УДК 621.39

Обеспечение информационной скрытности при доведении команд управления до беспилотных транспортных систем

Будко Д. Д., Будко П. А., Каретников В. В., Клименко А. Д.

Постановка задачи: *разработка сигнально-кодовых конструкций и алгоритмов их применения, обладающих способностью обеспечить информационную скрытность на каналах и трактах управления глобально-перемещающимися объектами, типа беспилотные транспортные системы, робототехнические комплексы и платформы, а также иные автономные системы. При этом такие глобально перемещающиеся автономные объекты рассматриваются Минтрансом России и его федеральными агентствами Росморречфлот, Росавиация, Росжелдор и Росавтодор как объекты критической информационной инфраструктуры, требующие защиты и принятия мер по предотвращению несанкционированного доступа к их управлению и к данным, которые они передают и получают.* ***Цель работы:*** *обеспечение информационной скрытности сигналов управления автономными системами на сети автомобильных и железных дорог, внутренних водных путях России и в морских акваториях.* ***Используемые методы:*** *технологии расширения спектра методом прямой последовательности, расширения спектра методом линейной частотной модуляции, а также режим перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону, технологии когнитивных радиосистем и программно определяемого радио, методы однополосной модуляции, амплитудной и частотной телеграфии, алгоритмы функционирования энергетического обнаружителя. К основным* ***результатам исследования*** *можно отнести предложенный подход к реализации нового класса радиолинии декаметрового диапазона волн, использующей передачу сообщений методом параллельного побитного излучения сверхузкополосных сигналов. При этом за информационными единицами «1» команд управления закрепляются активные частоты, а за информационными нулями «0» – пассивные, не излучаемые.* ***Практическая значимость*** *предложенных результатов состоит рассмотрение с позиции информационной скрытности данных видов сигнально-кодовых конструкций. Без знания актуальной для радиолинии псевдослучайной последовательности задействованных в сообщении рабочих частот, определить на каких пассивных частотах передаются информационные нули «0» не представляется возможным. Следовательно, посторонним наблюдателем команда управления не будет распознана. Тем самым может быть обеспечена полная информационная скрытность ее доведения до автономной системы в условиях попыток несанкционированного доступа к ней на маршруте движения.*

Ключевые слова: *амплитудная телеграфия, беспилотная транспортная система, декаметровый диапазон волн, информационная скрытность, сигнально-кодовая конструкция, частотная телеграфия.*

Введение

В последние годы в России, как и в мировом сообществе, наблюдается всплеск научных разработок и практических реализаций по внедрению робототехнических систем (РТС), беспилотных транспортных систем (БТС) и других

Библиографическая ссылка на статью:
Будко Д. Д., Будко П. А., Каретников В. В., Клименко А. Д. Обеспечение информационной скрытности при доведении команд управления до беспилотных транспортных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 197-217. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-197-217

Reference for citation:
Budko D. D., Budko P. A., Karetnikov V. V., Klimenko A. D. Ensuring information secrecy when bringing control commands to unmanned transport systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 197-217 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-197-217

автономных систем широкого применения во все сферы деятельности государства: от медицины до грузоперевозок, от охраны границ до подводных исследований [1-4]. Сложности по их внедрению сопряжены, прежде всего, с тем, что данные системы являются сложными, открытыми, распределенными, динамическими и вероятностными эргатическими системами. При этом:

- *сложность* системы обусловлена наличием большого числа взаимодействующих элементов – технических устройств и ситуационных центров управления (СЦУ), т. е. обслуживающего и управляющего персонала, составляющих единое целое и обладающих существенными свойствами, отсутствующими у отдельных элементов;
- *распределенность* системы связана с тем, что ее элементы не локализованы, а рассредоточены на большой территории страны и могут находиться вне её в водном, воздушном и космическом пространствах;
- *открытой* система является по причине, что она взаимодействует с окружающей средой, являющейся агрессивной в части влияния шумов и помех различной физической природы, а также иных случайных и преднамеренных дестабилизирующих факторов (ДФ);
- *динамической* система считается в связи непрерывным изменением ее состояния под воздействием факторов внешней среды и различных внутренних отказов элементов;
- все перечисленные события по отношению к автономным системам носят случайный характер, что относит эти системы к *вероятностным*.

Исходя из указанных выше особенностей современных автономных систем, в работе рассмотрены вопросы безопасного внедрения такой их разновидности как беспилотные транспортные системы. В целом беспилотные технологии наряду с искусственным интеллектом и цифровыми платформами на современном этапе развития определяют будущее человечества. Широкое внедрение их в наш обход – это веление времени, а не дань моде. Развитие беспилотных технологий открывают путь к решению проблем социально-экономического развития на фоне провалов в демографии и дефицита на рынке труда, обеспечению конкурентоспособности в мире, укреплению безопасности и суверенитета России.

С активным внедрением в транспортную отрасль и повседневную жизнь человечества БТС различного назначения [5] одним из актуальных направлений научных исследований являются вопросы обеспечения информационной безопасности их каналов управления [6]. Это связано с тем, что такие глобально перемещающиеся автономные объекты, как уже отмечалось выше, считаются открытыми эргатическими системами критической инфраструктуры с точки зрения обеспечения безопасности и предотвращения несанкционированного доступа к управлению ими и к данным, которые они передают или получают.

Цель статьи: рассмотреть различные виды сигнально-кодовых конструкций (СКК) в диапазоне декаметровых волн (ДКМВ), позволяющие добиться информационной скрытности сигналов управления глобально перемещающихся БТС, РТС и других автономных систем.

1. Используемые обозначения и термины

В ходе проведения исследования авторами был использован научно-методический аппарат по обеспечению информационной безопасности при доведении команд управления (КУ) до автономных систем в части их информационной скрытности и недопущения несанкционированного доступа. Также рассмотрены существующие и перспективные алгоритмы формирования сигнально-кодовых конструкций каналов управления, где были применены следующие обозначения, таблица 1.

Таблица 1 – Основные обозначения и их физический смысл

Обозначение	Физический смысл обозначения
$P_{\text{изл}}$	Мощность излучения сигнала
$f_{\text{изл}}$	Частота излучения сигнала (рабочая частота)
$\tau_{\text{бит}}$	Длительность одного бита команды управления
$f^{\text{«1»}}(f^{\text{«0»}})$	Частоты передачи информационных бит «1» («0»)
f_0	Несущая частота
f_{0i}	Несущая частота *i*-го бита
$F_{\text{н}}$, $F_{\text{в}}$	Частотный разнос для нижней (н) и верхней (в) боковых полос для режима однополосной модуляции и однополосной модуляции с подавленной несущей (SSB, SSB-SC)
$P_{\text{с}}$, $P_{\text{п}}$	Мощность сигнала и мощность помехи, соответственно
$I_0(z)$	Функция Бесселя
f_i	Рабочая частота *i*-го элемента псевдослучайной последовательности
ν^2	Спектральная плотность шума
N	Число бит в команде управления
$T_{\text{сеанс}}$	Время сеанса связи
$\Delta F_{\text{ППРЧ}}$	Частотная полоса излучения сигнально-кодовой конструкции в режиме изменения рабочей частоты по псевдослучайному закону
$\Delta f^{\max}_{\text{Доплер}}$	Максимальное значение полосы изменения частот, вызванное эффектом Доплера в ионосферных слоях
Δf	Частотная полоса, занимаемая передачей одного бита сообщения
τ	Длительность бинарной посылки
H	Величины порога обнаружения сигнала: σ, 2σ, 3σ
V_1	Значение напряжения огибающей принятого сигнала на выходе фильтра
$p_{\text{ош}}$	Вероятности ошибочного приёма элемента сигнала (для некогерентного приёме)
W	Энергия бита сигнала

Термины, раскрывающие сущность исследования, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные термины и определения

Термины и определения	Физический смысл термина
SDR	Программно-определяемое радио (англ. *Software Define Radio*) – радиопередатчик и/или радиоприёмник, реализованные на компьютере или встроенной системе с помощью программного обеспечения.
CRS	Когнитивная радиосистема (англ. *Cognitive Radio System*) – радиосистема, использующая полученные знания от постоянного изучения своего внутреннего состояния и окружающей электромагнитной среды для динамической корректировки своих протоколов взаимодействия и эксплуатационных параметров.
QRSS	Расширение Q-кода (QRS), говорящее корреспонденту о снижении скорости передачи. (Сверхмедленный телеграф)
SSB	*Single-Sideband Modulation* (англ.) – режим однополосной модуляции, в радиолюбительской среде называемой, однополосной модуляцией с подавленной несущей (SSB-SC)
Тракт управления	Совокупность радиотехнических и электронных средств, обеспечивающих прохождение КУ между СЦУ и БТС. Тракт управления состоит из канала траекторного наведения, канала доведения командной информации, и др.
Канал траекторного наведения	Канал связи для доведения команд на изменение скорости движения «Вперед» – «Назад», направлению движения «Влево» – «Вправо», угла места «Вверх» – «Вниз».
Канал командной информации	Канал передачи данных для доведения формализованных сообщений, используемых для управления БТС и обмена данными между ними при взаимодействии в группе.
FHSS	*Frequency-Hopping Spread Spectrum* (англ.) – перестройка рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ), осуществляется путем периодической смены рабочей частоты по известной только для передающей и приемной сторон некоторой псевдослучайной последовательности.

2. Существующий научно-методический аппарат синтеза сигнально-кодовых конструкций команд управления в интересах БТС

Существенный прирост эффективности и безопасности применения каналов управления как между СЦУ и БТС, так и в группе БТС возможно получить посредством применения в них формализованных сообщений (ФС). В данном случае в работе под каналами управления будем понимать как каналы передачи

данных для доведения ФС, используемых для управления БТС, так и каналы связи для доведения команд траекторного наведения по направлению и скорости движения, по азимуту и по углу места (тангажу).

К этому также можно отнести и часть ФС, формируемой системой кодирования (защиты информации) для обеспечения на составных трактах передачи (в гетерогенных средах с различными диапазонами волн) заданных требований по помехоустойчивости. В этом случае формализация сообщения необходима, прежде всего, для уменьшения периода энергетического контакта, а также повышения оперативности доведения КУ в направлении СЦУ – БТС, или при взаимодействии автономных БТС в группе. Уменьшить период времени на энергетический контакт возможно как за счет снижения мощности радиопередающего устройства (РПДУ), а также путем динамического управления радиочастотным спектром (РЧС) и частотной полосой сигнала, что сможет позволить добиться работы командной радиолинии (РЛ) «из под шумов», а, к примеру, для звукоподводной связи – маскировать КУ под звуковые сигналы морской фауны, как приведено в [7].

Осуществленные исследования [8-10] научно-методического аппарата по формированию радиотрактов управления и обмена данными показал, что существенный прогресс в синтезе эффективных алгоритмов дистанционного управления БТС и другими автономными системами в автоматизированном и автоматическом режимах был достигнут во второй половине прошлого века в период развития систем дистанционного автоматического регулирования.

В данном исследовании основное внимание направлено на разработку СКК КУ БТС, построенных на основе бинарных посылок типа информационных единиц «1» и нулей «0», которые соответствуют битам КУ [4, 7, 8].

Изначально, базовым аналогом, представляемым в статье СКК КУ стал широко известный и применяемый уже более века метод ведения радиообмена на основе кодовой последовательности «точек» и «тире» азбуки Морзе, запатентованной в 1849 году Сэмюэлем Морзе [10]. Защитный интервал между элементами азбуки Морзе внутри одного знака сообщения соответствует времени трансляции «точки», между знаками в блоке сообщения (слове) – времени передачи трех «точек», а между блоками сообщения – временному интервалу в семь «точек». Сообщения в коде Морзе передают в режиме АТ (амплитудная телеграфия) на фиксированных частотах, а принимаются оператором на слух.

Несмотря на простоту данного метода формирования каналов управления, к основным его недостаткам относят критически низкую скорость передачи, ориентированную на слуховой прием, что делает неприемлемым такой «ручной режим» в автоматических системах и для высокоскоростных БТС (РТС), управляемых в режиме реального времени. К этому добавляется низкая помехоустойчивость метода в связи с большой загрузкой диапазона ДКМВ помехами и замираниями ионосферы – в среде распространения радиоволн (РРВ).

В тоже время, простота и самое главное – глобальность в обеспечении связи, а также экономическая целесообразность и другие достоинства данного способа в радиосвязи способствуют его активному использованию более века. Так, в последние годы активно внедряются способы автоматического приема

азбуки Морзе различными трансиверами. На рис. 1 представлены фрагменты спектрограмм типа «Водопад» сигналов АТ при воздействии сосредоточенных по спектру помех и шумов.

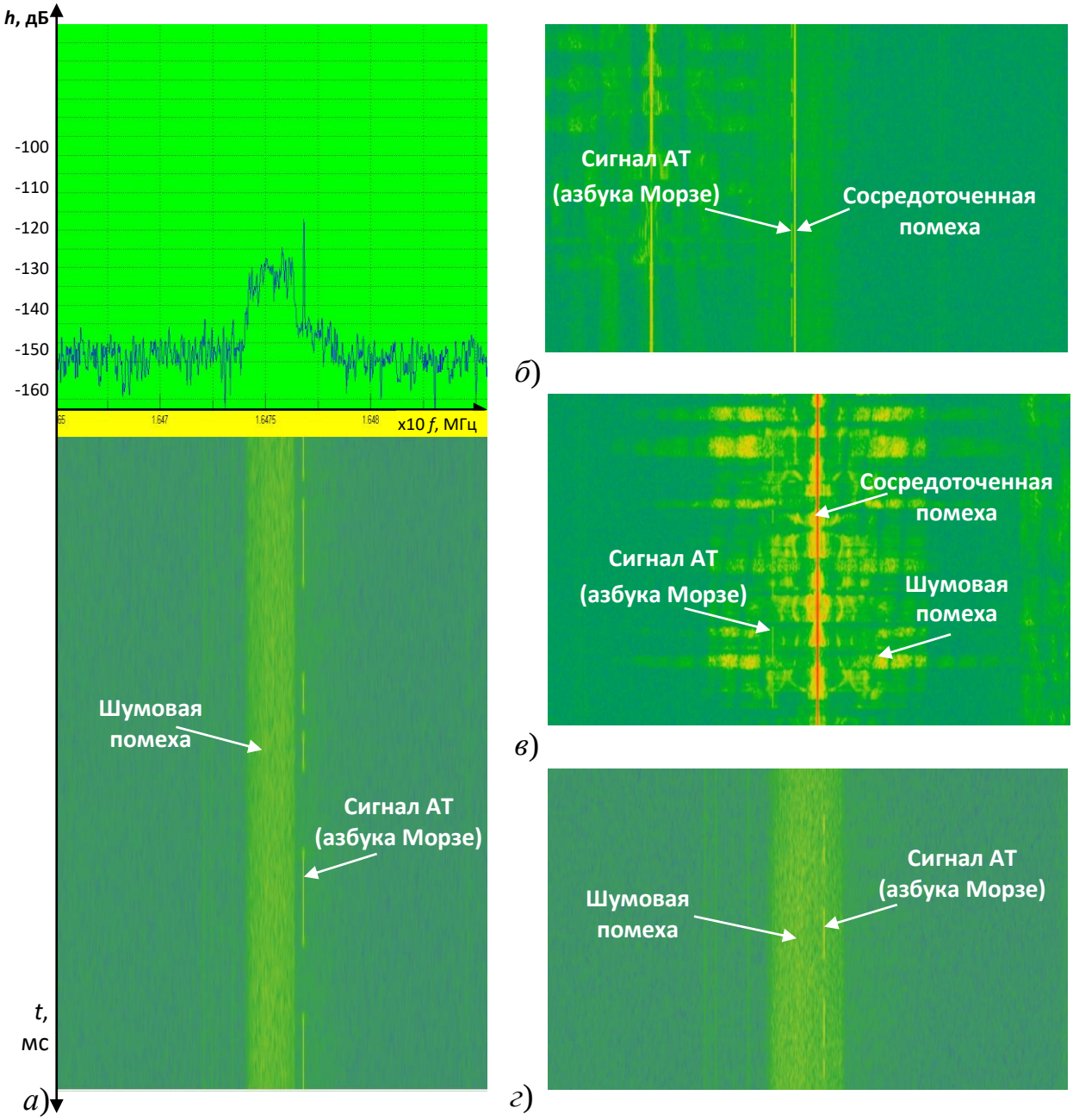


Рис. 1. Фрагменты спектрограмм приема сигналов АТ и их АЧХ: *а*) рядом с шумовой помехой, $h_{шп} \approx -120$ дБ; *б*) под воздействием сосредоточенной помехи; *в*) рядом с сосредоточенной помехой в шумах, *г*) под шумовой помехой

На основе анализа представленных на рис. 1 спектрограмм можно сделать вывод, что КУ, сформированная на основе АТ сигналов не обладают какой-либо информационной скрытностью и обычный энергетический обнаружитель [11] легко справляется с автоматическим перехватом команд управления БТС.

В связи с чем, при широком внедрении БТС необходим поиск новых подходов к построению более помехоустойчивых и безопасных в части информационной скрытности СКК КУ, также как и эффективных алгоритмов их дове-

дения до БТС, обладающих экономической целесообразностью и технической реализуемостью при передаче от СЦУ и пунктов дистанционного пилотирования [12, 13] (в случае управления беспилотными летательными аппаратами) и при приеме бортовыми комплексами связи (БКС) иных автономных систем.

Другим общеизвестным, но более безопасным в части скрытности, способом передачи КУ по беспроводным каналам связи можно отметить сигналы частотной телеграфии (ЧТ), когда информационные биты «1» и «0» передаются на разных частотах $f^{«1»}$ и $f^{«0»}$, и на приемной стороне командной радиолинии (РЛ) должны быть известны с их закреплением за единичными и нулевыми битами.

Также передача КУ возможна путем использования режима однополосной модуляции (ОМ), в радиолюбительской среде называемой SSB (single-sideband modulation), или ОМ с подавленной несущей (SSB-SC) рис. 2.

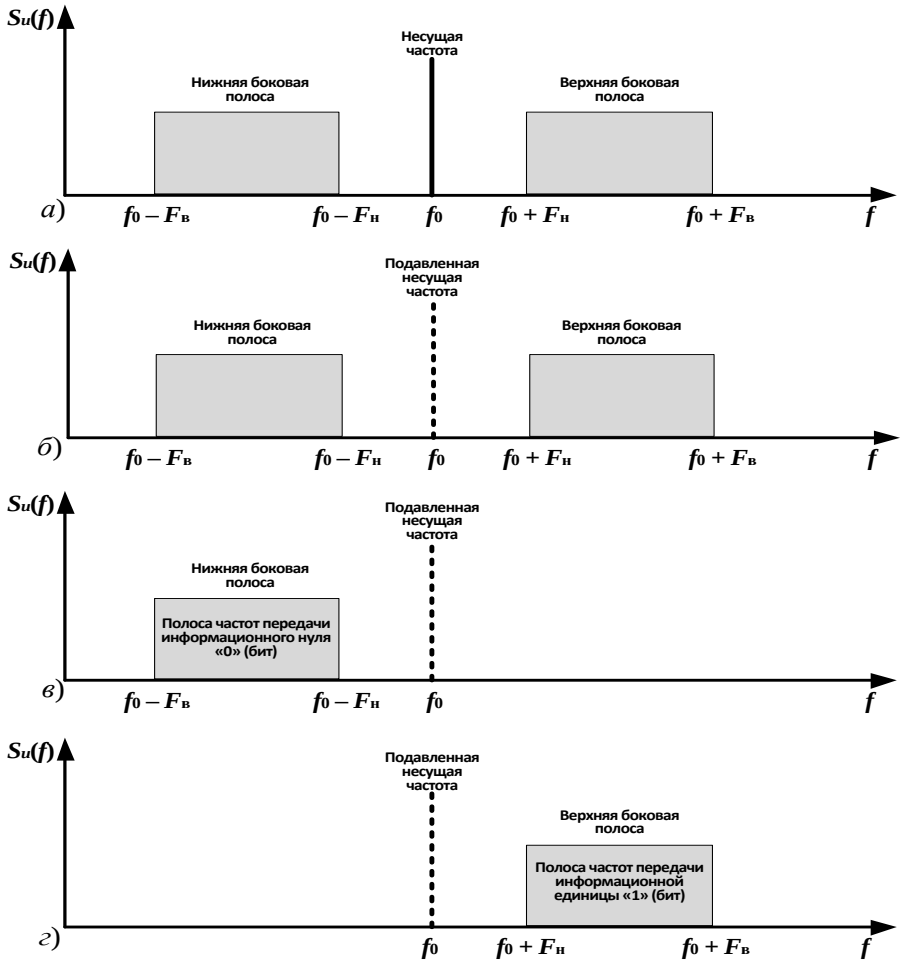


Рис. 2. Процесс формирования сигналов однополосной модуляции

В данном случае, например, за битами в виде информационной единицы «1» или информационного нуля «0» (или наоборот) закрепляется верхняя боковая (ВБП) либо нижняя боковая полоса (НБП), относительно несущей частоты.

На рис. 2 *а*) и б) приведен процесс формирования сигналов с двухполосной амплитудной модуляцией (DSB), соответственно, с несущей частотой f_0 и с подавленной несущей. На рис. 2 *в*) и *г*) показаны, соответственно, режимы SSB

– ОМ по НБП и ОМ по ВБП. Однако, даже в случае работы на передачу с подавленной несущей частотой, а также отсутствия сведений у постороннего наблюдателя о частотном разносе НБП и ВБП ($F_н$, $F_в$), данный алгоритм доведения КУ также не будет обладать информационной скрытностью.

Существуют и другие способы доведения КУ до автономных систем в условиях помех. Так, еще в 1965 году телекоммуникационная компания «Radio Corporation of America» (функционировала с 1919 по 1989 гг.) опубликовала результаты натурного эксперимента по использованию узкополосных сигналов в диапазоне ДКМВ на односкачковой радиотрассе с исходными данными:

– мощность излучения РПДУ $P_{изл} \approx 0{,}1$ Вт;
– частота излучения $f_{изл} \approx 15$ МГц;
– длительность единичного бита $\tau_{бит} \approx 20$ с;
– ширина полосового фильтра радиоприемного устройства (РПУ) 17 Гц.

Эксперимент был признан неудачным, поскольку низкая стабильность задающих генераторов РПДУ и РПУ повлияла на то, что в полной мере реализацию процесса «накопления» сигнала так и не удалось реализовать. Однако важно при этом отметить, что рабочая группа экспериментаторов озвучила обнадеживающие выводы о том, что данная технология на 40 дБ улучшает соотношение сигнал/шум по сравнению со штатным для РЛ режимом работы – АТ.

Хотя на тот момент такой метод медленнодействующей связи так и не был востребован из-за невозможности реализации на элементной базе того времени сложной обработки сверхузкополосных сигналов и все возрастающих требований к оперативности информационного обмена, уже через несколько десятилетий, в 90-е годы прошлого века, данный режим массово стал внедряться в радиолюбительской среде. На сегодня можно отметить так называемую технологию QRSS (режим сверхмедленного телеграфа с расширением Q-кода (QRS), предупреждающим корреспондента о снижении скорости передачи):

– мощность излучения РПДУ $P_{изл} \approx 10 \div 100$ мВт;
– диапазон частот излучения $f_{изл} \approx 10{,}138 \div 10{,}140$ МГц;
– длительность единичного бита $\tau_{бит} \approx 10$ с.

Рассмотрим данный метод передачи сверхузкополосных сигналов в контексте трансляции многочастотных сигналов на основе современных когнитивных радиосистем и SDR-технологий.

3. Предложения по формированию сигнально-кодовых конструкций команд управления БТС, обладающих информационной скрытностью

В работе предложен алгоритм формирования СКК, с использованием многочастотного сигнала, передаваемого по параллельным каналам в режимах ЧТ и АТ. Процесс синтеза кода многочастотного сигнала с представлением схемной реализации сумматора кода частот и устройства формирования многочастотных сигналов команд управления БТС в условиях помех подробно представлен в работе авторов [13], где описаны два основных этапа алгоритма:

– этап формирования Комплекта совместимых рабочих частот (КСРЧ), осуществляемый заблаговременно в результате интеллектуального мо-

ниторинга состояния среды РРВ и выбора свободных частотных полос РЧС с помощью технологий когнитивных радиосистем;

– этап формирования многочастотного сигнала на основе КСРЧ, транслируемого в параллельном режиме, таким образом, что за время передачи одного бита до БТС осуществляется доведение всей команды управления в режиме реального времени.

Причем основным методом работы командной РЛ является режим закрепления рабочих частот за информационными битами ФС по псевдослучайному закону (ППРЧ). Метод работы радиолиний в режиме ППРЧ относится к технологии расширения спектра (FHSS) и традиционно осуществляет перестройку рабочих частот по псевдослучайной последовательности (ПСП), используемой только абонентами одной радиолинии. Однако в предложенном алгоритме смена рабочих частот не осуществляется последовательно. Изначально происходит подбор Комплекта совместимых рабочих частот (КСРЧ) на доступных от сосредоточенных помех участках РЧС и далее вся команда управления транслируется в параллельном формате одномоментно. Такой режим ППРЧ с параллельным излучением всех элементов многочастотного сигнала [13], что приведено на рис. 3, значительно повышает эффективность доведения команд управления до удаленных объектов (БТС) в части оперативности, фактически доводя этот процесс до значений реального времени, что крайне необходимо в случаях аварийных ситуаций на маршруте движения.

Своеобразным драйвером появления такой технология стали достижения в развитии когнитивных радиосистем (CRS), а также SDR-радиоустройств. Причем выделение отдельных элементов (информационных бит) КУ и их динамическое распределение на незанятых первичными пользователями участках РЧС [13] позволяет легко интегрировать каналы управления БТС без создания взаимных помех в заблаговременно распределенном диапазон частот.

Рассмотрим вариант доведения КУ до удаленного объекта (БТС) для режима ЧТ, рис. 4.

Пусть КУ задана следующей информационной последовательностью в виде байта (01101101). При использовании режима однополосной модуляции с подавленной несущей частоты f_0 (SSB-SC) частотный разнос для нижней и верхней боковых полос составляет, соответственно, $F_н$ и $F_в$. При этом несущие частоты для передачи бит КУ распределены по псевдослучайной последовательности, известной только передающей и приемной сторонам. Тогда нулевые информационные биты (1-й, 4-й, 7-й) будут передаваться по нижней боковой полосе несущих частот f_{01}, f_{04}, f_{07}, а единичные биты (2-й, 3-й, 5-й, 6-й, 8-й) – по верхней боковой полосе несущих частот f_{02}, f_{03}, f_{05}, f_{06}, f_{08}, как показано на рис. 4 *а*).

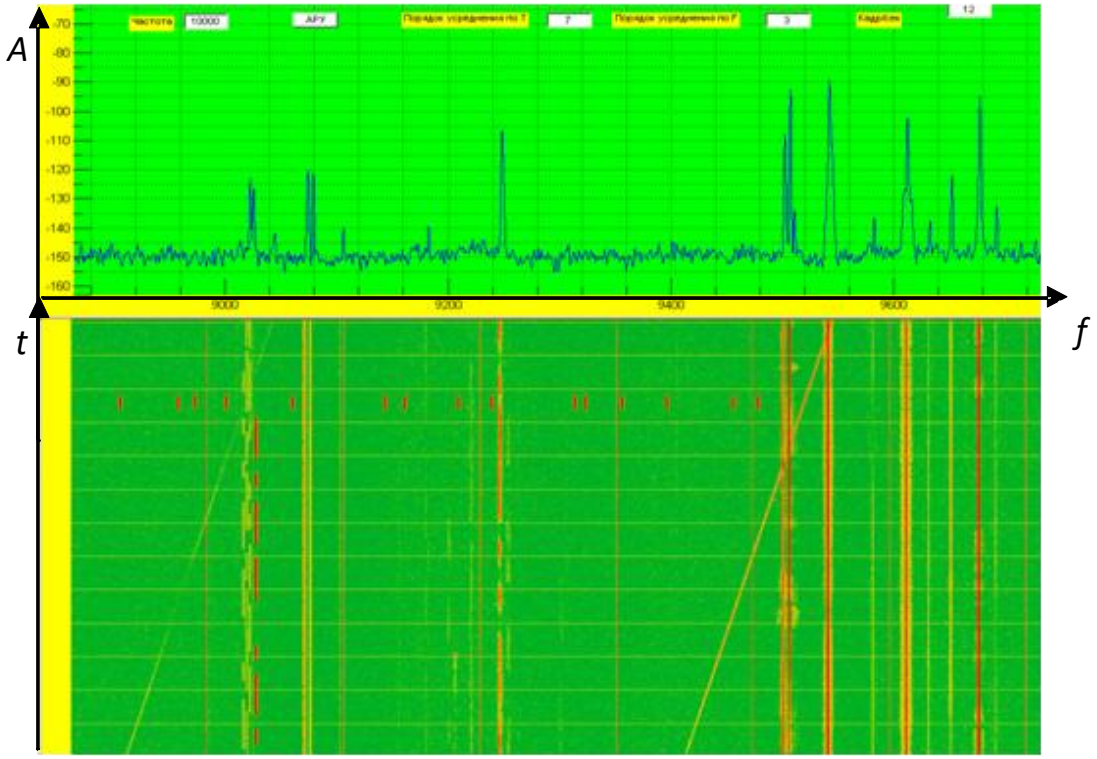


Рис. 3. Фрагмент спектрограммы типа «Водопад» с представлением КУ БТС в виде многочастотного сигнала с параллельной передачей информационных бит в режиме ППРЧ

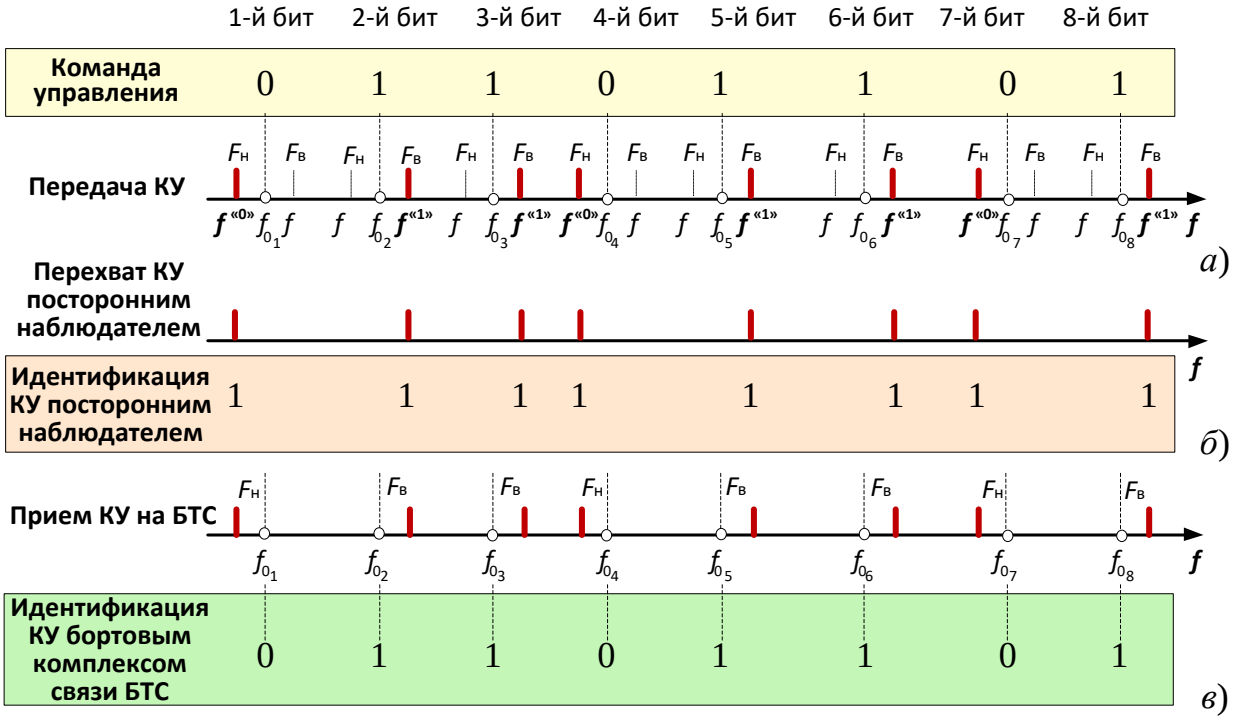


Рис. 4. Диаграммы доведения КУ до БТС в виде многочастотного сигнала в режиме ЧТ

При попытке перехвата посторонним наблюдателем канала управления БТС на его радиоприемном устройстве будут отображаться только наличие сигналов (бит), (11111111), без их семантической идентификации («0» или «1»),

рис. 4 *б*), поскольку постороннему наблюдателю не известны частотные позиции несущих и их распределение по ПСП в командной радиолинии БТС. Очевидно, что энергетической скрытности добиться в этом случае нельзя, поскольку все, что есть в радиоэфире – это уже не скрытно [11]. Но данный режим передачи обеспечивает *полную информационную скрытность* радиолинии за счет того, что полезный сигнал не имеет какой-либо иной специальной структуры, несущей идентификационные признаки. В тоже время, на приемной стороне (в бортовом комплексе связи БТС) команда управления будет идентифицирована, поскольку бортовое РПУ настроено на действующую в командной радиолинии ПСП, при этом известен частотный разнос НБП и ВБП, а также закрепление информационных бит за ними, рис. 4 *в*).

На рис. 5 продемонстрированы диаграммы процесса доведения КУ до БТС в режиме АТ.

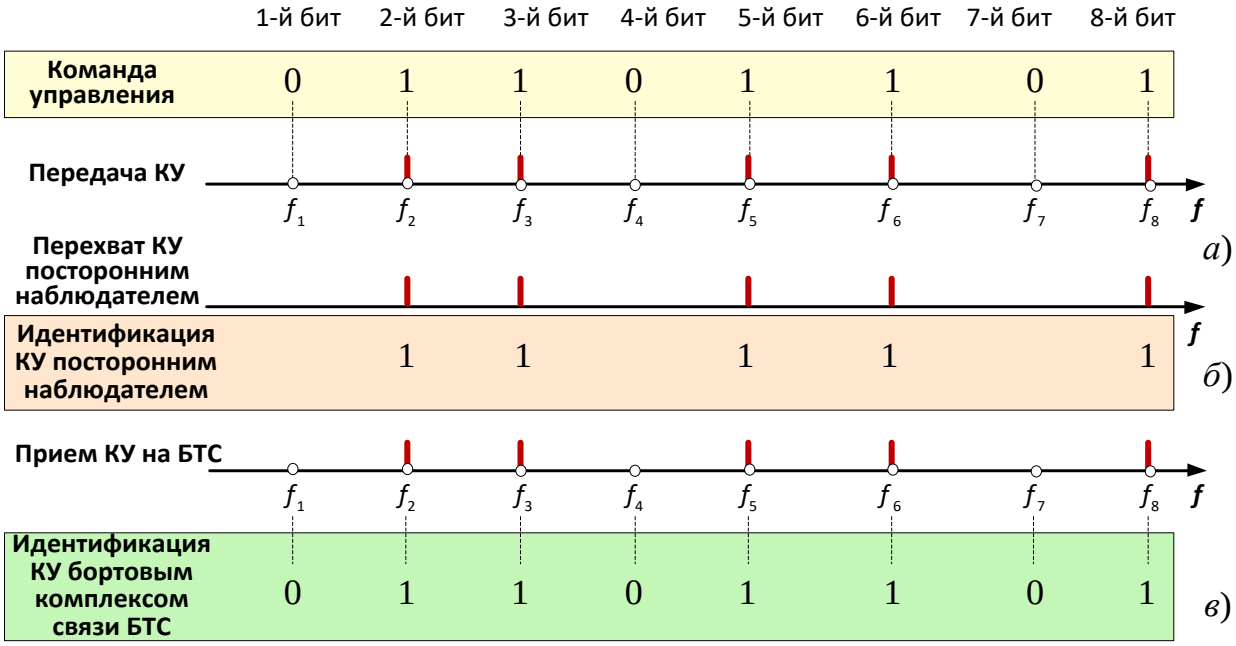


Рис. 5. Диаграммы доведения команды управления до БТС в режиме АТ

Пусть КУ задана такой же, как и в предыдущем примере информационной последовательностью в виде байта (01101101). При этом режим амплитудной телеграфии предполагает передачу бит информации с различной амплитудой. Используем для нашего случая граничные условия: передача информационной единицы «1» – на активной частоте, передача информационного нуля «0» – на пассивной частоте (амплитуда сигнала равна нулю), рис. 5 *а*). Распределение рабочих частот, так же, как и в режиме АТ для несущих частот осуществляется по псевдослучайному закону, известному на передающей и приемной сторонах командной радиолинии. В этом случае перехват КУ в радиолинии ни к чему не приведет, поскольку он сможет идентифицировать только единичные элементы (биты) сообщения (11111). А нулевые биты в радиоэфире отсутствуют, рис. 5 *б*). В тоже время, на приемной стороне (в БКС БТС) команда управления будет идентифицирована, поскольку известны все частотные позиции ПСП с рабочими частотами f_i, и если на каких-то частотных позициях РПУ БКС

сигнал не принят – это означает, что на данной рабочей частоте передавался нулевой информационный бит, рис. 5 *в*). Таким образом и данный режим передачи обеспечивает *полную информационную скрытность* командной РЛ.

4. Вычислительный эксперимент по приему многочастотного сигнала

На рис. 6 *а*) показаны варианты формирования многочастотного сигнала КУ длиной в 400 бит в режиме ЧТ, полученной в ходе эксперимента с имитационным моделированием, когда информационная единица «1» передается по верхней боковой, а информационный нуль «0» – по нижней боковой полосе.

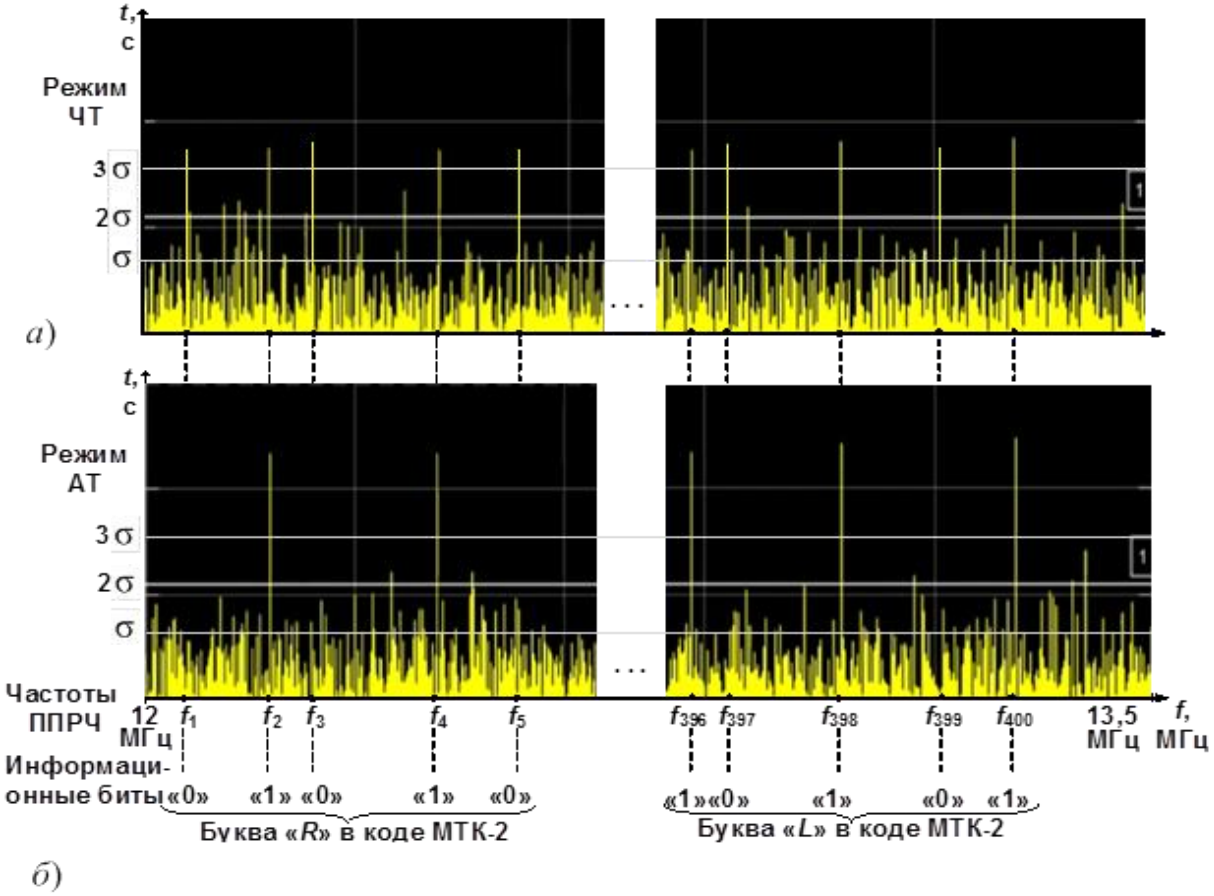


Рис. 6. Вариант формирования сигналов КУ в режимах: *а*) ЧТ; *б*) АТ

В данном случае постороннему наблюдателю (злоумышленнику) без истинного знания значения несущей частоты каждой из 400 частотных позиций невозможно определить информационный смысл переданной КУ. На спектрограмме все переданные информационные биты рассматриваются как активные частоты (как ложные «информационные единицы»). Несмотря на то, что на частоте f_1, f_3, f_5, …, f_{397} и f_{399} передаются информационные нули «0». Т. е., сам факт передачи команды управления посторонним наблюдателем будет зафиксирован, однако семантика сообщения (01010….10101) не будет расшифрована без знания несущих частот и частотного разноса режима ОМ.

На рис. 6 *б*) показаны фрагменты спектрограммы формирования многочастотного сигнала команды управления длиной в 400 бит в режиме АТ, когда

информационная единица «1» передается на активной частоте, а информационный нуль «0» – на пассивной (частота не активируется), как показано на рисунке при передаче информационной последовательности 01010….10101 КУ в виде букв «*R*» … «*L*» в коде МТК-2. В данном случае также факт передачи команды управления злоумышленником фиксируется, а смысл сообщения – нет. Без знания актуальной для командной РЛ псевдослучайной последовательности задействованных в КУ рабочих частот, определить на каких частотах передаются информационные нули, не представляется возможности. Следовательно, команда управления не будет распознана. Тем самым может быть обеспечена полная информационная скрытность доведения КУ до БТС в условиях попыток несанкционированного доступа к ней на маршруте движения, или в ходе выполнения миссии.

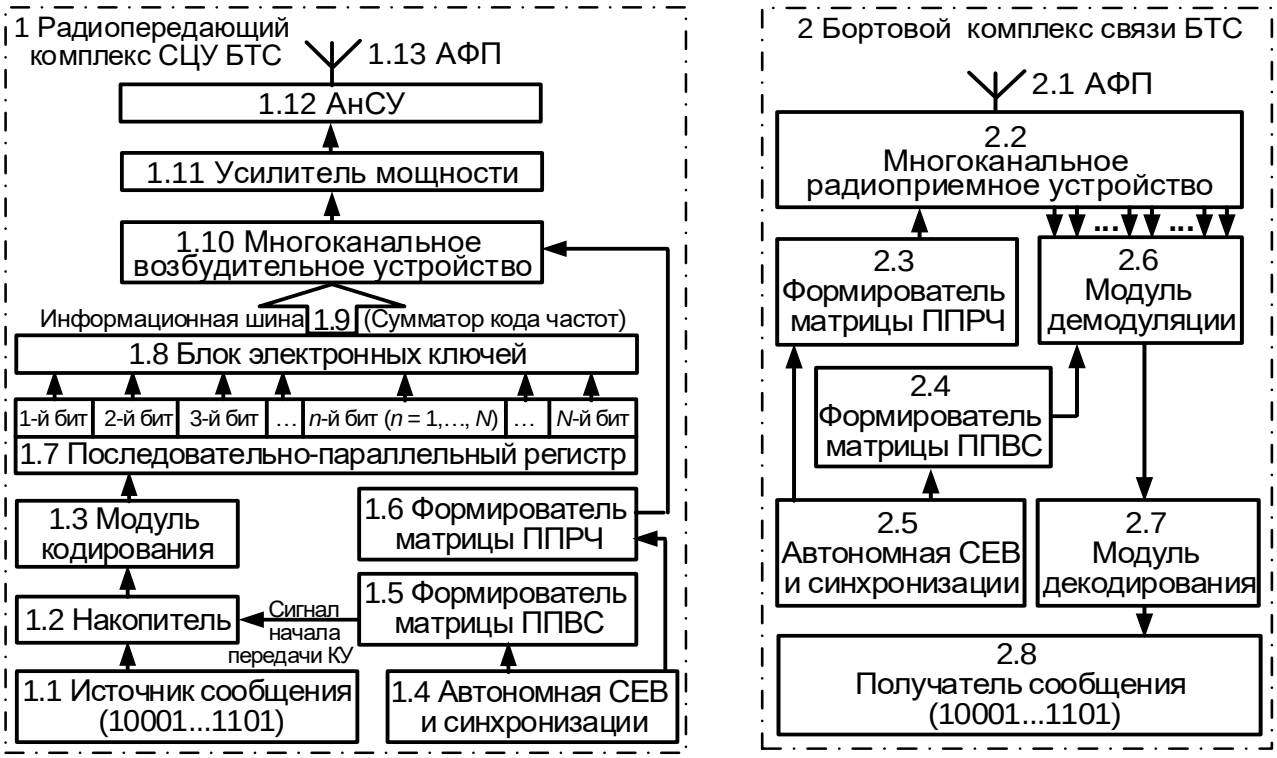
5. Схемная реализация командной радиолинии, обеспечивающая информационную скрытность доведения команд управления до БТС

Обоснованное в п. 2 значение длительности передачи информационного бита КУ $\tau_{бит} \approx 10$ с. для многочастотного режима излучения узкополосных сигналов способно не только повысить помехоустойчивость, но и обеспечивает защиту сигнала от быстрых замираний в ионосфере. Такая длительность в передаче бита позволяет значительно ослабить требования к системам синхронизации и системам единого времени на передающем радиоцентре СЦУ и в бортовом радиоприемнике БТС тракта управления в случае работы в режиме ППРЧ. Добавляя в алгоритм доведения КУ еще и режим изменения по псевдослучайному закону времени начала сеанса связи (ППВС), дополнительно возможно добиться скрытность в доведении КУ [14].

Учитывая это, на рис. 7 показаны варианты функциональных схем элементов командной РЛ, включая РПДУ СЦУ и бортовой комплекс связи БКС.

При этом функциональная схема радиопередающего комплекса СЦУ, показанная на рис. 7 *а*) выполнена на основе функциональной схемы формирователя многочастотных сигналов, приведенной в [13], а структурная схема модуля демодуляции (2.6) для приема одного бита КУ исполнена в виде энергетического обнаружителя [11], рис. 8.

Наиболее сложной из задач реализации командной радиолинии БТС является построение алгоритма способа приёма многочастотного сигнала и демодуляции его отдельных элементов (бит) при изменении частоты в точке приёма с учетом эффекта Доплера. Возможным подходом к решению данной задачи может быть применение банка узкополосных фильтров, используемых в современных системах цифровой обработки сигналов [15]. Тогда для каждого информационного бита КУ на заданной частоте осуществляется настройка узкополосного фильтра в канале приёма.



а) *б*)

Рис. 7. Функциональные схемы элементов командной РЛ:
а) радиопередающего комплекса СЦУ БТС; *б*) бортового комплекса связи БТС

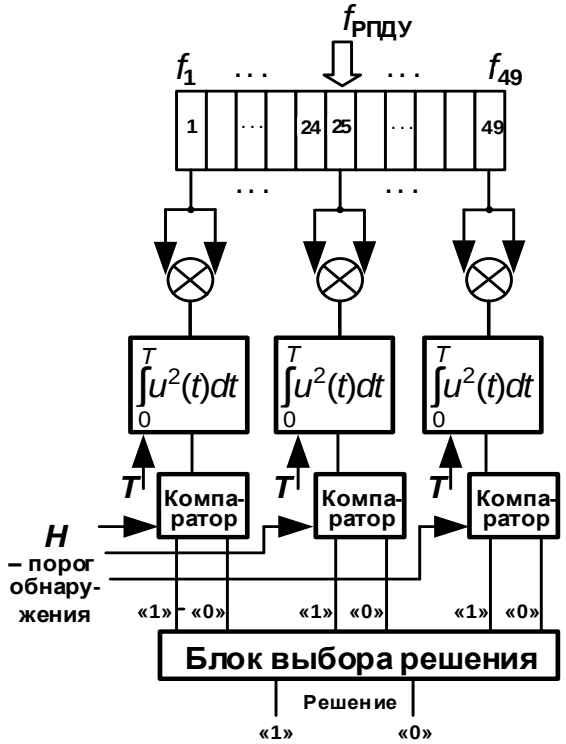


Рис. 8. Структурная схема модуля демодуляции для приема одного бита КУ в виде энергетического обнаружителя [11]

Такой подход к построению схемы учета эффекта Доплера в динамически меняющихся ионосферных слоях с параметрами (1) фактически соответствует

построению энергетического обнаружителя сигнала на выходе каждого канального фильтра, как показано на рис. 8, [11]:

$$\Delta f_{\text{Доплер}}^{\max} \approx \pm 5 \text{ Гц при } \Delta f_i \approx 0{,}2 \text{ Гц}. \quad (1)$$

Для эффективного функционирования схемы энергетического обнаружителя узкополосного сигнала [11] кроме исходных данных о времени начала и завершении сеанса связи необходимы значения оптимального порога обнаружения H, которое возможно получить из выражения для определения средней вероятности ошибки элемента сигнала при некогерентном приёме:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{2}\int_0^H \frac{2V_1}{W\nu^2}\exp\left(-\frac{V_1^2 - W^2}{W\nu^2}\right) I_0\left(\frac{2V_1}{\nu^2}\right) dV_1 + \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{H^2}{W\nu^2}\right), \quad (2)$$

где V_1 – величина напряжения огибающей сигнала с выхода фильтра на приеме.

Для расчета оптимальной величины порогового значения H минимизируем вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$ в выражении (2), путем приравнивания ее производной к нулю:

$$I_0\left(\frac{2H}{\nu^2}\right) = \exp\left(\frac{W}{\nu^2}\right). \quad (3)$$

Используя аппроксимацию функции Бесселя нулевого порядка:

$$I_0(z) \approx \frac{\exp(z)}{\sqrt{2\pi z}} \quad \text{при } z \geq 2 \quad (4)$$

имеем выражение зависимости значения порога H обнаружения сигнала на выходе фильтра от энергии информационного бита W:

$$\frac{2H}{\nu^2} - \ln\sqrt{2\pi\frac{2H}{\nu^2}} = \frac{W}{\nu^2}. \quad (5)$$

В конечном итоге расчеты сводятся к тому, что для значений $W/\nu^2 > 15$ дБ величина порога будет составлять $H \approx W/2$.

В тоже время, для решения обозначенной выше задачи наибольший смысл имеет условие $W/\nu^2 \leq 15$ дБ. В этом случае величину порога H будут определять спектральная плотность шума ν^2, а также мощность накопленного сигнала. В том случае, когда отсутствуют априорные данных по их величинам, ориентировочная установка значения порога обнаружения H может значительно ухудшить эффективность работы алгоритма приёма. Если принять во внимание факт того, что шумы считаются стационарными в полосе $\Delta f \approx 10$ Гц на протяжении 20 с., то величину ν^2 можно получить по предварительной их оценке за 10 секунд до начала времени сеанса связи. Рассчитать энергию W информационного бита многочастотного сигнала также возможно, зная величину мощности излучения РПДУ и состояния среды РРВ командной РЛ. При этом необходимо признать, что увеличение числа каналов параллельного доведения бит КУ (например, на рис. 8 их показано 49) вероятность ошибочного решения будет расти с уменьшением значения отношения W/ν^2. Альтернативой здесь может служить вариант определения значений дисперсии шума и среднеквадратического отклонения σ по ансамблю из 49 выборок, которые получены перед началом сеанса связи.

Учитывая вышеизложенное, на рис. 6 показано использование трех порогов *H*: σ, 2σ и 3σ [16]. Величины данных порогов предоставляют дополнительные исходные данные декодеру РПУ для оценки вероятности принятия верного решения по принимаемым битам КУ, что способствует повышению помехоустойчивости приема.

Излишне не останавливаясь на других возможных алгоритмах демодуляции, можно констатировать, что процесс «накопления» узкополосного сигнала при проведении вычислительного эксперимента выглядит равномерным, что продемонстрировано на рис. 9.

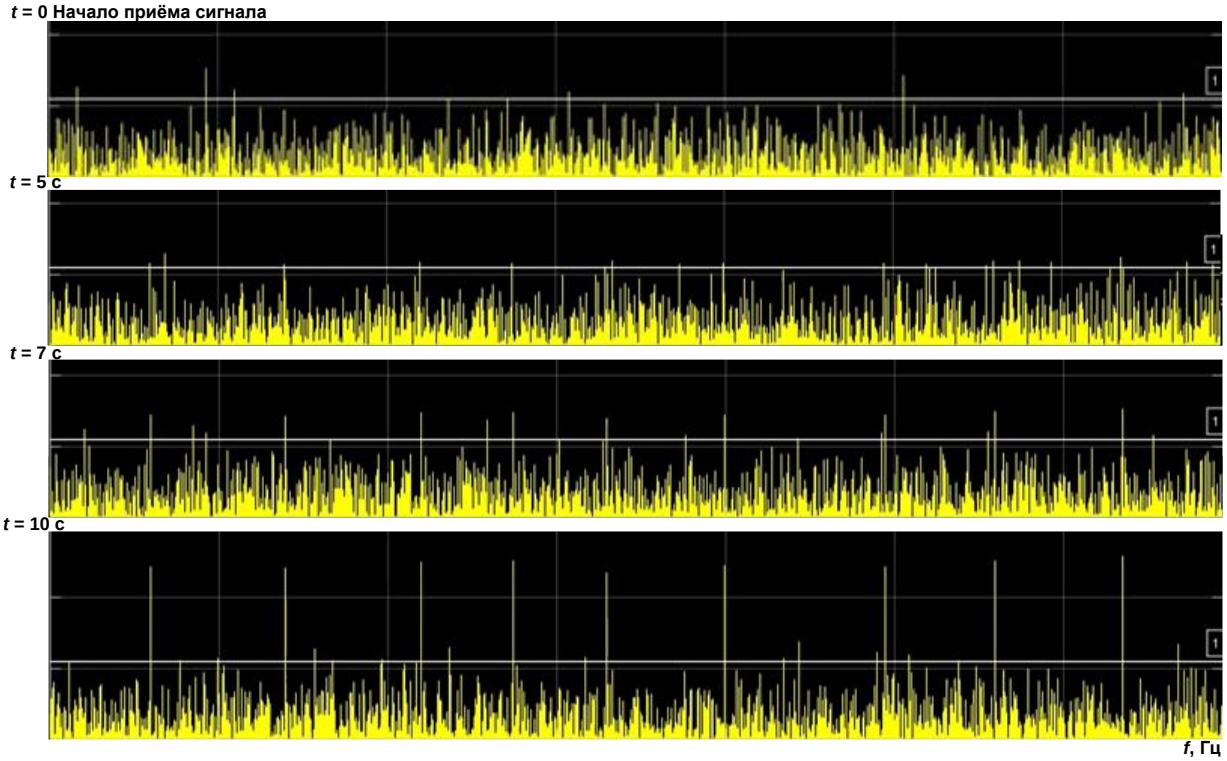


Рис. 7. Временные диаграммы спектрограмм приема бинарных посылок элементов КУ в многочастотном сигнале в ходе вычислительного эксперимента

Таким образом, наличие сигнала в каждом канале будет определяться по возрастанию градиента напряжения огибающей на выходах из каждого канального фильтра. Недостатком предложенного алгоритма является потребность в существенных вычислительных ресурсах на борту БТС.

Выводы

Проведенные исследования показали, что предлагаемый подход к созданию тракта доведения КУ до глобально перемещающихся БТС и других автономных систем, обеспечивающих параллельную передачу и прием многочастотных сигналов хотя и требует использования многоканальных РПУ (от 1000 и более (в зависимости от объема КУ) независимых каналов, что сегодня достигается применением SDR-технологий), но имеет существенные преимущества в части обеспечения информационной скрытности:

– параллельная передача сверхузкополосных сигналов, предлагаемой в статье СКК, обладает полной информационной скрытностью;
– для функционирования программно-аппаратного комплекса управления и связи БТС (РТС) не требуется использование высокоточных источников синхронизации (типа системы единого времени, ГЛОНАСС, LORAN и пр.) при использовании режимов передачи с перестройкой рабочих частот (ППРЧ) и времени начала сеанса связи (ППВС) по псевдослучайному закону, поскольку время трансляции бита (и всего сообщения) в течение 10 секунд может регистрироваться любым хронометром;
– в отличие от существующих командных радиолиний БТС и РТС при постановке прицельных преднамеренных помех, предлагаемый способ обеспечивает повышение вероятности приема команд управления за счет перераспределения энергии помехи на частотную позицию передаваемого сигнала, что повышает общую энергетику бита, обеспечивая эффективную работу энергетического обнаружителя радиоприемного устройства и улучшая приём.

Таким образом, предложенный подход к созданию командной радиолинии обеспечивает полную информационную скрытность доведения команды управления до БТС, а также повышение, как это ни странно, помехоустойчивости в условиях постановки прицельной (сосредоточенной) помехи.

Литература

1. Макаренко С. И., Козлов К. В. Автоматизированная система управления совместными действиями морских робототехнических комплексов, безэкипажных судов и катеров // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 1. С. 1-34. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-001-034.

2. Козлов К. В., Макаренко С. И., Милов В. Р., Скрипник И. В. Концепция создания автоматизированных систем управления видовых воинских формирований беспилотных систем из состава межвидовой группировки разнородных сил // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 1-49. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-001-049.

3. Тельный А. В., Монахов М. Ю. Имитационная модель движения беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 4. С. 115-142. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-115-142.

4. 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.

5. В России активно развиваются беспилотные технологии в сфере транспорта. [Электронный ресурс]. 2026. – URL: https://mintrans.gov.ru/presscenter/news/12387 (дата обращения: 04.05.2026).

6. 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 04.05.2026).

7. Будко Н. П., Будко П. А., Клюшин М. А., Шаталов А. Е. Способ доведения управляющей и телеметрической информации в интересах робототехнических платформ различных типов базирования // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 3. С. 294-322. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-294-322.

8. Будко Д. Д., Будко П. А., Клименко А. Д., Рыжкова Д. Н. Модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 74-83. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-74-83.

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

10. История отечественных средств связи / Под ред. А. С. Якунина. – М.: ЗАО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 576 с.

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

12. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам (ДПАС). [Электронный ресурс]. 2015. – URL: http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/10019_cons_ru.pdf (дата обращения 04.05.2026).

13. 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.

14. Жуков Г. А., Будко П. А. Широкополосные и узкополосные сигналы в радиолиниях декаметрового диапазона волн // Морская радиоэлектроника. 2020. № 2 (72). С 32-37.

15. Каплун Д. И., Клионский Д. М., Олейник А. Л., Вознесенский А. С., Жукова Н. А., Гульванский В. В., Петровский А. А. Применение полифазных банков фильтров в задачах мониторинга широкого частотного диапазона // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 3. С. 38-43.

16. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для ВТУЗов. Том 2. Москва: Наука, 1985. 549 с.

References

1. Makarenko S. I., Kozlov K. V. Automated control system for joint actions of marine robotic complexes and unmanned vessels. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 1, pp. 1-34 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-001-034.

2. Kozlov K. V., Makarenko S. I., Milov V. R., Skripnik I. V. Concept of creating automated control systems for military units of unmanned and robotic systems in a heterogeneous forces group. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 1-49 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-001-049.

3. Telny A. V., Monakhov M. Yu. Simulation model of the movement of an unmanned aerial vehicle of the quadcopter type. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 4, pp. 115-142 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-115-142.

4. Budko D. D., Budko P. A., Zatsepin 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. 143-178 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-143-178.

5. 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 04.05.2026) (in Russian).

6. 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 04.05.2026) (in Russian).

7. Budko N. P., Budko P. A., Klyushin M. A., Shatalov A. E. A method of delivering control and telemetry information in the interests of various types of robotic platforms. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 3, pp. 294-322 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916- 2025-3-294-322.

8. Budko D. D., Budko P. A., Klimenko A. D., Ryzhkova D. N. A frequency band selection model for the formation of decameter 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.

9. 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).

10. *Istoriya otechestvennykh sredstv svyazi* [History of Domestic Means of Communication]. Edited by A. S. Yakunin. Moscow, *Publishing House Stolichnaya Entsiklopediya*, 2013, 576 p. (in Russian).

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

12. *Rukovodstvo po distancionno pilotiruemym aviacionnym sistemam* (*DPAS*) [Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (DPAS)]. 2015. Available at: http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/10019_cons_ru.pdf (accessed 04.05.2026) (in Russian).

13. 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/

14. Zhukov G. A., Budko P. A. Broadband and narrowband signals in the links of waves of decameter range. *Marine Radio Electronics*, 2020, no. 2 (72), pp. 32-37 (in Russian).

15. Kaplun D. I., Klionsky D. M., Oleinik A. L., Voznesensky A. S., Zhukova N. A., Gulvansky V. V., Petrovsky A. A. Application of polyphase filter banks in wide frequency range monitoring tasks. *News of Russian universities. Radio electronics*, 2013, no. 3, pp. 38-43 (in Russian).

16. Piskunov N. S. *Differential`noe i integral`noe ischisleniya dlya VTUzov* [Differential and integral calculus for higher education institutions]. Vol. 2. Moscow, Nauka Publ., 1985, 549 p. (in Russian).

Статья поступила 06 мая 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.

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

Будко Павел Александрович – доктор технических наук, профессор. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: budkopa@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

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, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5, корп. 7.

Клименко Андрей Дмитриевич – адъюнкт. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы управления беспилотными транспортными системами. E-mail: klimenko-andrew@mail.ru.

Адрес: 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

Ensuring information secrecy when bringing control commands to unmanned transport systems

D. D. Budko, P. A. Budko, V. V. Karetnikov, A. D. Klimenko

Task statement: *development of signal-code structures and algorithms for their application that have the ability to provide information secrecy on channels and control paths for globally moving objects, such as unmanned transport systems, robotic complexes and platforms, as well as other autonomous systems. At the same time, such globally moving autonomous objects are considered by the Russian Ministry of Transport and its federal agencies Rosmorrechflot, Rosaviation, Roszheldor and Rosavtodor as objects of critical information infrastructure that require protection and measures to prevent unauthorized access to their management and to the data they transmit and receive.* ***The purpose of the work:*** *to ensure information secrecy of control signals of autonomous systems on the network of highways and railways, inland waterways of Russia and in marine areas.* ***Methods used:*** *technologies of spectrum expansion by direct sequence method, spectrum expansion by linear frequency modulation method, as well as the mode of tuning operating frequencies according to a pseudorandom law, technologies of cognitive radio systems and software-defined radio, methods of single-band modulation, amplitude and frequency telegraphy, algorithms for the functioning of an energy detector.* ***The main results*** *of the study include the proposed approach to the implementation of a new class of radio line in the decameter wavelength range, using the transmission of messages by the method of parallel bitwise emission of ultra-narrowband signals. At the same time, the active frequencies are assigned to the information units "1" of the control commands, and the passive, non–radiated frequencies are assigned to the information zeros.* ***The practical significance*** *of the proposed results consists in considering these types of signal-code structures from the standpoint of information secrecy. Without knowing the pseudorandom sequence of operating frequencies involved in the message, which is relevant for the radio link, it is not possible to determine on which passive frequencies the information zeros "0" are transmitted. Therefore, the control command will not be recognized by an outside observer. This can ensure complete information secrecy of its transmission to an autonomous system in the face of attempts to gain unauthorized access to it along the route.*

Keywords: *amplitude telegraphy, unmanned transport system, decameter wave range, information stealth, signal-code design, frequency telegraphy.*

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

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

Pavel Alexandrovich Budko – Doctor of Technical Sciences, Professor. Information Telecommunication Technologies Public Joint Stock Company. Research interests: resource management of information and telecommunication systems. E-mail: budkopa@inteltech.ru

Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya St., 8.

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.

Andrei Dmitrievic Klimenko – Postgraduate. Military Academy of Communication named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: methods of managing unmanned transport systems. E-mail: klimenko-andrew@mail.ru.

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretskiy prospect, build. 3.