости и минимально необходимого частотного разноса 3.6 осуществляется расчет обеспечения совместной работы многочастотного сигнала, излучаемого радиоустройством в условиях электромагнитных помех. Такой расчет может проводиться различными методами, известными из теории радиосвязи [30, 31] и давно реализованные на практике. Современные требования к расчету ЭМС, например, показаны в Методике расчетов электромагнитной совместимости и условий совместного использования радиоэлектронных средств телевизионного вещания с радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы в полосе частот 470-862 МГц [32]. Таким образом, на выходе модуля 3.6 формируется частотный ресурс, используемый далее при синтезе многочастотного сигнала, а также вырабатывается список резервных частот, который может быть оперативно использован для первоочередной замены в случае занятия выбранной частоты помехой. Принцип формирования частотного ресурса (назначения частот) основан на формировании дневных и ночных рабочих частот из имеющегося перечня разрешенных частот с помощью долгосрочных прогнозов суточного хода максимально применимых частот (МПЧ) на заданной радиолинии (радиотрассе). При этом для различных часовых поясов

назначается время перехода с ночной частоты на дневную и обратно. При долгосрочном частотном планировании учитываются долговременные изменения состояния среды РРВ (ионосферы), т. е. сезонные переходы на летние и зимние частоты. При выборе рабочих частот обычно стремятся к тому, чтобы они были как можно ближе к области ОРЧ, рис. 14. Примеры подобных расчетов приведены в [32, 33]. С выхода модуля расчета электромагнитной совместимости и минимально необходимого частотного разноса 3.6 (рис. 12) расчетные значения выбранных рабочих частот под конкретные радиолинии по входу «Запись» поступают в базу данных КСРЧ 3.7 и накапливаются в ней.

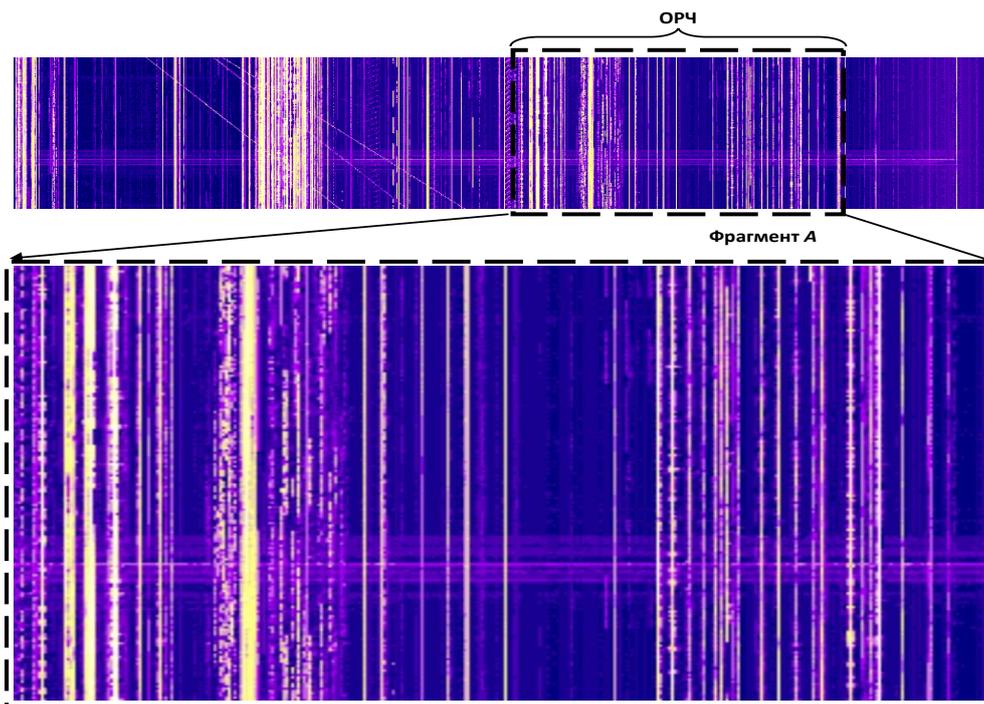


Рис. 14. Фрагмент загрузки диапазона ДКМВ вблизи области ОРЧ

Второй этап (*формирование многочастотного сигнала*) реализован следующим образом. С информационного входа «Сообщение» устройства формирования многочастотного сигнала, битовая последовательность  $1, 2, \dots, n, \dots, N$  поступает на вход последовательно-параллельного регистра записи сообщения 1, где преобразуется в параллельный код и считывается из ячеек регистра в параллельном режиме с информационных выходов «1-й бит», «2-й бит», ..., « $n$ -й бит», ..., « $N$ -й бит» в блок управления ключами 2. По сигналу тактовой частоты с одноименного управляющего выхода СЕВ и синхронизации 4 из базы данных КСРЧ 3.7 блока формирования набора рабочих частот 3 поступают рабочие частоты на вход «КСРЧ» генератора ПСП 5, в котором, по следующему сигналу тактовой частоты СЕВ и синхронизации 4 они перемешиваются в соответствии с действующей в радиолинии ПСП и поступают с выхода «ПСП рабочих частот» в блок установки рабочих частот 6, работающий также по принципу последовательно-параллельного регистра, который также по сигналу тактовой частоты СЕВ и синхронизации 4 параллельно транслирует закрепленные за позициями действующей ПСП рабочие частоты через спаренные управляющие выходы

« $f_1^{\text{раб.}}$ » и « $f_2^{\text{раб.}}$ », « $f_3^{\text{раб.}}$ » и « $f_4^{\text{раб.}}$ », ..., « $f_{2N-1}^{\text{раб.}}$ » и « $f_{2N}^{\text{раб.}}$ » на одноименные входы  $N$  пар электронных ключей блока, таким образом, что за каждым информационным битом передаваемого сообщения («1» или «0») закрепляются две рабочие частоты, попарно: первая пара рабочих частот – за первым информационным битом, вторая пара рабочих частот – за вторым информационным битом, ...,  $N$ -я пара рабочих частот – за  $N$ -м информационным битом. Блок установки рабочих частот 6, может работать как в режиме частотной (ЧТ), так и амплитудной (АТ) телеграфии. Например, в режиме ЧТ за информационным битом «1» или «0» будет закреплена, соответственно, верхняя боковая (ВБП) либо нижняя боковая полоса (НБП), выбранной блоком формирования набора рабочих частот 3 несущей частоты, рис. 15. На рисунке показана процедура формирования сигналов с однополосной модуляцией (ОМ): амплитудная модуляция – АМ ( $a$ ); DSB – двухполосная амплитудная модуляция с подавленной несущей ( $b$ ); SSB – однополосная модуляция – нижняя боковая полоса ( $c$ ); SSB – однополосная модуляция – верхняя боковая полоса ( $d$ ). При параллельной передаче информационных бит на рис. 16 приведены спектрограммы с вариантами формирования многочастотного сигнала в режиме частотной телеграфии – ЧТ ( $a$ ) и амплитудной телеграфии – АТ ( $b$ ), например, из заданной информационной последовательности 01010...10101 (буквы «R» ... «L» в коде МТК-2). При режиме АТ для передачи информационной единицы «1» рабочая частота будет активна, а для информационного нуля «0» – пассивна.

По следующему сигналу тактовой частоты СЕВ и синхронизации 4, рис. 12, из блока управления ключами 2 через информационную шину на информационные входы «1-й бит», «2-й бит», ..., « $N$ -1-й бит», « $N$ -й бит» блока электронных ключей 7 поступают информационные биты передаваемого сообщения в виде логических единиц («1») и логических нулей («0»), соответственно, открывая либо нечетные 7.1, 7.3, ..., 7.2 $N$ -3, 7.2 $N$ -1 (Ключ «1»), либо четные 7.2, 7.4, ..., 7.2 $N$ -2, 7.2 $N$  (Ключ «0») электронные ключи каждой из их  $N$  пар, давая возможность подключения рабочих частот с информационные выходов «1», «2», ..., «2 $N$ -1», «2 $N$ » блока электронных ключей 7 через открытые поступившими битами сообщения в каждой паре электронные ключи (Ключ «1» или Ключ «0») на соответствующие входы нулевого суммирующего блока 8.0 сумматора входов частот 8. При этом необходимо отметить, что в каждой  $n$ -й паре электронных ключей,  $n = 1, 2, \dots, N$ , блока электронных ключей 7 открытым будет только один электронный ключ из пары (Ключ «1») – (Ключ «0»), на который поступил одноименный бит информационного сообщения «1» или «0» от блока управления ключами 2, и с выхода каждой  $n$ -й пары электронных ключей нечетный Ключ «1» подключается к первому входу (вх. 1), а четный Ключ «0» – ко второму входу (вх. 2) 9. $n$ -го сумматора нулевого суммирующего блока 8.0.

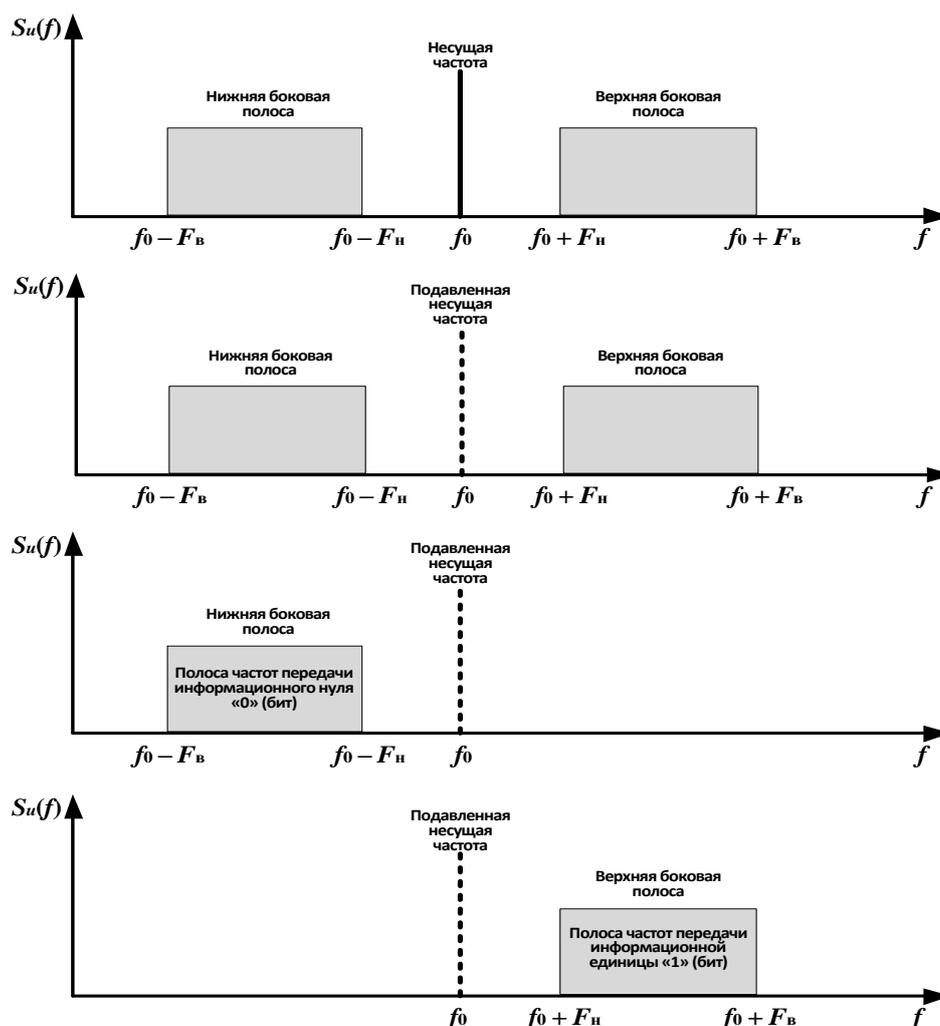


Рис. 15. Процесс формирования сигнала однополосной модуляции

Таким образом, на выход  $n$ -го сумматора (9. $n$ ) нулевого суммирующего блока 8.0 будет проходить только одна рабочая частота в соответствии с тем, какой информационный бит («1» или «0») передаваемого сообщения активировал открытие своего электронного ключа в паре, а на  $N$  выходов нулевого суммирующего блока 8.0 от каждого из  $N$  регистров памяти (10.1, 10.2, ..., 10. $N$ ) будет поступать  $N$  рабочих частот. При этом, поскольку сумматор кодов частот 8 выполнен по каскадной схеме, то каждый последующий каскад в виде  $r$ -й суммирующего блока 8. $r$ , где  $r = 0, 1, 2, \dots, \log_2 N$  будет содержать в два раза меньшее число сумматоров, по сравнению с предыдущим  $r-1$ -м каскадом, но каждый из которых будем суммировать в два раза большее число частот, запоминаемых в регистрах памяти  $r$ -го суммирующего блока, поскольку к первым и вторым входам (вх. 1 и вх. 2) каждого сумматора  $r$ -го суммирующего блока подключены попарно выходы регистров памяти предыдущего  $r-1$ -го суммирующего блока, так, что на выходе единственного регистра памяти завершающего каскада  $\log_2 N$ -го суммирующего блока 8. $\log_2 N$  будет записан весь многочастотный сигнал, содержащий предназначенное к передаче информационное сообщение и состоящий из рабочих частот КСРЧ, закодированное в соответствии с ПСП генератора ПСП 5.

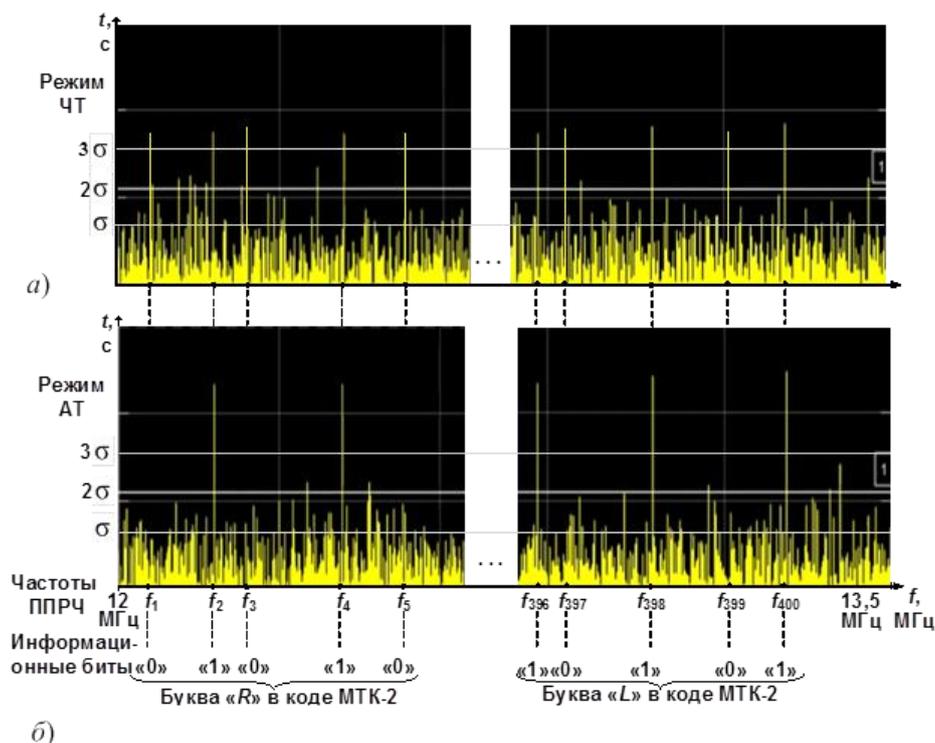


Рис. 16. Вариант формирования сигналов команды управления в режимах ЧТ (а) и АТ (б)

Сформированный в цифровом виде многочастотный код предполагаемого к передаче сигнала с выхода регистра памяти  $\log_2 N$ -го суммирующего блока  $8 \cdot \log_2 N$ , являющегося выходной информационной шиной сумматора кодов частот 8, по сигналу тактовой частоты от СЕВ и синхронизации 4 поступает в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 11, где преобразуется в аналоговый сигнал и через полосовой фильтр 12, усилитель мощности 13 и блок согласования с антенной 14 через передающую антенну 15.1 АФП 15 излучается с выхода «Многочастотный сигнал» устройства.

Пример работы предложенной модели формирования многочастотных сигналов команд управления БТС представлен на рис. 17, где приведены спектрограммы двух вариантов реализации режима ППРЧ с последовательной (а) и параллельной (б) трансляцией бит команд управления БТС с использованием КСРЧ, сформированного на основе данных радиомониторинга с использованием технологии когнитивного радио.

При этом выделение информационных бит команд управления и их динамическое распределение в свободных от первичных пользователей участках радиочастотного спектра позволяет интегрировать каналы управления БТС в уже распределенный диапазон частот без создания взаимных помех.

Необходимо также отметить, что режим работы ППРЧ излучающего устройства с параллельной трансляцией элементов (информационных бит) сигнала, как показано на рис. 17 (а) существенно повышает оперативность доведения команды управления до глобально перемещающегося БТС, доводя этот процесс до условий реального времени, когда вся команда управления передается одновременно за время трансляции одного информационного бита.

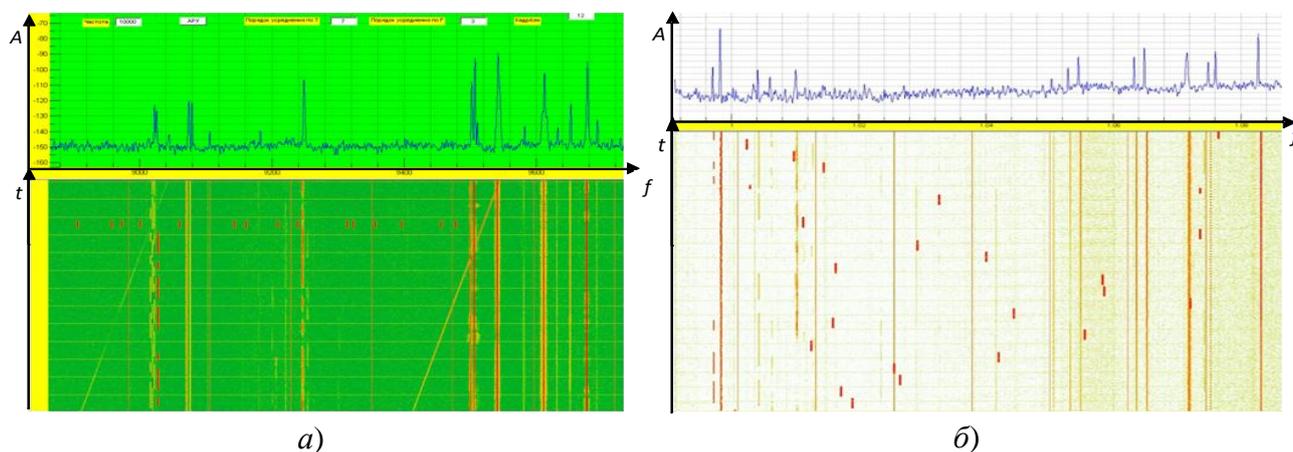


Рис. 17. Вариант формирования многочастотного сигнала команд управления БТС: а) при параллельной трансляцией бит в режиме ППРЧ; б) при последовательной трансляцией бит в режиме ППРЧ

### Система интеллектуального управления БТС на основе данных мониторинга их состояния и среды функционирования, как направление дальнейшего исследования

Выбор свободной для радиосвязи полосы частот на основе когнитивного анализа спектрограмм реального времени является теоретической базой технологии синтеза перспективных систем интеллектуального управления БТС.

Подобную систему интеллектуального управления БТС и другими РТК предполагается построить в виде структуры, состоящей из элементов, рис. 18:

- распределенной ИТКС Минтранса России 1, рассматриваемой в виде среды функционирования БТС и включающей сервера мониторинга: 1.1, осуществляющий контроль технического состояния БТС; 1.2, контролирующей безопасность движения БТС на маршруте (при выполнении миссии); 1.3, отвечающий за контроль РЧС и назначения рабочих частот на основе анализа его состояния при построении радиолиний контура наблюдения и контура управления;
- системы поддержки принятия решения (СППР) 2 на ситуационное управление БТС на маршрутах движения в среде их функционирования;
- СЦУ БТС 3, содержащий сервер сенсорного уровня 3.1, реализующий на основе оценки выхода параметров БТС за пределы нормы управление его функционированием на маршруте движения; сервер диспетчерского уровня 3.2, осуществляющий управление движением БТС на маршруте; сервер телекоммуникационного уровня 3.3, формирующей КСРЧ в интересах построения радиолиний контура наблюдения и контура управления БТС.

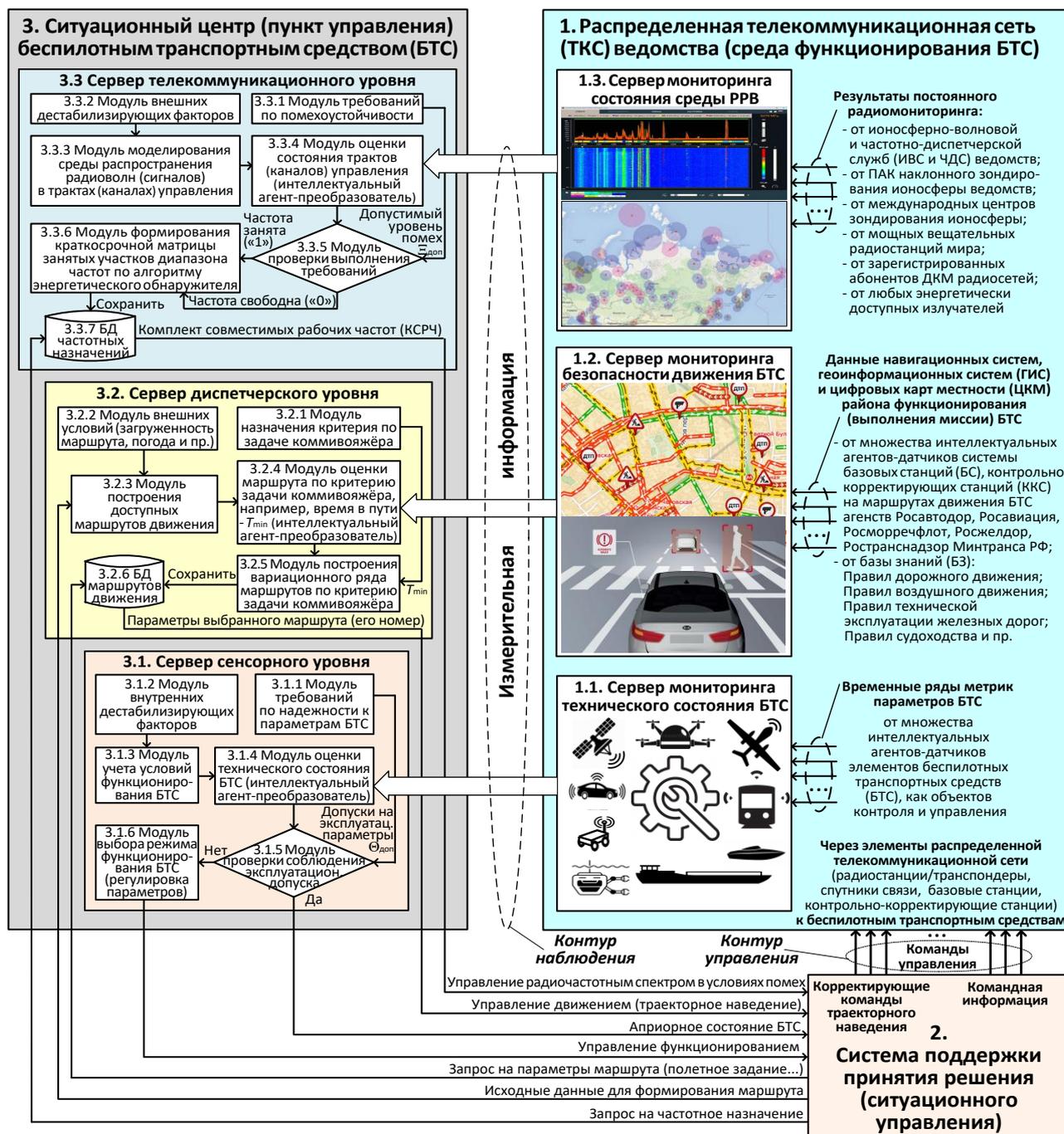


Рис. 18. Структура системы интеллектуального управления БТС (РТК)

## Заключение

Проверка адекватности предложенной модели формирования частотного ресурса подтверждает очевидность утверждения, что выполнение требования к сокращению ширины участков полосы частот под помехами  $\Delta F_{\Pi}$  способно улучшить значение вероятности правильного приема сообщения  $p$ , в радиолинии, функционирующей в режиме ППРЧ (или элемента сообщения, передаваемого в режиме так называемой «быстрой» ППРЧ [16]). При этом к основным способам, обеспечивающим выполнение этого требования, кроме выбора эффективных сигнально-кодовых конструкций [10, 16-18, 20, 26, 27], можно всецело отнести:

- наращивание мощности излучения радиопередатчика, что явно просматривается на спектрограмме рис. 9 (б) и (в), где представлены варианты геометрической модели формирования частотного ресурса для радиолиний с низким  $U_{\text{пор1}}$  и высоким  $U_{\text{пор2}}$  порогами уровней сигнала, которые характеризуют соответственно слабый и мощный сигналы команд управления;
- предоставление интеллектуальной подсистемой на основе CRS-радиосистем на пункте управления (СЦУ) ведомства и в бортовой комплекс связи БТС данных радиомониторинга в реальном масштабе времени о состоянии среды РРВ в точке приема и помеховой обстановке на маршруте БТС;
- использование других технических и технологических решений на основе применения адаптивных компенсаторов помех, технологий разнесенного приема и пр.

Участки диапазона, определяемые CRS-радиосистемой как незанятые сосредоточенной по спектру помехой в виде излучений радиопередающих средств первичных пользователей, а также ранжированные по ширине занятой полосы частот, могут быть использованы на вторичной основе для формирования КСРЧ с определением минимального между ними частотного разноса. Выбранный набор частот в виде комплекта совместимых рабочих частот должен лечь в основу псевдослучайной последовательности используемой сигнально-кодовой конструкции [27] для работы командной радиолинии БТС в режиме ППРЧ [16, 18, 27].

Направлением дальнейших исследований видится в построение устройства формирования многочастотных сигналов для реализации параллельной трансляции сигнально-кодовых конструкций команд управления беспилотными транспортными средствами в режиме ППРЧ, а также синтез системы интеллектуального управления БТС, функционирующей на основе данных интеллектуального мониторинга РЧС с получением от CRS-радиосистем ситуационного центра ведомства (Минтранса России) комплекта совместимых рабочих частот на основе и с использованием SDR-радиоустройств.

Предложенная в работе модель формирования многочастотных сигналов команд управления беспилотных транспортных систем в условиях помех должна лечь в основу интеллектуальной системы управления БТС нового типа.

## Литература

1. В России активно развиваются беспилотные технологии в сфере транспорта. [Электронный ресурс]. 2026. – URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12387> (дата обращения: 14.02.2026).
2. Материалы совместного совещания В. В. Путина и Правительства РФ по вопросам развития автономных систем (Москва. Электродепо «Аминьевское», Московский метрополитен, 16.01.2026) [Электронный ресурс]. 2026. – URL: <http://www.ktemlin.ru/events/president/transcripts/79016> (дата обращения: 14.02.2026).

3 Бутенко В. В., Пастух С. Ю. Итоги Всемирной конференции радиосвязи 2012 года // Электросвязь. 2012. № 3. С. 5-11.

4. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications // Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), IEEE International Workhop. San Diego. CA. USA. Nov. 1999. P. 3-10.

5. Михалевский Л. В. Когнитивное радио – передовая технология на пути к более рациональному использованию радиочастотного спектра // Материалы Регионального семинара Международного союза электросвязи «Конвергенция служб радиосвязи как средство повышения эффективности использования радиочастотного спектра» (Ереван, Армения, 28-30 апреля 2008 г.).

6. Авдонин Д. В., Рындык А. Г. Интеллектуальные радиосистемы: когнитивное радио // Информационные технологии. Системы, средства связи и управления: Информационно-аналитический сборник / Под ред. С.В. ИONOVA; ОАО «Концерн «Созвездие». – Воронеж, 2012. № 1. С. 115-117.

7. Кизима С. В., Митченков С. Г., Емельяников Б. Б. Когнитивные радиотехнологии. Аспекты практической реализации // Электросвязь. 2014. № 9. С. 43-47.

8. Николашин Ю. Л., Кулешов И. А., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2015. № 1. С. 20-31.

9. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхзвукосвязных декаметровых радиолоний // Морская радиоэлектроника. 2025. № 2 (52). С. 16-22.

10. Будко Д. Д., Будко П. А., Клименко А. Д., Рыжкова Д. Н. Модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолоний управления беспилотными транспортными системами // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 74-83.

11. Большова Г., Волкова Ю. Лоскутное одеяло спектра // Информ Курьер Связь. 2009. № 1. [Электронный ресурс]. 2009. – URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/2480773-Loskutnoe-odeyalo-spektra.html>. (дата обращения: 15.02.2026).

12. Федеральный закон Российской Федерации от 07.07.2003 г. № 126-ФЗ «О связи» // Собрание законодательства Российской Федерации № 28 от 14 июля 2003 г. ст. 3448.

13. Связь без брака. Как создать эффективную инфраструктуру связи для беспилотных воздушных судов // Ассоциация работодателей и предприятий индустрии беспилотных авиационных систем «АЭРОНЕКСТ». [Электронный ресурс]. 25 июня 2024 г. – URL: [https://aeronext.aero/press\\_room/analytics/182565](https://aeronext.aero/press_room/analytics/182565). (дата обращения: 15.02.2026).

14. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам (ДПАС). [Электронный ресурс]. 2015. – URL: [http://aviadocs.com/icaodocs/ Docs/10019\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.com/icaodocs/ Docs/10019_cons_ru.pdf) (дата обращения 15.02.2026).

15. Кудряков С. А., Рубцов Е. А., Беляев С. А., Экало А. В., Остапченко Ю. Б. Анализ линий различной протяженности для обеспечения

управления, контроля и связи с беспилотными воздушными судами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 31-38.

16. Беккиев А. Ю., Борисов В. И. Базовые принципы создания помехозащищенных систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1. С. 3-16.

17. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Г. И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.

18. Кандаурова Е. О. Разработка метода интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио / Дисс. уч. ст. канд. техн. наук. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2024. 153 с.

19. Шибанов В. С., Бровцин С. Н., Жуков Г. А., Попков В. Я. Обмен данными при ограниченных частотно-временных ресурсах // Техника средств связи. Серия Техника проводной связи. 1984. № 6. С. 75-85.

20. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Повышение эффективности функционирования декаметровых радиолиний // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 2. С. 4-10.

21. Анализатор спектра в реальном масштабе времени R&S FSVR, R&S FPS [электронный ресурс]. 2015. – URL: <https://rohde-schwarz.ru> (дата обращения 15.02.2026).

22. Банников И. М., Березовский В. А., Валеев М. М., Хазан Г. К. Радиоприёмные устройства и радиоприёмные комплексы перспективных узлов коротковолновой связи // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (РЭИС-2011). (Омск, 5-8 июля 2011 г.). – Омск: АО «ОНИИП», 2011. – С. 121-125.

23. Пономарчук С. Н., Грозов В. П., Котович Г. В. Расчет характеристик наклонного распространения радиоволн по данным вертикального зондирования ионосферы // Вестник академии военных наук. 2009. № 3. С. 95-98.

24. Килимнин Ю. П., Лебединский Е. В., Прохоров В. К., Шаров А. Н. Адаптивные автоматизированные системы военной радиосвязи / под ред. А. Н. Шарова. – Л.: ВАС, 1978. – 284 с.

25. Аппаратура автоматизированного ведения связи адаптивных радиолиний / под ред. Д. Д. Наследова. – Л.: ВАС, 1985. – 102 с.

26. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2014. № 1. С. 30-37.

27. Будко Д. Д., Будко П. А., Зацепин Т. А., Клименко А. Д. Метод управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 4. С. 134-178. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-134-178.

28. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. М.: Вузовская книга, 2013. 360 с.

29. Пузанков Д. В., Мирошников В. И., Пантелеев М. Г., Серегин А. В. Интеллектуальные агенты, многоагентные системы и семантический Web: концепции, технологии, приложения. – СПб.: ООО «Технолит», 2008. 292 с.

30. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.

31. Мешалкин В. А., Сосунов Б. В. Основы энергетического расчета радиоканалов. – Л.: ВАС, 1991. – 110 с.

32. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минцифры России от 23.11.2020 № 20-56-02-1 «Об утверждении Методики расчетов электромагнитной совместимости и условий совместного использования радиоэлектронных средств телевизионного вещания с радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы в полосе частот 470-862 МГц. – М.: СПС «Гарант», 2020. – 131 с.

33. Ладанов М. В., Ведищев А. М., Кизима С. В., Лавров Г. В. Планирование радиосвязи на коротких волнах для магистральных радиотрасс // Электросвязь. 2012. № 3. С. 3-8.

### References

1. V Rossii aktivno razvivayutsya bespilotnye tekhnologii v sfere transporta [Unmanned technologies in the field of transport are actively developing in Russia]. 2026. Available at: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12387> (accessed 14.02.2026) (in Russian).

2. Materialy sovmestnogo soveshchaniya V.V. Putina i Pravitel'stva RF po voprosam razvitiya avtonomnyh sistem [Materials of the joint meeting of Vladimir Putin and the Government of the Russian Federation on the development of autonomous systems] (Moscow. Elektrodepo "Aminevskoe", Moscow Metro, 16.01.2026). 2026. Available at: <http://www.ktemlin.ru/events/president/transcripts/79016> (accessed 14.02.2026) (in Russian).

3 Butenko V. V., Pastuh S. Yu. Itogi Vsemirnoj konferencii radiosvyazi 2012 goda [Results of the 2012 World Radiocommunication Conference]. *Elektrosvyaz*, 2012, no. 3, pp. 5-11 (in Russian).

4. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications. Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, on November. 1999, pp. 3-10.

5. Mikhalevsky L. V. Cognitive radio – advanced technology on the way to more rational use of a radio-frequency range, Materialya BDT/BR Regional Seminar "Convergence of radio services as a means of improving the efficiency of spectrum utilization". Yerevan, Armenia, on April 28-30, 2008 (in Russian).

6. Avdonin D. V., Rindik A. G. Intellectual radio systems: cognitive radio. *Information technologies. Systems, means of communication and managements. The information and analytical collection*. Under the editor. of S. V. Ionov, JSC Sozvezdiye Concern Publ., Voronezh, 2012, no. 1, pp.115-117 (in Russian).

7. Kizima S. V., Mitchenkov S. G., Emelyannikov B. B. Cognitive radio technologies. Aspects of practical realization. *Elektrosvyaz*, 2014, no. 9, pp. 43-47 (in Russian).

8. Nikolashin Yu. L., Kuleshov I. A., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. SDR radio devices and cognitive radio communication in the decameter frequency range. *H&ES Research*, 2015, no. 1, pp. 20-31. (in Russian).

9. Nikolashin Yu. L., Mirosnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Cognitive connection system and influence of monitoring data usage on noise immunity of ultra-narrow decimeter. *Marine radio electronics*, 2015, no.1 (52), pp. 16-22 (in Russian).

10. Budko D. D., Budko P. A., Klimenko A. D., Ryzhkova D. N. A frequency band selection model for the formation of decimeter radio control lines for unmanned transport systems. *Means of communication equipment*, 2025, no. 4 (172), pp. 74-83 (in Russian) DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-74-83.

11. Bol'shova G., Volkova Yu. Loskutnoe odeyalo spectra [The patchwork of the spectrum]. 2009. Available at: <https://www.iksmedia.ru/articles/2480773-Loskutnoe-odeyalo-spektra.html> (accessed 14.02.2026) (in Russian).

12. The federal law of the Russian Federation of July 7, 2003 no.126-FZ "On Communications". Collection of Legislation of the Russian Federation no. 28, July 14, 2003, Article 3448 (in Russian).

13. Svyaz' bez braka. Kak sozdat' effektivnuyu infrastrukturu svyazi dlya bespilotnykh vozдушnykh sudov [A relationship without marriage. How to create an effective communication infrastructure for unmanned aircraft]. *Associaciya rabotodatelej i predpriyatij industrii bespilotnykh aviacionnykh sistem "Aeronekst"* [Association of Employers and enterprises of the industry of unmanned aircraft systems "Aeronext"]. June 25, 2024. Available at: [https://aeronext.aero/press\\_room/analytics/182565](https://aeronext.aero/press_room/analytics/182565) (accessed 15.02.2026) (in Russian).

14. Rukovodstvo po distancionno pilotiruемым aviacionnym sistemam (DPAS) [Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (DPAS)]. 2015. Available at: [http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/10019\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/10019_cons_ru.pdf) (accessed 15.02.2026) (in Russian).

15. Kudryakov S. A., Rubtsov E. A., Belyaev S. A., Ekalo A. V., Ostapchenko Yu. B. Analiz linij razlichnoj protyazhennosti dlya obespecheniya upravleniya, kontrolya i svyazi s bespilotnymi vozдушnymi sudami [Analysis of lines of various lengths to ensure control, control and communication with unmanned aerial vehicles]. *Proceeding of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2019, no. 1, pp. 31-38 (in Russian).

16. Bekkiev A. Yu., Borisov V. I. Bazovie printsipi sozdaniya pomehozashishyonnih system radiosvyazi [Basic Principles of Creation of Noise-Proof Radio Communication Systems]. *Radio Communication Theory and Equipmen*, 2014, no. 1, pp. 3-16 (in Russian).

17. Tuzov G. I., Sivov V. A., Prytkov V. I. *Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami* [Noise immunity of radio systems with complex signals]. Edited by G. I. Tuzov. Moscow, *Radio and Communications*, 1985, 264 p. (in Russian).

18. Kandaurova E. O. *Razrabotka metoda intellectual'noj perestrojki rabochikh chastot v sistemakh kognitivnogo radio*. Diss. kand. tehn. nauk [Development of a method of intelligent adjustment of operating frequencies in cognitive radio systems. Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), 2024. 153 p. (in Russian).

19. Shibanov V. S., Brovtsin S. N., Zhukov G. A., Popkov V. Ya. Obmen dannymi pri ogranichennykh chastotno-vremennykh resursah [Data exchange with limited time-frequency resources]. *Means of communication equipment. Ser. Wired communication technology*, 1984, is. 6, pp. 75-85. (in Russian).

20. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. The increase efficiency of decameter radio lines. *T-Comm*, 2015, no. 2, pp. 4-10 (in Russian).

21. Analizator spektra v real'nom masshtabe vremeni R&S FSVR, R&S FPS [Real-time spectrum analyzer R&S FSVR, R&S FPS]. 2026. Available at: <https://www.rohde-schwarz.com> (accessed 14.02.2026) (in Russian).

22. Bannikov I. M., Berezovsky V. A., Valeev M. M., Khazan G. K. Radiopriyomnye ustrojstva i radiopriyomnye komplekсы perspektivnyh uzlov korotkovolnovoj svyazi [Radio receiving devices and radio receiving complexes of promising shortwave communication nodes]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Radiotekhnika, elektronika i svyaz'" (REiS-2011)* [International Scientific and Technical Conference "Radio Engineering, Electronics and Communications" (REiS-2011)]. Omsk, July 05-08, 2011, pp. 121-125 (in Russian).

23. Ponomarchuk S. N., Grozov V. P., Kotovich G. V. Raschet harakteristik naklonnogo rasprostraneniya radiovoln po dannym vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery [Calculation of the characteristics of oblique propagation of radio waves based on vertical sounding of the ionosphere]. *Bulletin of the Academy of Military Sciences*, 2009, no. 3 (28), pp. 95-08 (in Russian).

24. Kilimnin Yu. P., Lebedinsky E. V., Prokhorov V. K., Sharov A. N. *Adaptivnye avtomatizirovannye sistemy voennoj radiosvyazi* [Adaptive automated military radio communication systems]. Edited by A. N. Sharov. Leningrad, Military Academy Communications Publ., 1978, 284 p. (in Russian).

25. *Apparatura avtomatizirovannogo vedeniya svyazi adaptivnyh radiolinij* [Equipment for automated communication of adaptive radio lines]. Edited by D. D. Nasledov. Leningrad, Military Academy Communications Publ., 1985, 102 p. (in Russian).

26. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. Perspective methods of increase noise stabilities of decameter radio lines. *H&ES Research*, 2014, no. 1, pp. 30-37 (in Russian).

27. Budko D. D., Budko P. A., Zatsëpin T. A., Klimenko A. D. A method for controlling unmanned transport systems based on noise-resistant signal-code structures in conditions of concentrated and noisy interference. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 4, pp. 134-178 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-134-178.

28. Kupriyanov A. I. *Radioe`lektronnaya bor`ba* [Electronic warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga publ., 2013. 360 p. (in Russian).

29. Puzankov D. V., Miroshnikov V. I., Panteleev M. G., Seregin A. V. *Intellektual'nye agenty, mnogoagentnye sistemy i semanticheskij Web: koncepcii, tekhnologii, prilozheniya* [Intelligent agents, multi-agent systems and the semantic Web: concepts, technologies, applications]. St. Petersburg, Technolit LLC Publ., 2008. 292 p. (in Russian).

30. Korzhik V. I., Fink L. M., Shchelkunov K. N. *Raschet pomekhustojchivosti sistem peredachi diskretnyh soobshchenij. Spravochnik* [alculation of noise immunity of discrete message transmission systems. Handbook]. Moscow, *Radio i svyaz'* [Radio and Communications], 1981. 232 p. (in Russian).

31. Meshalkin V. A., Sosunov B. V. *Osnovy energeticheskogo rascheta radiokanalov* [Fundamentals of energy calculation of radio channels]. Leningrad. Military Academy Communications Publ., 1991. 110 p. (in Russian).

32. Reshenie Gosudarstvennoj komissii po radiochastotam pri Mincifry Rossii ot 23.11.2020 № 20-56-02-1 "Ob utverzhdenii Metodiki raschetov elektromagnitnoj sovmestimosti i uslovij sovmestnogo ispol'zovaniya radioelektronnyh sredstv televizionnogo veshchaniya s radioelektronnyimi sredstvami suhoputnoj podvizhnoj sluzhby v polose chastot 470-862 MGc" [Decision of the State Commission on Radio Frequencies under the Ministry of Digital Affairs of the Russian Federation dated 11.23.2020 No. 20-56-02-1 "On approval of the Methodology for calculating electromagnetic compatibility and conditions for the joint use of radio–electronic means of television broadcasting with radio–electronic means of land mobile service in the frequency band 470–862 MHz]. Moscow, Legal Reference System "Garant" Publ., 2020. 131 p. (in Russian).

33. Ladanov M. V., Vedishchev A. M., Kizima S. V., Lavrov G. V. *Planirovanie radiosvyazi na korotkih volnah dlya magistral'nyh radiotrass* [Planning of short-wave radio communications for trunk radio routes]. *Elektrosvyaz'*, 2012, no. 3, pp. 3-8 (in Russian).

Статья поступила 2 марта 2026 г.

### Сведения об авторах

*Будко Дмитрий Дмитриевич* – аспирант. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Область научных интересов: методы управления беспилотными транспортными системами. E-mail: budd.85@yandex.ru.

*Каретников Владимир Владимирович* – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой судоходства на внутренних водных путях. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Область научных интересов: определение дальности и зон действия радиотехнических средств СВ и ПВ/КВ диапазонов. E-mail: karetnikovvv@gumrf.ru.

Адрес: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5, корп. 7.

---

## A model for generating multi-frequency control command signals for unmanned transport systems under interference conditions

D. D. Budko, V. V. Karetnikov

**Problem statement:** currently, the Russian transport industry is rapidly developing unmanned technologies in key areas of scientific progress. It is important to take into account that the use of aviation, space, land, sea and river unmanned transport systems at global ranges or within the city is accompanied by the use of wireless technologies based on radio channels of various wave ranges, which are subject to the destructive effects of noise, interference, fading and other destabilizing factors. In turn, it can be stated that the radio frequency spectrum has long been divided between licensees and continues to be overloaded due to the explosive growth in the introduction of autonomous systems by departments, especially in large metropolitan areas and transport and logistics hubs in ports and industrial agglomerations. At the same time, increasing the number of high-speed autonomous systems, sometimes operating at hypersonic speeds, requires developers to

develop new approaches to bring control commands in real time. **The article aims** to develop a model for the formation of multi-frequency control command signals for unmanned transport systems transmitted in parallel transmission mode of each bit over available interference-free radio channels. **The purpose of the work:** to develop a model for the formation of multi-frequency control command signals for unmanned transport systems in conditions of interference based on the use of intelligent technologies. **Methods used:** methods of dynamic control of the radio frequency spectrum based on technologies of spectrum expansion with a change in the operating frequency according to a pseudo-random law, spectrum expansion by direct sequence method and spectrum expansion by linear frequency modulation method, technologies of cognitive radio systems and software-defined radio. **The main results** of the study include the regulatory and legal justification of the need for dynamic control of the frequency resource in conditions of interference, the determination of the initial data for modeling and the model itself for the formation of multi-frequency signals of commands for controlling unmanned transport systems in conditions of interference, the verification of the proposed model for adequacy, the schematic implementation of a multi-frequency signal generator for commands for controlling unmanned transport systems in conditions of interference, and also suggestions on the directions of further research. **The novelty** consists in presenting a geometric model for the formation of multi-frequency control command signals for unmanned transport systems at different signal level thresholds against the background of noise and interference in the command radio link, as well as calculating the probability of correct reception of a control command signal with a varying frequency band depending on the ratio of the frequency band width under interference and free from it. **The practical significance** of the model is its use in the synthesis of a promising intelligent control system for unmanned vehicles of the department based on data from monitoring their condition and operating environment.

**Keywords:** unmanned transport systems, cognitive radio systems, software-defined radio, radio frequency spectrum, spectrum extension technologies.

### Information about the Authors

*Dmitry Dmitrievich Budko* – Postgraduate. State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. Research interests: methods of managing unmanned transport systems. E-mail: budd.85@yandex.ru

*Vladimir Vladimirovich Karetnikov* – Doctor of Engineering Sciences, Professor. Head of the Department Inland Waterway Navigation. Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Waterways. His research interests include determining the range and coverage areas of MF/HF radio equipment. Email: karetnikovvv@gumrf.ru

Address: 198035, St. Petersburg, Dvinskaya St., 5/7.