

Научная статья

УДК 621.396.24

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-87-96>

EDN:OELOOW



Обеспечение устойчивости системы радиосвязи в условиях радиоподавления

-  Сергей Васильевич Русин¹, rusin_sv@ntiradio.ru
-  Василий Алексеевич Долгих¹, dolgikh_va@ntiradio.ru
-  Василий Дмитриевич Пашкевич¹, pashkevich_vd@ntiradio.ru
-  Сергей Валентинович Волвенко², volk@cee.spbstu.ru
-  Виктор Александрович Минко³, svetlana.minko@gmail.com
-  Руслан Абдрашитович Дасаев³, baikonur-space@rambler.ru

¹Научно-технический институт «Радиосвязь»,
Санкт-Петербург, 198097, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

³4-й Центральный научно-исследовательский институт Минобороны России,
Московская область, г. Королёв, 141091, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. На современном этапе методы улучшения развед- и помехозащищенности систем радиосвязи КВ диапазона основаны на технологиях пакетной передачи информации в режиме адаптивной псевдослучайной перестройки рабочих частот, для поддержки которой должны быть организованы сервисные функции, такие как трассовое зондирование, передача радиостанциям рабочих частот и синхронизация радиостанций. Использование частотного ресурса систем радиосвязи в сервисных целях ограничивает возможности обмена оперативной информацией и увеличивает вероятность подавления. В статье представлено решение актуальной задачи обеспечения устойчивости систем радиосвязи за счет использования метеорных радиоканалов для частотного обеспечения радиостанций и их синхронизации, а также – сбора актуальных данных о помеховой обстановке на корреспондирующих радиостанциях.

Целью работы является повышение устойчивости функционирования систем радиосвязи за счет использования перспективной ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы, оснащенной средствами метеорной радиосвязи.

Используемые методы: имитационное моделирование конфликта сложных систем – радиосвязи и радиоэлектронного подавления.

Результат заключается в достижении высокой помехозащищенности систем радиосвязи.

Научная новизна результата состоит в применении средств метеорной радиосвязи для частотного обеспечения и синхронизации радиостанций.

Практическая значимость: обеспечение непрерывности функционирования систем радиосвязи в условиях активного радиоподавления.

Ключевые слова: система радиосвязи, радиосеть, радиоэлектронная борьба, радиоэлектронное подавление, радиоразведка, короткие волны, ионосферно-волновая и частотно-диспетчерская служба, система метеорной радиосвязи

Ссылка для цитирования: Русин С.В., Долгих В.А., Пашкевич В.Д., Волвенко С.В., Минко В.А., Дасаев Р.А. Обеспечение устойчивости системы радиосвязи в условиях радиоподавления // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 87–96. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-87-96. EDN:OELOOW

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-87-96>

EDN:OELOOW

Ensuring the Stability of a Radio Communication System in Radio Jamming Conditions

 **Sergey V. Rusin**¹, rusin_sv@ntiradio.ru
 **Vasily A. Dolgikh**¹, dolgikh_va@ntiradio.ru
 **Vasily D. Pashkevich**^{✉1}, pashkevich_vd@ntiradio.ru
 **Sergey V. Volvenko**², volk@cee.spbstu.ru
 **Victor A. Minko**³, svetlana.minko@gmail.com
 **Ruslan A. Dasaev**³, baikonur-space@rambler.ru

¹Scientific and Technical Institute «Radio Communication»,
St. Petersburg, 198097, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, 195251, Russian Federation

³4th Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia,
Moscow Region, Korolev, 141091, Russian Federation

Annotation

Relevance. At the current stage, methods for improving the reconnaissance and interference immunity of HF radio communication systems are based on packet data transmission technologies in the adaptive pseudorandom frequency hopping mode. To support frequency hopping, service functions should be organized, such as route probing, transmission of operating frequencies to radio stations, and synchronization of radio stations, which usually use the frequency hopping range. Using the frequency resource of the radio communication systems for service purposes limits the possibility of exchanging operational information and increases the probability of suppression. The article presents a solution to the urgent problem of ensuring the stability of the radio communication systems through the use of meteor radio channels for frequency provision of radio stations and their synchronization and collecting current data on the interference situation at corresponding radio stations.

The purpose of the work is to increase the stability of the radio communication systems operation through the use of a promising ionospheric-wave and frequency dispatch service equipped with meteor radio communication tools. The methods used: imitation modeling of the conflict of complex systems: radio communication systems and electronic warfare systems.

The result consists in achieving high noise immunity of the radio communication systems.

The novelty consists in the use of meteor radio communication facilities for frequency provision and synchronization of radio stations.

Practical significance is ensuring the continuity of the radio communication systems operation under conditions of active radio suppression.

Keywords: radio communication system, radio network, electronic warfare, electronic suppression, radio intelligence, short waves, ionospheric-wave and frequency-dispatch service, meteor radio communication system

For citation: Rusin S.V., Dolgikh V.A., Pashkevich V.D., Volvenko S.V., Minko V.A., Dasaev R.A. Ensuring the Stability of a Radio Communication System in Radio Suppression Conditions. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(4):87–96. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-87-96. EDN:OELOOW

Введение

Эффективным средством снижения энергетической и временной доступности систем радиосвязи (СРС) является метод пакетной передачи информа-

ции в режиме адаптивной псевдослучайной перестройки рабочих частот (ППРЧ). Ввиду ограниченности группы рабочих частот (ГРЧ), используемой для ППРЧ, частоты могут быть разведаны и подав-

лены помехами в виде сетки узкополосных колебаний. В режиме адаптивной ППРЧ частоты, пораженные на данный момент помехами, исключаются из ГРЧ для передачи на очередном шаге [1]. ГРЧ используется не только для обмена оперативной информацией, но и в интересах ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы (ИВЧДС) – для трассового зондирования и передачи обновлений ГРЧ, кроме того, последняя может использоваться для синхронизации радиостанций [2, 3]. Это увеличивает вероятность вскрытия и радиоподавления ГРЧ.

Для иллюстрации использования разрешенных частот рассмотрим процедуру подготовки ГРЧ программно-аппаратным комплексом помехозащищенной КВ радиосвязи (ПАК КРС). Перед началом радиосеанса ПАК КРС осуществляет трассовое зондирование путем излучения зондирующего сигнала последовательно на каждой разрешенной частоте, начиная с нижней и заканчивая верхней разрешенной частотой, со скоростью переключения не более $0,2 \text{ мс}^{-1}$. Осуществляется т. н. псевдо-ЛЧМ-зондирование. По ионограмме (рисунок 1) назначается ГРЧ из частот с наибольшим отношением сигнал / (шум + помеха) на главной станции. В данном примере это диапазон 18500...20500 кГц. Все разрешенные частоты, выделенные для радиоперехвата, использованы для зондирования.

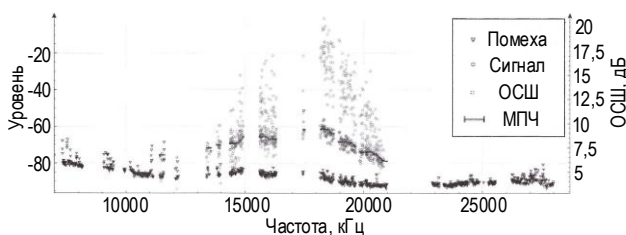


Рис. 1. Ионограмма трассового зондирования на частотах, выделенных для радиоперехвата

Fig. 1. Ionogram of the Route Sounding at Frequencies Allocated for the Radio Line

Очевидны следующие недостатки трассового зондирования на рабочих частотах:

- 1) на этапе зондирования могут быть вскрыты факты трассового зондирования, корреспондирующие радиостанции и все разрешенные частоты;
- 2) ионограмма не отображает лучевую структуру сигнала, которая является важнейшей характеристикой распространения радиоволн (РРВ); на радиоперехвате с цифровой модуляцией сигнала (т. н. «дискретных радиоперехватов») одной из главных причин возникновения ошибок в радиоканале является интерференция «обыкновенной» и «необыкновенной» волн [4], поэтому целесообразно назначать ГРЧ в поддиапазоне частот, на которых имеет место только «обыкновенная» волна; определить этот поддиапазон можно на полноценной ЛЧМ-ионограмме или расчетным способом на модели ионосферы.

Для сокрытия разрешенных частот целесообразно использовать полноценный ЛЧМ-ионзонд, излучение которого не фиксируется на разрешенных частотах, а плавно перестраивается по всему КВ диапазону. А для сокрытия факта зондирования лучше использовать пассивное зондирование, например, метод «просвечивания» ионосферы сигналами спутников ГНСС с последующим расчетом условий РРВ на модели ионосферы.

В настоящей статье предложена перспективная ИВЧДС в которой реализованы развед- и помехозащищенные технологии поддержки радиоперехвата с ППРЧ, а именно:

- пассивное зондирование ионосферы;
- расчет условий РРВ и лучевой структуры сигнала на модели ионосферы;
- измерение на периферийных станциях параметров помеховой обстановки: математического ожидания (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО) уровня помех, и передача этих параметров на центральный пост ИВЧДС по каналам метеорологической радиосвязи;
- расчет качества связи на радиоперехвате на ближайшую перспективу с учетом помеховой обстановки;
- формирование ГРЧ из частот с наилучшими прогнозными показателями качества связи;
- передача радиостанциям обновленной ГРЧ по каналам метеорологической радиосвязи.

Технологии мониторинга и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки хорошо известны и имеются в распоряжении АО «НТИ «Радиосвязь», а метеорологическая радиосвязь является новым инструментом ИВЧДС. Она обеспечит обмен служебной информацией, не используя частотный ресурс КВ диапазона.

Практическое использование средств метеорологической радиосвязи (СМРС) продолжается с начала 1950-х гг. На метеорологических радиоперехватах с передатчиками умеренной мощности доступно достаточное количество метеорологических следов для поддержания телеграфной связи на умеренных скоростях и «...хотя один наблюдатель может видеть всего два-три видимых следа в час, за тот же период можно обнаружить с помощью чувствительной радиоаппаратуры сотни следов» [5]. Наибольший практический интерес представляет использование СМРС в системе ИВЧДС, требующей передачи небольших объемов информации с высокой имитостойкостью, скрытностью и стойкостью к радиоподавлению.

Чем меньше объем передаваемой информации и меньше скорость передачи, тем раньше и с меньшими ошибками она будет доставлена получателю по метеорологическому радиоканалу. Испытания тестовой метеорологической радиоперехватной протяженностью 655 км Лехтуси (Ленинградская область) – Москва с пере-

датчиками мощностью 250 Вт, проведенные исследовательской группой СПбПУ в ноябре 2022 г., показали, что при уменьшении скорости передачи всего на 20 %, со 125 до 100 кбит/с, изменились параметры метеорной радиосвязи в следующей пропорции:

- количество метеорных каналов увеличилось в 2,4 раза;
- ожидание канала сократилось в 2 раза;
- длительность существования канала увеличилась в 2 раза;
- объем переданной информации за сеанс связи на одном метеорном следе уменьшился в 6 раз и составил 2,0 кбит, но этого вполне достаточно для поддержания базы данных ИВЧДС в актуальном состоянии.

На основе имеющегося опыта авторами исследована возможность применения метеорных радиолиний в перспективной ИВЧДС для передачи данных о помеховой обстановке, обновления частот ГРЧ и синхронизации радиостанций.

Преимущество, которое получит СРС, можно проиллюстрировать на имитационной модели в динамике противоборства двух сложных систем – СРС и системы радиоэлектронного подавления (РЭП), стремящихся изменить собственное состояние или состояние противной стороны для достижения цели своего функционирования. Цель функционирования СРС – сохранение максимальной связности, а цель системы РЭП – минимизация связности СРС. На основе подхода, описанного в работах [6, 7], авторами разработана имитационная Simulink-модель (S-модель) в которой процесс противоборства представлен как эволюция конфликтной «сверхсистемы СРС-РЭП» [8].

В соответствии с теорией многоуровневых иерархических систем [8, 9], каждая из конфликтующих сторон представлена в виде двух взаимосвязанных инерционных подсистем (рисунок 2): в СРС – это подсистемы «радиосеть» (Р/С) и «ИВЧДС», а в системе РЭП – подсистемы «радиоподавления» (РП) и «радиоразведки» (РР). СМРС в составе ИВЧДС обозначены штриховым контуром как перспективное средство доставки частот и синхронизации радиостанций. Первые подсистемы реализуют основную функционал каждой системы, а вторые – формируют условия его реализации. Конфликтные направления обозначены стрелками. Взаимосвязь «вверх» означает, что конфликт нижнего уровня определяет условия протекания конфликта верхнего уровня. Взаимосвязь «вниз» означает, что состояние конфликта верхнего уровня определяет требования к функционированию подсистемы нижнего уровня. Внутрисистемные конфликты (тонкие сплошные двунаправленные стрелки слева и справа) обусловлены: в СРС – начальной потребностью и крутизной потребности подсистемы

Р/С в частотах и задержкой подсистемы ИВЧДС в предоставлении пригодных частот. В системе РЭП – начальным количеством неподавленных (пригодных) частот, начальным значением выхода частот из строя и точностью, и задержкой целеуказания подсистемой РР на подавление.

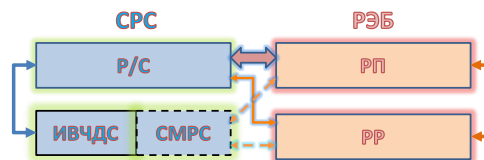


Рис. 2. Структурная модель конфликта

Fig. 2. Structural Model of Conflict

Межсистемный конфликт (широкая двунаправленная стрелка на рисунке 2) обусловлен, с одной стороны, связностью СРС и реакцией системы РЭП, с другой. Конфликтные направления между подсистемами разных систем (тонкая сплошная двунаправленная стрелка между Р/С и РР) обусловлены соотношением времени излучения радиостанций и времени анализа излучений подсистемой РР для определения их местоположения, выбора оптимальной помехи для их подавления.

Штриховыми стрелками обозначены возможные конфликтные направления от подсистем РР и РП к СМРС, что в целом снизит развед- и помехозащищенность СРС в целом. Полагая, что линии метеорной связи обладают высокой развед- и помехозащищенностью по естественным причинам [5], в настоящей статье эти конфликтные направления не рассматриваются. В последующих статьях по данной теме авторы предоставят сравнительные оценки развед- и помехозащищенности СРС в целом при отсутствии и наличии в ее составе СМРС.

Наличие межсистемного конфликта СРС и системы РЭП позволяет рассматривать процесс конфликта в виде единой конфликтной «сверхсистемы СРС-РЭП», обладающей самостоятельными свойствами, не присущими ни одной из конфликтующих систем [8].

Описание имитационной модели конфликтной «сверхсистемы СРС-РЭП»

Имитационная Simulink-модель конфликтной «сверхсистемы СРС-РЭП» выполнена в виде блок-схемы и представляет собой динамическую дискретно-детерминированную модель, в которую могут быть добавлены случайные составляющие входных переменных, делая ее стохастической [10–12].

Количественный прогноз и анализ устойчивости СРС можно получить в процессе имитационного моделирования конфликтной «сверхсистемы» при различных параметрах входящих в нее подсистем:

- связности и потребности Р/С в частотах;

- задержки ИВЧДС в предоставлении частот;
- задержки подсистемы РР в целеуказании;
- производительности подсистемы РЭП в подавлении Р/С.

Подсистема Р/С имитирует работу 5 радиостанций в режиме коммутации пакетов с ППРЧ на ГРЧ из 20-ти частот коллективного пользования ($N = 20$). Связность сети равна количеству пригодных частот в ГРЧ, которые позволяют организовать 20 радионаправлений или 10 двунаправленных (дуплексных) информационных цепей [8]. При наличии доступности радиостанции могут соединяться в произвольном порядке. Все радионаправления имеют одинаковую важность и одинаковую вероятность подавления системой РЭП. Согласно терминологии, принятой в теории игр, СРС и система РЭП действуют в «чистых стратегиях», однозначно определяющих их действия в достижении целей.

Подсистема РП имитирует постановку помех пространственными волнами с отражением от ионосферы излучаемых стационарными станциями помех с энергопотенциалом 500 кВт – 10 МВт. В зависимости от рабочей частоты, времени года и суток, уровни преднамеренных помех могут находиться в пределах от 30 до 75 дБ мкВ/м. Ресурсы подсистемы РП достаточны для подавления ГРЧ в целом. Время реакции подсистемы РП определяется временем перестройки передатчиков помех на новую частоту и составляет от 15 с до 3–5 мин. Время реакции подсистемы РР на вскрытие и целеуказание много меньше, поэтому время реакции системы РЭП принято равным времени реакции подсистемы РП. Действие непреднамеренных помех может быть задано датчиком случайных чисел, распределенных по логарифмически-нормальному закону [13]. В целом действие системы РЭП и непреднамеренных помех определяет «время жизни» (t) рабочей частоты в ГРЧ.

Действие мобильных и авиационных комплексов РЭП не учитывается, потому что тактика их применения предполагает действие вблизи объектов подавления и постановку помех земной волной с уровнем от 10 до 33 дБ мкВ/м. Время их реакции составляет единицы миллисекунд. В этом случае режим ППРЧ не эффективен для помехозащиты, а эффективна автоматическая компенсация помех на основе антенн с управляемыми диаграммами направленности и уровнем подавления от 20 до 35 дБ. Тогда помехи, поставленные мобильными или авиационными комплексами РЭП, будут скомпенсированы до уровня шумов приемника и практически не окажут влияния на работу СРС. По этой причине рассматривается только один вариант постановки помех – стационарными станциями помех пространственной волной с отражением от ионосферы.

Радиостанции выявляют частоты, пораженные помехами, и исключают их из числа разрешенных путем передачи команд по КВ радиоканалам на частотах действующей ГРЧ [1]. Поток «выбытия» частот по причине воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех формирует реальное количество рабочих частот, находящихся в распоряжении Р/С, а также начальное количество вышедших из строя частот (n), начальную потребность в частотах (M) и крутизну (v) текущей потребности в частотах.

Потребности в частотах удовлетворяет ИВЧДС в полном объеме, но с задержкой (T). В СРС с традиционной ИВЧДС, если на момент установления связи частоты актуализированы трассовым зондированием, то задержка вхождения в связь T может составлять 1–2 с. Если информация о состоянии ионосферы отсутствует, то зондирование осуществляется непосредственно перед установлением связи, и общее время вхождения в связь может достигать нескольких минут (в зависимости от требуемой точности оценки состояния канала связи). Информация о помеховой обстановке на корреспондирующих станциях остается неизвестной, поэтому участки спектра с минимальным на данный момент уровнем помех могут быть использованы только случайно.

В СРС с перспективной ИВЧДС (оснащенной СМРС) мониторинг помеховой обстановки на периферийных станциях проводится непрерывно, с вычислением МО и СКО помех за время ожидания метеорного канала. Параметры помеховой обстановки (МО и СКО) передаются на центральный пост ИВЧДС по каналам метеорной радиосвязи (рисунок 3).

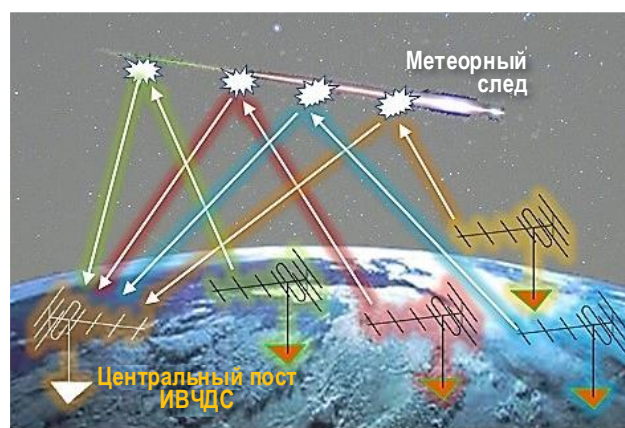


Рис. 3. Передача данных по метеорным радиоканалам

Fig. 3. Data Transmission via Meteor Radio Channels

Условия распространения радиоволн определяются расчетным методом по результатам просвечивания ионосферы сигналами спутников ГНСС [13–15], т. е. без трассового зондирования. Исполь-

зуя параметры РРВ и помеховой обстановки, однозначно определяют качество связи на текущий момент и ближайшую перспективу: вероятность ошибки ($p_{\text{ош}}$), вероятность обслуживания (ВО) и время действия (ВД) [16–18]. В обновленную ГРЧ включаются частоты с наилучшими прогнозными показателями качества связи. Рассылка обновленной ГРЧ осуществляется от центрального поста ИВЧДС на периферийные посты в автоматическом режиме по каналам метеорной радиосвязи в моменты появления метеорного радиоканала (см. рисунок 3). Поток поступающих в модель метеорных каналов задан генератором случайных чисел с распределением Пуассона.

Применение СМРС не ограничивается частотным обеспечением. По метеорным радиоканалам может осуществляться синхронизация радиостанций с наносекундной точностью для обеспечения режима ППРЧ [19–21]. Такой вариант синхронизации может рассматриваться как основной и как резервный.

Имеющиеся образцы систем синхронизации, разработанные в СПбПУ и АО «Обуховский завод», прошли лабораторные испытания на имитаторе метеорного радиоканала и обеспечивают точность синхронизации не ниже 10 нс. Испытания на тестовой радиолинии были запланированы на первую половину текущего года.

Характеристики метеорной радиосвязи достаточно полно описаны в трудах [22–25]. Антенны средств метеорной радиосвязи ориентируют в плоскости большого круга так, чтобы главные лепестки диаграмм направленности пересекались примерно на высоте 110 км, образуя т. н. «пятно засветки ионосферы» – область пространства на пересечении главных лепестков диаграмм направленности антенн.

Благоприятными условиями для метеорной радиосвязи являются трассы протяженностью 700–1400 км в утренние часы (0÷6 ч по местному времени) в летне-осенний период. Неблагоприятными – короткие трассы меньше 500 км, или протяженные – более 1400 км радиотрассы, в вечерние часы в зимне-весенний период.

В соответствии с существующей классификацией метеоры характеризуются звездной величиной, а метеорные следы (МСл) – электронной концентрацией. Метеоры 1...5 звездных величин оставляют «переуплотненные» МСл (МСлП) с электронной концентрацией $N > 10^{14}$, обеспечивающие среднечасовую скорость до 2–3 кбит/с. Метеоры 6...10 звездных величин оставляют «неуплотненные» МСл (МСлН) с электронной концентрацией $N < 10^{14}$, обеспечивающие среднечасовую скорость до 30–40 бит/с [22].

Количество МСл, попадающих в «пятно засветки», зависит от интенсивности метеорных потоков и размера «пятна засветки». При использовании 3–5-элементных антенн «Уда-Яги» в суммарно благоприятных условиях среднее количество метеоров 1–5 звездных величин, попадающих в «пятно засветки», составляет $K \approx 40$ в час, т. е. за 10-минутный интервал появляется 6–7 переуплотненных следов.

В суммарно неблагоприятных условиях в течение часа могут наблюдаться только метеоры 6–10 звездных величин (от следов которых еще происходит фиксируемое отражение радиоволн). Среднее количество таких метеоров составляет $K \approx 10500$ в час, т. е. за 10-минутный интервал появляется ~1750 неуплотненных следов.

Анализ имеющихся данных позволяет установить, что пропускная способность каналов метеорной радиосвязи даже в суммарно неблагоприятных условиях достаточна для обмена информацией в подсистеме ИВЧДС в 10-минутные интервалы.

От периферийных постов ИВЧДС необходимо передать в центральный пост величины МО и СКО помех ($МО_{\text{п}}$ и $СКО_{\text{п}}$) на 50 частотах, измеренные за время ожидания метеорного радиоканала. Объем измерений на одной частоте составляет 10 бит, например, $МО_{\text{п}} = 32$ дБ (6 бит) и $СКО_{\text{п}} = 12$ дБ (4 бита), а на 50 частотах объем измерений составит 500 бит.

От центрального поста ИВЧДС на периферийные посты необходимо передать список ГРЧ из 20-ти частот, представляющий собой перечень порядковых номеров частот из списка с разрешенных частот с трехзначной нумерацией. Для передачи списка из 20 номеров частот обновленной ГРЧ потребуется 200 бит.

Для обмена сообщениями по метеорному каналу используется алгоритм «с обратной связью» и постоянной скоростью передачи. Различные варианты протоколов по реализации алгоритмов «с обратной связью», в том числе для дуплексного и сетевого обмена, достаточно полно изложены в литературе [26–30]. Как показало моделирование систем метеорной связи «с обратной связью», при использовании передатчиков мощностью $P_{\text{прд}} \approx 1$ кВт и 3–5-элементных антенн «Уда-Яги» с суммарным коэффициентом усиления $G_{\text{Апрд}} + G_{\text{Апрм}} \approx 15$ дБ, за время существования «неуплотненного» метеорного следа в суммарно неблагоприятных условиях, возможна передача до одного килобита информации при средней вероятности ошибки на бит в блоке сообщения $p_{\text{ош}} \approx 10^{-2}$ [22]. Результаты моделирования показали, что время передачи данных между центральным и периферийными постами ИВЧДС составит не более 10 мин. Количество реально обновленных в

ГРЧ частот является случайной величиной с математическим ожиданием $МО_f$.

Характерная эволюция СРС с традиционной и перспективной ИВЧДС в конфликтной «сверхсистеме СРС-РЭП» представлена на рисунке 4.

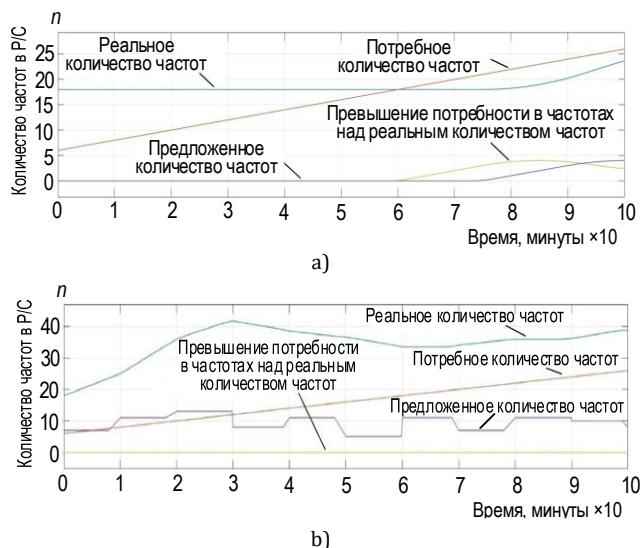


Рис. 4. Результаты моделирования СРС: а) с традиционной ИВЧДС (без СМРС); б) с перспективной ИВЧДС (оснащенной СМРС) и возможностью обновления частот по каналам метеорной радиосвязи

Fig. 4. Results of Modeling the RCS: a) with the Traditional IWFDs (without SMRS); b) with the Promising IWFDs (equipped with SMRS) and the Ability to Update Frequencies via Meteor Radio Communication Channels

Параметры условий функционирования конфликтной «сверхсистемы» следующие:

- крутизна потребности СРС в частотах, $\nu = 0,2 \text{ мин}^{-1}$;
- начальная потребность СРС в частотах, $M = 6$;
- задержка в предоставлении частот, $T = 1,5 \text{ мин.}$;
- количество пригодных частот в ГРЧ, предоставленных для Р/С, $N = 20$;
- срок жизни частот $t = 5 \text{ мин.}$;
- начальное значение выхода из строя частот, $m = 2$;
- поток неуплотненных МСл с распределением Пуассона с $\lambda = 10$;
- МО частот, обновленных в 10-минутные интервалы по каналам метеорной радиосвязи, $МО_f = 10 \text{ частот}$.

В СРС с традиционной ИВЧДС (рисунок 4а) характерным событием является подавление всех рабочих частот в результате активного противодействия со стороны системы РЭП. При заданных исходных данных уже после 60-ти мин. количество предоставляемых традиционной ИВЧДС пригодных частот меньше потребностей Р/С в частотах.

В СРС с перспективной ИВЧДС, оснащенной СМРС (рисунок 4б), количество пригодных частот в полной мере удовлетворяет потребности в них и

наблюдается стабильное превышение реального количества частот, имеющихся в распоряжении Р/С над потребным количеством частот. Это объясняется наличием метеорных радиоканалов, по которым происходит бесперебойное частотное обеспечение радиостанций независимо от активности и мощности средств радиоразведки и радиоподавления.

Перспективная ИВЧДС не только формирует ГРЧ с учетом условий РРВ и помеховой обстановки, но также способна обеспечить синхронизацию радиостанций с наносекундной точностью.

Если использовать метеорную радиосвязь в подсистеме ИВЧДС только в качестве средства обмена короткими сообщениями (SMS-сервиса) – для сбора данных о помеховой обстановке и рассылки обновлений ГРЧ объемом 0,5 кбит каждые 10 минут, то для этой цели требуется незначительный ресурс СМРС [5]. Тогда, например, можно использовать СМР с более «скромными» характеристиками – антенны меньших габаритов, с меньшим коэффициентом усиления или передатчики меньшей мощности. Периодичность обновления ГРЧ может динамически изменяться в зависимости от складывающейся помехоустойчивости. Как показывает опыт в результате воздействия РЭП, помехоустойчивость может устанавливаться на разумном уровне, при котором СРС «соглашается» с текущей связностью и поддерживает трафик на условиях, которые диктует система РЭП. Решение на отвлечение (или ограничение) ресурсов СМРС может быть принято на этапе оперативного управления, когда становится возможным наблюдение за конкретными действиями противника, а на этапе планирования развертывания СРС для этого требуется учет конкретного механизма распространения радиоволн, знание конкретных позиций, технических характеристик и алгоритмов работы средств РЭП.

Выводы и заключение

В перспективной подсистеме ИВЧДС на метеорные каналы перенесены сервисные функции поддержки радиосети, такие как передача на центральный пост ИВЧДС информации о помеховой обстановке, передача на радиостанции обновленной ГРЧ и синхронизация радиостанций.

Таким образом, наличие метеорных радиоканалов позволяет реализовать частотное обеспечение на технологиях, не требующих частотного ресурса КВ диапазона:

- трассовое зондирование заменено на пассивное зондирование и расчет условий РРВ на модели ионосферы;
- расчет качества связи на ближайшую перспективу осуществляется с учетом условий РРВ и помеховой обстановки;

– ГРЧ формируется из частот с наилучшими прогнозными показателями качества связи.

Внедрение перспективной подсистемы ИВЧДС увеличит частотный ресурс СРС и позволит обновлять ГРЧ до окончания «срока жизни» частот, что, в свою очередь, уменьшит временную доступность средствам РЭП к радиостанциям СРС. Это обеспечивает бесперебойное функционирование СРС в условиях активного радиоподавления.

Имеющийся в АО «НТИ «Радиосвязь» теоретический и практический задел в области радиосвязи и SDR-технологий позволяют реализовать программно-аппаратный комплекс ИВЧДС нового поколения, в котором частотное обеспечение осуществляется в автоматическом режиме в соответствии со складывающейся сигнально-помеховой обстановкой, обмен служебной информацией и синхронизация радиостанций осуществляются по метеорным радиоканалам.

Список источников

1. Панин Р.С., Путилин А.Н., Хвостунов Ю.С. Использование частотного ресурса системой декаметрового диапазона в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Техника средств связи. 2020. № 3(151). С. 2–14. EDN:JOZDQI
2. Панин Р.С. Решение задачи выбора параметров множественного доступа к анизотропным радиоканалам декаметрового диапазона // I-methods. 2022. Т. 14. № 4. С. 6. EDN:UOJZRX
3. Хвостунов Ю.С. Реализации сетевой синхронизации в автоматизированной сети радиосвязи декаметрового диапазона // Техника средств связи. 2020. № 2(150). С. 63–70. EDN:XZETEM
4. Головин О.В. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 598 с. EDN:QMPNFX
5. Forsyth P.A., Vogan E.L., Hansen D.R., Hines C.D. The Principles of JANET-A Meteor-Burst Communication System // Proceedings of the IRE. 1957. Vol. 45. Iss. 12. PP. 1642–1657. DOI:10.1109/JRPROC.1957.278296
6. Козирацкий А.Ю., Паринов М.Л. Вероятностная модель конфликта сложных систем // Материалы VI международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». Воронеж: ВГУ, 2006. С. 315–319.
7. Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 279 с.
8. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: ВАС, 2006.
9. Козирацкий А.Ю., Козирацкий А.Ю., Гревцев А.И., Паринов М.Л., Куцев С.С. Компьютерное моделирование конфликта сложных систем // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2008. № 2. С. 13–17. EDN:KHNZDB
10. Саати Т.Л. Математические модели конфликтных ситуаций. Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1977. 170 с.
11. Козирацкий А.Ю., Подлужный В.И., Паринов М.Л. Методический подход к построению вероятностной модели конфликта сложных систем // Вестник ВПРЭ. 2005. № 3. С. 4–16.
12. Капралов Д.Д., Кирик Д.И. Стохастическая модель метеорного радиоканала // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 54–64. DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-54-64. EDN:YAVGWD
13. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.
14. Филонин О.В., Белоконов И.В. Исследование возможностей пространственной реконструкции параметров электронной компоненты ионосферы с использованием навигационных спутников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 47–53. EDN:SZGQSV
15. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе систем GPS/ГЛОНАСС // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 6. С. 5. EDN:MSPQPD
16. Анишин М.М., Радио Л.П. Программный комплекс для прогнозирования характеристик КВ-радиолоний «Трасса-2019» (часть 2) // Техника радиосвязи. 2020. № 1(44). С. 40–51. DOI:10.33286/2075-8693-2020-44-40-51. EDN:ENZHXO
17. Мясковский Г.М. Системы производственной радиосвязи. М.: Связь, 1980. 216 с.
18. Рекомендация МСЭ-R P.533-14 (08/2019). Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий. Серия Р. Распространение радиоволн.
19. Latorre V.R. Utilization of the Phase Stability of Meteor Trails for Accurate Synchronization // Proceedings of the International Conference Res. IEEE, 1965. Pt. 2. PP. 121–129.
20. Epictetov L.A., Menakreev R.R., Sidorov V.V. Application of Meteor Burst Equipment for High Precision Comparisons of Time and Frequency Standards // Proceedings of the 7th European Frequency and Time Forum (EFTF, 16–18 March 1993, Neuchatel, Switzerland). Swiss Foundation for Research in Microtechnology, 1993. PP. 413–416.
21. Карпов А.В., Сулимов А.И., Шерстюков О.Н. Актуальные научные и прикладные проблемы метеорного распространения радиоволн // Труды конференции «Распространение радиоволн», 1-6 июля 2019, Казань, Российская Федерация. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. Т. 1. С. 20–28. EDN:GQBCCR
22. Мирошников В.И., Будко П.А., Жуков Г.А. Основные направления развития метеорной связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 4. С. 30–47. DOI:10.24411/2409-5419-2018-10277. EDN:PADANA
23. Crook A.G., Sytsma D. Meteor burst telemetry in hydrologic data acquisition // Proceedings of the Vancouver Workshop on Remote Data Transmission (9–22 August 1987). LAHS Publ., 1989. Vol. 178. PP. 9–17.
24. Асири Т., Карпов А.В., Кодиров А.И., Латипов Д., Попов В.И., Рубцов Л.Н. и др. Боковое распространение радиоволн на коротких метеорных радиотрассах // Известия вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 7. С. 912–913.

25. Захаров В.Н., Кривицкий Б.Х., Мамаев Н.С., Мановцев А.П., Матов В.И., Николаев О.А. и др. Справочник по радио-электронным системам. Т. 1. М.: Энергия, 1979. 352 с.
26. Miller S.L., Milstein L.B. A Comparison of protocols for a meteor-burst channel based on a time-varying channel model // IEEE Transactions on Communications. 1989. Vol. 37. Iss. 1. PP. 18–30. DOI:10.1109/26.21649
27. Волвенко С.В., Макаров С.Б., Завьялов С.В., Хачаянц М.Б. Выбор пороговых отношений сигнал/шум при приеме сигналов в метеорном канале связи с использованием полудуплексного протокола с повторной передачей по запросу // Радиотехника. 2016. № 12. С. 83–93. EDN:XRLFGH
28. Иванченко Ю.С., Орлова Л.Г. Способ увеличения скорости передачи данных в пакетной сети метеорной связи. Патент на изобретение RU 2461125 от 28.06.2010. Опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25. EDN:QXZBNT
29. Smith D.K., Donich T.G., Dickerson B.V., Leader R.E. Meteor scatter burst communication system. Patent US, no. 4277845, 20.02.1981.
30. Mui S.Y. A comparison of fixed and variable-rate signaling for meteor burst communications // IEEE Transactions on Communications. 1994. Vol. 42. Iss. 234. PP. 211–215. DOI:10.1109/TCOMM.1994.577010

References

1. Panin R.S., Putilin A.N., Khvostunov Yu.S. Use of frequency resource by decameter communication system in pseudo-random frequency tuning mode. *Means of Communication Equipment*. 2020;3(151):2–14. (in Russ.) EDN:JOZDQI
2. Panin R.S. Solution of the problem of selecting parameters of multiple access to anisotropic radio channels of decameter range. *I-methods*. 2022;14(4):6. (in Russ.) EDN:UOJZRX
3. Khvostunov Yu.S. Implementation of network synchronization in an automated radio communication network of decameter range. *Means of Communication Equipment*. 2020;2(150):63–70. (in Russ.) EDN:XZETEM
4. Golovin O.V. *Systems and Devices of Short-Wave Radio Communication*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom Publ.; 2006. 598 p. (in Russ.) EDN:QMPNFX
5. Forsyth P.A., Vogan E.L., Hansen D.R., Hines C.D. The Principles of JANET-A Meteor-Burst Communication System. *Proceedings of the IRE*. 1957;45(12):1642–1657. DOI:10.1109/JRPROC.1957.278296
6. Koziratsky A.Yu., Parinov M.L. Probabilistic model of conflict of complex systems. *Proceedings of the VI International Scientific and Methodological Conference on Computer Science: Problems, Methodology, Technologies*. Voronezh: Voronezh State University Publ.; 2006. p.315–319. (in Russ.)
7. Sirota A.A. *Computer Modeling and Evaluation of the Effectiveness of Complex Systems*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2006. 279 p. (in Russ.)
8. Bogovik A.V., Ignatov V.V. *The Effectiveness of Military Communication Systems and Methods for Its Evaluation*. St. Petersburg: Military Signal Academy Publ.; 2006. (in Russ.)
9. Koziratsky Yu.L., Koziratsky A.Yu., Grevtsev A.I., Parinov M.L., Kushev S.S. Computer modeling of conflict in complex systems. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2008;2:13–17. (in Russ.) EDN:KHNZDB
10. Saati T.L. *Mathematical models of arms control and disarmament: Application of mathematical structures in politics (Operations Research Society of America. Publications in operations research)*. Wiley, 1968.
11. Koziratskiy Ju.L., Podluzhnyi V.I., Parinov M.L. Methodical Approach to Constructing Probabilistic Models of Complex Conflict Systems. *Vestnik of Military Institute of Radioelectronics*. 2005;3:4–16. (in Russ.)
12. Kapralov D.D., Kirik D.I. Stochastic Model of Meteor-Burst Radio Channel. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(3):54–64. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-54-64. EDN:YAVGWD
13. Komarov V.F., Sosunov V.N. *Random Radio Interference and Reliability of HF Communications*. Moscow: Svyaz Publ.; 1977. 136 p. (in Russ.)
14. Philonin O.V., Belokonov I.V. Space Research Opportunities for Reconstruction of Electronic Components Ionosphere by Means of Utilizations of Navigation Satellites. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(4):47–53. (in Russ.) EDN:SZGQSV
15. Smirnov V.M., Smirnova E.V. Ionospheric support module based on GPS/GLONASS systems. *Journal of Radio Electronics*. 2010;6:5. (in Russ.) EDN:MSPQPD
16. Anishin M.M., Radio L.P. Software Package for Forecast Characteristics HF Radio Link «Trassa-2019» (Part 2). *Radio Communication Technology*. 2020;1(44):40–51. (in Russ.) DOI:10.33286/2075-8693-2020-44-40-51. EDN:ENZHXO
17. Myaskovsky G.M. *Industrial Radio Communication Systems*. Moscow: Svyaz Publ.; 1980. 216 p. (in Russ.)
18. Rec. ITU-R P.533-14 (08/2019). *Method for predicting the performance of HF links. Series P. Radiowave Propagation*.
19. Latorre V.R. Utilization of the Phase Stability of Meteor Trails for Accurate Synchronization. *Proceedings of the International Conference Res. IEEE*; 1965. pt.2. p.121–129.
20. Epictetov L.A., Menakreev R.R., Sidorov V.V. Application of Meteor Burst Equipment for High Precision Comparisons of Time and Frequency Standards. *Proceedings of the 7th European Frequency and Time Forum, EFTF, Neuchatel, Switzerland, 16–18 March 1993*. Swiss Foundation for Research in Microtechnology; 1993. p.413–416.
21. Karpov A.V., Sulimov A.I., Sherstyukov O.N. Modern Scientific and Applied Problems of Meteor Scatter Radio Propagation. *Proceedings of the Conference on Propagation of Radio Waves, 1–6 July 2019, Kazan, Russian Federation, vol.1*. Kazan: Kazan Federal University Publ.; 2019. p.20–28. (in Russ.) EDN:GQBCDR
22. Miroshnikov V.I., Budko P.A., Zhukov G.A. The main directions of development of meteor communication. *H&ES Research*. 2019;11(4):30–47. (in Russ.) DOI:10.24411/2409-5419-2018-10277. EDN:PADANA
23. Crook A.G., Sytsma D. Meteor burst telemetry in hydrologic data acquisition. *Proceedings of the Vancouver Workshop on Remote Data Transmission, 9–22 August 1987, vol.178*. LAHS Publ.; 1989. p.9–17.

24. Asiri T., Karpov A.V., Kodirov A.I., Latipov D., Popov V.I., Rubtsov L.N., et al. Lateral propagation of radio waves on short meteor radio paths. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1989;32(7):912–913. (in Russ.)
25. Zakharov V.N., Krivitsky B.Kh., Mamaev N.S., Manovtsev A.P., Matov V.I., Nikolaev O.A., et al. *Handbook on Radio-Electronic Systems, vol.1*. Moscow: Energy Publ.; 1979. 352 p. (in Russ.)
26. Miller S.L., Milstein L.B. A Comparison of protocols for a meteor-burst channel based on a time-varying channel model. *IEEE Transactions on Communications*. 1989;37(1):18–30. DOI:10.1109/26.21649
27. Volvenko S.V., Makarov S.B., Zavyalov S.V., Khachayants M.B. The choice of the threshold SNR at the reception of signals in the meteoric communication channel with the use of half-duplex protocol with retransmission on request. *Radioengineering*. 2016;12:83–93. (in Russ.) EDN:XRLFGH
28. Ivanchenko Yu.S., Orlova L.G. *Method for increasing the data transmission rate in a packet meteor communication network*. Patent RF, no. 2461125, 28.06.2010. (in Russ.) EDN:QXZBNT
29. Smith D.K., Donich T.G., Dickerson B.V., Leader R.E. *Meteor scatter burst communication system*. Patent US, no. 4277845, 20.02.1981.
30. Mui S.Y. A comparison of fixed and variable-rate signaling for meteor burst communications. *IEEE Transactions on Communications*. 1994;42(234):211–215. DOI:10.1109/TCOMM.1994.577010

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2025; принята к публикации 24.07.2025.

The article was submitted 12.05.2025; approved after reviewing 19.06.2025; accepted for publication 24.07.2025.

Информация об авторах:

РУСИН
Сергей Васильевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-технического института «Радиосвязь»
 <https://orcid.org/0009-0005-8912-9576>

ДОЛГИХ
Василий Алексеевич

генеральный директор Научно-технического института «Радиосвязь»
 <https://orcid.org/0009-0001-6297-042X>

ПАШКЕВИЧ
Василий Дмитриевич

начальник отдела перспективных исследований и разработок Научно-технического института «Радиосвязь»
 <https://orcid.org/0000-0001-9306-1934>

ВОЛВЕНКО
Сергей Валентинович

старший научный сотрудник Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
 <https://orcid.org/0000-0001-7726-8492>

МИНКО
Виктор Александрович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник 4-го Центрального научно-исследовательского института Минобороны России
 <https://orcid.org/0009-0004-0169-4523>

ДАСАЕВ
Руслан Абдрашитович

младший научный сотрудник 4-го Центрального научно-исследовательского института Минобороны России
 <https://orcid.org/0009-0005-5420-6113>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.