

УДК 621.61; 623.61

Способы устойчивого доведения информации по каналам с переменными параметрами

Жуков Г. А., Будко Н. П.

Постановка задачи: статья посвящена разработке способов доведения информации до удаленных объектов с помощью параллельной передачи сверхзаканосных сигналов в режиме перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону. **Целью работы** является повышение эффективности функционирования радиолиний декаметрового диапазона волн, использующих передачу блоков сообщений способом параллельного побитного излучения сверхзаканосных сигналов. **Используемые методы:** технологии построения когнитивных радиосистем и перепрограммируемых радиоустройств, методы теории потенциальной помехоустойчивости, оптимальные алгоритмы и методики совместной обработки сигналов при их параллельном приеме, способы проектирования многоканальных приемо-передающих технических средств (многоканальных модемов), способы снижения пик-фактора сигнала в декаметровом радиоканале, методы кодирования и декодирования информации. **Новизна** состоит в определении класса сверхзаканосных радиосигналов, частотная полоса которых существенно меньше частотной полосы доплеровского смещения в ионосферных слоях при дальнем распространении радиоволн, а также в разработке способов обнаружения и приема сверхзаканосных сигналов, включая прием в условиях случайных и преднамеренных помех. **Результаты:** проведен анализ и дана оценка помехоустойчивости широкополосных, узкополосных и сверхзаканосных радиосигналов. Разработан способ устойчивого доведения коротких блоков данных по каналам с переменными параметрами, к которым относятся радиоканалы декаметрового диапазона волн. Данный способ состоит из алгоритмов параллельной передачи сверхзаканосных сигналов в режиме перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону, а также параллельного приема и демодуляции бит сообщения с учетом доплеровского смещения рабочей частоты в точке приема. Показана схемная реализация радиопередающего и радиоприемного комплексов формируемой радиолинии (информационно-телекоммуникационной системы). Представлены особенности приема сверхзаканосных сигналов с различными видами модуляции в условиях случайных и преднамеренных помех. **Практическая значимость** состоит в построении радиолиний управления с расширением диапазона рабочих частот в область ультракоротких волн, позволяющей обеспечить прием в условиях сложной помеховой обстановки при любом реальном значении оптимальной рабочей частоты, в том числе и при аномальной ионизации в ионосфере. Предлагаемые подходы и принципы построения радиосистем позволяют перейти к реализации низкоэнергетических радиолиний нового класса, использующих передачу сообщений способом параллельного побитного излучения сверхзаканосных сигналов.

Ключевые слова: декаметровая радиолиния, помехоустойчивость, широкополосный сигнал, узкополосный сигнал, сверхзаканосный сигнал, перестройка рабочих частот по псевдослучайному закону, эффект Доплера.

Введение

Несмотря на бурное развитие в новом тысячелетии волоконно-оптических, спутниковых и радиорелейных систем передачи, традиционно от-

Библиографическая ссылка на статью:

Жуков Г. А., Будко Н. П. Способы устойчивого доведения информации по каналам с переменными параметрами // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 271-297. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10410

Reference for citation:

Zhukov G. A., Budko N. P. Methods of Sustainable Delivery of Information through Channels with Variable Parameters. Systems of Control, Communication and Security, 2020, no. 4, pp. 271-297 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10410

носящихся к высоконадежным каналам телекоммуникаций, радиосвязь продолжает сохранять важное значение в обеспечении оперативного и устойчивого управления удаленными территориями и перемещающимися в пространстве объектами. Такие её важные отличительные особенности как обеспечение прямой связи на глобальные удаления при минимальных затратах сил и средств, высокая гибкость и мобильность выделяет радиосвязь как важную составляющую резервирования основных каналов и трактов ведомственных (корпоративных), государственные и межнациональных информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС), включая глобальную сеть Internet.

В тоже время, условия функционирования и общие принципы построения существующих сетей радиосвязи выдвигают на первый план недостатки данного рода связи (с точки зрения её классификации), незаслуженно отодвигающие применимость декаметрового диапазона волн (ДКМВ) на второстепенные роли в ИТКС общего назначения. Такими причинами являются:

- существенная загрузка ДКМВ диапазона случайными помехами;
- значительная подверженность среды распространения радиоволн влиянию регулярных и нерегулярных изменений, вызывающих быстрые и медленные замирания радиосигнала;
- открытость системы радиосвязи в плане доступности частотного ресурса радиоэлектронному подавлению;
- высокая инерция подсистемы управления системы радиосвязи, выражающаяся в медленной её реакции на поступающие заявки для передачи оперативных сообщений и др.

В связи с чем актуальными являются исследования по повышению эффективности функционирования сетей радиосвязи и отдельных радиолиний, проводимые в последние годы [1-4].

Странами Северо-Атлантического альянса развитие декаметровой (ДКМ) радиосвязи рассматривается важным фактором в обеспечении надежного и непрерывного управления войсками в условиях сетецентрической войны. При этом дальнейшее развитие получают как системы когнитивного радио (Cognitive Radio Systems – CRS) и SDR-технологии (Software Defined Radio), так и более совершенные системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Исходя из этого, а также учитывая территориальный масштаб и удаленность регионов России, наличие её национальных интересов на арктическом шельфе, в морской и океанской зонах и тенденции по необходимости повышения требований к достоверности, скрытности и своевременности доведения команд управления до удаленных стационарных и глобально перемещающихся объектов (ГПО) различного назначения, представляется актуальным поиск путей повышения устойчивости связи при использовании ДКМ радиолиний.

Целью статьи является разработка эффективных способов управления удаленными объектами, обеспечивающих заданные требования по вероятностно-временным характеристикам (ВВХ) доведения информации с использованием параллельной передачи сверхузкополосных сигналов в режиме перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону (ППРЧ).

1. Основные элементы декаметрового тракта связи информационно-телекоммуникационной системы

На рис. 1 представлена укрупненная структурная схема ИТКС в виде автоматизированной системы обмена данными (АСОД) пунктов управления (ПУ) с удаленными объектами при использовании радиолиний декаметрового диапазона волн [2, 5].

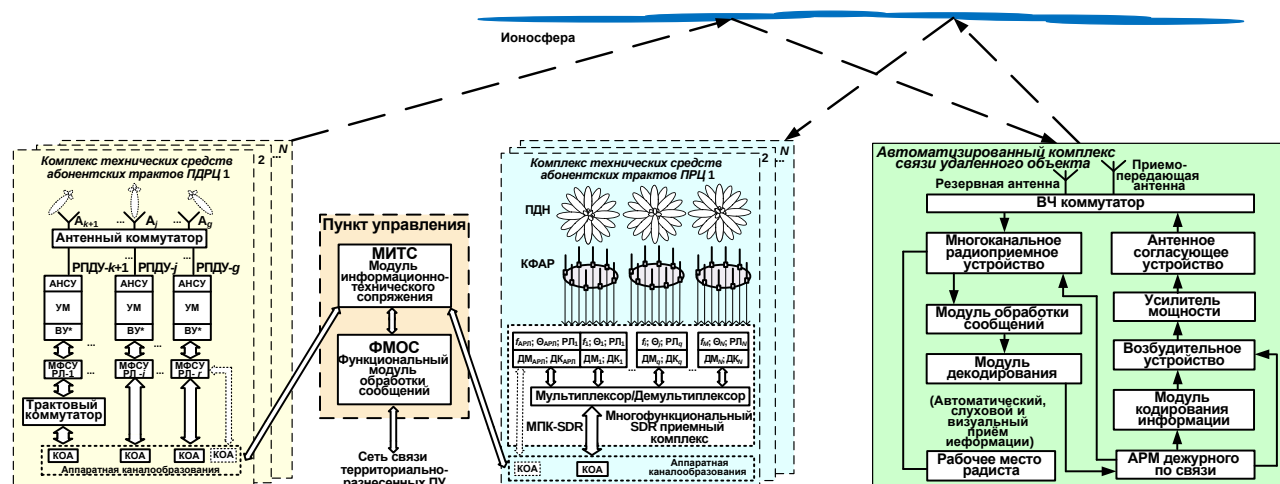


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы обмена данными с удаленными объектами (А – антенна; АНСУ – антенное согласующее устройство; УМ – усилитель мощности; МФСУ – многофункциональное согласующее устройство; КОА – каналообразующая аппаратура; ДМ – демодулятор; ДК – декодер; ВЧ – высокая частота; АРМ – автоматизированное рабочее место)

Как показывают ряд экспериментальных исследований и результаты расчетов, комплексное использование в ИТКС территориально-разнесённых приёмных (ПРЦ) и передающих (ПДРЦ) радиоприёмных (РПУ) и возбуждающих устройств (ВУ), способов частотно-разнесённой передачи сообщений, современных радиопередающих устройств (РПДУ) и антенно-фидерных подсистем, приёмных кольцевых фазированных антенных решёток (КФАР) с возможностью цифрового формирования «веера» парциальных диаграмм направленности (ПДН), а также оптимальных алгоритмов и способов совместной обработки принятых копий сообщений [6-8] позволяет обеспечить энергетический контакт с удаленными стационарными и ГПО даже в условиях замираний сигнала при ионосферном распространении радиосигнала, а также воздействия случайных и преднамеренных помех [9]. Вместе с тем, без внедрения новых и перспективных способов формирования и обработки сообщений в РЛ реализовать в ИТКС современные требования к ВВХ по доведению команд управления до удаленных объектов и ГПО, а также приёму от них на ПУ донесений весьма затруднительно.

Одним из основных решений по повышению устойчивости обмена данными между ПУ и удаленными ГПО является использование адаптивных радиолиний [10-12]. Применение в них вызывных сигналов, зачастую используемых в том

числе и для зондирования ионосферы при выборе оптимальных рабочих частот в режиме реального времени, позволяет оптимизировать структуру декаметровых каналов связи с вероятностью приёма информации не хуже заданной. В тоже время, для выполнения повышенных требований по скрытности обмена данными между ПУ и удалёнными объектами, как правило, используются симплексные радиолинии.

На сегодня при построении таких радиолиний в качестве основного их режима работы используется режим передачи с применением перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону [13]. При этом выполнение требований к своевременности доведения информации в тракте решают за счёт применения высокоскоростных радиоканалов.

В настоящее время имеется возможность реализации двух основных подходов к идеологии построения радиолиний ППРЧ: с использованием «последовательных» и «параллельных» модемов. Этапы развития данных основных подходов и возможности по дальнейшему их развитию изложены в [14].

В тоже время дискуссия в научных кругах и на радиолюбительских форумах глобальной сети Интернет о приоритетах в использовании тех или иных модемов для ДКМ каналов продолжается. С учётом существенных успехов в развитии и применимости SDR технологий представляется целесообразным реализация «сдвоенного» модема, осуществляющего режимы как последовательной, так и параллельной работы с последующей их оценкой эффективности по результатам трассовых испытаний. Полученный эффект от объединения различных способов передачи/приёма и обработки информации был проверен в ходе натурного эксперимента при проведении сравнительных трассовых испытаний системы когерентного и весового мажоритарного сложения при пространственно-разнесенном приёме [15, 16]. Структурная схема экспериментальной установки и результаты проведения испытаний представлены соответственно на рис. 2 и в таблице 1.

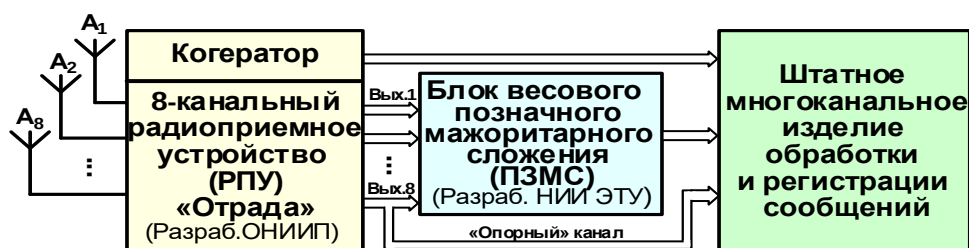


Рис. 2. Структурная схема проведения сравнительных трассовых испытаний

Таблица 1 – Результаты сравнительных трассовых испытаний

	«Опорный» канал	Когератор	ПЗМС	Совместная обработка
Вероятность безошибочного приёма сообщения из 200 знаков	0,52	0,81	0,85	0,93

Некоторый «проигрыш» «когерентного» сложения обусловлен наличием быстрых «замираний» сигнала в ДКМ канале связи с последующим изменением

фазовых соотношений при возрастании сигнала, требующих перестройки комплексных весовых коэффициентов «когератора». При этом необходимо подчеркнуть, что подключение выхода «когератора» в качестве одного из входов блока позначного мажоритарного сложения (ПЗМС), как показано в таблице 1 позволило сократить значение вероятности неприёма сообщения более чем в 2 раза ($K_{\text{и}} = 0,15/0,07$).

2. Оценка помехоустойчивости декаметровых радиолиний с использованием широкополосных сигналов

Как известно из [17], при оптимальной обработке сигнала (корреляционный приём или согласованная фильтрация) в условиях белого гауссовского шума помехоустойчивость радиосвязи можно определить значением отношения энергии принимаемого сигнала E к спектральной плотности мощности белого шума ν^2 через параметр

$$h^2 = \frac{E}{\nu^2} = \frac{P \cdot T}{\nu^2} = \frac{P \cdot T}{\nu^2} \cdot \frac{F}{F} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot FT = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot B, \quad (1)$$

где P – мощность сигнала, T – длительность сигнала, F – занимаемая частотная полоса сигнала.

Независимость значения h^2 от частотной полосы F , занимаемой сигналом, хорошо просматривается в выражении (1) из представленных в подчеркнутом равенстве промежуточных математических выкладок.

Как отмечалось в [17] «... не следует, однако думать, что применение широкополосных сигналов (сигналов с большой базой) позволит уменьшить мощность передатчика при заданной верности приёма...», «... уменьшить вероятность ошибки при заданной мощности передатчика можно лишь ... путём уменьшения ν^2 , либо, наконец, путем увеличения T (замедляя передачу)...». Из чего следует, что увеличение базы сигнала ($B = FT$) за счёт увеличения полосы F не влияет на помехоустойчивость в условиях действия только белого гауссовского шума.

В тоже время, расширение частотной полосы F , занимаемой сигналом, зачастую имеет значительные преимущества перед «узкополосными» сигналами (с базой сигнала $B \approx 1...2$), в том числе и по такому параметру, как скрытность передачи [18-20]. Учитывая это, в начале 80-х годов прошлого века был проведен сравнительных эксперимент с трассовыми испытаниями модема с штатной «узкополосной» радиолинией и РЛ с широкополосным (шумоподобным, сложным) сигналом (ШПС) с привлечением действующего пункта радиоконтроля. Опытный образец декаметровой радиолинии с ШПС на базе кода Фрэнк с $B \approx 80$ (руководитель разработки Цикин И.А. – профессор СПбПУ [21]) в ходе испытаний позволил сделать основные выводы по возможности применения широкополосных сигналов в ДКМ канале связи:

- 1) Нестационарность декаметрового канала связи, также, как и для когерентного сложения, не позволила получить ожидаемый теоретический выигрыш в случае применения модема с ШПС.
- 2) Увеличение базы сигнала (B) за счёт расширения его частотной полосы (F) ограничено из-за нарушения частотно-фазовых соотношений в

принимаемом сигнале после отражения от ионосферных слоёв, и, как следствие, приводит к снижению эффективности функционирования согласованного фильтра.

- 3) Увеличение базы сигнала (B) за счёт повышения длительности элемента сообщения ведет к нарушению заданных требований по оперативности доведения команды управления.
- 4) С учётом вышеизложенного, при ограниченной базе сигнала (B) из-за глубоких селективных замираний в декаметровом канале связи используемая мощность РПДУ, обеспечивающая необходимое качество приёма сообщения, приводит к росту вероятности обнаружения излучения пунктом радиоконтроля, а, следовательно, и к снижению скрытности передачи в целом.
- 5) Учитывая вышеизложенное, Заказчиком были приостановлены работы по внедрению ШПС сигналов для дальней декаметровой связи. В тоже время, необходимо отметить, что для более высокого диапазона частот (свыше 150...300 МГц) широкополосные сигналы получили активное распространение в радиолокации и связи, особенно в последние годы (Wi-Fi, WiMax, Zig Bee и др.).

3. Применение многоканальных SDR радиоприемных и возбуждательных устройств для реализации новых радиолиний

Режим работы с ППРЧ на сегодня реализуется практически во всех существующих радиолиниях и вновь создаваемых радиостанциях ДКМВ-УКВ диапазона. При этом передача элементов сообщения осуществляется последовательно во времени (рис. 3).

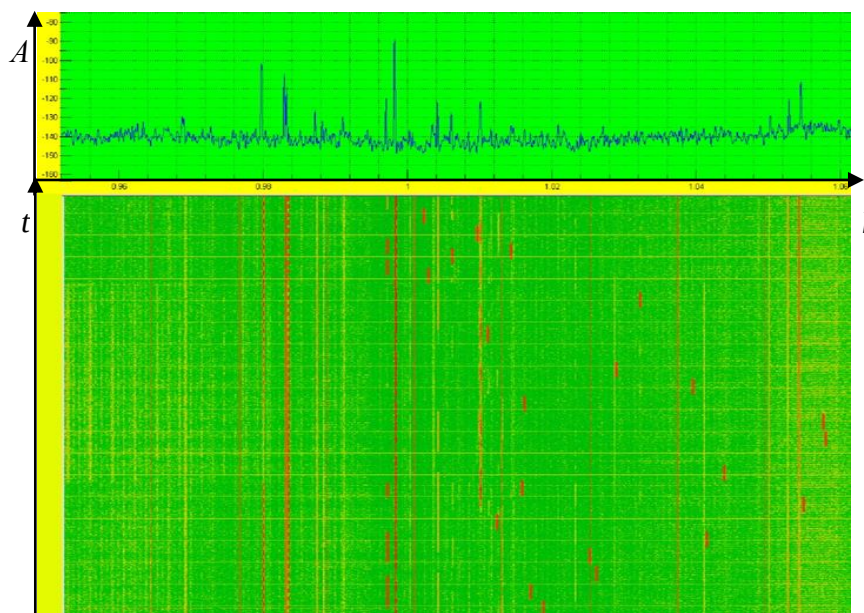


Рис. 3. Фрагмент спектрограммы передачи сообщения по группам двоичных элементов в режиме ППРЧ

Чтобы снизить вероятность приёма обнаруженного сеанса связи при уменьшении времени передачи блока сообщения до значений меньше времени ре-

акции (τ_p) «постановщиков помех» в ряде случаев ими могут быть применены широкополосные заградительные помехи. Однако, если всё сообщение возможно будет передать за время передачи одного бита $T_{\text{бит}} < \tau_p$ (т. е. за период меньше времени реакции средств постановки помех), то даже в случае обнаружения начала передачи вероятность того, что сеанс связи можно сорвать будет пренебрежимо мала (см. рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент спектрограммы параллельной передачи блока сообщения в режиме ППРЧ

Очевидно, что реализация такого режима (передача всего сообщения за время передачи одного бита) потребует использование многоканальных приемопередающих технических средств (многоканальных модемов). Существенный прогресс в развитии SDR технологии уже в наше время позволяет реализовать «мегаканальные» радиоприемные и возбуждающие устройства [7, 22]. К примеру, на рис. 5 представлен фрагмент спектрограммы функционирования многоканальной ДКМ радиолинии в режиме передачи изображений (разработка группы специалистов Военной академии связи и ООО «АДК», г. Санкт-Петербург).

Одновременно с SDR-технологиями создания многоканальных ВУ и РПУ, для обеспечения эффективности ДКМ радиолиний на глобальных дальностях связи с сохранением заданной вероятности ошибки на бит сообщения для режима параллельной их передачи (см. рис. 4) важно сохранить соответствующую мощность излучения каждого бита сообщения, такую же, как для режима последовательной передачи (см. рис. 3). Действительно, если мощность излучения РПДУ была равна 1 кВт ($P_1 = 1$ кВт), то для параллельной передачи сообщения объемом $N = 1000$ бит с учетом пик-фактора многочастотного сигнала потребуется передатчик с мощностью $P_N > 1000$ кВт, что на практике трудно реализуемо, да и навряд-ли целесообразно. Одновременно с этим, если для режима параллельной передачи сообщения использовать РПДУ мощностью $P_1 > 1$ кВт, то в этом случае мощность излучения каждого бита сообщения не

превысит $p_{\text{бит}} = P_1/N$. Тогда для передачи сообщения длиной $N = 1000$ бит, мощность излучения бита будет равна $p_{\text{бит}} \approx 1$ Вт.

В таком случае для сохранения помехоустойчивости связи теоретически необходимо выполнить условие для передачи каждого бита сообщения $h_{\text{паралл.}}^2 \geq h_{\text{послед.}}^2$, т. е. в соответствии с выражением (1), имеем

$$\frac{p_{\text{бит}} T_{\text{бит}}}{v^2} \geq \frac{P_1 \tau}{v^2}, \quad (2)$$

откуда $T_{\text{бит}} \geq N\tau$.

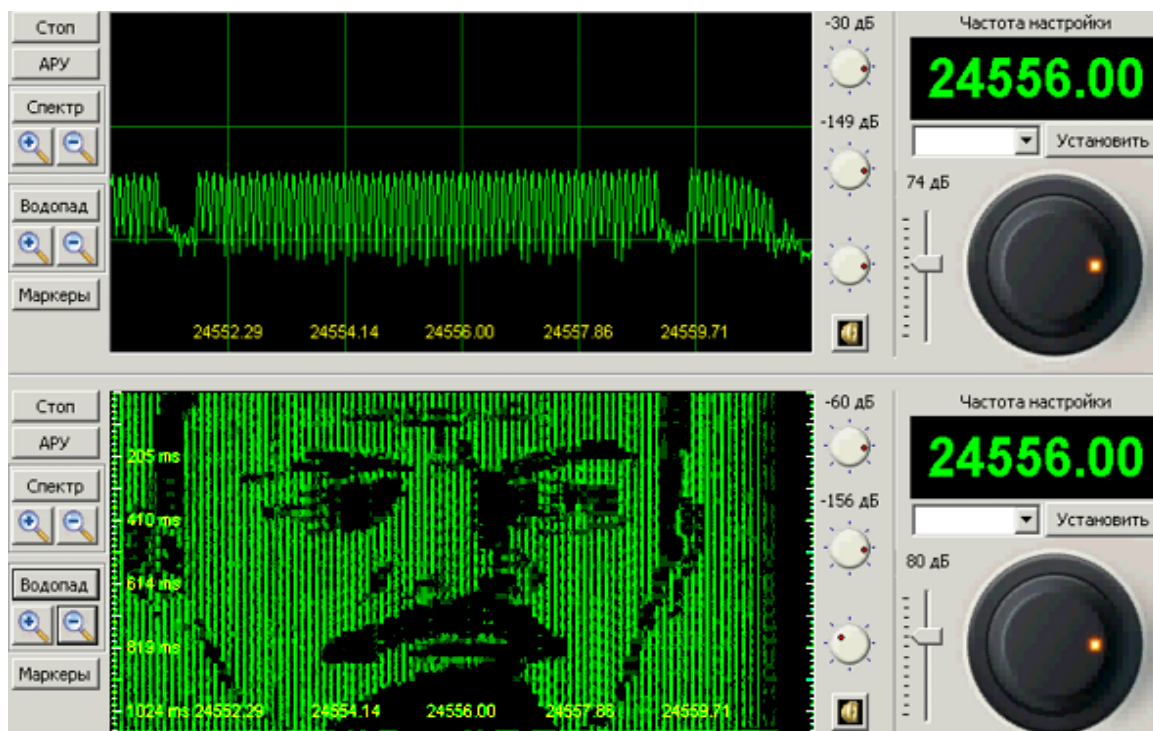


Рис. 5. Фрагмент спектрограммы функционирования многоканальной ДКМ радиолинии в режиме передачи изображений

Исходя из этого, для случая $\tau \approx 5$ мс и длины сообщения $N = 1000$ бит длительность передачи одного бита, а значит и всего сообщения, в режиме, представленном на рис. 4 составит примерно $T_{\text{бит}} \approx 5$ с. А поскольку в этом случае $T_{\text{бит}} > N\tau$, то для обеспечения помехозащищенности передачи сообщения необходимо реализовать его энергетическую скрытность. Как было показано в п. 2 статьи, для декаметрового канала связи сложные ШПС сигналы не в полной мере обеспечивают данное требование, исходя из чего, рассмотрим скрытность узкополосного сигнала. В зависимости от скорости передачи, действующие «узкополосные» радиолинии, как правило, занимают частотный участок от 20...30 Гц (низкоскоростные ДКМ радиолинии) до 1,2...1,5 кГц (так называемые сверхбыстродействующие (СБД) радиолинии).

Для реализации ДКМ радиолинии с параллельной передачей элементов сообщения заданное время проведения сеанса радиосвязи реально может составить 1-2 мин. для передачи 1000 бит информации. Тогда, из соотношения (1) сле-

дует, что увеличив длительность передачи бита сообщения $T_{\text{бит}}$ с $\tau \approx 5$ мс до 100 с, при сохранении h^2 (а соответственно и вероятности правильного приема) можно уменьшить мощность излучения до $P_{\text{бит}} \approx 0,05$ Вт. Причём в данном случае частотная полоса, занимаемая каждым сигналом, при параллельной передаче блока сообщения в режиме ППРЧ, составит около $\Delta f_c \approx 0,01$ Гц.

Из теории и практики радиоконтроля [19, 20] известно, что для энергетического обнаружителя при частотной полосе поиска больше полосы сигнала эффективность падает, а при меньшей полосе в случае нахождения сигнала в ней – практически не снижается. Из чего следует, что для обнаружения сигнала, к примеру, с полосой $\Delta f = 10$ кГц с неизвестной частотой излучения в некотором диапазоне $\Delta F = 1$ МГц (средний диапазон оптимальных рабочих частот для ДКМ радиолиний) теоретически необходимо не более 200 каналов параллельного поиска, а для обнаружения сигнала с $\Delta f \approx 0,01$ Гц – не менее 100 000 000 каналов автоматического поиска сигнала. Это достаточно проблематично с позиции вычислительных возможностей системы обнаружения.

Одним из существенных факторов, определяющих минимизацию «пропуска сигнала» и «ложной тревоги» в системе обнаружения является обеспечение необходимого значения соотношения коэффициента $K = \text{сигнал}/(\text{шум} + \text{помеха})$, определяемого исходя из поставленной системе задачи и при $K < 1$. В случае отсутствия априорных сведений о рабочих частотах и времени начала сеанса радиосвязи работа системы обнаружения окажется неэффективной, и, наоборот, система связи (радиолиния) будет обладать повышенной скрытностью [19].

Дополнительно к изложенному следует подчеркнуть, что также как и для ШПС, для узкополосного радиосигнала существует согласованный фильтр в виде интегратора, обеспечивающий возможность приёма сигнала находящегося ниже уровня шумов ($K < 1$) до окончания процесса интегрирования.

В ходе проведения сеансов связи с временем начала излучения сигнала (и всего сообщения) по псевдослучайному закону, т. е. неизвестному постороннему наблюдателю, попытка обнаружить сигнал с полосой $\Delta f \approx 0,01$ Гц приведет к потоку «ложных тревог» (ошибкам первого рода). Это произойдет в связи с тем, что для потенциального обнаружения «под шумами» важно продолжительное время находиться на значительном количестве «дежурных» частот, но при отсутствии знания времени начала сеанса уже через 10-15 с работы радиолинии на выходах интеграторов обнаружителя появится поток ложных «срабатываний», обусловленных «накоплением» слабых собственных частотных гармоник РПУ обнаружителя, а также побочных излучений от посторонних РПДУ. В связном же приемнике, в силу априорных знаний о времени начала сеанса и матрицы ППРЧ, ошибки такого рода отсутствуют.

Также положительными свойствами радиосигналов с такой сверхузкой полосой является отсутствие межсимвольной интерференции при параллельной побитной передаче всего сообщения и низкие требования к точности системы синхронизации, что позволяет не учитывать расхождение по времени на передающем и приемном комплексах, возникающем при их глобальном взаимном удалении. При этом в радиолиниях с «быстрой ППРЧ» для синхронизации пе-

рестройки РПДУ требуется передача помехоустойчивой преамбулы на пункте управления и РПУ на удалённом объекте связи.

В тоже время, одной из сложных задач, возникающих при реализации радиолинии предлагаемого вида, является учёт смещения спектра принимаемого сигнала по частоте, который обусловлен спорадическим перемещением отражающих передаваемый сигнал слоёв ионосферы, т. н. эффект Доплера. Так, в среднем для протяженных декаметровых радиотрасс доплеровское смещение составляет $\Delta f_d \approx \pm 1,5$ Гц (см. рис. 6 а, б) достигая в периоды восхода и захода Солнца значений $\Delta f_d \approx \pm 4$ Гц.

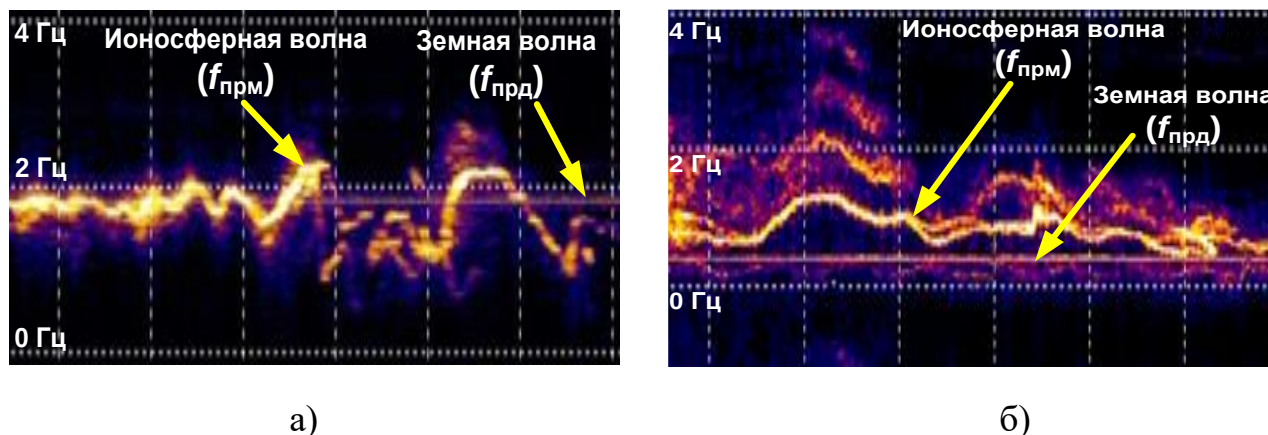


Рис. 6. Спектрограмма фрагмента узкополосного ДКМВ сигнала, принимаемого «Земной волной» и после отражения от ионосферы [23]

Такие смещения спектра сигнала из-за эффекта Доплера практически не влияют на работу штатных узкополосных радиолиний, а потому обычно и не учитываются. Однако, при частотной полосе Δf_c меньше полосы доплеровского смещения Δf_d этот эффект необходимо учитывать при реализации ДКМ радиолинии, см. рис. 7.

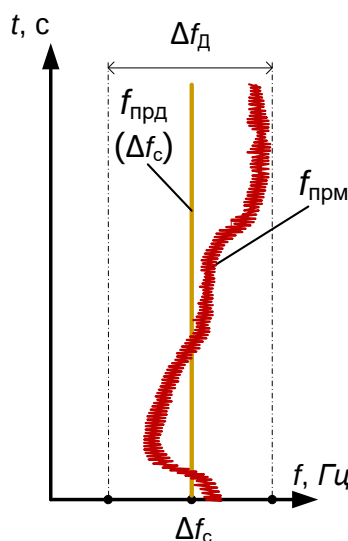


Рис. 7. Влияние эффекта Доплера на «сверхузкополосный» сигнал

В дальнейшем сигналы с такой полосой $\Delta f_c < \Delta f_d$ будем называть «сверхузкополосными».

4. Оценка основных характеристик сигнальной конструкции при использовании узкополосных и сверхузкополосных сигналов

Возможности по применению узкополосных сигналов для передачи информации в декаметровом диапазоне волн, а также эффективность от их использования практически проверялась в 1965 г. специалистами «Radio Corporation of America» (фирма существовала с 1919 по 1989 г.). Натурный эксперимент проводился на односкачковой радиотрассе с использованием РПДУ с мощностью излучения $P_{\text{изл}} \approx 100$ мВт на рабочей частоте $F_{\text{изл}} \approx 15$ МГц. Из-за низкой стабильности задающих генераторов РПУ и РПДУ, разработчикам не удалось полностью реализовать эффект «накопления» сигнала (полоса фильтра РПУ составляла 17 Гц при длительности одного бита $\tau_{\text{бит}} \approx 20$ с). Но даже при таких исходных данных экспериментальной установки в ходе испытаний было зафиксировано, что предложенная технология на 40 дБ улучшает соотношение сигнал/шум по сравнению с традиционной работой в режиме «Азбуки Морзе». В тоже время, сложность обработки сверхузкополосных сигналов на элементной базе того времени и постоянное ужесточение требований к оперативности доставки сообщений, привело к забвению способа медленнодействующей передачи сообщений и не востребовавности его в дальнейшем. Однако, следует отметить, что в конце XX – начале XXI века значительные достижения в развитии элементной базы для цифровой обработки сигналов и массовое внедрение средств вычислительной техники позволило даже в радиолубительской практике вернуться к вопросу эффективной эксплуатации сверхузкополосных сигналов. На сегодня известен режим так называемого сверхмедленного телеграфа (QRSS), при котором радиолубители в диапазоне частот 10,138...10,140 МГц обмениваются информацией на одно-двухскачковых радиотрассах с мощностью РПДУ 10...100 мВт и длительности бита сообщения до 10 с. На рис. 8 представлена визуализация режима работы QRSS-30 [24].

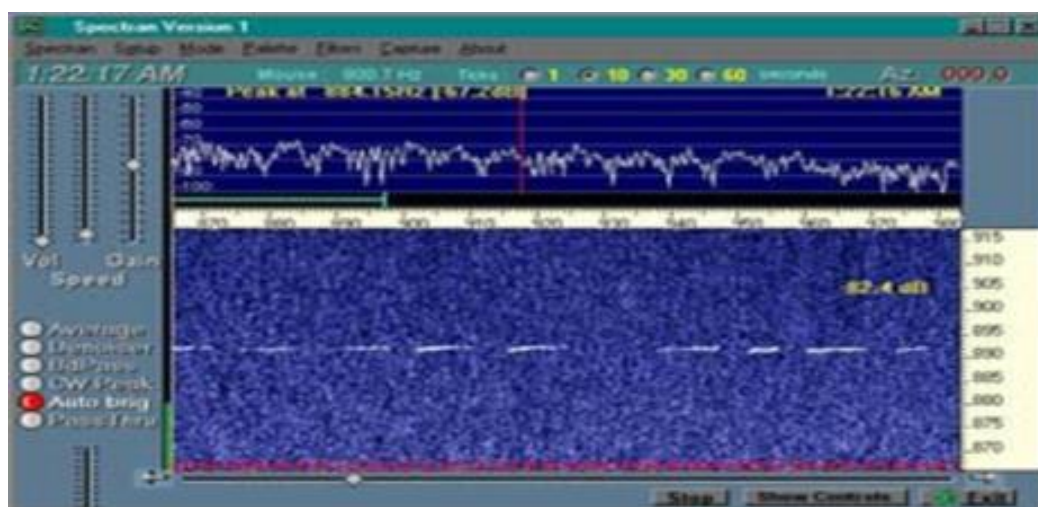


Рис. 8. Режим QRSS-30: при длине «точки» – 30 с, диапазон 10 МГц, $P_{\text{вых}} = 1$ мВт [24]

Как было показано выше, достижения в области создания высокоэффективных радиоэлектронных компонентов, вычислительной техники и «цифровых» технологий, повлияли на возможности по созданию новых радиолиний и позволяют синтезировать сигнально-кодовые конструкции на базе сверхузкополосных сигналов, реализация которых до настоящего времени была проблематична. Так при переходе к современным методам «цифрового» формирования и обработки сигналов стала возможной реализация «мегаканальных» ВУ и РПУ, обладающих необходимыми характеристиками по скорости перестройки рабочих частот, чувствительности, побочным излучениям, энергопотреблению и т. д., а также создание «мультидиаграммных» фазированных антенных решёток (ФАР), обеспечивающих снижение времени доведения сообщения в целом и повышение помехоустойчивости приёма в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех [6, 25-27].

В п. 3 статьи была показана целесообразность реализации декаметровых радиолиний с параллельной побитной передачей сверхузкополосных сигналов в режиме перестройки матрицы рабочих частот по псевдослучайному закону. Как видно из (2) и (3), при фиксированной мощности РПДУ $P_{\text{изл}}$ путём увеличивая длительность T одного бита сообщения в N раз можно без потери помехоустойчивости параллельно передать N заданных элементов сообщения (если при передаче многочастотного сигнала не учитывать пик-фактор)

$$h^2 = \frac{P_{\text{изл}} \cdot T}{v^2} = \frac{\left(\frac{P_{\text{изл}}}{N}\right) \cdot (N \cdot T)}{v^2}. \quad (3)$$

При этом помимо технических трудностей построения радиолинии, обеспечивающей параллельную передачу сообщения большого объёма ($N > 1000$) в режиме ППРЧ, возникает ряд ограничений, связанных с изменяющимися характеристиками сверхузкополосных сигналов, отражённых от ионосферы, что также увеличивает время доставки сообщения. Так на рис. 9 приведены фрагменты спектрограмм, характеризующих варианты изменения параметров сверхузкополосного сигнала из-за влияния эффекта Доплера.

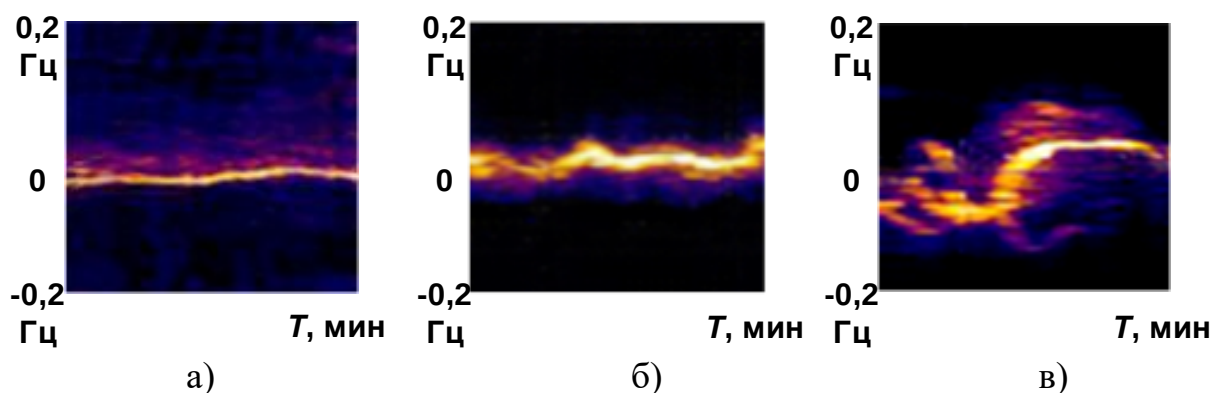


Рис. 9. Фрагменты вариантов влияния эффекта Доплера на принимаемый узкополосный сигнал при ионосферном отражении

Анализ среды распространения декаметрового канала связи, как канала с переменными параметрами, показал, что в спокойном состоянии ионосферы

(рис. 9 а) диффузное размытие спектра сигнала составляет примерно 0,1...0,2 Гц. Это делает нецелесообразным увеличение длительности бита сообщения $\tau_{\text{бит}}$ более 10-15 с. Однако, в ряде случаев при возмущенных состояниях ионосферы в результате солнечной активности частотная полоса, занимаемая принимаемым сверхзкополосным сигналом, может увеличиваться (рис. 9 б, в) вплоть до нескольких Герц, как показано для утренних и вечерних сумерек на рис. 6. Данный факт важно учитывать при реализации демодулятора в приёмном комплексе декаметровой радиолинии.

В дальнейшем будем исходить из оценки длительности одного бита сигнала $\tau_{\text{бит}} \approx 10$ с и ориентироваться на характеристики штатной радиолинии, обеспечивающей заданные требования по помехоустойчивости для скорости передачи 100 бит/с ($\tau_{\text{бит.шт}} = 10$ мс). Число бит в передаваемом сообщении для такой радиолинии с рассматриваемой сигнальной конструкцией не должно превышать значения

$$N = \frac{\tau_{\text{бит}}}{\tau_{\text{бит.шт}}} \cdot K, \quad (4)$$

где K – коэффициент учета пик-фактора при передаче многочастотного сигнала.

С учётом известных из [28] методов и способов снижения пик-фактора сигнала и выражения (4) получим оценку для максимального значения числа бит в передаваемом сообщении N . Беря во внимание кодовую избыточность сообщения его длина может составлять $N_{\text{max}} \leq 400$ бит и при необходимости это значение может быть увеличено за счёт повышения мощности радиопередающего устройства. Дополнительно к изложенному, следует отметить, что длительность передачи одного бита $\tau_{\text{бит}} \approx 10$ с обеспечивает защиту от быстрых замираний сигнала, что иллюстрируется осциллограммой на рис. 10.

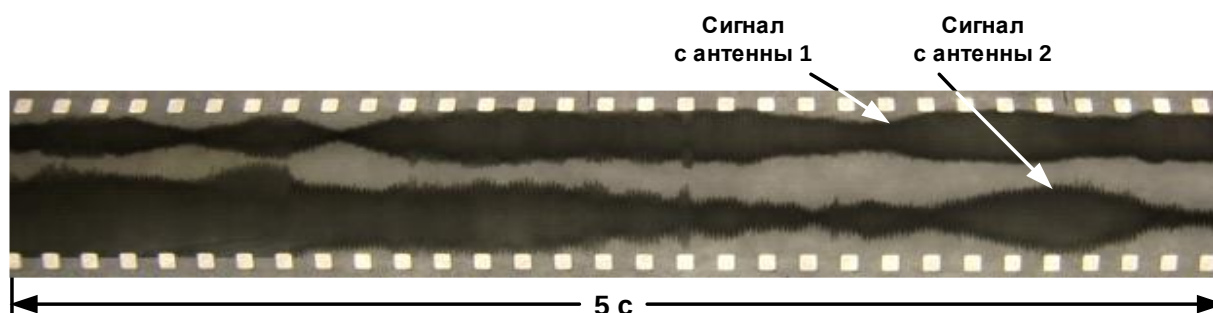


Рис. 10. Фрагменты осциллограммы приёма немодулированного сигнала на пространственно-разнесенные антенны при наличии быстрых замираний для двухскачковой декаметровой радиотрассы

Также дополнительно следует обратить внимание на вид модуляции, используемой для радиолиний с параллельной передачей сверхзкополосных сигналов. С точки зрения информационной скрытности побитную параллельную передачу в режиме ППРЧ возможно вести с использованием амплитудной (АТ) или частотной (ЧТ) модуляции [5]. Тогда в соответствии с [29] для оптимального когерентного (к) и некогерентного (нк) приёма сигналов на фоне белого

гауссовского шума, вероятность ошибки на бит сообщения для данных видов модуляции определим по соотношениям

$$p_{\text{ЧТ}_K} = 1 - F(h), \quad (5)$$

$$p_{\text{АТ}_K} = 1 - F\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right), \quad (6)$$

$$p_{\text{ЧТ}_{\text{НК}}} \approx 0,5e^{-\frac{h^2}{4}}, \quad (7)$$

$$p_{\text{АТ}_{\text{НК}}} \approx 0,5e^{-\frac{h^2}{8}}, \quad (8)$$

где $h = \sqrt{\left(\frac{W}{v^2}\right)}$, W – энергия бита сигнала, $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа.

Как следует из выражений (5) – (8), вероятность ошибки при одной и той же мощности сигнала и спектральной плотности мощности белого шума v^2 выше при использовании амплитудной модуляции. Однако при параллельной передаче бит сообщения, в силу примерно одинаковой плотности «единиц» и «нулей» в тексте передаваемого сообщения, при использовании режима АТ число «активных» излучений будет ориентировочно в два раза меньше чем при ЧТ модуляции, что подтверждается рис. 11.

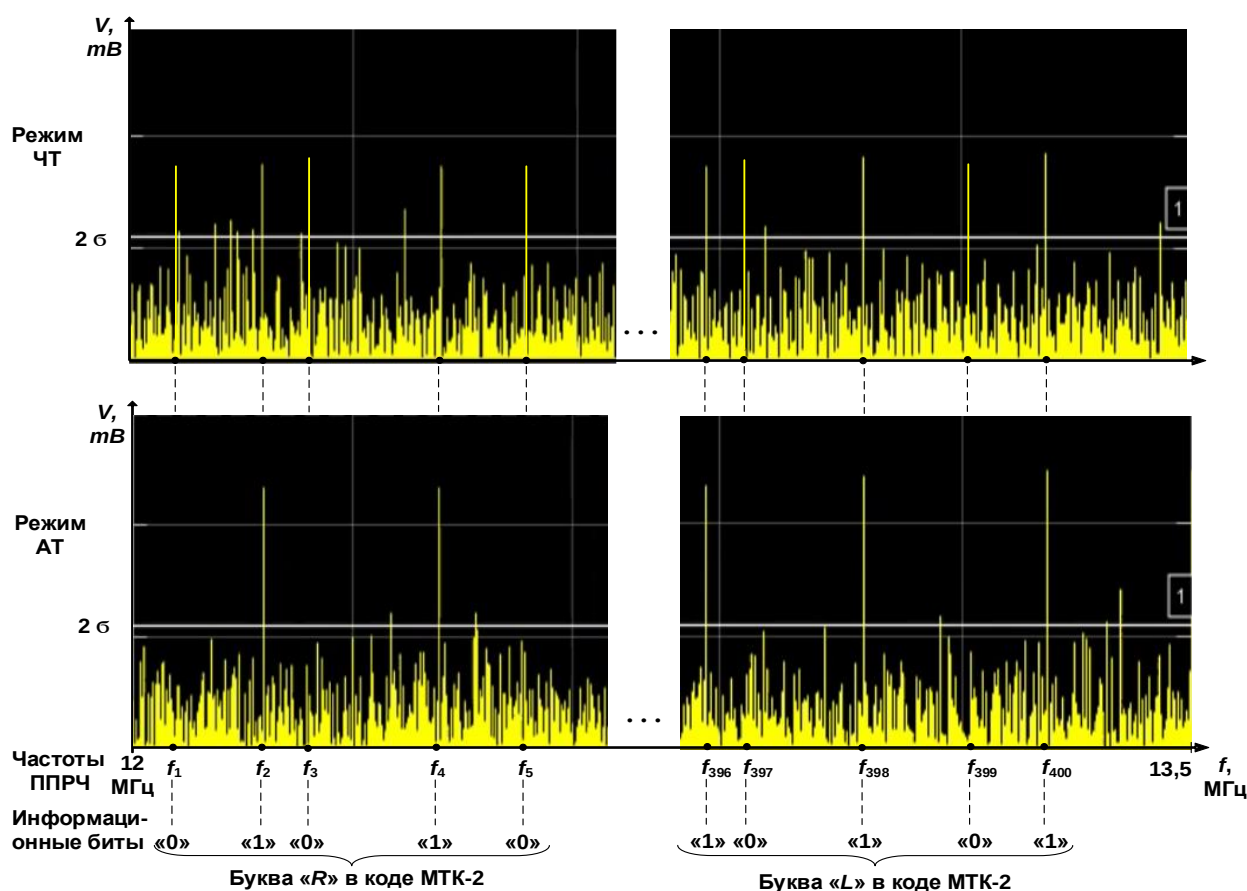


Рис. 11. Фрагмент спектрограмм приема текста сообщения передаваемого в режимах ЧТ и АТ при одинаковой мощности излучения РПДУ

Таким образом, в режиме АТ возможно увеличить в два раза мощность передачи сигналов (бит сообщения) без изменения общей мощности РПДУ, поскольку в рассматриваемой сигнальной конструкции $p_{\text{АТ}} \approx p_{\text{ЧТ}}$. Кроме этого, уменьшение в радиоэфире числа передаваемых «активных» частот способствует повышению электромагнитной совместимости и обеспечивает скрытность функционирования радиолинии.

Помимо изложенного важно отметить, что основным преимуществом сигнальной конструкции при использовании параллельной передачи блока сообщения в режиме ППРЧ и АТ модуляции является устойчивость к прицельным по частоте преднамеренным помехам. В данном случае очевидно, что при их постановке средняя вероятность приёма сообщения будет *увеличиваться*, поскольку отсутствие априорных сведений у постороннего наблюдателя о частотах с пассивной паузой («0») в режиме АТ не позволит «поставить» прицельную помеху, а постановка помех на активные частоты (информационные «1») только увеличит мощность принимаемых сигналов, в силу отсутствия у них структурных признаков, нарушаемых прицельной помехой.

5. Способы приёма сверхзаклопосных сигналов с модуляцией АТ

Принятая в п. 4 статьи длительность бита сообщения $\tau_{\text{бит}} \approx 10$ с позволяет существенно упростить систему синхронизации для совместной перестройки частот на радиопередающем и радиоприёмном комплексах радиолинии по заданному псевдослучайному закону. При этом реализация передачи сеансов связи с временными интервалами, также меняющимися по псевдослучайному закону (ППВС), обеспечивает повышение скрытности передачи данных.

С учетом изложенного, на рис. 12 и 13 приведена структура радиолинии.

При реализации подобной радиолинии одной из сложных задач представляется разработка способа приёма и демодуляции бит сообщения с учетом доплеровского смещения рабочей частоты в точке приёма. Вариантом решения такой задачи является применение банка узкополосных фильтров [30] на каждой рабочей частоте, с использованием энергетического обнаружителя сигнала на выходе каждого фильтра, рис. 14.

Из представленной схемы энергетического обнаружителя сигнала [19] видно, что для эффективного его функционирования помимо данных о начале и окончании времени сеанса связи T (ППВС) необходимо получать значение оптимального порога обнаружения H , которое можно найти минимизируя среднюю вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$ при некогерентном приёме сигнала с АТ модуляцией

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \int_0^H \frac{2V_1}{Wv^2} \exp\left(-\frac{V_1^2 - W^2}{Wv^2}\right) I_0\left(\frac{2V_1}{v^2}\right) dV_1 + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{H^2}{Wv^2}\right), \quad (9)$$

где V_1 – напряжение огибающей сигнала на выходе фильтра в момент окончания сеанса.

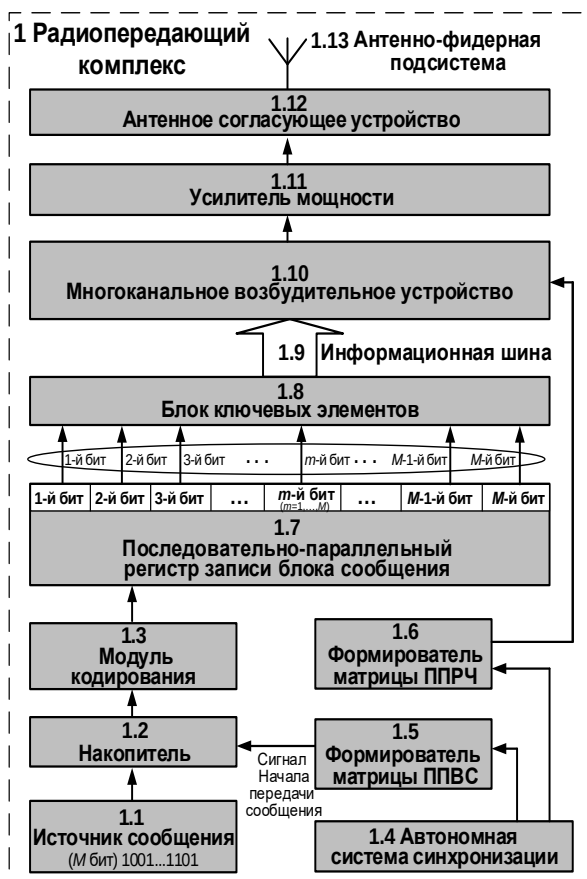


Рис. 12. Функциональная схема радиопередающего комплекса

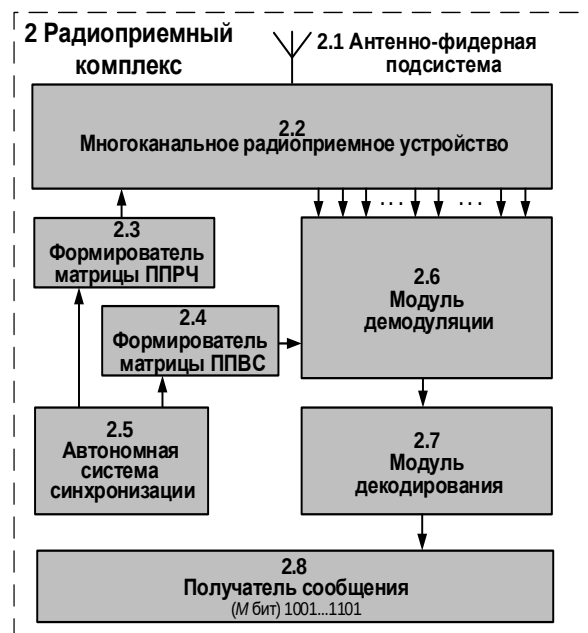


Рис. 13. Функциональная схема радиоприёмного комплекса

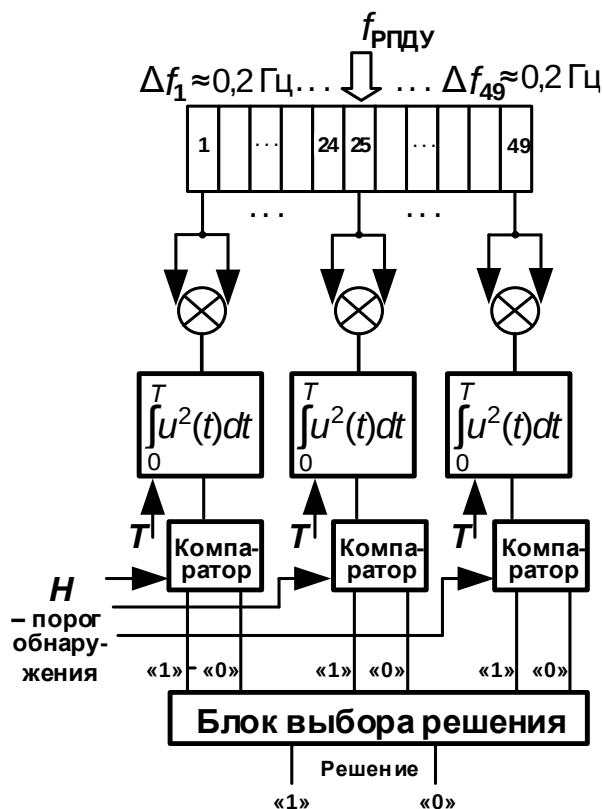


Рис. 14. Функциональна схема демодулятора для одного бита сообщения
($\Delta f_{\text{Доплер}}^{\text{max}} \approx \pm 5 \text{ Гц}$, $\Delta f_i \approx 0,2 \text{ Гц}$)

Оптимальное значение порога H найдем путем взятия производной в выражении (9) и приравняв её к нулю:

$$I_0\left(\frac{2H}{v^2}\right) = \exp\left(\frac{W}{v^2}\right). \quad (10)$$

Тогда воспользовавшись (10) и аппроксимацией функции Бесселя нулевого порядка:

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

получим:

$$\frac{2H}{v^2} - \ln \sqrt{2\pi \frac{2H}{v^2}} = \frac{W}{v^2}. \quad (11)$$

Из проведённых численных расчётов по соотношению (11) следует, что при $W/v^2 > 15$ дБ значение порога обнаружения $H \approx W/2$. В тоже время, при $W/v^2 \leq 15$ дБ (для реальных условиях данный вариант представляет наибольший интерес) значение оптимального порога энергетического обнаружителя демодулятора существенно зависит от мощности накопленного сигнала и v^2 .

Важно отметить, что отсутствие априорных данных по этим величинам при ориентировочной установке значения H может резко снизить эффективность приёма. Вместе с тем, считая шумы в радиолинии стационарными в течении 20 с в полосе $\Delta f \approx 10$ Гц, то данные по v^2 можно получить по предварительным измерениям за 10 секунд до начала сеанса связи, а значение W может быть оценено исходя из конкретных условий радиотрассы и мощности радиопередающего устройства. Однако, из-за большого количества используемых каналов приёма (49 фильтров, см. рис. 14) вероятность принятия ошибочного решения увеличивается с уменьшением отношения W/v^2 . Альтернативным вариантом является определение по ансамблю из 49 выборок, полученных до начала сеанса, значений по дисперсии шума и среднеквадратическому отклонению σ . Для предоставления декодеру дополнительных сведений по оценке вероятности принятого решения для каждого бита сообщения, возможно воспользоваться при приёме сигналов тремя порогами H : 2σ , 3σ и 4σ [31], что в целом повысит помехоустойчивость приёма.

Не останавливаясь на иных возможных вариантах демодуляции принятых сигналов, можно отметить, что процесс «накопления» сигнала является достаточно равномерным, см. рис. 15, поэтому, канал в котором присутствует сигнал можно определить по градиенту увеличения напряжения огибающей на выходе каждого из фильтров. В тоже время, такой алгоритм демодуляции требует использования значительных вычислительных ресурсов.

Результаты применения методов имитационного моделирования, а также экспериментальных исследований, для реальных условий декаметрового радиосвязи показали, что из-за наличия сосредоточенных помех и медленных замираний сигнала на рабочих частотах до 15...25 % сообщения с рассматриваемой сигнальной конструкцией будут приняты неверно. Учитывая данный факт, вы-

бор способа кодирования текста сообщения является безусловно важной задачей.

В радиолиниях декаметрового диапазона волн часто используется недвоичный циклический (n, k) код Рида-Соломона, с исправительной способностью до $t = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor$ ошибок в блоке. Исходя из этого, если $t \approx 0,25n$, где n – число символов в кодируемом блоке, а k – число информационных бит, то максимальная скорость кода будет сравнительно низкой: $R \approx 1/2$.

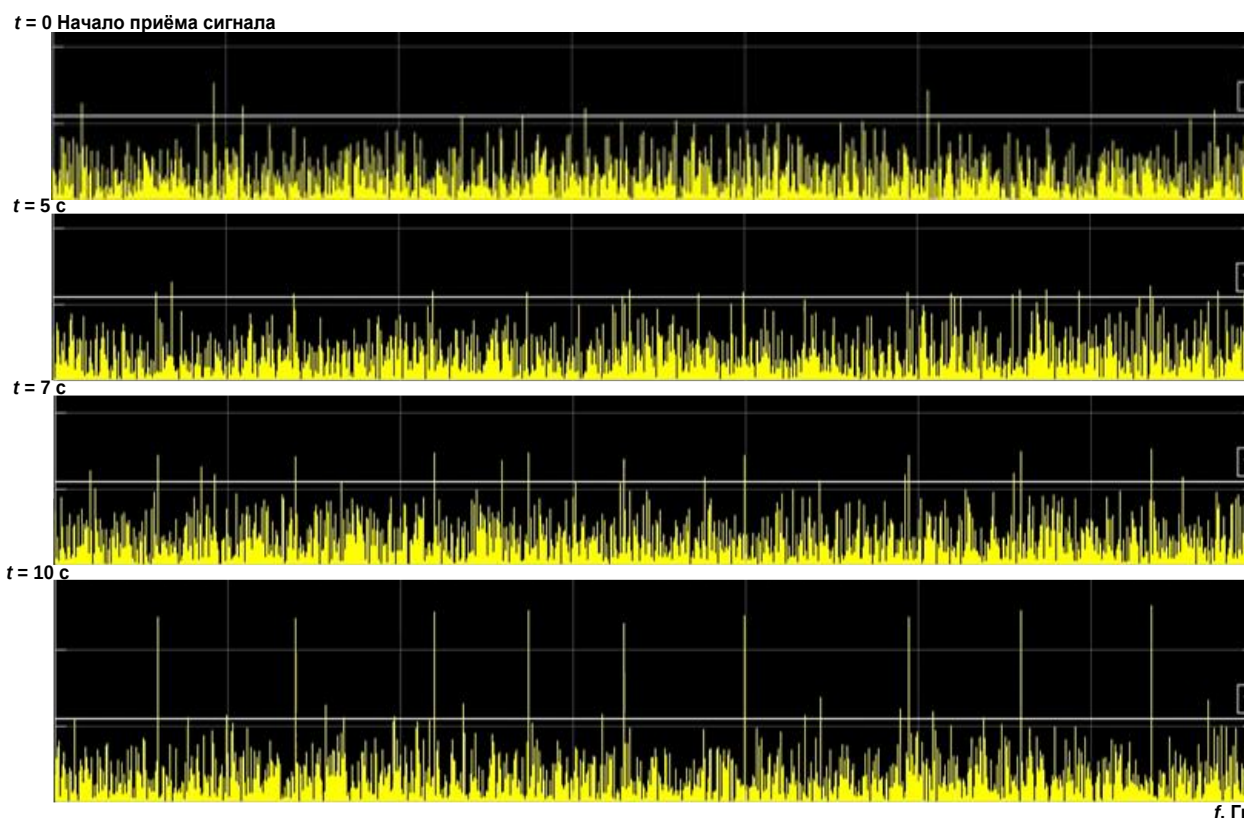


Рис. 15. Фрагменты спектрограмм приема («накопления») сверхузкополосного сигнала на фоне белого шума

Как представлено в [32] в этом случае наиболее эффективно включать коды Рида-Соломона в каскадные схемы кодирования. Вместе с тем, важно учитывать, что в случае использования нескольких порогов обнаружения сигналов при демодуляции: $H = 2\sigma \dots 4\sigma$ каждому биту сообщения может быть определена вероятностная оценка, что делает целесообразным рассмотрение с точки зрения эффективности применения других способов кодирования и декодирования информации, включая итеративные алгоритмы с «мягким» решением.

Дополнительным преимуществом радиолинии, реализованной на базе рассмотренной сигнально-кодовой конструкции (СКК), является её возможность устойчивой работы не только при наличии «прицельных» помех, но также и при организации заградительной помехи (ЗП).

Так, перед постановкой ЗП, система мониторинга (контроля) должна достоверно (с достаточно низкой вероятностью ложной тревоги) обнаружить факт начала работы радиолинии. Однако обнаружение сверхузкополосных сигналов

предложенной структуры потребует наличия комплекса параллельного поиска заданного вида излучения, минимум на $\frac{1}{5} \Delta F_{\text{ППРЧ}}$ для обнаружения факта наличия одновременного начала передачи группы сигналов рассматриваемой сигнальной конструкции $\Delta F_{\text{ППРЧ}} \approx 1$ МГц и $\Delta f \approx 0,2$ Гц. Даже если предположить, что поиск сигналов радиолинии посторонним наблюдателем будет осуществляться в полосе $\Delta f_{\text{сигн}} = 0,5$ Гц (что из-за уменьшения отношения P_c/P_n существенно снизит вероятность обнаружения сигнала), для мониторинга такой полосы частот потребуется минимум $K = \frac{1}{5} \frac{\Delta F_{\text{ППРЧ}}}{\Delta f_{\text{обн.}}} \approx 400\,000$ каналов параллельного анализа. Используя расчёты на базе формулы Бернулли, легко убедиться, что в этом случае даже при вероятности ложной тревоги в одном канале $P_{\text{л.т.}} \approx 10^{-5}$, суммарная вероятность ложной тревоги системы мониторинга постороннего наблюдателя будет неприемлемо высокой. Тем не менее, предположим, что обнаружителю системы мониторинга (радиоконтроля) удалось осуществить приём и классификацию сигнала до окончания сеанса связи и суметь поставить заградительную помеху. Учитывая такие дополнительные факторы как то, что абонентская радиолиния обладает информацией о времени начала сеанса связи и рабочих частотах близких к оптимальным (ОРЧ), а также в ней используются ФАР с оптимизированными диаграммами направленности для заданной радиотрассы, можно предположить, что уже к моменту начала постановки ЗП, радиоприёмное устройство радиолинии также будет иметь возможность осуществить приём и демодуляцию сигнала¹.

Основным условием для этого является прекращение «накопления» сигналов в момент начала ЗП. Такая задача в предлагаемой радиолинии решается за счёт увеличения каналов приёма РПУ в два раза. Частотная полоса анализа мощности помех в дополнительных каналах радиоприёмного комплекса может составлять 20-30 Гц. Структура размещения дополнительных каналов приёма $f_{\text{дi}}$ и структурная схема обнаружителя ЗП приведены на рис. 16.

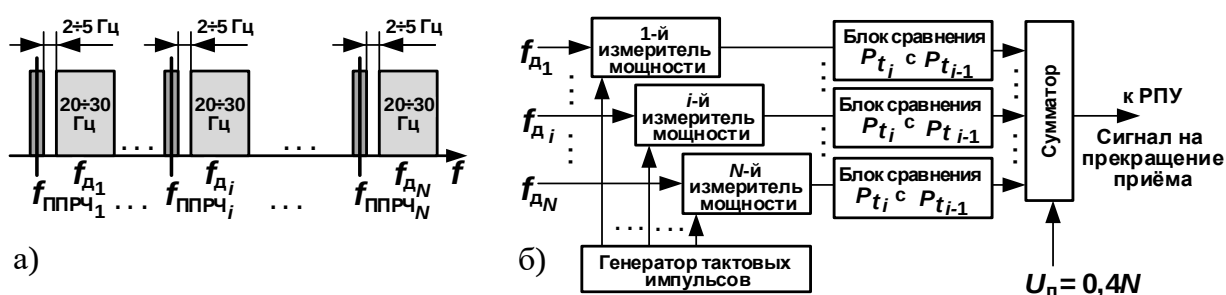


Рис. 16. Структура расположения дополнительных каналов приёма (а), структурная схема обнаружителя ЗП (б)

¹ **Примечание:** варианты увеличенной напряжённости поля сигнала в точке обнаружения по сравнению с напряжённостью поля сигнала в месте нахождения абонента, в данном случае не рассматриваются.

Обнаружитель ЗП работает следующим образом. Сигнал с фильтра каждого дополнительного канала поступает на измеритель мощности помехи, данные в котором обновляются через $t_{\text{обн.}} \approx 50$ мс, начиная отсчёт с момента поступления сигнала из ППВС о начале сеанса связи. В блоке сравнения измеренная мощность помехи P_t сравнивается с мощностью помехи на предыдущем шаге измерения, и если $P_t > 2 P_{t-1}$, в сумматор поступает сигнал управления «1». При одновременном поступлении в сумматор сигналов «1» с $L \geq 0,4N$ каналов (т. е. число поражённых помехой каналов выше исправляющей способности кодовой конструкции, применяемой в радиолинии), с сумматора в радиоприёмное устройство передаётся запрещающий сигнал на продолжение приёма и разрешающий – на переход к процедуре демодуляции и декодирования. Введя дополнительные задержки при обработке принимаемых из эфира сигналов, можно полностью исключить влияние ЗП на приём сообщения.

Выводы

1) Одним из перспективных направлений развития техники связи в декаметровом диапазоне волн является создание «мегаканальных» радиоприёмных и возбуждающих устройств.

2) Внедрение радиолиний с параллельной побитной передачей сообщений узкополосными сигналами в режиме ППРЧ позволит повысить устойчивость связи за счёт снижения требований к системе синхронизации и отсутствия межсимвольной интерференции.

3) Радиолиния декаметрового диапазона волн с использованием параллельной передачи сверхузкополосных сигналов с модуляцией АТ обладает повышенной помехоустойчивостью в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех.

4) При построении радиолинии с параллельной передачей сверхузкополосных сигналов целесообразно провести разработку способа кодирования, оптимально учитывающего возможность предоставления декодеру оценки вероятностных характеристик по приёму каждого бита с учётом помеховой обстановки и характера искажения сигнала из-за эффекта Доплера.

5) Разработка эффективных методов и способов обнаружения и приёма сверхузкополосных сигналов с низкой энергетикой представляет теоретическое и практическое значение.

6) Проведенные лабораторные испытания макетного образца подтверждают эффективность предлагаемых технических решений, в том числе и для перспективной декаметровой системы радиосвязи [2].

Литература

1. 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.

2. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Основные направления модернизации декаметровой системы связи // Техника средств связи. 2019. № 1 (145). С. 13-25.

3. Лазоренко В. С., Ватаф С. А., Панков Д. В. О развитии сетей ведомственной декаметровой радиосвязи с учетом её значимости при создании системы связи Арктической зоны // Материалы III Международной НТК «Радиотехника, электроника и связь» (РЭС-2015). (Омск, 6-8 октября 2015 г.). – Омск, 2015. – С. 64-68.

4. Анненков В. И., Баранов С. Н., Моисеев В. Ф., Хархалуп С. С. Сетевизм: геополитические и военно-политические аспекты современности / Под общ. ред. проф. В. И. Анненкова. Учебник. – М.: РУСАВИА, 2013. – 496 с.

5. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Автоматизированный, слуховой и визуальный приём коротких сообщений на удалённых морских объектах // Морская радиоэлектроника. 2017. № 3 (61). С. 34-39.

6. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхзвукосвязных декаметровых радиолоний // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2 (52). С. 16-22.

7. Официальный сайт АО «ОНИИП» [Электронный ресурс]. – URL: /http://www.oniip.ru/produkcia (дата обращения: 12.11.2020).

8. Ступницкий М. М., Лучин Д. В. Потенциал КВ-радиосвязи – для создания цифровой экосистемы России // Электросвязь. 2018. № 5. С. 49-54.

9. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Территориально-разнесённый приём информации от глобально-перемещающихся объектов морского базирования // Морская радиоэлектроника. 2017. № 4 (62). С. 18-23.

10. Лузан Ю. С., Хмырова Н. П. Адаптивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот, современное состояние и тенденции развития // Техника радиосвязи. 2008. № 13. С. 3-24.

11. Гук И. И., Путилин А. Н., Сиротинин И. В., Хвостунов Ю. С. Адаптивная система декаметровой радиосвязи с полндиапазонной перестройкой рабочей частоты и предварительные результаты трассовых испытаний ее фрагмента // Материалы VII Межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России» (ИБРР-2011). (Санкт-Петербург, 26-28 октября 2011 г.). – СПб.: ФГУП «НПО «Импульс», 2011. С. 32-35.

12. Пукса Д. О., Романов Ю. В. Результаты трассовых испытаний адаптивной пакетной КВ-радиолонии высокоскоростной передачи данных файлового типа разработки ОАО «ОНИИП» // Материалы III Международной НТК «Радиотехника, электроника и связь» (РЭС-2015). (Омск, 6-8 октября 2015 г.). – Омск, 2015. – С. 186-192.

13. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

14. Романов Ю. В. Эволюция высокоскоростных КВ-радиомодемов в XX веке // Техника радиосвязи. 2016. № 1 (28). С. 72-88.
15. Сосновский Н. С., Ярофевич Б. Н. Когерентное сложение разнесённых сигналов с предварительным взвешиванием парциальных каналов // Техника средств связи. Серия: Техника радиосвязи. 1981. № 10 (29). С. 49-56.
16. Жуков Г. А. Методы весовой мажоритарной обработки дискретной информации при приёме по параллельным каналам // Техника средств связи. Серия: Техника проводной связи. 1983. № 8. С. 74-84.
17. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Советское радио, 1970. – 727 с.
18. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 385 с.
19. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2013. – 359 с.
20. Липатников В. А., Царик О. В. Методы радиоконтроля. Теория и практика. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2018. – 607 с.
21. Цикин И. А. Дискретно-аналоговая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1982. – 161 с.
22. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Повышение эффективности функционирования декаметровых радиолоний // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 2. С. 4-10.
23. Doppler sounding of the Ionosphere – latest Doppler shift spectrograms by IAP [Электронный ресурс]. – URL: <http://ok1dub.cz/ok0eu/index.php?view=42> (дата обращения: 28.05.2020).
24. Работа в режиме QRSS [Электронный ресурс]. 24.11.2014. – URL: <https://www.ruqrz.com> (дата обращения: 20.11.2020).
25. Николашин Ю. Л., Кулешов И. А., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне волн // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. № 1. С. 20-31.
26. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Нейробионический подход к решению задачи оптимизации приема информации в канале с переменными параметрами // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 1. С. 44-51.
27. Валеев М. М., Давыдович А. В., Хазан Г. К., Банников И. М. Перспективные принципы построения архитектуры антенно-приёмной части узлов связи КВ-диапазона // Техника радиосвязи. 2020. № 1 (44). С. 7-16.
28. Пик-фактор в КВ ОБП [Электронный ресурс]. 25.05.2010. – URL: www.radioscanner.ru/info/article418 (Дата обращения: 20.11.2020).
29. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчёт помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. – Москва: Радио и связь, 1981. – 231 с.
30. 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 высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013. № 3. С. 38-43.

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

32. Тамразян Г. М. Программно-аппаратная реализация оптимального алгоритма декодирования каскадных кодов на базе кода Рида-Соломона в адаптивных системах обмена данными. Дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск: УГТУ, 2017. – 139 с.

References

1. Budko P. A., Zhukov G. A., Kuleshov I. A., Nikolashin Yu. L. Metodyi i kanalyi upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami morskogo bazirovaniya v geterogennoy srede [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).

2. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. Osnovnyie napravleniya modernizatsii dekametrovoy sistemyi svyazi [Main Directions of Modernization of the Decameter Communication System]. *Means of Communication Equipment*, 2019, no 1 (145), pp. 13-25 (in Russian).

3. Lazorenko V. S., Vataf S. A., Pankov D. V. O razvitii setey vedomstvennoy dekametrovoy radiosvyazi s uchetom eYo znachimosti pri sozdanii sistemyi svyazi Arkticheskoy zonyi [On the Development of Departmental Decameter Radio Communication Networks, Taking into Account its Importance in Creating the Communication System of the Arctic Zone]. *Materialy III Mezhdunarodnoy NTK «Radiotekhnika, elektronika i svyaz» (REiS-2015)* [Proceeding of the 3th International Scientific and Technical Conference "Radio Engineering, Electronics and Communications" (REES-2015). Omsk, 2015, pp. 64-68 (in Russian).

4. Annenkov V. I., Baranov S. N., Moiseev V. F., Kharkhalup S. S. *Setetsentrizm: geopoliticheskie i voenno-politicheskie aspektyi sovremennosti* [Network Centrism: Geopolitical and Military-political Aspects of Modernity] Moscow, RUSAVIA Publ., 2013. 496 p. (in Russian).

5. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Avtomatizirovannyiy, sluhovoy i vizualnyiy priYom korotkih soobscheniy na udalYonnyih morskikh ob'ektah [Automated, Auditory and Visual Reception of Short Messages on Remote Marine Objects]. *Marine Radio Electronics*, 2017, no. 3 (61), pp. 34-39 (in Russian).

6. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Kognitivnaya sistema svyazi i vliyanie ispolzovaniya dannyih monitoringa na pomehoustoychivost sverhuzkopolosnyih dekametrovyih radiolinyi [Cognitive Communication System and the Impact of Monitoring Data use on the Noise Immunity of Ultra-narrowband Decameter Radio Lines]. *Marine Radio Electronics*, 2015, no. 2 (52), pp. 16-22.

7. Ofitsialnyiy sayt AO «ONIIP» [Official Website of JSC "ONIIP"]. Available at: <http://www.oniip.ru/produkcia> (accessed 12 November 2020) (in Russian).

8. Stupnitsky M. M., Luchin D. V. Potentsial KV-radiosvyazi – dlya sozdaniya tsifrovoy ekosistemyi Rossii [The Potential of HF Radio Communication – to Create a Digital Ecosystem of Russia]. *Elektrosvyaz*, 2018, no. 5, pp. 49-54 (in Russian).

9. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Territorialno-raznesYonnyiy priyom informatsii ot globalno-peremeschayuschihnya ob'ektov morskogo bazirovaniya [Geographically Dispersed Reception of Information from Globally Moving Sea-based Objects]. *Marine Radio Electronics*, 2017, no. 4 (62), pp. 18-23 (in Russian).

10. Luzan Yu. S., Khmyrova N. P. Adaptivnaya radiosvyaz v dekametrovom diapazone chastot, sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya [Adaptive Radio Communication in the Decameter Frequency Range, Current State and Development Trends]. *Radio communication technology*, 2008, no. 13, pp. 3-24 (in Russian).

11. Guk I. I., Putilin A. N., Sirotin I. V., Khvostunov Yu. . Adaptivnaya sistema dekametrovoy radiosvyazi s polnodiapazonnoy perestroykoy rabochey chastoty i predvaritelnyie rezultaty trassovyih ispytaniy ee fragmenta [Adaptive System of Decameter Radio Communication with Full-range Adjustment of the Operating Frequency and Preliminary Results of Trace Tests of its Fragment]. *Materialyi VII Mezhhregionalnoy konferentsii «Informatsionnaya bezopasnost regionov Rossii» (IBRR-2011)* [Proceedings of the VII Interregional conference "Information Recurity of the Regions of Russia" (IBRD-2011)]. Saint-Petersburg, FSUE "NPO "Impulse", October 26-28, 2011, pp. 32-35 (in Russian).

12. Puksa D. O., Romanov Yu. V. Rezultaty trassovyih ispytaniy adaptivnoy paketnoy KV-radiolinii vyisokoskorostnoy peredachi dannyih faylovogo tipa razrabotki OAO «ONIIP» [Results of Route Tests of Adaptive Packet HF Radio Line of High-speed Data Transmission of File Type Developed by JSC "ONIIP"]. *Materialyi III Mezhdunarodnoy NTK «Radiotekhnika, elektronika i svyaz» (REiS-2015)*. [Proceeding of the 3th International Scientific and Technical Conference "Radio Engineering, Electronics and Communications" (REES-2015). Omsk, October 6-8, 2015, pp. 186-192 (in Russian).

13. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomehozaschischennost sistem svyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty* [Noise Immunity of Communication Systems with Pseudo-random Adjustment of the Operating Frequency]. Saint-Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013. 166 p. (in Russian).

14. Romanov Yu. V. Evolyutsiya vyisokoskorostnyih KV-radiomodemov v 20 veke [Evolution of High-speed HF Radio Modems in the 20th Century]. *Radio communication technology*, 2016, no. 1 (28), pp. 72-88 (in Russian).

15. Sosnovskiy N. S., Yarofevich B. N. Kogerentnoe slozhenie raznesYonnyih signalov s predvaritelnyim vzveshivaniem partialnyih kanalov [Coherent Addition of Diversity Signals with Pre-weighting of the Partial Channels]. *Means of Communication Equipment. Seriya Radio Frequency Technician*, 1981, vol. 10 (29), pp. 49-56 (in Russian).

16. Zhukov G. A. Metodyi vesovoy mazhoritarnoy obrabotki diskretnoy informatsii pri priYome po parallelnym kanalom [Methods of Weight Majority the Treatment of Discrete Information when Receiving Parallel Channels] //

Communication Equipment. Serija Wired Communication Technology, 1983, vol. 8, pp. 74-84 (in Russian).

17. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobscheniy* [Theory of Transmission of Discrete Messages]. Moscow, Soviet Radio, 1970. 727 p. (in Russian).

18. Varakin L. E. *Sistemyi svyazi s shumopodobnyimi signalami* [Communication Systems with Noise-like Signals]. Moscow, Radio and Communication, 1985. 385 p. (in Russian).

19. Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Radio-Electronic Warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2013. 359 p. (in Russian).

20. Lipatnikov V. A., Tsarik O. V. *Metodyi radiokontrolya. Teoriya i praktika* [Methods of Radio Control. Theory and Practice]. Saint Petersburg, State Research Institute "National Development", 2018. 607 p. (in Russian).

21. Tsikin I. A. *Diskretno-analogovaya obrabotka signalov* [Discrete-analog Signal Processing]. Moscow, Radio and communication, 1982. 161 p. (in Russian).

22. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. Povyishenie effektivnosti funktsionirovaniya dekametrovykh radiolinii [Improving the Efficiency of Decameter Radio Lines]. *T-Comm*, 2015, no. 2, pp. 4-10 (in Russian).

23. Doppler sounding of the Ionosphere – latest Doppler shift spectrograms by IAP. Available at: <http://ok1dub.cz/ok0eu/index.php?view=42> (accessed 28 May 2020).

24. Rabota v rezhime QRSS [Working in QRSS Mode]. Available at: <https://www.ruqrz.com> On 24 November, 2014 (accessed 20 November 2020) (in Russian).

25. Nikolashin Yu. L., Kuleshov I. A., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. SDR radioustroystva i kognitivnaya radiosvyaz v dekametrovom diapazone voln [SDR Radio Devices and Cognitive Radio Communication in the Decameter Wave Range]. *H&ES Research*, 2015, no. 1, pp. 20-31 (in Russian).

26. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. Neyrobionicheskiy podhod k resheniyu zadachi optimizatsii priema informatsii v kanale s peremennymi parametrami [Neurobionic Approach to Solving the Problem of Optimizing Information Reception in a Channel with Variable Parameters]. *Neurocomputers*, 2016, no. 1, pp. 44-51 (in Russian).

27. Valeev M. M., Davydovich A. V., Khazan G. K., Bannikov I. M. Perspektivnyie printsipy postroeniya arhitekturyi antenno-priyomnoy chasti uzlov svyazi KV-diapazona [Promising Principles of Constructing the Architecture of the Antenna-receiving Part of HF-band Communication Nodes]. *Radio communication technology*, 2020, no. 1 (44), pp. 7-16 (in Russian).

28. PIK-faktor V KV OBP [The Peak Factor in the HF SSB]. Available at: www.radioscanner.ru/info/article418 On 25 May, 2010. (accessed 20 November 2020) (in Russian).

29. Korzhik V. I., Fink L. M., Shchelkunov K. N. *Raschyot pomehoustoychivosti sistem peredachi diskretnykh soobscheniy* [Calculation of Noise Immunity of Discrete Message Transmission Systems]. Moscow, Radio and communications, 1981. 231 p. (in Russian).

30. Kaplun D. I., Kliensky D. M., Oleynik A. L., Voznesensky A. S., Zhukova N. A., Gulvansky V. V., Petrovsky A. A. Primenenie polifaznykh bankov

filtrów w zadachach monitoringa szerokiego zakresowego [Application of Polyphase Filter Banks in Problems of Monitoring of a Wide Frequency Range]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2013, no. 3, pp. 38-43 (in Russian).

31. Piskunov N. S. *Differentsialnoe i integralnoe ischisleniya dlya VTUZov* [Differential and Integral Calculus for Higher Education Institutions. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 549 p. (in Russian).

32. Tamrazyan G. M. *Programmno-apparatnaya realizatsiya optimalnogo algoritma dekodirovaniya kaskadnykh kodov na baze koda Rida-Solomona v adaptivnykh sistemakh obmena dannymi*. Dis. kand. tehn. nauk [Software and hardware implementation of the optimal algorithm for decoding cascade codes based on the reed-Solomon code in adaptive data exchange systems. Ph.D. Thesis]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2017. 139 p. (in Russian).

Статья поступила 20 декабря 2020 г.

Информация об авторах

Жуков Геннадий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заслуженный конструктор Российской Федерации. Советник генерального конструктора. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: проектирование SDR-радиоустройств, методы устойчивого обмена данными в условиях помех. E-mail: intelteh@inteltech.ru

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

Будко Никита Павлович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Независимый специалист. Область научных интересов: автоматизированные системы обработки информации и управления. E-mail: budko62@mail.ru

Адрес: 194048, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Бутлерова д. 9.

Methods of Sustainable Delivery of Information through Channels with Variable Parameters

G. A. Zhukov, N. P. Budko

Problem statement: the article is devoted to the development of methods for bringing information to remote objects by means of parallel transmission of ultra-narrowband signals in the mode of adjustment of operating frequencies according to the pseudorandom law. The aim of the work is to increase the efficiency of the operation of radio lines of the decimeter wave range, which use the transmission of message blocks by the method of parallel bitwise radiation of ultra-narrowband signals. **Methodology:** technologies of cognitive radio systems and reprogrammable devices, methods of the theory of potential noise immunity, optimal algorithms and methods for joint processing of signals in the parallel reception, methods of designing multi-channel transceiver technical means (multi-channel modem), methods to reduce the crest factor of the signal at decimeter radio channel, methods of encoding and decoding information. **The novelty** consists in determining the class of ultra-narrowband radio signals, the frequency band of which is significantly less than the frequency band of the Doppler shift in the ionospheric layers during long-range propagation of radio waves, as well as in developing methods for detecting and receiving ultra-narrowband signals, including reception in conditions of accidental and intentional interference. **Results:** the analysis and evaluation of the noise

immunity of broadband, narrow-band and ultra-narrow-band radio signals is carried out. A method of stable transmission of short data blocks over channels with variable parameters, which include radio channels of the decameter wave range, has been developed. This method consists of algorithms for parallel transmission of ultra-narrowband signals in the mode of adjustment of operating frequencies according to the pseudorandom law, as well as parallel reception and demodulation of message bits taking into account the Doppler shift of the operating frequency at the receiving point. The schematic implementation of the radio transmission and radio reception complexes of the formed radio line (information and telecommunication system) is shown. Features of reception of ultra-narrowband signals with various types of modulation under conditions of random and intentional interference are presented. **Practical significance** consists in the construction of radio control lines with an extension of the operating frequency range to the region of ultrashort waves, which makes it possible to provide reception in a complex interference environment at any real value of the optimal operating frequency, including anomalous ionization in the ionosphere. The proposed approaches and principles of construction of radio systems allow us to proceed the implementation of low-energy radio lines of a new class, using the transmission of messages by the method of parallel bitwise radiation of ultra-narrowband signals.

Key words: decameter radio link, noise immunity, broadband signal, narrowband signal, ultra-narrowband signal, tuning of operating frequencies according to the pseudo-random law, Doppler effect.

Information Authors

Gennady Anatolyevich Zhukov – Ph.D. of Engineering Sciences, associate Professor, Honored designer of the Russian Federation, adviser the General designer. Public joint stock company "Information telecommunication technologies". Field of research: design of SDR radio devices, methods of stable data exchange under interference conditions. E-mail: intelteh@inteltech.ru

Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya st. 8.

Nikita Pavlovich Budko – Doctoral Student. Independent Expert. Field of research: automated information processing systems and management. E-mail: budko62@mail.ru

Address: 194048, Russia, St. Petersburg, Butlerova st. 9.