

УДК 621.39

## Метод управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех

Будко Д. Д., Будко П. А., Зацепин Т. А., Клименко А. Д.

**Постановка задачи:** применение беспилотных транспортных систем в настоящее время широко вошло в обиход всех сфер деятельности человека в космосе, на земле, в воздушном, надводном и подводном пространствах. Однако, применение таких систем на глобальных расстояниях, в городе и в черте крупных промышленных центров сопряжено с применением на их трактах управления беспроводных технологий на основе радиоканалов различных диапазонов волн, которые, в свою очередь, подвержены деструктивному воздействию различного рода дестабилизирующих факторов в виде помех, шумов и др. В статье ставится задача на разработку метода управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех. **Цель работы:** обеспечение помехоустойчивости каналов и трактов управления беспилотными транспортными системами в условиях сосредоточенных и шумовых помех за счет таких **используемых методов**, как расширение спектра с изменением рабочей частоты по псевдослучайному закону, расширения спектра методом прямой последовательности и расширения спектра методом линейной частотной модуляции. Также к методам, используемым в исследовании можно отнести методы цифровой фильтрации, идентификацию команд управления методами экстраполяции и нейрообработки. К основным **результатам исследования** можно отнести повышение помехоустойчивости сигналов трактов управления беспилотных транспортных систем в условиях их использования в крупных городских и промышленных агломерациях (заводы, порты, логистические центры, транспортные хабы и др.). Дополнительными эффектами предложенного в работе метода могут быть рассмотрены вопросы обеспечения энергетической скрытности и информационной безопасности сигналов управления в интересах транспортной отрасли страны, как критически важной инфраструктуры, а также автоматизации процесса идентификации принятых команд управления средствами согласованной фильтрации и цифровой обработки сигналов. **Новизна** работы состоит в совокупности существенных признаков при формировании каналов управления беспилотной транспортной системой по азимуту (курсу), по направлению (скорости) движения и по углу места (тангажу) на основе многочастотных дискретных сигнально-кодовых конструкций, состоящих из  $n$  чипов с постоянным дискретно повышающим или дискретно понижающим изменением частоты на заданных интервалах времени, соответствующих бинарным посылкам и передаваемым в режиме изменения рабочей частоты по псевдослучайному закону, а принимаемых путем преобразования в исходную частотную форму с использованием обратного псевдослучайного кода. **Практической значимостью** метода является повышение помехоустойчивости тракта управления беспилотных транспортных систем, а также робототехнических комплексов или робототехнических платформ различного типа базирования в условиях сосредоточенных по спектру случайных и преднамеренных помех, а также промышленных шумов и помех.

### Библиографическая ссылка на статью:

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. 143-178. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-143-178

### Reference for citation:

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

*Ключевые слова:* беспилотные транспортные системы, канал траекторного наведения, линейный частотно-модулированный сигнал, расширение спектра скачками частоты, робототехнический комплекс, тракт управления, сигнально-кодовая конструкция.

## Актуальность

В последние десятилетия в обиход человеческой деятельности прочно вошли роботы самого широкого применения от медицинского назначения, до обеспечения грузоперевозок и выполнения специальных миссий. Впервые эру роботов, как глобально перемещающихся объектов (ГПО), открыла космическая отрасль, запуском первого в мире искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года. На сегодня особую роль и важное значение в мире имеют промышленные робототехнические комплексы (РТК) и робототехнические платформы (РТП) в транспортной отрасли, военной сфере, сфере услуг, сельском хозяйстве и др. Так, к беспилотным транспортным системам (БТС) на основе РТП можно отнести: безэкипажные морские суда и буксиры; автономные необитаемые подводные аппараты и речные трамваи; беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного, квадрокоптерного и смешанного типов; беспилотный городской, междугородний наземный и железнодорожный транспорт, рис. 1.

Так, на сегодня только в Китае сервис беспилотных такси Waymo на базе технологий беспилотных автомобилей составляет 200 тыс. поездок в неделю. В нашей стране Министерство транспорта Российской Федерации уже начало тестирование первого в России беспилотного метропоезда на современном составе серии «Москва». Полноценные пассажироперевозки на беспилотных метропоездах планируется начать в Москве уже в конце следующего года. В этом году впервые на дорогах России беспилотный грузовик прошел маршрут в 400 км без вмешательства оператора, полностью в автономном режиме.

Не вдаваясь в подробности развития и применения робототехники человечеством на современном этапе [1], отметим, что внедрение роботов в различных сферах народного хозяйства сопряжено с рядом проблемных вопросов, начиная от законодательного уровня, до безопасности и частотного регулирования. Использование же БТС, РТК и РТП в городской черте или на больших (глобальных) расстояниях, в районах крупных промышленных и логистических центров или на автомобильных, железнодорожных, морских (речных) и воздушных трассах (путях) сопряжено с применением в качестве основных трактов управления беспроводных технологий на основе радиоканалов различных диапазонов волн. В то же время, используемая среда распространения радиоволн (РРВ), в свою очередь, подвержена деструктивному воздействию дестабилизирующих факторов (ДФ) в виде различного рода сосредоточенных по спектру и промышленных помех, а также шумов естественного и искусственного происхождения, вызванных всевозможными излучениями, импульсами, электромагнитной или электростатической индукцией и пр.

*Целью статьи* является разработка метода управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех

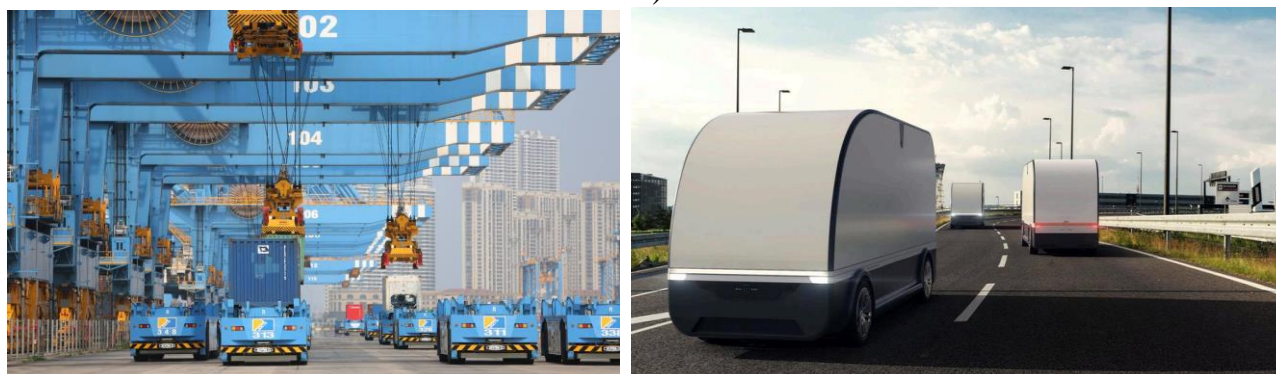




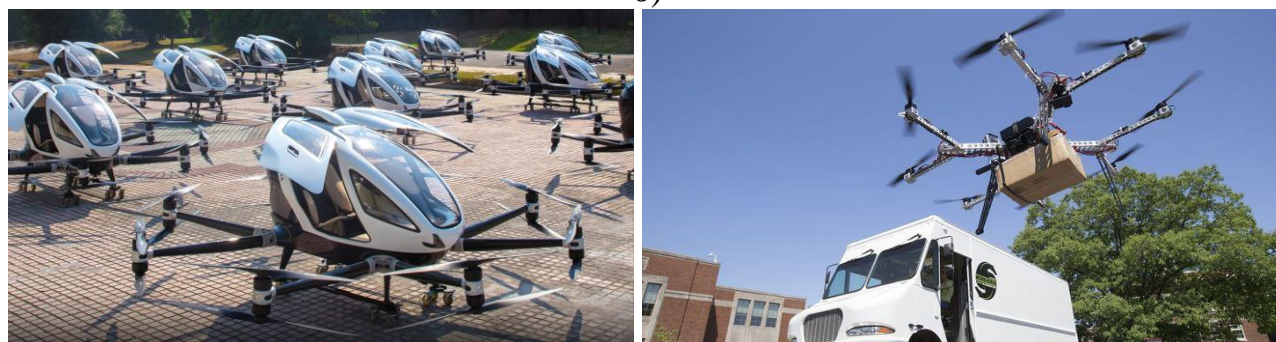
а)



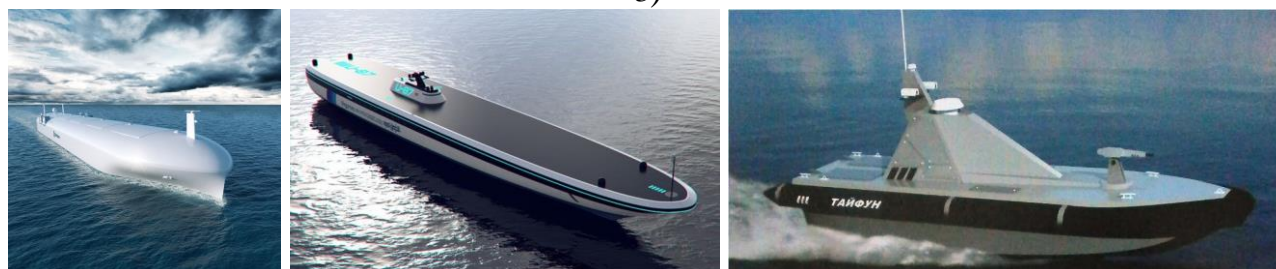
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Беспилотные транспортные системы различных типов базирования:  
а), б), в) наземного; г) воздушного; д) морского

## 1. Основные термины и обозначения

При анализе действующих на сегодня, а также перспективных способов построения помехоустойчивых СКК в каналах управления РТК, РТП и БТС, в работе использованы следующие обозначения, таблица 1, и термины, таблица 2.

Таблица 1 – Основные обозначения и их физический смысл

Обозначение	Физический смысл обозначения
$f_i^{00} (f_i^{11})$	Несущие колебания частот каждого $i$ -го частотного чипа, информационной бинарной посылки «0» или «1»
$\Delta f = f_i^{00(11)} - f_{i-1}^{00(11)} = f_{i+1}^{00(11)} - f_i^{00(11)}$	Шаг изменения частоты на заданных интервалах времени передачи частотных чипов бинарных посылок информационного нуля «0» и информационной единицы «1» команды управления
$T_{\text{бп}}^{00}, T_{\text{бп}}^{11}$	Интервалы времени (длительности бинарных посылок «0» и «1»)
$f_0$	Центральное значение несущей частоты
$f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$	Полоса частот действия ЛЧМ-сигнала
$f_{\text{max}}$	Максимальное значение частот радиосигнала
$f_{\text{min}}$	Минимальное значение частот радиосигнала
$\theta$	Градиент наклона ЛЧМ-сигнала (%) – это синус угла наклона траектории, домноженный на 100 %; величина погружения (подъема), тангажа <sup>2</sup>
$m$	Число повторов бинарных посылок команд управления
$T_{\text{бп}}$	Длительность бинарных посылок команд управления
$T_{\text{защ}}$	Величина защитного интервала бинарных посылок команд управления
$S_{\text{ЛЧМ}}^{00}(t)$	Линейно возрастающий закон изменения частоты
$S_{\text{ЛЧМ}}^{11}(t)$	Линейно убывающий закон изменения частоты
$S_0$	Амплитуда сигнала
$b$	Параметр, равный скорости изменения частоты во времени
$T_c$	Длительность сигнала
$\varphi_0$	Начальная фаза радиосигнала
$V$	Величина скорости движения БТС (РТК)
$\alpha$	Величина угла поворота по азимуту
$S$	Скважность следования бинарных посылок команд управления
$T$	Период следования бинарных посылок команд управления
$\tau$	Длительности бинарной посылки
$T_{\text{в}}$	Величина выигрыша в оперативности передачи команды управления для различных вариантов формирования сигнально-кодовой конструкции (с защитным интервалом внутри бинарных посылок $T_{\text{защ}}$ или без него)

<sup>2</sup> Тангаж летательного аппарата или морского судна (франц. tangage – килевая качка), угловое движение летательного аппарата (судна), при котором его продольная ось изменяет своё направление относительно горизонтальной плоскости. Применяется в двух значениях: как собственно отклонение (характеризуется углом тангажа) и как движение летательного аппарата (судна), когда изменяется угол тангажа (характеризуется скоростью тангажа).



Таблица 2 – Основной терминологический аппарат разрабатываемого метода

Терминологический аппарат	Характеристика, описание, физический смысл сущностей, процессов, объектов и субъектов разрабатываемого метода
Индустриальная помеха	Это электромагнитная помеха, создаваемая техническими средствами (электрическими машинами, приборами или другими электронными устройствами). Индустриальные помехи классифицируются по различным признакам: по источникам; по спектру; по времени воздействия; по методам подавления
Код Морзе	Способ кодирования бинарных посылок при помощи длинных и коротких сигналов в виде так называемых «точек» и «тире». Единицей времени при кодировании букв алфавита, цифр, знаков и других символов принимают длительность одной «точки». Длительность одного «тире» равна трём «точкам», пауза между знаками в букве – одна «точка», между буквами в слове – три «точки», между словами – семь «точек»
КОИ-8	Код Обмена Информацией, 8 бит (КОИ8) – восьмибитовая кодовая страница, совместимая с международным кодом ASCII. Разработана для кодирования букв кириллических алфавитов
МТК-2	Международный Телеграфный Код № 2 – пятиэлементный код по ГОСТ 15607, разработанный на основе стандарта ITA2 Международного консультативного комитета по телеграфии и обратно совместимый с ним. Содержит 86 символов: 26 букв латинского алфавита, 31 букву русского алфавита (Ё и Ъ не используются), 10 цифр, 11 орфографических, пунктуационных и математических знаков, а также 8 управляющих символов
CRS	<i>Cognitive Radio System</i> (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
SDR	<i>Software Define Radio</i> (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
Тракт управления	Включает каналы командной информации и траекторного наведения
Канал командной информации	Радиоканал, используемый в интересах БТС для передачи командной информации в виде формализованных сообщений и данных для их управления, типа: номеров и координат маршрутов движения БТС (например, «Маршрут № 3» – М3); телеметрии в соответствии с данными цифровых карт местности (ЦКМ) обеспечивающей геоинформационной системы (ГИС) района выполнения миссии РТК; сценарных планов миссии (например, «СП-5») и пр.
Канал траекторного наведения	Радиоканал, используемый в предлагаемом методе для передачи корректирующих команд траекторного наведения для БТС и РТК: по изменению скорости и направления движения «Вперед» – «Назад», по изменению азимута (крена) движения «Влево» – «Вправо», по изменению угла места (тангажа подъёма – спуска, погружения) «Вверх» – «Вниз»

## 2. Существующие подходы к формированию каналов управления в интересах беспилотных транспортных систем

В основу предлагаемого в данном исследовании метода управления БТС на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех положены способы построения СКК на основе ЛЧМ и ДЛЧМ-сигналов, относящиеся к технологиям расширения спектра [2]. Данные способы позволяют повысить эффективность доведения сигналов управления до ГПО за счет увеличения базы сигнала. В использующих данную технологию системах для реализации этой цели применяются три метода:

- изменение рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ – псевдослучайная перестройка рабочей частоты, англ. frequency-hopping spread spectrum, FHSS). Существо данного метода заключается в периодическом скачкообразном изменении несущей (рабочей) частоты по известному лишь передатчику и приёмнику некоторому алгоритму. Преимущество метода состоит в простоте реализации, но при этом в качестве недостатка отмечается задержка в потоке данных при каждом скачке с частоты на частоту. Данный метод широко применяется в технологии Bluetooth. Сходные подходы с более редким изменением рабочих частот (Slow frequency hopping) предлагаются для GSM;
- расширение спектра методом прямой последовательности (ПРС, англ. direct sequence spread spectrum, DSSS). По своей эффективности данный метод превосходит режим ППРЧ, но более сложен в реализации. Сущность метода состоит в повышении тактовой частоты модуляции, при которой каждому символу передаваемого сообщения соответствует некоторая достаточно длинная псевдослучайная последовательность (ПСП). Метод используется в таких системах как CDMA и системах стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi);
- расширение спектра методом линейной частотной модуляции (ЛЧМ, англ. chirp spread spectrum, CSS). Суть данного метода состоит в перестройке несущей частоты по линейному закону. Он широко используется в радиолокации, при зондировании состояния ионосферы, а также в некоторых радиомодемах.

В ряде телекоммуникационных систем для снижения мощности побочных электромагнитных излучений, существенно влияющих на эффективность функционирования располагаемых в непосредственной близости нескольких БТС, а также для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) применяются сходные технологии. Примером таких технологий может служить технология Spread-spectrum clock generation (SSCG), когда в высокочастотных синхронных схемах частоты их тактовых генераторов постоянно изменяются в пределах 30-250 кГц (например, в SATA, DisplayPort).

Использованию ЛЧМ-сигналов в интересах управления РТК и РТП была подробно посвящена работа [2]. Дальнейшему же развитию данной технологии на основе ДЛЧМ-сигналов с целью повышения помехоустойчивости каналов

управления БТС посвящено настоящее исследование. При этом важно отметить, что широкое внедрение беспилотного транспорта в инфраструктурах городских агломераций, крупных промышленных районах и на основных транспортных магистралях страны, включая применение беспилотных систем т. н. «малой авиации» во всех сферах жизнедеятельности, а также безэкипажное судоходство на внутренних водных путях (ВВП) и в портах, существенно насыщает и без того загруженный радиочастотный спектр (РЧС) появляющимися в геометрической прогрессии новыми частотными назначениями. Все это негативно сказывается на обеспечении ЭМС и безопасности информации на каналах и в трактах управления объектами транспортной отрасли, как критически важной инфраструктуры (КВИ), поскольку высок риск перехвата каналов управления БТС на глобальном удалении от пунктов управления (ситуационных центров Минтранса России).

Рассмотрим некоторые из способов доведения управляющей информации до ГПО, которые с точки зрения авторов могут выступить аналогами и прототипом предлагаемого в работе метода.

Из [2-4] и др. известен способ ведения радиообмена с использованием приёма на слух азбуки Морзе, который уже более века безальтернативно применяется в декаметровом диапазоне волн (ДКМВ) для осуществления связи с глобально удаленными объектами морского, воздушного и наземного базирования. В настоящее время существует огромное количество различных типов транспондеров<sup>3</sup>, которые применяют в автоматическом режиме обмен бинарными посылками (БП) при помощи всё той же азбуки Морзе на основе длинных (так называемых «точек») и коротких («тире») сигналов. В данном случае единицей времени для кодирования знаков (цифр или букв алфавита) принимается длительность одной «точки», длина трёх «точек» приравнивается к длине одного «тире» и т. д., таблица 2. При этом сигналы передают в режиме амплитудной телеграфии (АТ) на фиксированных частотах, а принимают с использованием головных телефонов на слух, в неавтоматическом режиме.

Для обитаемых объектов связи и ГПО в ДКМВ-радиоканалах данный метод из-за уникальных возможностей слуха человека является безальтернативным. В тоже время, в связи со значительной загрузкой ДКМВ диапазона сосредоточенными помехами, а также замираниями в среде РРВ, к недостаткам указанного метода можно отнести достаточно низкую помехозащищенность радиообмена и сопряженную с этим скорость телеграфирования, ориентированную в основном на ручной (или слуховой) радиоприем. Причём для необитаемых стационарных объектов, а также БТС и ГПО, перемещающиеся на большие расстояния по транспортным артериям страны: автомобильным и железным дорогам, ВВП и на воздушных трассах, необходимо применение исключительно транспондеров с автоматическими системами по распознаванию радиосигнала на фоне шумов и помех.

---

<sup>3</sup> *Транспондер* (англ. transponder от transponder-responder «передатчик-ответчик») – приёмопередающее устройство, посылающее сигнал в ответ на принятый сигнал

Также известен способ передачи и приема цифровой информации в радиоканалах с применением сигнала с расширением спектра скачками частоты – FHSS<sup>4</sup> [5-7], в соответствии с которым, при передаче информационной последовательности, величину её несущей частоты модулируют по одному из известных узкополосных методов, изменяя расширяющую кодовую последовательность по псевдослучайному закону. При приёме же частота первого гетеродина изменяется в соответствии с расширяющей кодовой ПСП, используемой на передающей стороне, а полученный сигнал после гетеродинирования переносят на фиксированную промежуточную частоту с осуществлением селективной фильтрации.

Недостатком метода FHSS можно отметить требование к наличию динамической скоростной перестройки (переключению) селективных фильтров, что усложняет структуру радиоприемного устройства (РПУ) и не всегда может обеспечить требуемое качество фильтрации.

Более близким к рассматриваемому методу управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех является способ, представленный в [8] и заключающийся в том, что при передаче формируются БП в виде многочастотного дискретного сигнала, включающего  $n$  чипов, каждый  $i$ -й из которых,  $i = \overline{1, n}$ , передают на частоте псевдослучайного кода (ПСП), а при приёме путем преобразования принятого сигнала в исходную частотную форму восстанавливают БП. При этом несущие колебания частот  $f_i^{(0)}$  ( $f_i^{(1)}$ ) каждого  $i$ -го частотного чипа, информационной БП «0» или «1» до частотного преобразования по псевдослучайному закону дискретно изменяют с равномерным шагом  $\Delta f = f_i^{(0)(1)} - f_{i-1}^{(0)(1)} = f_{i+1}^{(0)(1)} - f_i^{(0)(1)}$  с постоянным дискретно повышающим или дискретно понижающим изменением частоты на заданных интервалах времени  $T_{\text{бп}}^{(0)}$  или  $T_{\text{бп}}^{(1)}$ , оставляя их постоянными на длительности  $i$ -го частотного чипа  $t_i$  ( $f_i^{(0)} = \text{const}$ ,  $f_i^{(1)} = \text{const}$ ), а после приема и обратного преобразования по псевдослучайному закону на приемной стороне декодируют принятый бит информационного сообщения по заданному образцу из двоичного алфавита, после чего идентифицируют сообщение по принятой бинарной последовательности. В случае же сложной помеховой обстановки по сохраняемой в цифровой форме спектрограмме восстанавливают принятые БП по фрагментарным данным путем повторного анализа.

Недостатком данного метода является также его ориентация на ручной (зрительный) режим обработки информации, не применимый в автоматических системах управления беспилотным транспортом различных типов базирования.

Как было отмечено в [2] в практике развития методов управления РТК и их разновидностью в виде БТС все шире используются технологии искусственного интеллекта (ТИИ) при определении наиболее подходящих механиз-

<sup>4</sup> FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – расширение спектра скачками частоты) – расширенный сигнал получается путем изменения (сканирования) несущей частоты передатчика по псевдослучайному закону в соответствии со значениями символов передаваемой кодовой последовательности (ПСП)



мов доведения управляющей информации, адаптируемых к различным ДФ. ДКМВ-радиоканалы из-за сложной помеховой обстановки в среде РРВ не случайно называют каналами с низкой эксплуатационной надежностью (или с высоким коэффициентом ошибок). Применение интеллектуальных радиосистем позволяет извлекать из окружающей среды РРВ информацию о её состоянии, адаптируя подходящую СКК к изменяющимся параметрам радиоканала, нагрузке частотного диапазона и области оптимальных рабочих частот (ОРЧ) множеством мешающих радиостанций и промышленных помех [9-11], рис. 2 (фрагмент А). Это необходимо для обоснованного формирования наборов номиналов используемых рабочих частот [12] в интересах построения ПСП тракта доведения управляющей информации до БТС. В данном случае интеллектуальные (когнитивные) радиосистемы (CRS) в административном смысле определяют возможность вторичного использования радиочастотного спектра, а в технологическом – адаптируемость радиосистем в части использования свободных от работы других станций полос и номиналов радиочастот [13].

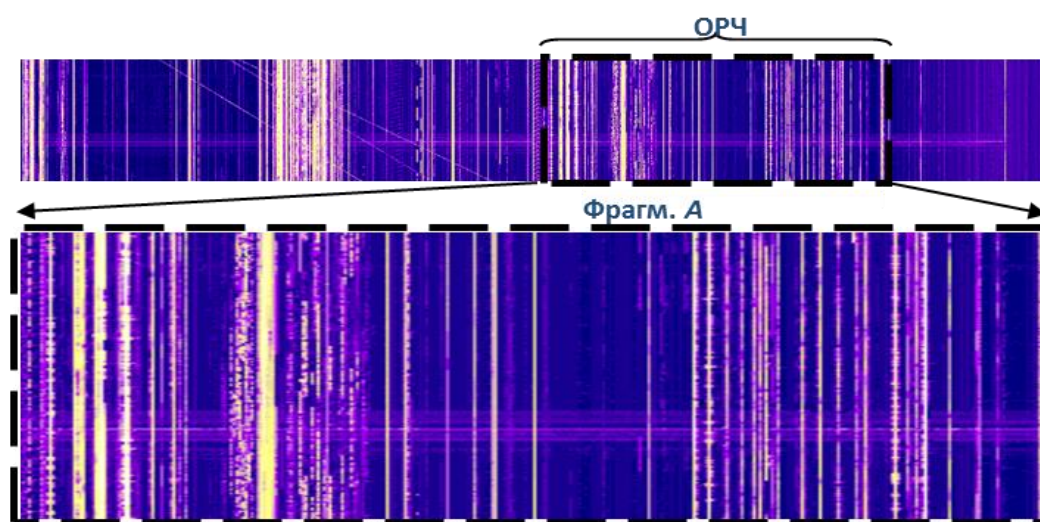


Рис. 2. Общий вид загрузки участка оптимальных рабочих частот декаметрового диапазона волн в режиме реального времени для конкретной радиотрассы

Анализ, проведенный в [2] в интересах построения помехоустойчивых СКК трактов управления РТК (РТП) при формировании бинарной информации, позволил обратить внимание, наряду с использованием SDR-технологий, также на системы когнитивного радио [13], создающихся сегодня на основе высокопроизводительных программно-логических интегральных схем (ПЛИС) 5 поколения, а также аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Это способствовало появлению в последние годы перепрограммируемых SDR формирователей сигналов (возбудительных устройств) и РПУ [8, 12, 13, 14] с высокоэффективными по помехоустойчивости характеристиками радиотрактов и радиоканалов управления ГПО, открывая новые подходы к формированию методов доведения управляющей и телеметрической информации в интересах БТС. Одними из таких механизмов, характеризующимися высокой помехоустойчивостью, как указывалось выше,

являются методы, основанные на процессах динамического управления спектром [5-7].

Рассмотрим их подробнее в части вариантов построения новых СКК.

### 3. Метод управления беспилотными транспортными системами на основе формирования помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех

Предложенный метод управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех включает, рис. 3:

- предварительный этап (шаги 1 и 2);
- первый этап – формирования БП команд управления (шаги 3-5);
- второй этап – формирования тракта управления и его СКК (шаги 6 и 7);
- третий этап – доведения команд управления до БТС (шаги 8-11);
- завершающий этап (шаг 12).

**Предварительный этап** метода должен осуществляться заблаговременно на ситуационном центре управления (СЦУ) БТС и состоит в уяснении задач осуществления их миссии, а также оценке обстановки для эффективного их функционирования на маршруте движения.

*Шаг 1* заключается в задании исходных данных в виде:

- выделенного диапазона частот для района выполнения миссии БТС;
- конкретизации частотного ресурса в интересах каналов управления БТС, центрального значения несущей частоты  $f_0$ , а также частотных полос действия ЛЧМ-сигнала ( $f_{\max} - f_{\min}$ );
- набора команд управления, включающих корректирующие команды траекторного наведения и формализованную командную информацию (сценарные планы (СП) движения по маршруту), формируемую оператором БТС или системой поддержки принятия решения (СППР) СЦУ;
- телеметрии в соответствии с используемыми на маршрутах ЦКМ обеспечивающей ГИС района функционирования БТС, номеров и координат маршрутов движения БТС и пр.;
- используемого формата кодировки в интересах построения СКК на основе кода Морзе, КОИ-8 или МТК-2 и др.;
- градиента опорного ЛЧМ-сигнала  $\theta$ , используемого для построения СКК на основе ДЛЧМ-сигналов передающей стороной радиоканала;
- количества повторений БП  $m$ , а также их длительности  $T_{\text{бп}}$  и величины защитных интервалов  $T_{\text{защ}}$  формируемых команд управления;
- структуры ПСП, применяемой для расширения спектра сигнала в каждом канале управления или канале доведения командной информации;
- разновидности БП (изменяющихся по длительности, числу повторов, или градиенту наклона), закрепленных за каналом управления по направлению движения, азимуту или углу места, либо каналом командной информации СКК и др.

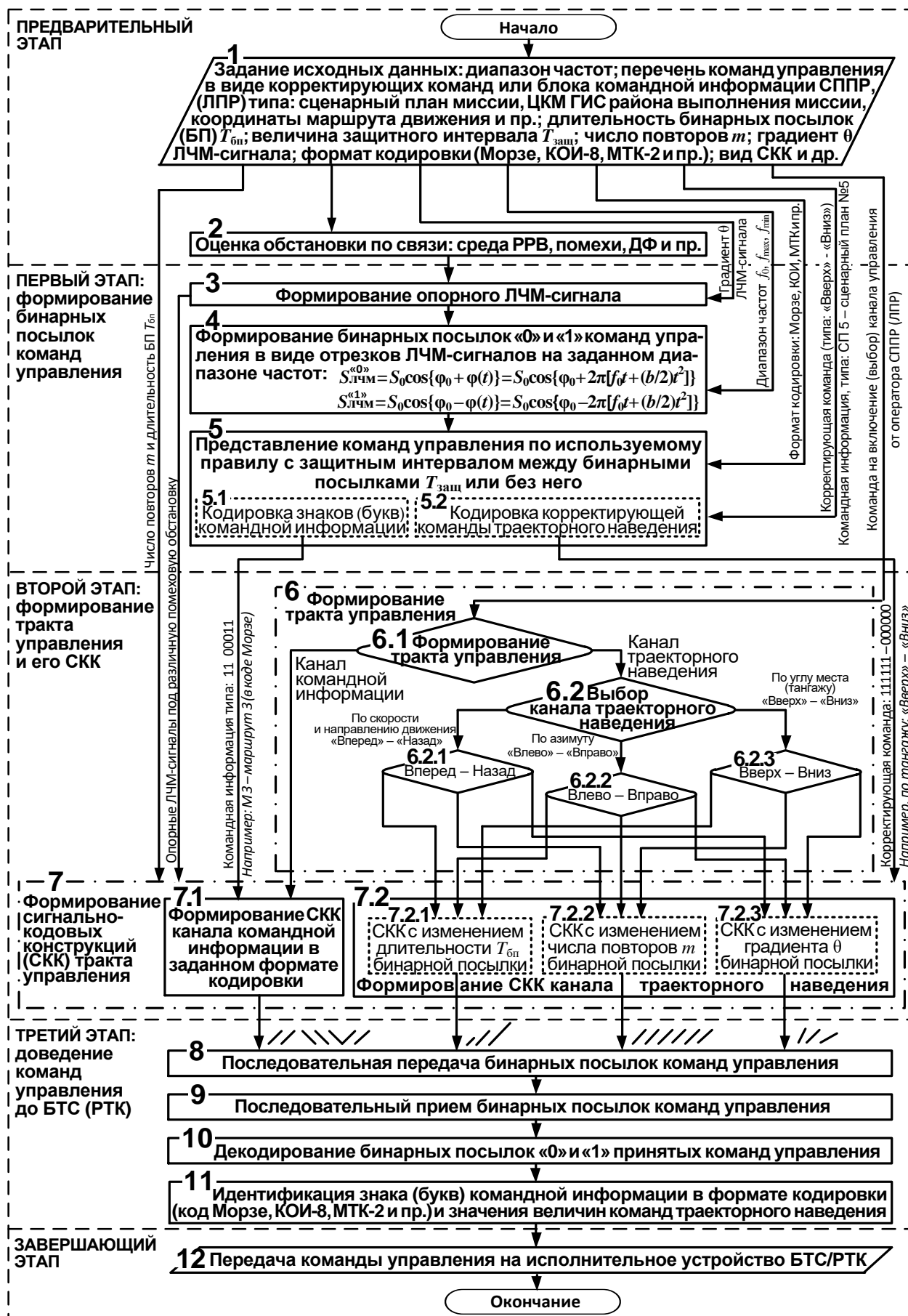


Рис. 3. Блок-схема алгоритма метода управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех



*Шаг 2* предназначен для осуществления оценки обстановки по связи в части состояния среды РРВ для различного времени года, времени суток, ДФ естественного и искусственного происхождения – помеховой обстановки. На данном этапе в полной мере проявляется способности ТИИ на основе CRS перепрограммировать SDR-радиоустройства под незанятые мешающими радиостанциями полосы и номиналы частот.

*Первый этап* метода использует в своей основе сформированные на подготовительном этапе исходные данные для последующего синтеза команд управления в виде бинарных посылок («0» и «1»).

*Шаг 3* посвящен формированию опорных ЛЧМ-сигналов бинарных посылок для заданного на шаге 1 диапазона частот, соответствующих линейно возрастающему

$$S_{\text{ЛЧМ}}^{''0''}(t) = S_0 \cos\{\varphi_0 + \varphi(t)\} = S_0 \cos\{\varphi_0 + 2\pi[f_0 t + (b/2)t^2]\}$$

и линейно убывающему

$$S_{\text{ЛЧМ}}^{''1''}(t) = S_0 \cos\{\varphi_0 - \varphi(t)\} = S_0 \cos\{\varphi_0 - 2\pi[f_0 t + (b/2)t^2]\}$$

законам изменения частоты, рис. 4, 5, где  $S_0$  – амплитуда сигнала;  $f_0 = (f_{\max} + f_{\min})/2$  – центральное значение несущей частоты;  $b = (f_{\max} - f_{\min})/T_c$  – параметр, характеризующий скорость изменения частоты во времени;  $T_c$  – длительность сигнала;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения частоты радиосигналов.

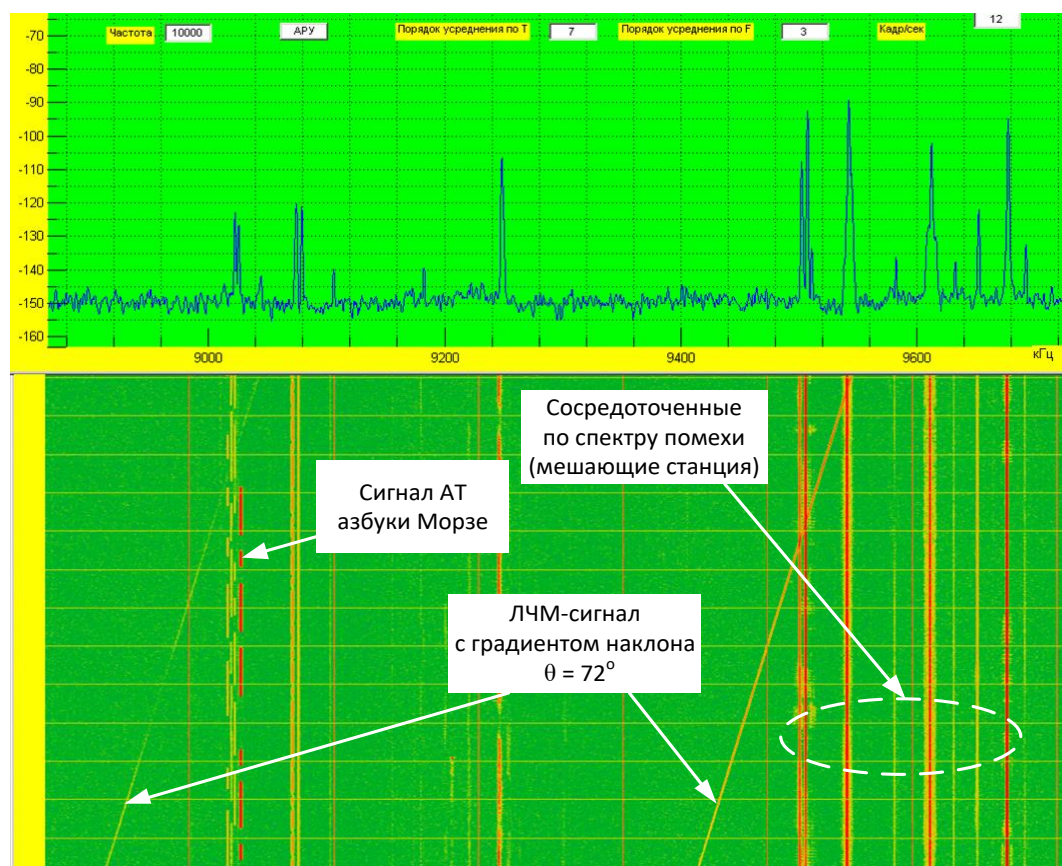


Рис. 4. Внешний вид опорного ЛЧМ-сигнала с градиентом наклона ( $\theta = 72^\circ$ ), сигнала АТ азбуки Морзе и сосредоточенных по спектру помех на реальной спектрограмме участка частотного диапазона 8,85 – 9,75 МГц

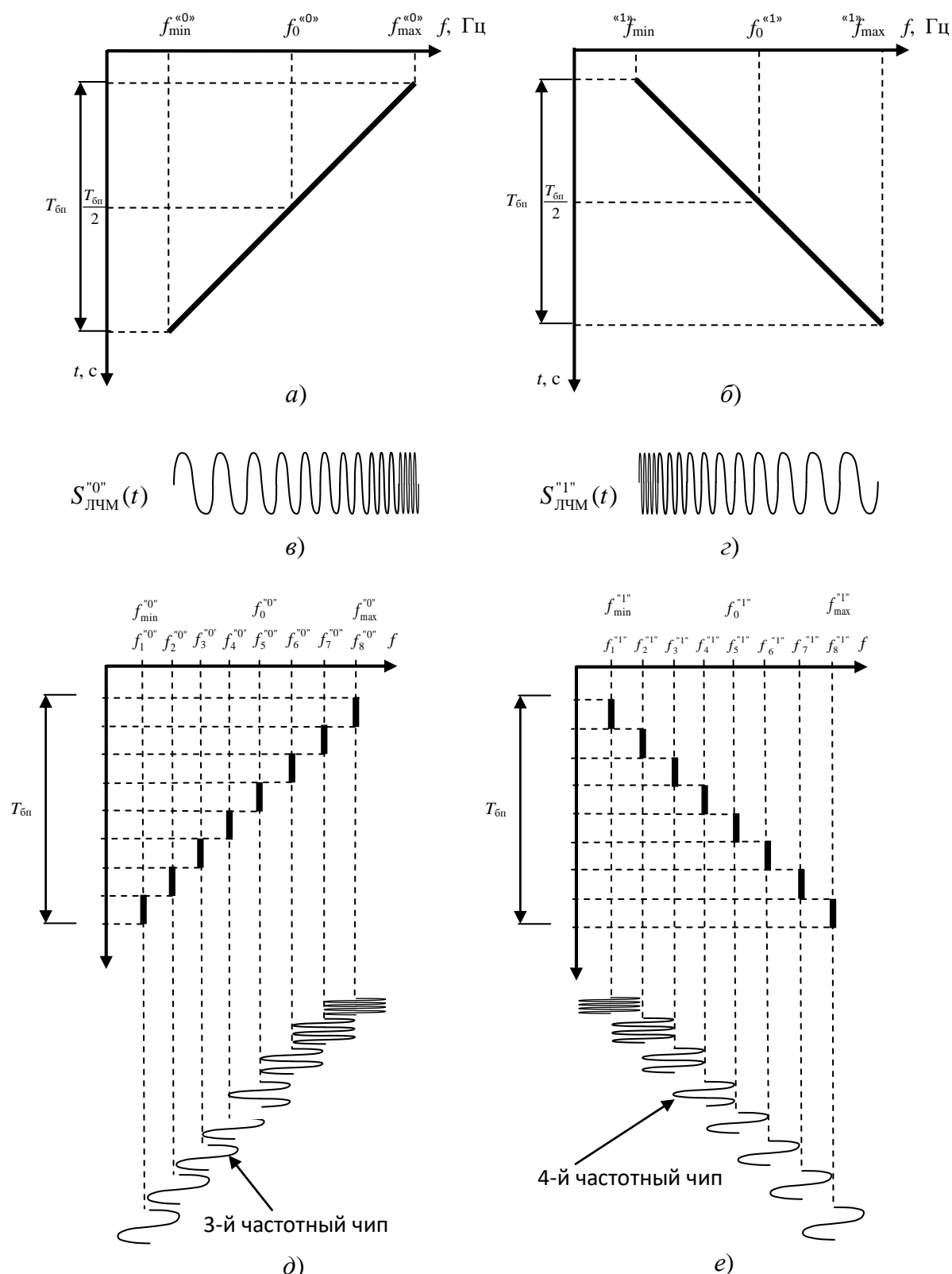


Рис. 5. Частотно-временные характеристики опорных ЛЧМ-сигналов:  
а) с законом линейно возрастающего изменения частоты (в);  
б) с законом линейно убывающего изменения частоты (г);  
д) с законом линейно возрастающего изменения частоты  
каждого последующего частотного чипа;  
е) с законом линейно убывающего изменения частоты каждого  
последующего частотного чипа

ЛЧМ-сигналы традиционно используются в системах радиолокации, а также для мониторинга состояния слоёв ионосферы. Однако, в последнее время они все чаще стали использоваться в том числе и для передачи информации.

Процедура формирования ЛЧМ-сигналов давно известна и подробно рассмотрена, к примеру, в [8, 12, 15]. Опорные ЛЧМ-сигналы, рис. 5 а), б), формируемые по линейно возрастающему («0»), рис. 5 в), либо линейно убывающему («1»), рис. 5 г) законам изменения частот, изображены в частотно-временной плоскости в виде наклонных линейных отрезков с отрицательным либо положительным градиентом наклона линейного изменения закона модуляции.

*Шаг 4* (рис. 3) предназначен для формирования БП в виде многочастотных дискретных сигналов, в которых несущие колебания частот  $S_{\text{ЛЧМ}}^{0''}(t)$  ( $S_{\text{ЛЧМ}}^{1''}(t)$ ) каждого из входящих в них  $i$ -х частотных чипов,  $i = \overline{1, n}$  (информационного нуля «0» или информационной единицы «1») БП скачкообразно меняются на заданном интервале времени с постоянно понижающим либо повышающим градиентом наклона, рис. 5 д), е). Причем в СКК, показанной на рис. 5 д) и е) число частотных чипов равно  $n = 8$ , хотя, по большому счету, их количество может быть и иным [8]. Важно отметить, что длительность  $i$ -го чипа (временного дискрета) зависит от заданной (требуемой) точности идентификации ДЛЧМ-сигнала для различной сложности помеховой обстановки в радиоканале управления БТС, как и число частотных чипов в одной БП. Также максимальное число частотных чипов  $n$ , используемых для передачи БП (информационных «0» или «1») командной информации и надежной (уверенной) их идентификации в условиях аддитивных случайных или преднамеренных (сосредоточенных по спектру или шумовых) помех, а также мультипликативных замираний среды РРВ, существенно зависит от ширины выделенной для канала управления полосы частот, в которой передаются БП. С расширением полосы частот снижается вероятность попадания частотного чипа БП под помеху либо в интервал селективных замираний. При этом, для того чтобы не допустить попадания всей бинарной посылки под замирания, полосу частот для передачи чипов, из которых формируют информационную единицу «1» или информационный нуль «0», целесообразно выбирать больше коэффициента частотной корреляции в ДКМВ радиоканале. Поскольку с высокой вероятностью селективные замирания в ДКМВ радиоканале проявляются в полосе  $3 \div 5$  кГц, то для защиты от них передаваемых частотных чипов внутри информационных БП их полосу частот необходимо брать  $10 \div 15$  кГц. Фактически несущее колебание частоты излучения каждого  $i$ -го чипа  $f_i^{0''}$  ( $f_i^{1''}$ ) ступенчато (дискретно) изменяются с равномерным шагом  $\Delta f = f_i^{0''(1'')} - f_{i-1}^{0''(1'')} = f_{i+1}^{0''(1'')} - f_i^{0''(1'')}$  с постоянным дискретно понижающим или дискретно повышающим градиентом модуляции изменения частоты информационной БП на заданном интервале времени  $T_{\text{бп}}^{0''}$  или  $T_{\text{бп}}^{1''}$ , оставляя их постоянными внутри частотного чипа  $t_i$  ( $f_i^{0''} = \text{const}$ ,  $f_i^{1''} = \text{const}$ ). Причем для передачи информационного нуля («0») из веера  $n$  частотных чипов с постоянными дискретно изменяющимися частотами  $f_1 \div f_n$  формируется сигнал с линейно возрастающим законом дискретного изменения частот передачи



чипов от  $f_{\min}=f_1=f_1^{''0''}$  до  $f_{\max}=f_n=f_n^{''0''}$ , рис. 5 д) в информационной БП ( $f_i^{''0''} > f_{i-1}^{''0''}$ ), а для передачи информационной единицы («1») из веера  $n$  частотных чипов с постоянными дискретно изменяющимися частотами  $f_1 \div f_n$  формируется сигнал с линейно убывающим законом дискретного изменения частот передачи чипов от  $f_{\max}=f_1=f_1^{''1''}$  до  $f_{\min}=f_n=f_n^{''1''}$ , рис. 5 е), в информационной БП ( $f_i^{''1''} < f_{i-1}^{''1''}$ ).

Шаг 5 (рис. 3) предназначен для формирования последовательности логических единицы («1») и нуля («0») командной информации (команды управления), представляемых таким образом, что передача любой бинарной посылки  $T_{\text{бп}}$  по времени сопоставима со временем передачи «точки» азбуки Морзе в режиме АТ (70 мс), фиг. 6 а), как показано в [8].

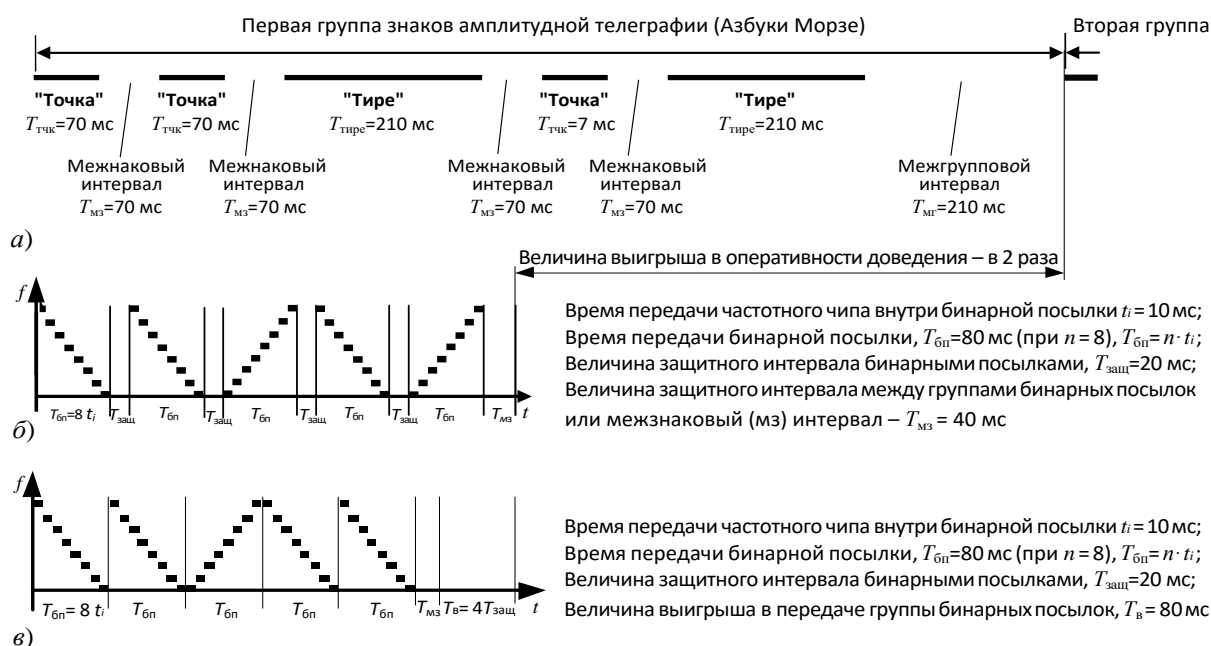


Рис. 6. К вопросу повышения оперативности доведения команд управления до БТС в виде БП многочастотных ДЛЧМ-сигналов

На рис. 6 показано: а) команда управления на основе азбуки Морзе; б) та же команда управления на основе ДЛЧМ-сигнала с законом линейно возрастающего и линейно убывающего изменения частоты с защитными интервалами между БП; в) те же бинарные посылки без защитных интервалов.

При этом необходимо отметить, что на шаге 1 есть возможность для оператора или СППР СЦУ изменять длительность БП в зависимости от обстановки по связи в районе функционирования (на маршруте движения) БТС, поскольку прототип [8] ориентирован на визуальный (ручной) прием информации, а предлагаемый метод – на автоматический прием в режиме реального времени команд управления. Также в предложенном методе возможно дополнительно увеличить оперативность доведения БП, повысив их скорость передачи в сравнении с передачей азбуки Морзе в режиме АТ, за счет ликвидации защитного интервала между БП, как показано на рис. 6 б), в). Ликвидация межнакового защитного интервала для сигнала АТ азбуки Морзе критично, поскольку «точки» и «тире» передаются на одной частоте и без такого интервала они не будут

идентифицированы радиотелеграфистом или в ходе цифровой фильтрации на приемной стороне. Однако для применяемых в рассматриваемом методе ЛЧМ-сигналов защитный интервал между БП команд управления играет несколько второстепенную роль, поскольку начало каждой БП всегда хорошо идентифицируется, как показано на рис. 6 б, в).

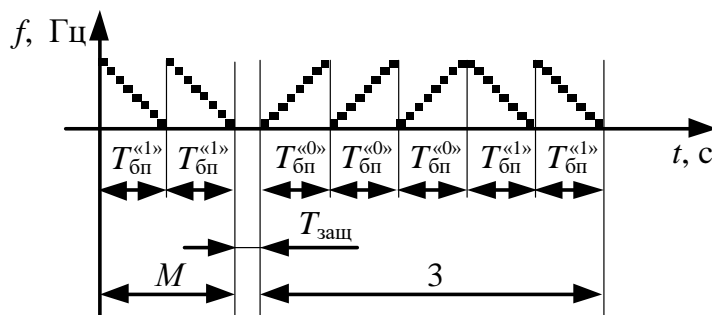
Как видно из рис. 3, шаг 5 разбивается на подшаги 5.1 и 5.2, на которых осуществляется представление команд управления по задаваемым СППР или оператором правилам кодировки БП, соответственно, знаков (букв) командной информации: в коде азбуки Морзе; 8-битном коде обмена информацией КОИ-8; 5-элементном Международном телеграфном коде № 2 (МТК-2) и пр.

Так на подшаге 5.1 осуществляется кодировка букв (знаков) блока командной информации, получаемой от СППР либо оператора СЦУ типа:

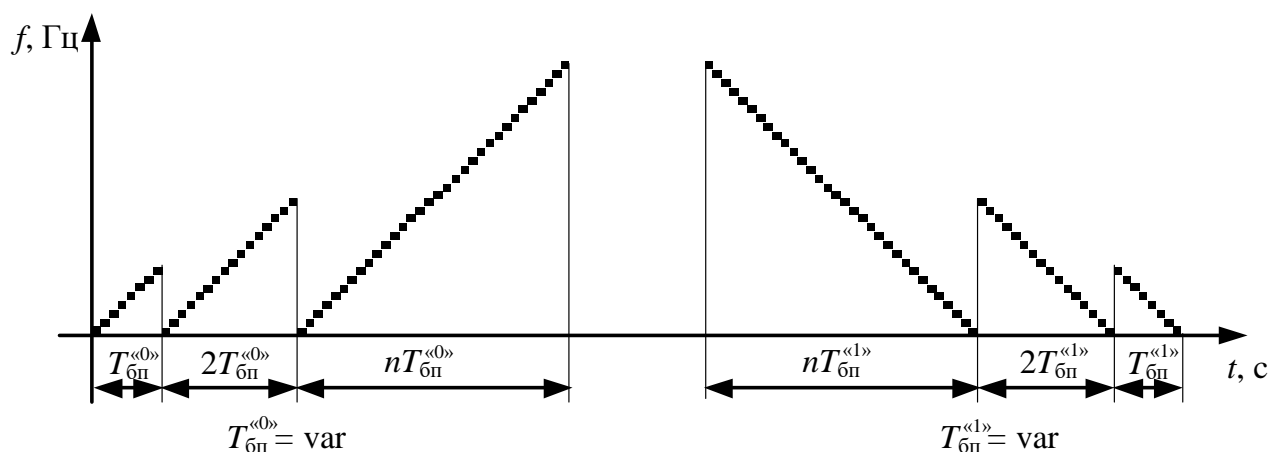
- сценарный план миссии БТС, например, «СП-5»;
- телеметрической информации в соответствии с данными ЦКМ обеспечивающей ГИС района движения по маршруту БТС;
- номера или координат маршрутов движения БТС, например, «Маршрут № 3» – МЗ) и др.

Как правило, на автономные БТС командная информация по выполнению определенных действий записывается в его бортовую базу данных (БД) еще до выхода на маршрут (до запуска), а для дистанционно управляемых БТС с гибридными системами управления при доведении таких команд управления необходим специально выделенный тракт (или канал), по которому происходит коррекция миссии (маршрута) в процессе функционирования БТС или в случае аварийной ситуации. Пример визуализации блока командной информации, типа МЗ («Маршрут № 3») в кодировке азбуки Морзе (11 00011) показан на рис. 7 а). Также на рис. 7 б) приведен вариант представления корректирующей команды траекторного наведения, в виде БП разной длительности ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{var}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{var}$ ), например: «Вперед, быстрее» – «Назад, медленнее». На рис. 7 в) представлен вариант формирования корректирующей команды траекторного наведения, в виде БП одинаковой длительности ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{const}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{const}$ ) с разным числом повторов  $m = \text{var}$ , например: «Влево 4°» – «Вправо 6°» ( $m$  может быть кратно, например 5° или 10° азимута). На рис. 7 г) соответственно показан вариант представления корректирующей команды траекторного наведения, в виде БП с разной скважностью следования  $S = \text{var}$ , что может соответствовать различной величине тангажа (подъема – спуска), или градиенту наклона  $\theta = \text{var}$ .

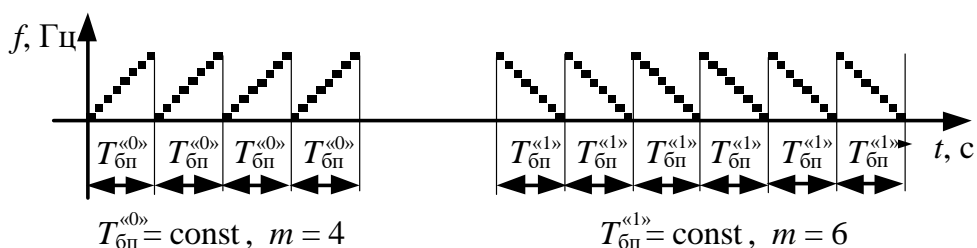
На подшаге 5.2 (рис. 3) осуществляют кодировку корректирующих команд траекторного наведения БТС. Как правило, такие команды необходимы для дистанционно-управляемых БТС с гибридной системой управления на завершающем этапе выполнения миссии и в наиболее сложных условиях движения по маршруту или в аварийной ситуации. Для БТС с автономными системами управления также переход на режим траекторного наведения может быть использован на наиболее ответственных этапах выполнения миссии, например, стыковка космических аппаратов на орбите, парковка, швартовка, посадка, разгрузочно-погрузочные мероприятия и пр.



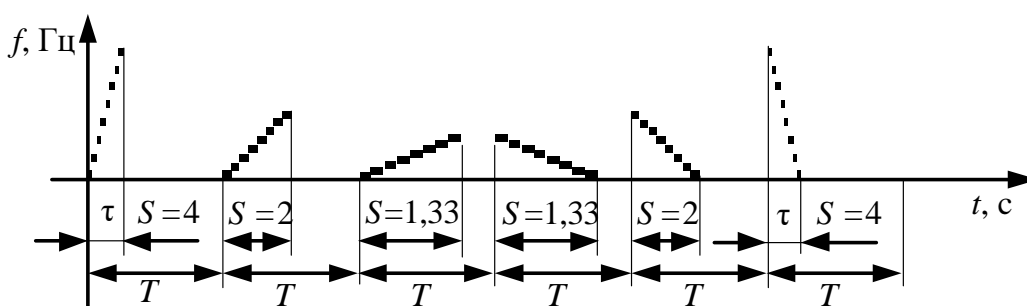
а) Вариант представления командной информации, типа: «Маршрут № 3» (М3) в коде азбуки Морзе – 11 00011



б) Периоды следования ДЛЧМ-сигналов разной длительности  $T_{бп}$



в) Периоды следования ДЛЧМ-сигналов с разным числом повторов  $m$



г) Периоды следования ДЛЧМ-сигналов с разной скважностью  $S$

Рис. 7. Варианты формирования команд управления на основе многочастотного ДЛЧМ-сигнала с законом линейно возрастающего и линейно убывающего изменения частоты



В предложенном методе к корректирующим командам траекторного наведения для наземных и надводных БТС и РТК (РТП) определены:

- по изменению скорости и направления движения «Вперед» – «Назад»;
- по изменению азимута (крена) движения «Влево» – «Вправо».

Дополнительно к этому, для БТС воздушного, космического и подводного базирования добавляются команды траекторного управления по изменению угла места: тангажу погружения/всплытия (спуск/подъём) – «Вверх» – «Вниз».

Для БТС и РТК промышленного назначения также могут выделяться и другие команды на исполнение, связанные с технологией того или иного производства, выполнения работ на подводных коммуникациях и пр. Поскольку при таком представлении корректирующих команд траекторного наведения их легко можно заменить на БП, то для уменьшения избыточности командной информации в тракте управления БТС в предложенном методе им ставятся в соответствие бинарные символы информационных нулей «0» или единиц «1». Причем каждую команду управления возможно представить как одним бинарным символом «0» или «1» разной длительности, рис. 7 б), где величина длительности может быть сопоставима в каждом из каналов управления с величиной изменения скорости БТС при движении «Вперед» или «Назад», с величиной (градусом) изменения направления её движения по азимуту (крену) при повороте «Влево» или «Вправо», с величиной изменения тангажа (погружения) «Вверх» или «Вниз», так и числом повторов этих бинарных символов, рис. 7 в), или крутизне градиента наклона, рис. 7 г). При этом величины скорости движения  $V$  в направлении «Вперед» – «Назад», углов поворота по азимуту  $\alpha$  «Влево» – «Вправо», и по подъёму – спуску (погружению, тангажу)  $\theta$  «Вверх» – «Вниз» пропорционально соответствуют длительности БП ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{var}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{var}$ ), или числу повторов  $m = \text{var}$  каждой из БП при их фиксированной длине ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{const}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{const}$ ), или крутизне градиента наклона  $\theta = \text{var}$  БП.

Данный параметр также может характеризоваться скважностью<sup>5</sup> следования БП  $S$ , определяемой через отношение периода следования  $T$  к её длительности  $\tau$ . Длительность БП, а соответственно и число частотных чипов в ней может изменяться по исходным данным, устанавливаемым СППР или оператором, неся в себе информацию о величине значения команды траекторного наведения. При этом шаг скачкообразного изменения частоты  $\Delta f$  между чипами, формирующими передачу информационной единицы «1» или информационного нуля «0» должен оставаться постоянным ( $\Delta f = f_i^{0''(1'')} - f_{i-1}^{0''(1'')} = f_{i+1}^{0''(1'')} - f_i^{0''(1'')}$ ), т. е.  $\Delta f = \text{const}$ , Частота передачи каждого чипа при формировании информационной «1» или информационного «0» внутри чипа также постоянна ( $f_i = \text{const}$ ), в то время как увеличение частот от  $f_1$  до  $f_n$  (от  $i$ -го чипа к  $i+1$  чипу) изменяется по линейному закону опорного ЛЧМ-сигнала (по способу модуляции скачкообразного изменения частоты), рис. 5 д), е).

<sup>5</sup> Скважность – безразмерная величина, определяющая отношение периода  $T$  следования (повторения) бинарной посылки к ее длительности  $\tau$  ( $S = T/\tau$ ). Часто используется величина, обратная скважности, называемая коэффициентом заполнения  $D = \tau/T = 1/S$ .

**Второй этап** предлагаемого метода предназначен для формирования тракта управления и используемых в нем СКК для каналов траекторного наведения и командной информации.

**Шаг 6** (рис. 3) посвящен непосредственно формированию тракта управления БТС, который в общем виде состоит из каналов командной информации (условие 6.1 блок-схемы алгоритма метода) и траекторного наведения (условие 6.2), выбираемых СППР подсистемой управления БТС или его оператором дистанционного управления. При этом канал траекторного наведения позволяет осуществлять управление БТС:

- по направлению движения и величине изменения скорости «Вперед» или «Назад» (условие 6.2.1);
- по азимуту (крену) и величине изменения разворота «Влево» или «Вправо» (условие 6.2.2);
- по углу места и величине изменения тангажа (погружения) «Вверх» или «Вниз» (условие 6.2.3).

Причём каждое из этих условий предполагает формирование СКК канала траекторного наведения путем изменения длительности бинарных посылок ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{var}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{var}$ ), или числу повторов  $m = \text{var}$  каждой из БП при их фиксированной длине ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{const}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{const}$ ), или крутизне их градиента наклона  $\theta = \text{var}$  (скважности  $S$  ЛЧМ-сигнала), как показано на рис. 7 б) в) з) в зависимости от наличия свободного частотного ресурса (необходимой полосы частот), а также сложности помеховой обстановки или воздействия иных ДФ, например радиоэлектронного подавления [16].

**Шаг 7** (рис. 3) предназначен для формирования СКК тракта управления:

на подшаге 7.1 – формируют СКК в интересах канала передачи командной информации БТС в заданном на подшаге 5.1 формате кода, например – азбуке Морзе, рис. 7 а);

на подшаге 7.2 (рис. 3) – формируют СКК в интересах канала траекторного наведения по команде от шага 6, инициируемого оператором СЦУ БТС или подсистемой управления СППР. Причём в формируемых СКК применяется кодировка корректирующей команды траекторного наведения, выполненная на подшаге 5.2. При этом СКК для изменения величины скорости в направлениях «Вперед» – «Назад»  $V$  на подшаге 6.2.1, значения угла поворота по азимуту «Влево» – «Вправо»  $\alpha$  на подшаге 6.2.2 и по значению величины подъема – спуска (погружения, тангажа) «Верх» – «Вниз»  $\theta$  на подшаге 6.2.3 не поддерживается постоянной, а варьируется:

- длительностью БП ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{var}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{var}$ ) в частотно-временной плоскости ЛЧМ-сигнала, на подшаге 7.2.1, как показано, рис. 7 б);
- числом повторов БП ( $m = \text{var}$ ) при ограничениях на доступную полосу частот под ЛЧМ-сигнал, на подшаге 7.2.2, как показано рис. 7 в);
- скважностью следования  $S = \text{var}$  БП или градиентом наклона опорного ЛЧМ-сигнала  $\theta = \text{var}$ , как показано на рис. 7 з).

Предопределение выбора варианта формируемой СКК с изменяющимися длительностью, количеством повторов или скважностью БП команд управления

во многом зависит от наличия свободного частотного ресурса (загрузки диапазона частот), а также сложности помеховой обстановки в районе функционирования (на маршруте движения) БТС или выполнения РТК своей миссии. Решение по выбору варианта СКК принимает, как правило, оператор БТС или СППР СЦУ беспилотного транспорта. В режиме работы полной автоматизации (без оператора) возможно жесткое закрепление СКК за каналами управления, например, первого из указанных вариантов формирования СКК (рис. 7 б) – за каналом траекторного наведения «Вперед» – «Назад» («Ускорение» – «Торможение»); второго (рис. 7 в) – за каналом траекторного наведения «Влево» – «Вправо», а третьего (рис. 7 г) – за каналом траекторного наведения «Вверх» – «Вниз». При этом для наземного железнодорожного транспорта, типа беспилотных метростанций и беспилотных трамваев задача выбора упрощается, поскольку для данного вида транспорта может быть задействован лишь один канал управления: «Вперед» – «Назад» («Ускорение» – «Торможение»). Для автомобильных и надводных БТС задействуются два канала управления: «Вперед» – «Назад» и «Влево» – «Вправо». И только для БТС (РТК) воздушного, подводного и космического базирования должны использоваться все три канала управления (траекторного наведения), включая и тангаж: «Вверх» – «Вниз». Как правило, каждый оператор БТС (РТК) выбирает конкретные варианты СКК под особенности движения по маршруту (выполнения миссии) и заданную помеховую обстановку. Иногда, такой выбор осуществляется и под предпочтения, например:

- если при управлении БТС (РТК) задействован манипулятор, типа «джойстик», то для канала траекторного наведения, очевидно, будет предпочтительным первый вариант СКК с изменением длительности бинарной посылки, рис. 7 б);
- для передачи точных значений изменяемой величины параметра движения, к примеру, поворот на заданный градус азимута, необходимо предпочтение отдать второму варианту СКК с повтором бинарных посылок, рис. 7 в), при этом каждый её повтор будет соответствовать строго требуемой величине варьируемого параметра управления (для заявленного примера – градусы азимута);
- в случае, когда необходимо изменить тангаж по высоте/глубине (воздушному эшелону) движения БТС (РТК), будет предпочтительным третий вариант СКК с изменением скважности  $S$  бинарной посылки, рис. 7 г).

**Третий этап** метода предназначен для непосредственного доведения команд управления до БТС (РТК) в виде командной или телеметрической информации, а также корректирующих команд траекторного наведения.

**Шаг 8** (рис. 3) алгоритма рассматриваемого метода необходим для осуществления трансляции сформированных на шаге 7 второго этапа СКК из многочастотный ДЛЧМ-сигналов в интересах канала командной информации (от подшага 7.1), а также каналов траекторного наведения (от подшага 7.2: 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3). При этом каждый частотный чип многочастотной бинарной последовательности информационных единиц «1» и нулей «0» последовательно



передают по радиоканалу известными в радиотехнике способами [5, 8, 15] на частоте псевдослучайного кода (ПСП), обеспечивая известный из [6, 7] режим перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону (ППРЧ), например, как приведено на верхней спектрограмме рис. 8. Причём на приемной стороне радиоканала управления (на борту БТС или РТК) осуществляется обратная свёртка БП по заданным исходными данными ПСП для управления БТС.

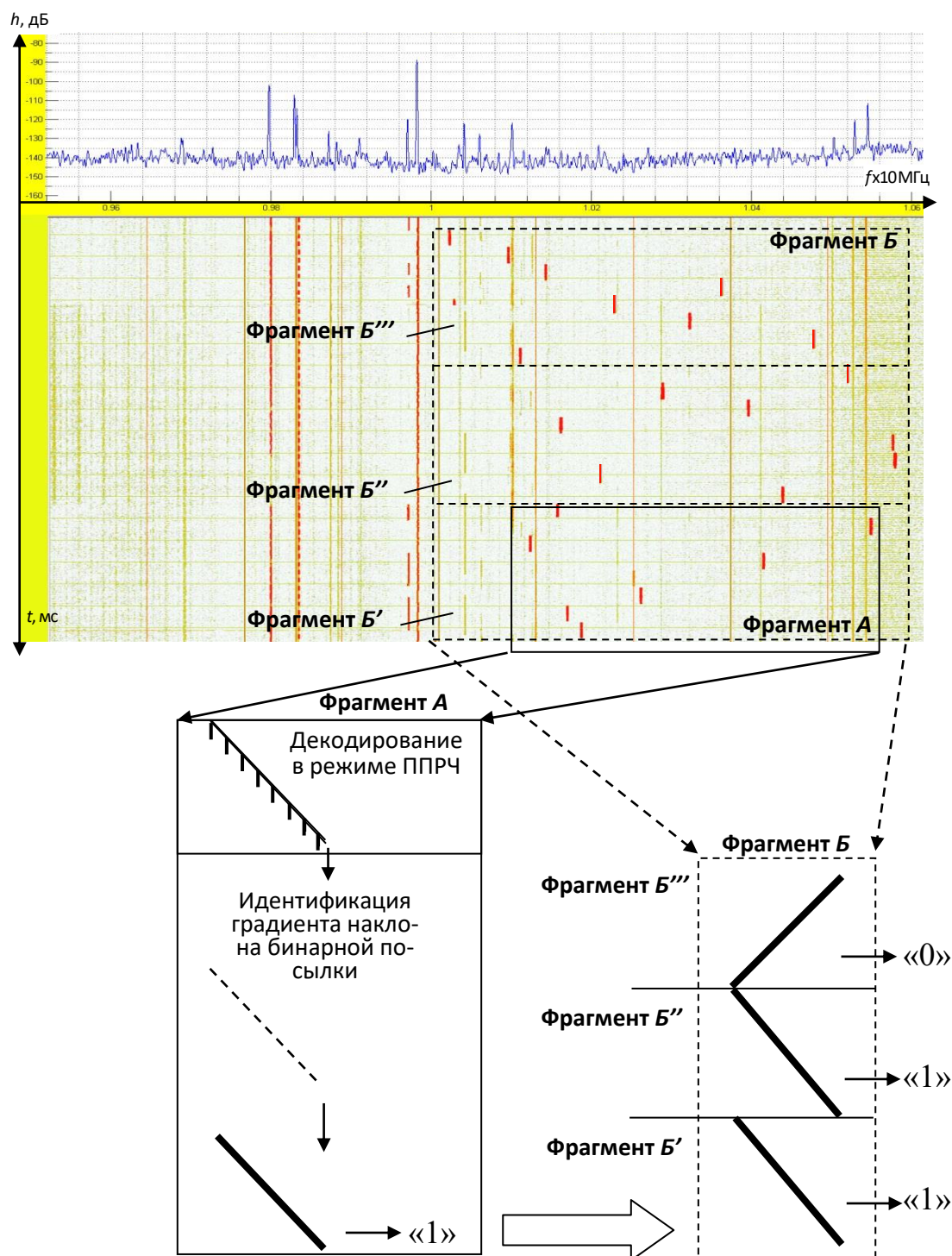


Рис. 8. Демонстрация работы командной радиолинии БТС/РТК при передаче ДЛЧМ-сигналов бинарных посылок команды управления «1», «1», «0» в режиме внутрибитовой ППРЧ и автоматического их восстановления

Таким образом, передача сформированных БП осуществляется в режиме внутрибитовой ППРЧ [6, 7], когда трансляция каждого  $i$ -й частотного чипа внутри одной информационной БП «1» или «0» происходит на частотах ПСП  $(f_i^{0("1")})_{\text{ППРЧ}}$  так, что число частотных чипов  $n$  ДЛЧМ-сигнала, см. рис. 5  $\delta$ ),  $\epsilon$ ) равно числу скачков рабочей частоты заданной ПСП внутри одной БП, см. фрагмент  $B$  верхней спектрограммы рис. 8. Этот режим работы (внутрибитовая ППРЧ) обеспечивает повышение устойчивости доведения управляющей информации до БТС (РТК) при существенной загрузке выделенного частотного диапазона большим числом сосредоточенных помех в условиях мегаполиса (крупных промышленных центров и транспортных хабов).

Также при решении задачи управления БТС нельзя обходить стороной тот факт, что транспортную отрасль любого государства всегда относят к КВИ. Поэтому вопросы обеспечения безопасности информации на каналах (в трактах) управления беспилотным транспортом всегда являются приоритетными. С этой точки зрения, в методе предложено длительность частотных чипов бинарных посылок команд управления снижать до длительности, менее времени реакции противоборствующей стороны на постановку помехи или на применение иных деструктивных воздействий, включая перехват каналов управления [16], рис. 9.

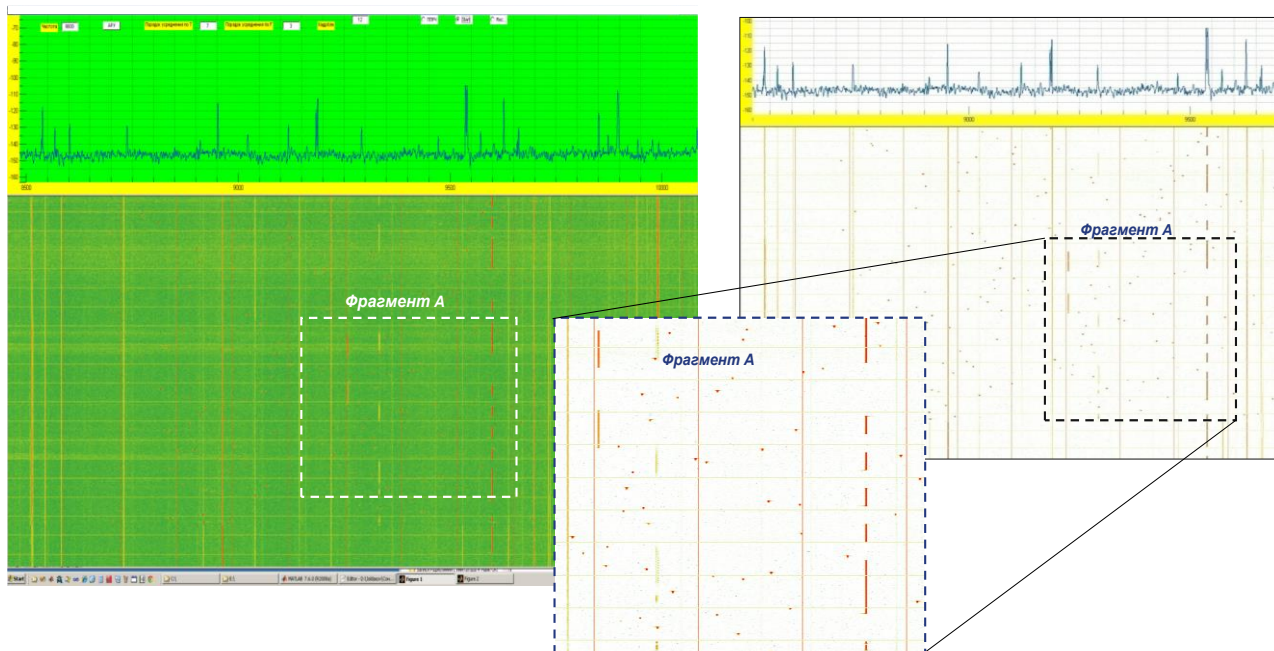


Рис. 9. Спектрограмма сигналов командной радиолинии, работающей в режиме внутрибитовой («быстрой») ППРЧ при длительности частотного элемента  $t_i = 10$  мс

*Шаг 9* (рис. 3) предусматривает осуществление последовательного приёма ДЛЧМ-сигналов известными в радиотехнике способами [5-8, 15]. При этом обработка принимаемых частотных чипов ДЛЧМ-сигналов происходит в соответствии с заданным протоколом передачи, частотно-временным расписанием и ПСП режима ППРЧ, рис. 8. В данном случае на приемной стороне целенаправ-

ленно объединяются независимые частотные элементы (чипы) БП сигнала, распределяемые CRS-радиосистемой в свободных участках ЧВС в режиме внутрибитовой ППРЧ [5-7]. Затем осуществляется фильтрация, оцифровка и преобразование принимаемого сигнала в другую частотную форму [19], а также перемножения его со сформированным гетеродинным сигналом на частотах используемого псевдослучайного кода (ПСП), имеющим знак градиента частоты, противоположный знаку градиента частоты несущей волны передаваемого сигнала. Таким образом, частота несущей волны преобразованного сигнала является постоянной, либо частотные составляющие соответствующего спектра представляют собой постоянные частоты. Также существует возможность обработки спектральных составляющих принятого частотно-преобразованного сигнала с применением более сложных систем фильтрации по одиночке, параллельно в блоке, а в случае необходимости, комбинируя их друг с другом с целью восстановления, или извлечения, или выделения параметров, несущих информацию. Для этого применимы способы, известные из общедоступных источников по цифровой обработке сигналов [6, 8] и др.

Именно на шаге 9 происходит достижение цели предлагаемого метода в отношении помехоустойчивого приема БП команд управления БТС. Для сравнения, на рис. 10 представлены варианты спектрограмм сигналов кода Морзе (АТ) в условиях шумовых и сосредоточенных помех, откуда видно, что в автоматическом режиме в сложной помеховой обстановке искусственной нейронной сети (ИНС) бортового транспондера БТС достаточно сложно выделить полезный сигнал. В то время как на рис. 11 приведен вариант приема БП в виде многочастотного ДЛЧМ-сигнала, передаваемого в режиме ППРЧ и восстановление его на приемной стороне бортовым РПУ БТС. Процесс приема БП команд управления в предложенном методе аналогичен изложенному в [8], с той лишь разницей, что в основе приёма и последующей идентификации команды управления лежат методы согласованной цифровой фильтрации по шаблонам полосовых пропускающих фильтров (ППФ) и экстраполяции [19].

*Шаг 10*, рис. 3, предназначен для декодирования принятых на шаге 9 многочастотных ДЛЧМ-сигналов БП команд управления с правым или левым градиентами наклона. При этом им ставится в соответствие обратная ПСП изменения рабочей частоты, которая используется на передающей стороне (шаг 8). Для очистки (отделения) принимаемого многочастотного ДЛЧМ-сигнала от помех можно использовать фильтрацию, например, как указывалось выше – ППФ. Причем такие фильтры должны настраиваться на заданные шаблоны с левым и правым градиентами наклона опорных сигналов бинарных посылок (логической единицы «1» или логического нуля «0»). С другой стороны, соответствующие составляющие могут переноситься в заданный частотный диапазон, например, путём синхронизации соответствующих вспомогательных частот с соответствующими многолучевыми составляющими.

Для повышения помехоустойчивости в условиях сложной помеховой обстановки обычно используется согласованная фильтрация с блоком защиты от сосредоточенных помех [12, 15, 19]. Процедура декодирования подробно описана в [8] и показана в нижней части рис. 8 (фрагмент А).



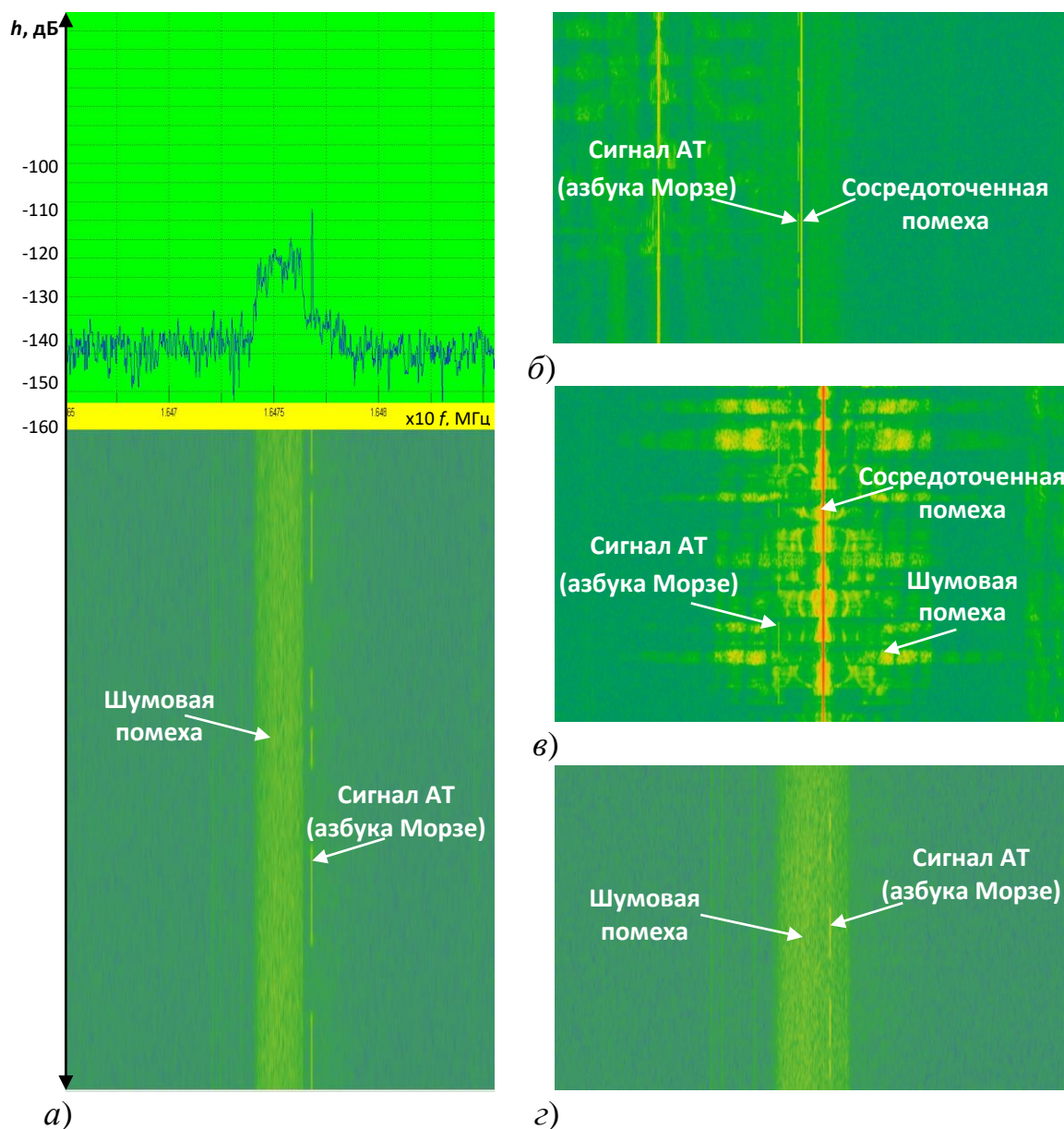


Рис. 10. Варианты спектрограмм сигналов АТ (азбуки Морзе):  
а) рядом с шумовой помехой, б) рядом с сосредоточенной помехой,  
в) под мощными сосредоточенной и г) шумовой помехами

Вариант осуществления процедуры автоматического восстановления БП командной информации по фрагментарно принятым частотным чипам много-частотного ДЛЧМ-сигнала методами согласованной цифровой фильтрации с использованием шаблонов ППФ и экстраполяции для последующей идентификации команды управления 00011 приведен на рис. 11. В данном случае показаны фрагменты при приеме четырех (а), трех (б) и двух (в, г, д) элементов БП (частотных чипов) в условиях сосредоточенных помех. На верхней части рисунка мощным сосредоточенным по спектру помехам соответствуют вертикальные сплошные и пунктирные линии, в средней части рисунка – правильно идентифицированные частотные чипы, в нижней части показано определение градиента наклона по минимально двум принятым частотным чипам.



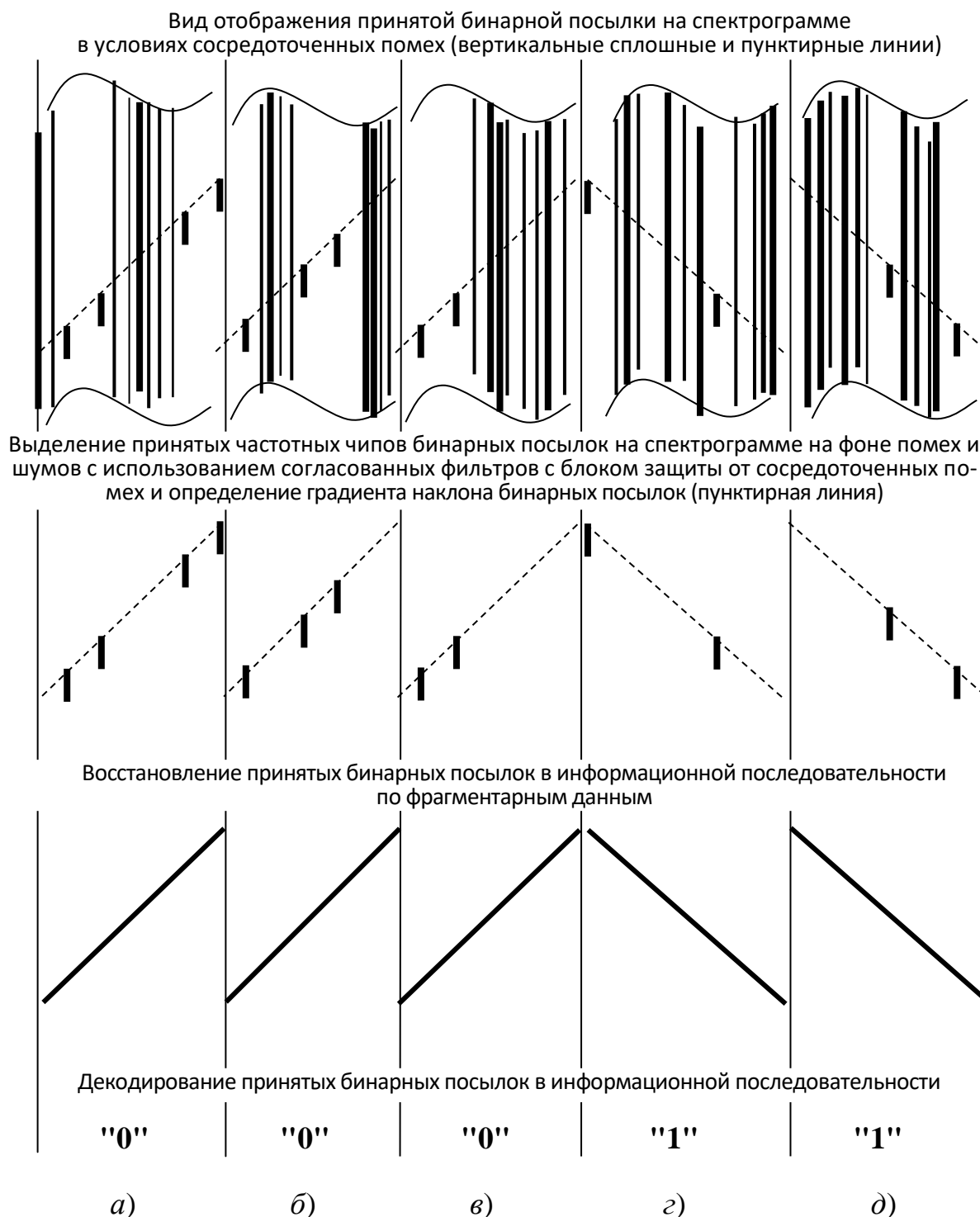


Рис. 11. Вариант автоматического восстановления принятых бинарных посылок по фрагментарным данным методами согласованной цифровой фильтрации

Как отмечалось выше, при параллельной трансляции (рис. 12) бинарных посылок (на шаге 8 метода) команд управления в тракте управления БТС (РТК) необходимо, чтобы бортовой комплекс БТС имел многоканальное РПУ [20] для приёма ДЛЧМ-сигналов командной информации. Процедура приема БП по параллельным каналам в тракте управления подробно описана в [8, 15], а также в работах [21, 22].

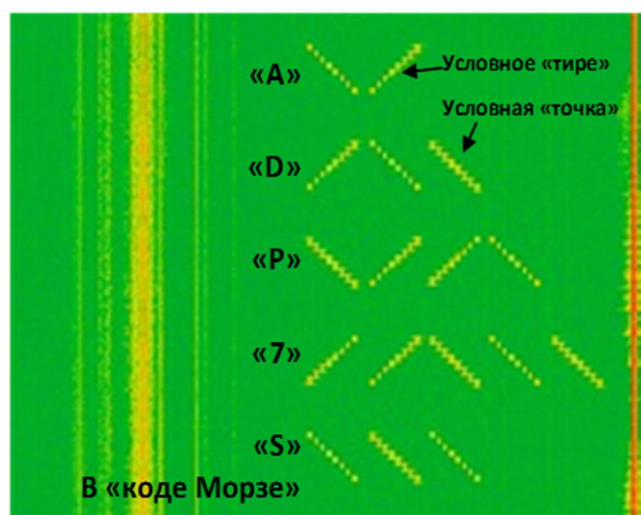


Рис. 12. Фрагмент спектрограммы применения новой сигнально кодовой конструкции при параллельной (познаковой) передаче (приеме) «кода Морзе»

*Шаг 11* (рис. 3) предназначен для осуществления процедуры идентификации принятых знаков (букв) командной информации после приема и декодирования БП. Как показано на спектрограмме рис. 12, информационные нули «0» и информационные единицы «1», соответствующие условным «точкам» и «тире» азбуки Морзе, либо информационным битам иной кодировки (МТК-2, КОИ-8 и др.), полученные после обратного преобразования по псевдослучайному закону изменения ПСП, отображаются в виде группы  $n$  чипов с определенным градиентом наклона (левым либо правым) на спектрограмме в плоскости «время-частота» в составе информационной бинарной последовательности, например, как показано на нижнем фрагменте ( $B' - B'' - B'''$ ) рис. 8 в виде формализованной информационной команды «1» «1» «0», или на нижнем фрагменте рис. 11 в виде формализованной команды «0» «0» «0» «1» «1». Далее происходит идентификация принятой команды управления, например, как показано на рис. 12, в виде команды «ADP7S» в коде Морзе. Причём и при последовательной и при параллельной трансляции и приёме ДЛЧМ-сигналов идентификация букв (знаков) команд управления (принимаемого сообщения) БТС (РТК) осуществляется целиком (позначно). Командная информация по принятым и декодированным бинарным посылкам в виде координат точек маршрута движения, либо иных команд траекторного наведения с априори известной системе идентификации БТС (РТК) кодировкой (азбука Морзе в новой СКК, МТК-2, КОИ-8 и др.) идентифицируют значение величин углов разворота по азимуту  $\alpha$  «вправо» – «влево», в направлении  $V$  «вперед» – «назад» (и скорости движения «быстрее» – «медленнее»), высоты подъема – спуска (погружения, тангажа)  $\theta$  «вверх» – «вниз» пропорционально длине бинарных посылок ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{var}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{var}$ ), или числу повторов  $m = \text{var}$  каждой из бинарных посылок при их фиксированной длине ( $T_{\text{бп}}^{0''} = \text{const}$ ,  $T_{\text{бп}}^{1''} = \text{const}$ ) в группе, или по скважности следования  $S$  (крутизне их градиента наклона  $\theta$ ).

*На завершающем этапе (шаг 12, рис. 3) осуществляется передача принятых, декодированных и идентифицированных на предыдущих шагах метода команд управления на бортовые исполнительные устройства БТС (РТК).*

### Достижимость цели предложенного метода

Пример достижимости технического результата (цели) предложенного метода управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех можно продемонстрировать спектрограммами рис. 13, из которых видно, что в случае сложной помеховой обстановки в канале управления, а также при малой длительности БП, их возможно восстановить по фрагментарным данным методом экстраполяции (рис. 11). При этом все современные РПУ имеют возможность цифровой обработки и анализа принимаемой информации. Восстановление принятых ДЛЧМ-сигналов по фрагментарным данным при потере нескольких частотных чипов в БП приведено на рис. 13 а) б), где из восьми частотных чипов уверенно идентифицированы два.

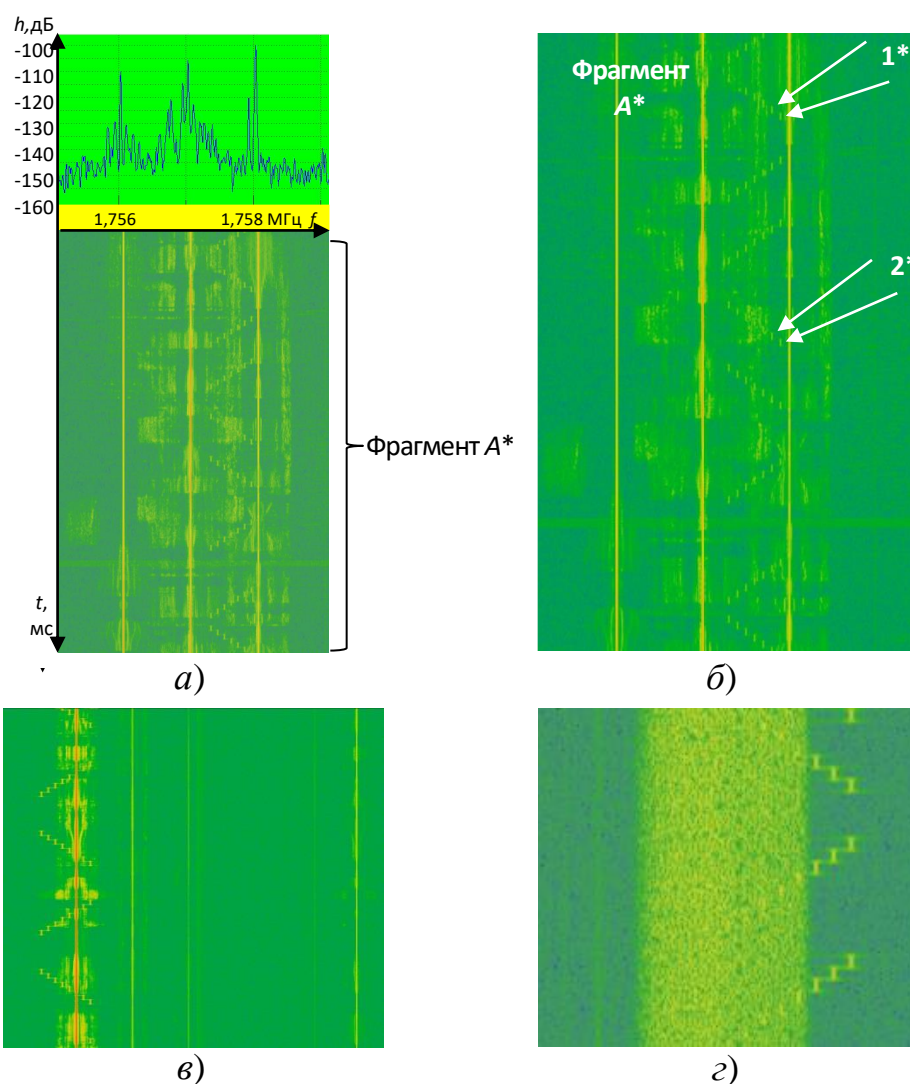


Рис. 13. Фрагменты спектрограмм многочастотных ДЛЧМ-сигналов бинарных посылок команд управления в частотном диапазоне 1,757 – 1,758 МГц (а, б), под мощными сосредоточенной (в) и шумовой (г) помехами

Так из детализации фрагмента  $A^*$  данного рисунка видно, что все принятые бинарные посылки информационной последовательности (команды управления) могут быть восстановлены даже без специальных инструментальных методов повышения помехоустойчивости, несмотря на то, что превышение мощности помехи над сигналом составляет 20 дБ (рис. 13 а). Рассматривая подробно данную спектрограмму, можно констатировать, что если при уровне сосредоточенной помехи на 20 дБ превышающим уровень сигнала и мощной шумовой помехе в принимаемой БП большинство частотных чипов не будут приняты (приняты лишь два из восьми, обозначенные цифрами 1\* и 2\* на фрагменте  $A^*$ ), то ИНС РПУ БТС позволит на командной радиолинии уверенно восстановить «левый» или «правый» градиенты наклона данных БП, см. спектрограммы рис. 13 б) во фрагменте  $A^*$  частотные чипы 1\* и 2\*. Для сравнения на рис. 10 б) и в) при трансляции сигналов в коде азбуки Морзе (режим АТ) в случае воздействия сосредоточенных и шумовых помех с аналогичными параметрами автоматический, так же как и слуховой прием, невозможны. При этом на фрагментах рис. 13 в) и г) также наблюдается уверенное восстановление частотных чипов БП информационной последовательности команды управления при превышении мощности сосредоточенной помехи ( $h_{\text{п}} = -130$  дБ) над мощностью полезного сигнала ( $h_{\text{с}} = -90$  дБ) на 40 дБ, и, соответственно, в случае превышения мощности шума ( $h_{\text{ш}} = -120$  дБ) над мощностью сигнала ( $h_{\text{с}} = -110$  дБ) – на 10 дБ.

### Направления дальнейших исследований и выводы

Описание представленного в статье метода управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех не смогло охватить весь спектр решаемых задач по его реализации на практике. Поэтому перечислим лишь некоторые, наиболее важные на взгляд авторов направления дальнейших исследований.

Выбор количества используемых частотных чипов для формирования одной бинарной посылки команды управления является самостоятельной оптимизационной задачей и для адаптивных CRS-радиосистем может варьироваться в зависимости от состояния радиоканала или от преднамеренного воздействия. На приведенных в работе примерах с демонстрацией спектрограмм физического моделирования показаны информационные бинарные посылки, состоящие из восьми частотных чипов, рис. 5-8 и 11-13, что существенно повышает помехоустойчивость предлагаемого метода. Это связано с тем, что, к примеру, в дециметровом диапазоне волн, используемом в интересах формирования трактов управления БТС в виде ГПО морского (речного), воздушного и наземного базирования, осуществляющих междугородние грузоперевозки или обеспечивающие межконтинентальные транспортные потоки, вероятность одновременного глубокого замирания сигнала на такой полосе частот ЛЧМ-сигналов существенно ниже вероятности столь же глубоких замираний в полосе частот каждого из передаваемого частотного чипа в отдельности. Наличие двух простран-



ственных фильтров (ПФ) ПФ-0 для приема бинарных посылок с информационным нулём («0») и ПФ-1 для приема бинарных посылок с информационной единицей («1») значительно повышает вероятность приёма за счёт автоматически решаемой искусственной нейронной сетью бортового радиоприёмного устройства БТС задачи сравнительной оценки правдоподобия объектов.

Как видно из рис. 11, фрагменты *в*), *г*) и *д*), и рис. 13 б), фрагменты 1\* и 2\*, минимальное число частотных чипов, необходимых для надежного восстановления бинарной посылки с определением градиента её наклона (линейно возрастающего или убывающего законов дискретного изменения частоты) на приемной стороне, равно двум, поскольку любой наклон отрезка можно определить всего по двум его точкам. Это говорит о том, что в случае сложной помеховой обстановки или при наличии глубоких замираний, способных поразить весь частотный чип (или даже несколько частотных чипов), входящий в сформированную бинарную посылку команды управления, для её идентификации (восстановления) на приёмной стороне достаточно сохранения (приёма) всего двух частотных чипов, по которым блок интеллектуального анализа бортового РПУ достоверно определит градиент наклона бинарной посылки.

На сегодня все известные способы приема и декодирования сигналов, передаваемых в режиме ППРЧ требуют автоматизации и наличия системы единого времени (СЕВ). Это касается и рассмотренного в работе метода управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех на основе передачи ДЛЧМ-сигналов в режиме ППРЧ. Мало того, использование режима так называемой быстрой (внутрибитовой) ППРЧ на глобальных радиоперелиниях (расстояниях) без дорогостоящей СЕВ не представляется возможным, тем более при длительности передачи частотного чипа бинарной посылки команды управления в заявленном методе в 10-20 мс. Поэтому еще одним направлением исследования, в части развития предложенного метода, является осуществление синхронизации в командной радиоперелинии без установки на борту БТС СЕВ, а лишь за счет ввода в команду управления после трансляции каждого повтора группы частотных чипов межзнаковых интервалов, составляющих бинарную информационную посылку («0» или «1»). По аналогии с СКК азбуки Морзе, где длина интервала между группами «точек» и «тире» составляет 210 мс, при передаче команды управления рассматриваемым методом в режиме ППРЧ (СКК на основе ДЛЧМ-сигналов) этот межзнаковый интервал может быть соизмерим со временем трансляции одной бинарной информационной посылки («0» или «1»), например 40-80 мс. При этом отсутствие дорогостоящей СЕВ на борту БТС является существенным преимуществом, и совместно с применением алгоритмов согласованной цифровой фильтрации на основе ППФ, методов экстраполяции и нейрообработки при последующей идентификации команды управления, позволяет автоматически восстанавливать принятые бинарные посылки по фрагментарным данным.

Как отмечалось выше, в предложенном методе при ограничении доступного частотного ресурса, рис. 2, на пункте управления или СЦУ БТС возможно использование модуля CRS-системы. Его когнитивные возможности определения свободных частотных промежутков в выделенном диапазоне волн для по-

следующего их использования на вторичной основе (в то время когда эти участки диапазона не заняты работой передающих устройств первичных пользователей) [12] могут пригодиться для формирования набора частот в интересах построения структуры ПСП. Впервые о таком рациональном использовании частотного ресурса было заявлено в стандарте IEEE 802.22 в 2011 г. Вопрос возможностей безлицензионного использования частотного ресурса обсуждается практически на всех Всемирных конференциях радиосвязи последнего десятилетия. Действительно, исследования Федеральной комиссии связи (FAC) США показали. Что «... спектр, как драгоценный природный ресурс, используется недостаточно эффективно» [17]. Значительно повысить коэффициент использования диапазонов радиоволн призваны механизмы динамического управления частотным спектром, обоснованно предоставляя вторичным пользователям, которые не закреплены за данным диапазоном, возможность передавать сообщения на участках диапазонов первичных пользователей во время отсутствия на них работы штатной передающих устройств [12]. Описание таких CRS-систем когнитивного радио, способных к познанию и самообучению, было представлено еще в 1999-2000 гг. Д. Митоллой [18]. Принципы когнитивности радиосистем, заявленные им и предопределяющие возможность применения такого подхода, в административном смысле предполагают вторичное использование радиочастотного спектра (РЧС), а технологически – в развитии адаптивных радиосистем в части расширенной реализации номиналов радиочастот и полос частотного диапазона [13]. Система когнитивного мониторинга РЧС была предложена в [8] и, по мнению авторов, является самостоятельным направлением исследований.

Также к самостоятельным направлением исследования, касающимся повышения скорости доведения управляющей информации в отношении предложенного метода управления БТС является применение алгоритмов многоканальной передачи и многоканального приема в трактах управления, при наличии свободного канального ресурса. При наличии на борту БТС (РТК) и на пункте управления транспортными потоками (в ситуационном центре) только одного выделенного канала управления с транспортной единицей, команды управления передаются последовательно, а при наличии свободного канального ресурса данные команды могут передаваться одновременно на БТС (РТК) каждая в своем выделенном канале траекторного наведения или канале командной информации, с трансляцией в параллельном режиме (на шаге 8 рис. 2 не показано). Это позволяет повысить оперативность управления БТС (РТК) при ограничениях во времени, например, на высокой скорости движения, на завершающем этапе миссии (парковка, швартовка, погрузка/выгрузка, при наведении на цель и пр.). При этом процесс передачи БП команд управления в предлагаемом методе аналогичен представленному в [8].

Как видно из многочисленных публикаций по данному вопросу, потенциал многоканальных возбуждающих и приемных SDR-радиоустройств еще далеко не исчерпан [8, 12, 14, 21, 22], в том числе и в интересах технологий управления активно развивающимися беспилотными транспортными системами.

## Литература

1. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf>.
2. Будко Н. П., Будко П. А., Ключин 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.
3. Будко П. А., Жуков Г. А., Кулешов И. А., Николашин Ю. Л. Методы и каналы управления робототехническими комплексами морского базирования в гетерогенной среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 4 (17). С. 28-40.
4. История отечественных средств связи / Под ред. А.С. Якунина. – М.: ЗАО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 576 с.
5. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. – М.: Изд-во «Горячая линия – Телеком», 2007. – 432 с.
6. Беккиев А. Ю., Борисов В. И. Базовые принципы создания помехозащищенных систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1. С. 3-16.
7. Будко П. А., Будко Н. П., Винограденко А. М. Способы повышения помехоустойчивости в автоматизированных системах контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 176-211. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10206.
8. Будко Н. П., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жолдасова А. Е., Жуков Г. А., Кулешов И. А., Мальцев Д. С., Мирошников В. И., Николашин Ю. Л., Фатюхин И. Н. Способ передачи и приема бинарной информации по каналам радиосвязи в неавтоматическом режиме (Варианты) // Патент RU № 2605045 от 20.12.2016, бюл. № 35. 31 с.
9. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks // III International scientific Conference «Communications in computing and information Science» (Convergent'2018). Moscow, 2018, Vol. 1140. Springer, Cham. P. 200-210. doi: 10.1007/978-3-030-37436-5\_18.
10. Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Samoylenko I. V., Sharipov I. K., Anikuev S. V. Mathematical aspects of stable state estimation of the radio equipment in terms of communication channel functioning // Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). Moscow, 2019. Vol. 1141. Springer, Cham. P. 547-559. doi: 10.1007/978-3-030-36625-4\_44.
11. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Pedan A. V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of

difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling // Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). Moscow, 2019. Vol. 1141. Springer, Cham. P. 560-573. doi: 10.1007/978-3-030-36625-4\_45.

12. 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 технологии в космических исследованиях Земли. 2015. №1. С. 20-31.

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

14. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолоний. // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2014. № 1. С. 30-37.

15. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 513 с.

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

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

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

19. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

20. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А., Угрик Л. Н. Новое направление создания помехоустойчивых радиолоний декаметрового диапазона волн // Техника средств связи. 2021. № 1 (153). С. 2-26.

21. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Общие принципы построения радиотракта устойчивого доведения информации до исполнительных звеньев глобально перемещающихся объектов. Часть 1 // Морская радиоэлектроника. 2022. № 2 (80). С. 30-35.

22. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Общие принципы построения радиотракта устойчивого доведения информации до исполнительных звеньев глобально перемещающихся объектов. Часть 2 // Морская радиоэлектроника. 2022. № 3 (81). С. 34-38.

## References

1. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-



132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (in Russian).

2. 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.

3. Budko P. A., Zhukov G. A., Kuleshov I. A., Nikolashin Yu. L. Methods and paths of control in heterogeneous environment for robotic complexes of sea basing. *Robotics and technical cybernetics*, 2017, no. 4 (17), pp. 28-40 (in Russian).

4. *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).

5. Galkin V. A. *Cifrovaya mobil'naya radiosvyaz*. [Digital mobile radio communications]. Moscow, Hotline – Telecom Publishing House, 2007. 432 p. (in Russian).

6. Bekkiev A. Yu., Borisov V. I. *Bazovye printsipy sozdaniya pomehozashchishyonnykh sistem radiosvyazi* [Basic Principles of Creation of Noise-Proof Radio Communication Systems]. *Theory and technique of radio communication*, 2014, no. 1, pp. 3-16 (in Russian).

7. Budko P. A., Budko N. P., Vinogradenko A. M. Ways to increase noise immunity in automated control systems. *Sistems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 176-211 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2020-10206.

8. Budko N. P., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zholdasova A. E., Zhukov G. A., Kuleshov I. A., Maltsev D. S., Miroshnikov V. I., Nikolashin Yu. L., Fatyukhin I. N. *Sposob peredachi i priema binarnoj informacii po kanalam radiosvyazi v neavtomaticheskom rezhime (Varianty)* [Method of transmitting and receiving binary information via radio communication channels in non-automatic mode (Variants)]. Patent Russia, no. 2605045, 2016 (in Russian).

9. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks. III International scientific Conference «Communications in computing and information Science» (Convergent'2018). Moscow, 2018, v. 1140, Springer, Cham., pp. 200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5\_18.

10. Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Samoylenko I. V., Sharipov I. K., Anikuev S. V. Mathematical aspects of stable state estimation of the radio equipment in terms of communication channel functioning. Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). Moscow, 2019, v. 1141, Springer, Cham., pp. 547-559. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4\_44.

11. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Pedan A. V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling. Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks:

control, computation, communications» (DCCN-2019). Moscow, 2019, v. 1141, Springer, Cham., pp. 560-573. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4\_45.

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

13. Kizima S. V., Mitchenkov S. G., Emelyannikov B. B. Cognitive radio technology. Aspects of the practical implementation. *Electrosvyaz*, 2014, no. 9, pp. 43-47 (in Russian).

14. 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).

15. Gonorovskiy I. S. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly* [Radio engineering circuits and signals]. Moscow, Radio and Communications, 1986. 513 p. (in Russian).

16. Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Electronic warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2013. 360 p. (in Russian).

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

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

19. Sergienko A. B. *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg, Peter Publ., 2002. 608 p. (in Russian).

20. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A., Ugrik L. N. A new direction for creating noise-resistant radio lines in the decameter wave range. *Means of communication equipment*, 2021, no. 1 (153), pp. 2-26 (in Russian).

21. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. General principles for constructing a radio path for sustainable communication of information to the executive units of globally moving objects. Part 1. *Marine radio electronics*, 2022, no. 2 (80), pp. 30-35 (in Russian).

22. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. General principles for constructing a radio path for sustainable communication of information to the executive units of globally moving objects. Part 2. *Marine radio electronics*, 2022, no. 3 (81), pp. 34-38 (in Russian).

Статья поступила 26 ноября 2025 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, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5, корп. 7.

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

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

Зацепин Тимофей Андреевич – студент. Государственный университет авиационного приборостроения. Область научных интересов: методы управления беспилотными транспортными системами. E-mail: slash1@inbox.ru

Адрес: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

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

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

---

## A method for controlling unmanned transport systems based on noise-resistant signal-code structures in conditions of concentrated and noisy interference

D. D. Budko, P. A. Budko, T. A. Zatsepin, A. D. Klimenko

**Problem statement:** the use of unmanned transport systems is now widely used in all areas of human activity in space, on earth, in air, surface and underwater spaces. However, the use of such systems over global distances, in cities and within large industrial centers is associated with the use of wireless technologies based on radio channels of various wave ranges on their control paths, which, in turn, are susceptible to the destructive effects of various kinds of destabilizing factors in the form of interference, noise, etc. The article sets the task of developing a method for controlling unmanned transport systems based on noise-resistant signal-code structures in conditions of concentrated and noise interference. **The purpose of the work:** to ensure noise immunity of channels and control paths of unmanned transport systems in conditions of concentrated and noisy interference due to such methods used as spectrum expansion with a change in operating frequency according to a pseudo-random law, spectrum expansion by direct sequence method and spectrum expansion by linear frequency modulation method. Also, **the methods used** in the study include digital filtering methods, identification of control commands by extrapolation and neuro-processing methods. **The main results** of the study include an increase in the noise immunity of signals from control paths of unmanned transport systems in conditions of their use in large urban and industrial agglomerations (factories, ports, logistics centers, transport hubs, etc.). Additional effects of the method proposed in the work can include issues of ensuring energy secrecy and information security of control signals in the interests of the country's transport industry as a critical infrastructure, as well as automating the identification of accepted control commands by means of coordinated filtering and digital signal processing. **The novelty** of the work consists in a set of essential features in the formation of control channels for an unmanned transport system in azimuth (course), direction (speed) of movement and angle (pitch) based on multi-frequency discrete signal-code structures consisting of  $n$  chips with a constant discretely increasing or discretely decreasing frequency change at specified time intervals, corresponding to binary parcels and transmitted in the mode of changing the operating frequency according to a pseudo-random law, and received by converting to the original frequency form using a reverse pseudorandom code. **The practical significance** of the method is to increase the noise immunity of the control path of unmanned transport systems, as well as robotic complexes or robotic platforms of various types based in conditions of random and intentional interference concentrated along the spectrum, as well as industrial noise and interference.

**Key words:** control path, linear frequency-modulated signal, robotic complex, signal-code design, spectrum expansion by frequency jumps, trajectory guidance channel, unmanned transport systems.

### Information about 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, st. Dvinskaya, bldg. 5/7.

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

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

*Timofey Andreevich Zatsepin* – Student. State University of Aviation Instrumentation. Research interests: methods of managing unmanned transport systems. E-mail: slash1@inbox.ru

Address: 190000, Russia, St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya, bldg. 67, lit. A.

*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: anutikaaa@mail.ru

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