



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.1>

УДК: 621.391

ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СЕТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC

А.А. Молев¹, К.Д. Титов^{1,2}, В.В. Кондаурова¹

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

² Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Статья поступила в редакцию 30 августа 2023 г.

Аннотация. Проведена оценка помехозащищенности сети сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех от различных источников (с разной конфигурацией) на основе имитационного моделирования в среде Anylogic. Показано, что технология сверхширокополосной радиосвязи обеспечивает эффективное функционирование сети радиосвязи в условиях воздействия узкополосных помех.

Ключевые слова: имитационное моделирование, сверхширокополосная радиосвязь, помехозащищенность, Anylogic.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Автор для переписки: Титов Константин Дмитриевич, titovkd@gmail.com

Введение

В современной радиоэлектронике перспективными являются технологии, основанные на применении сверхширокополосных (СШП) сигналов, их использование расширяет функциональные возможности существующих радиоэлектронных систем, а также позволяет создавать принципиально новые радиоэлектронные системы, предназначенные для решения широкого круга научно-технических задач. К ключевым особенностям, отличающим СШП устройства от традиционных (узкополосных), относится бóльшая пропускная способность, лучшая помехоустойчивость и скрытность. Современные средства связи локальных и персональных беспроводных сетей, функционирующие в соответствии со стандартами IEEE 802.15.3, 802.15.4, 802.11ad, 802.11ay, используют СШП сигналы. Многие разрабатываемые системы связи субтерагерцового диапазона также используют для передачи СШП сигналы.

Важным фактором, обуславливающим сложность исследования алгоритмов обработки СШП сигналов, является существенное изменение их формы на всех этапах распространения: при передаче по фидерным трактам, при излучении, распространении в дисперсной среде, при отражении от объекта локации и приёме. Перечисленные особенности настолько существенны и принципиальны, что разработку радиосистем на основе СШП сигналов можно выделить в самостоятельное научно-техническое направление с собственными методами анализа и нетрадиционными схемотехническими и алгоритмическими решениями. Научная проблема создания новых и совершенствования имеющихся СШП устройств и сетей при наличии случайных искажений в условиях априорной неопределённости имеет высокую значимость как в развитии фундаментальных основ радиофизики и радиотехники, так и в практических приложениях, при разработке систем радиосвязи, локации, навигации и др.

К отличительным особенностям сетей СШП радиосвязи по сравнению с традиционными, обеспечивающими их устойчивое и эффективное функционирование в условиях сложной помеховой обстановки, можно отнести:

- отсутствие явно выделенных элементов сети, осуществляющих управление сетью и коммутацию трафика,

- быстрая адаптация сети к условиям динамически меняющейся помеховой обстановки за счет исключения из схемы маршрутизации сегментов сети, подверженных воздействию помех,

- возможность оперативной смены диапазона рабочих частот и регулирования выходной мощности передатчиков при наличии помех,

- возможность адаптивного управления шириной полосы сигнала и видом модуляции для изменения пропускной способности, дальности связи, при изменении погодных условий или помеховой обстановки,

- возможность адаптивного регулирования выходной мощности передатчиков радиостанций.

Современные и перспективные сети СШП радиосвязи представляют собой организационно и технически сложные пространственно-распределенные системы, включающие в свой состав большое количество взаимодействующих унифицированных средств связи, объединённых общими правилами взаимодействия. Оценка эффективности сетей СШП радиосвязи в целом аналитическими методами весьма затруднительна, поскольку позволяет получить лишь самые общие качественные выводы о характере протекающих в системе процессах. При анализе необходимо учитывать процессы системного уровня – оценки состояния электромагнитной обстановки и адаптации к ее изменению, маршрутизации пакетов данных, обусловленные необходимостью обеспечения непрерывности управления, надежности связи при высокой мобильности абонентов, защищенности каналов от несанкционированного доступа и воздействия электромагнитных помех, с жесткими требованиями к надёжностным и вероятностно-временным характеристикам передачи данных.

Поэтому применительно к сетям СШП радиосвязи, имеющей адаптивную структуру и характеристики, варьируемые в процессе функционирования в широких пределах, целесообразно использовать методы дискретно-событийного имитационного моделирования сетей и систем связи для проведения исследований по анализу особенностей их построения и алгоритмов функционирования в условиях воздействия помех от различных источников [1, 2].

Цель работы – оценка помехозащищенности сети СШП радиосвязи в условиях воздействия помех различной мощности, широкополосности, плотности и вариантов размещения их источников, применительно к различным топологиям сети.

1. Общее описание имитационной модели

Для проведения исследования в среде Anylogic была разработана имитационная модель функционирования сети СШП радиосвязи в условиях воздействия помех (рис. 1), в которой процесс передачи данных детализируется по уровням модели взаимодействия открытых систем, соответствующих различным этапам процесса передачи данных [1, 3].

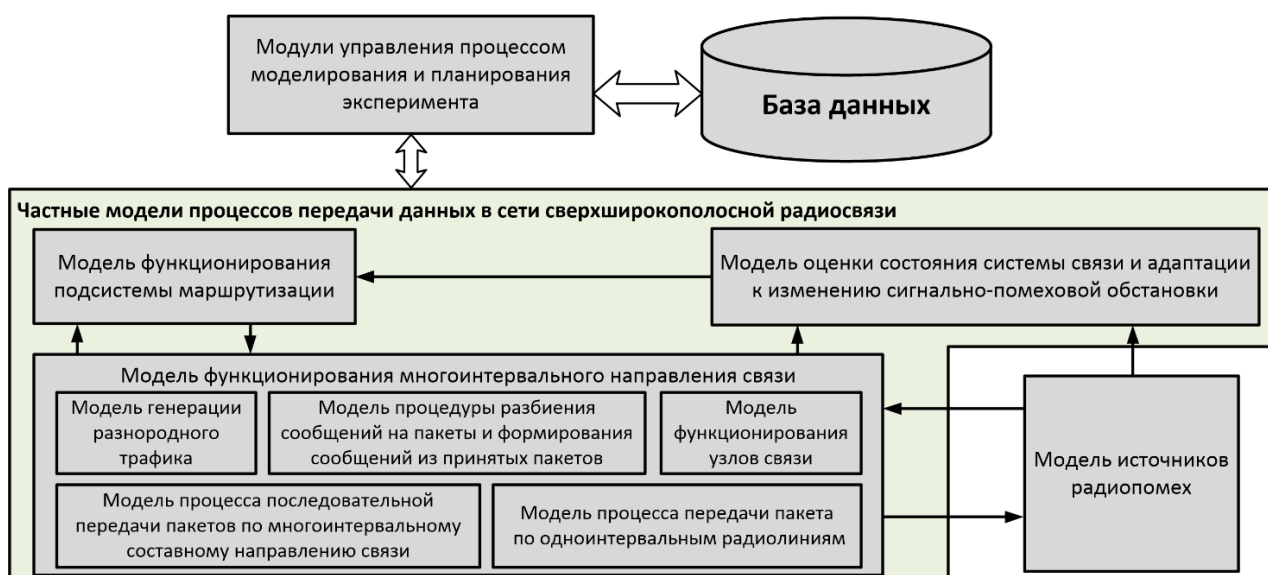


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели сети СШП радиосвязи.

Имитационная модель позволяет проводить научно-исследовательские эксперименты для сравнительного анализа различных вариантов построения сетей СШП радиосвязи, характеристик их быстродействия, степени использования возможностей по передаче данных с учетом маршрутизации и адаптации к электромагнитной обстановке.

Имитационная модель включает следующие основные компоненты:

– частные модели процессов передачи данных в сети СШП радиосвязи – многоинтервального направления связи, подсистемы маршрутизации, оценки состояния системы связи и адаптации к изменению электромагнитной обстановки;

– модель источников радиопомех;

– модули управления процессом моделирования, планирования эксперимента и ввода/корректировки информации из базы данных;

– база данных, содержащая информацию о структуре и параметрах работы сети СШП радиосвязи, характеристиках размещения узлов связи на местности, типах и характеристиках радиостанций, данные о характеристиках источников радиопомех.

Входными данными модели являются характеристики сети СШП радиосвязи, включающие пространственно-временные характеристики размещения абонентов; перечень, состав и основные характеристики направлений руководства (взаимодействующих абонентов) – количество, входящих в них абонентов, объемы и интенсивности передаваемых данных, время ценности информации; характеристики радиостанций и источников помех – диапазоны частот, выходная мощность, виды и режимы излучения, продолжительность и интенсивность выходов в эфир.

К выходным данным модели относятся значения показателей эффективности сети СШП радиосвязи и динамика их изменения во времени моделирования. В качестве показателя эффективности используется «реализуемая пропускная способность сети радиосвязи Q_c », характеризующая её общее быстродействие, достигаемое в процессе функционирования с учетом

возможностей по маршрутизации пакетов данных и адаптации к электромагнитной обстановке. Вычисляется в рамках реализации моделирования как отношение общего объема успешно переданных сообщений к длительности интервала моделирования $t_{\text{мод}}$:

$$Q_c[\text{Мбит} / \text{с}] = \frac{\sum_j^{N_{\text{нс}}} S_{\text{успер}j}}{t_{\text{мод}}},$$

где $S_{\text{успер}j}$ – объем успешно переданных сообщений в j -ом направлении связи.

Обобщенное состояние сети СШП радиосвязи может быть оценено на основе сравнения реализуемой пропускной способности сети связи в условиях воздействия помех $Q(\Pi_{\text{возд}})$ с величиной, достигаемой в процессе нормального функционирования системы связи $Q(\Pi_{\text{норм}})$, т.е. величиной снижения пропускной способности сети СШП радиосвязи относительно исходной (ΔQ , %). Для оценки состояния сети связи (направления связи) в зависимости от величины снижения её пропускной способности относительно исходной используются следующие критерии [4]:

«Устойчиво» – $\Delta Q \leq 20\%$;

«Затруднено» – $20 < \Delta Q \leq 40\%$;

«Нарушено» – $40 < \Delta Q \leq 80\%$;

«Сорвано» – $\Delta Q > 80\%$.

Величина снижения пропускной способности относительно исходной вычисляется с использованием выражения:

$$\Delta Q(\Pi_{\text{возд}}) = \frac{Q(\Pi_{\text{норм}}) - Q(\Pi_{\text{возд}})}{Q(\Pi_{\text{норм}})} \cdot 100\%,$$

где $\Pi_{\text{возд}} = (T, N_{\text{блок}}, \{B\}, \Delta t_{\text{изл}}, \tau_{\text{изл}})$ – параметры воздействия источников помех на сеть СШП радиосвязи, включающие тип блокируемых объектов T , их количество $N_{\text{блок}}$ и перечень $\{B\}$, периодичность $\Delta t_{\text{изл}}$ и продолжительность

воздействия помех $\tau_{изл}$, а $\Pi_{норм}$ – параметры, соответствующие отсутствию воздействия, т.е. количество заблокированных объектов $N_{блок} = 0$ и множество объектов на которые осуществляется воздействие – пустое $\{B\} = \emptyset$.

Имитационная модель характеризуется следующими особенностями:

– расчет частотно-энергетических характеристик для оценки дальности связи между абонентами, а также уровней помех, воздействующих на приемные устройства, осуществляется с применением аналитических соотношений теории распространения радиоволн для СШП сигналов (в диапазоне рабочих частот 0,5...325 ГГц) [5];

– адаптация к воздействию помех реализуется путем выполнения операций, включающих корректировку главного лепестка диаграммы направленности АФАР при воздействии помех, смену частотного канала и вида модуляции сигналов, в том числе использование низкоуровневых модуляций с сопутствующим снижением скорости передачи данных;

– в качестве показателя критического дестабилизирующего воздействия на линии СШП радиосвязи определены полученные в [2] предельные отношения помеха/сигнал.

Совокупность указанных показателей позволяет осуществить всестороннее рассмотрение особенностей функционирования сети СШП радиосвязи в целом и ее структурных элементов в условиях воздействия помех, в интересах сравнительного анализа различных вариантов построения сети радиосвязи, характеристик её быстродействия, оценки степени использования возможностей по передаче данных (пропускной способности) с учетом маршрутизации и адаптации к электромагнитной обстановке [3].

2. Частотно-энергетические соотношения для расчета характеристик

Для средств радиосвязи, использующих для передачи данных СШП сигналы, при расчете уровней принимаемых сигналов необходимо учитывать, что при применении классического уравнения радиосвязи для узкополосных

сигналов [6], полученные результаты являются некорректными с увеличением относительной ширины спектра СШП сигналов вследствие того, что основные характеристики элементов сети радиосвязи, такие как коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны D_ω и эффективная площадь (ЭП) приемной антенны A_ω рассчитываются или измеряются только на конкретной частоте ω . Это допустимо для узкополосных сигналов, поскольку из-за малой ширины спектра эти характеристики остаются практически неизменными на любой частоте в пределах ширины спектра сигнала. Однако для СШП сигналов из-за очень большой ширины спектра, соизмеримой с его центральной частотой, указанное допущение нарушается и предположение о постоянстве характеристик $D_\omega(\omega)$ и $A_\omega(\omega)$ в пределах ширины спектра сигнала, как правило, не выполняется. В работах [5, 7] проведены исследования частотно-энергетических характеристик, в которых максимальная дальность СШП связи пропорциональна квадратному корню из максимально допустимой средней мощности излучения $P_{\text{cp max}}$, средней в полосе излучаемых частот обобщенной ЭП приёмной антенны в системе связи $\{G_T(\omega)A_R(\omega)\}_{\text{cp}}$ и обратно пропорциональна квадратному корню из скорости передачи информации V . Выражение для максимальной дальности СШП связи определяется выражением:

$$r_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_{\text{cp max}} \{G_T(\omega)A_R(\omega)\}_{\text{cp}}}{4\pi V N_{\text{ш}} q_0^2}},$$

где обозначено:

$$\{G_T(\omega)A_R(\omega)\}_{\text{cp}} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_T(\omega)A_R(\omega)d\omega / (\omega_2 - \omega_1)$$

– среднее значение произведения антенных характеристик $G_T(\omega)A_R(\omega)$ в поддиапазоне (ω_1, ω_2) , которое, исходя из размерности, называют обобщенной

ЭП приёмной антенны в системе связи. Эта величина играет роль передаточной функции и, помимо свойств приёмной антенны (множитель $A_R(\omega)$), учитывает также усиление сигнала передающей антенной (множитель $G_T(\omega)$).

Например, для дипольных антенн при отсутствии потерь и согласовании с фидером во всей полосе частот [8]:

$$G_T(\omega) = 1,5,$$

$$A_R(\omega) = \pi(c/\omega)^2 G_{R0} \equiv \pi(c/\omega)^2 D_{R0},$$

$$\{D_T(\omega)A_R(\omega)\}_{\text{cp}} = \pi c^2 D_{T0}^2 / \omega_1 \omega_2 \approx 1,4 \times 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Величина, $\{G_T(\omega)A_R(\omega)\}_{\text{cp}}$, достигаемая в приёмно-передающей паре, состоящей из рупорных антенн Пб-23М, согласно паспорту антенны [9], приблизительно равна $4,4 \text{ м}^2$.

Энергетическое уравнение передачи/приема СШП сигналов, определяющее дальность радиосвязи получено в работе [5]:

$$W_R(\theta, \varphi, \theta_1, \varphi_1) = \frac{1}{4\pi D_c^2} W_T \eta_T \eta_R F_R^2 F_T^2 |\zeta|^2 (1 - |\dot{\Gamma}_R|^2) \times$$

$$\times (1 - |\dot{\Gamma}_T|^2) D(\theta, \varphi) A(\theta, \varphi, \theta_1, \varphi_1) \lambda^2 \geq W_{R\text{min}}, \quad (1)$$

где нижние индексы:

«R» – Receiver (характеристики приемника);

«T» – Transmitter (характеристики передатчика);

$W_{R\text{min}}$ – минимальное значение энергии на входе приемника;

W_T – плотность потока энергии;

$\eta_{R,T}$ – коэффициент полезного действия приёмной/передающей антенны;

$F_{R,T}$ – значение амплитудной диаграммы направленности приемной/передающей антенны в направлении на передающую/приемную антенну;

$\dot{\Gamma}_{R,T}$ – комплексный коэффициент отражения в антенно-фидерном тракте приемника/ передатчика;

$|\xi|^2$ – поляризационный коэффициент передачи по мощности, зависящий в общем случае от структур приемной и передающей антенн и их взаимной угловой ориентации в пространстве;

$D(\theta, \varphi)$ и $A(\theta, \varphi, \theta_1, \varphi_1)$ – интегральные КНД и ЭП антенн;

λ – длина волны;

D_c – максимальная дальность связи.

Энергетическое уравнение применяется в алгоритме формирования топологии сети СШП радиосвязи для проверки условия $W_R \geq W_{R_{\min}}$, заключающегося в оценке превышения энергии сигнала от передающего корреспондента заданного минимального значения энергии на входе приемника радиоэлектронного средства, при котором обеспечивается устойчивая связь с требуемым качеством функционирования. При выполнении данного условия может быть обеспечена возможность организации связи между парой корреспондентов.

3. Исходные данные для расчетов и порядок проведения исследования

В зависимости от организационной принадлежности, степени мобильности и требований к дальности связи, в сети СШП радиосвязи могут применяться следующие типы радиостанций [1]:

диапазона 1...10 ГГц с пропускной способностью порядка 1 Мбит/с и высотой поднятия антенн 1,5 м – для абонентов, обладающих высокой подвижностью и использующих линии связи протяженностью до 5 км;

диапазона 10...80 ГГц с пропускной способностью до 200 Гбит/с и высотой поднятия антенн порядка 20 м – для низкоомобильных (стационарных) абонентов, использующих для связи радиолинии дальностью до 100 км.

Для каждого абонента задаются текущее направление, узел связи и активные объекты классов, воспроизводящие генерацию СШП сигналов, формирование и прием информации в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4 [10]. При этом аналитическая модель СШП сигнала при имитационном моделировании может быть выбрана любой – разрывный или регулярный СШП радио- или видеосигнал. Формализация поведения каждого из агрегатов осуществляется путем задания множеств входных и выходных сигналов, состояний агрегатов и операторов изменения их состояний.

Для расчета напряженности поля в заданной точке используются выражения, приведенные в [5], в качестве исходных данных для расчетов определена рабочая частота в диапазоне 10-80 ГГц, ширина полосы сигнала 2 ГГц, выходная мощность передатчика 100 мВт, высоты поднятия антенн для наземных объектов 1,5 м (для воздушных – до 10 км) и коэффициент усиления антенны 20-30 дБ.

В ходе исследования рассматривалась сеть СШП радиосвязи имеющая трёхуровневую структуру, нижний (первый) уровень которой образован локальными сетями мобильных радиостанций, средний (второй) – абонентами, имеющими мобильные и стационарные радиостанции, а верхний (третий) – стационарными узлами, образующими опорную сеть связи. Через второй уровень осуществляется взаимодействие высокоомобильных и стационарных абонентов первого и третьего уровней. Связь между корреспондентами организуется по принципу «каждый с каждым», при необходимости связи с удаленным корреспондентом осуществляется маршрутизация через опорную сеть связи. Топология сети меняется в зависимости от состояния радиоэлектронной обстановки, и информация в общем случае передается по произвольному маршруту с ретрансляцией информации через промежуточные узлы связи [11, 12]. В настоящее время

на основе таких сетей строятся системы радиосвязи, обеспечивающие управление в экстремальных и сложных природно-географических условиях, например, в интересах автоматизированных систем управления экологически опасными объектами, систем обеспечения ликвидации последствий масштабных чрезвычайных ситуаций и т.д. [13-15].

Вариант трёхуровневой структуры моделируемой сети СШП радиосвязи имеет вид, представленный на рис. 2.

Определение возможности организации связи между радиостанциями узла связи осуществляется для каждой пары корреспондентов, путем расчёта напряженности поля в точке приёма на трассе «передающая радиостанция – приёмная радиостанция» и проверки выполнения следующих условий:

совместимости абонентов по их организационной принадлежности;

обеспечения прямой видимости между корреспондентами;

превышения напряженности сигнала от передающего корреспондента E_{prd}

в точке размещения приемного корреспондента в обе стороны: $E_{prd} \geq E_{min}$, где

E_{min} – минимальное значение напряженности на входе приемника радиостанции, при котором обеспечивается устойчивая связь, типовое значение которой составляет от -55 до -110 дБм.

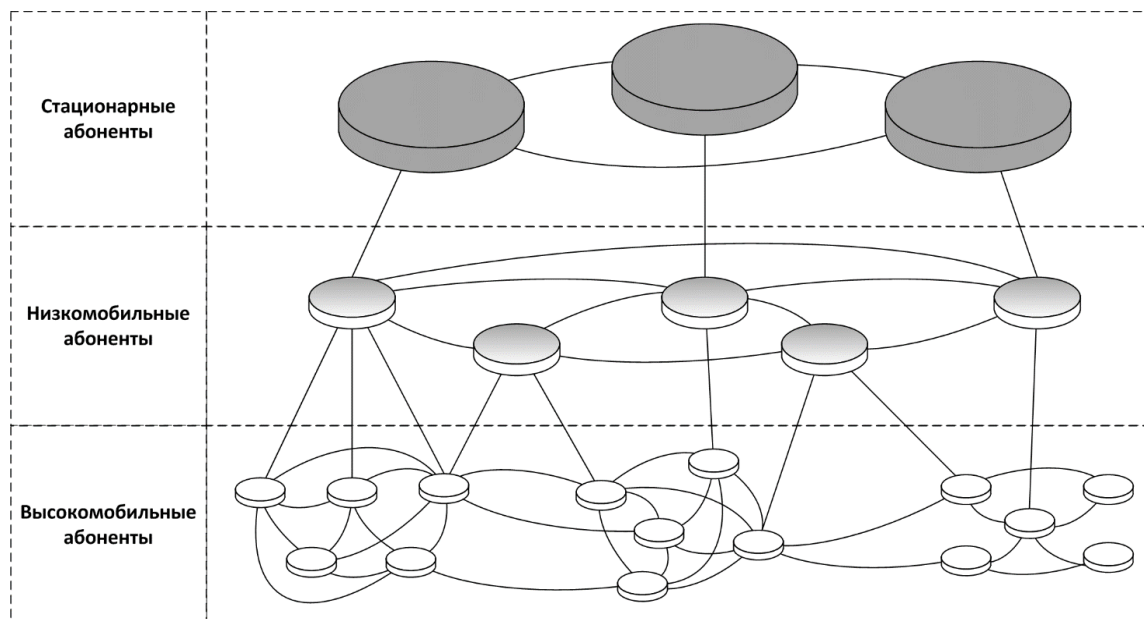


Рис. 2. Вариант трёхуровневой структуры моделируемой сети СШП радиосвязи.

Напряженность поля в точке приёма является неотъемлемой частью расчёта энергетического уравнения (1), поскольку величина $A(\theta, \varphi, \theta_1, \varphi_1)$ представляет собой отношение энергии сигналов, поступающих на вход приемника к плотности потока энергии за тот же интервал времен в точке приёма.

Оценка степени воздействия помех на приемные устройства осуществляется путем расчёта отношения «помеха/сигнал» по пиковой мощности k_{NSR} и сравнения его с пороговым значением [2], при превышении которого достигается срыв передачи информации между абонентами [16]:

$$k_{NSR} = \left(\frac{E_n}{E_c} \right),$$

где E_n и E_c – значения напряжённости поля помехи и поля сигнала в точке размещения приёмной радиостанции соответственно.

Порядок проведения оценки эффективности сети СШП радиосвязи при воздействии помех на ее элементы состоит в выполнении последовательности операций [3, 17]:

- ввода/корректировки исходных данных;
- определения необходимого объема экспериментов;
- проведения имитационного моделирования;
- сбора и анализа результатов, получении выводов и заключений на основе анализа статистического материала, сформированного в ходе имитационных экспериментов.

Внешний вид элементов модели в ходе исследований представлен на рис. 3, который иллюстрирует структуру моделируемой сети связи. Голубыми кружками изображены элементы сети (абоненты), а многоугольниками – различные сети, сформированные в текущий момент времени.

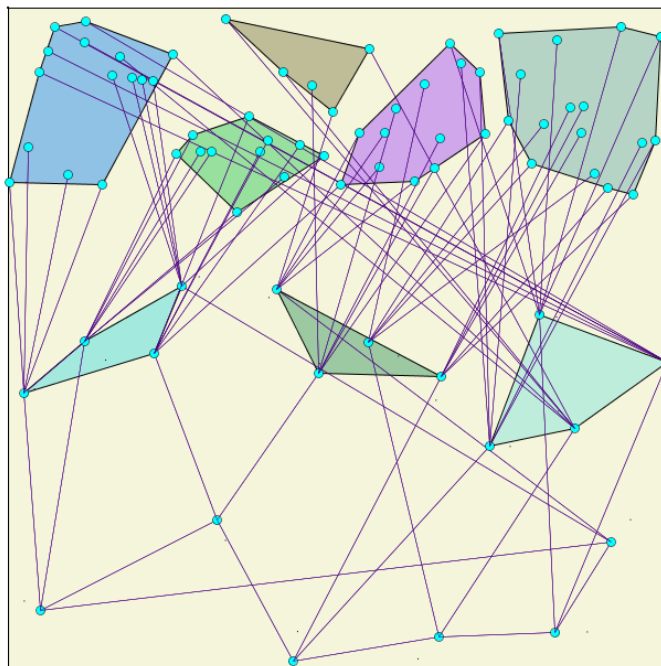


Рис. 3. Отображение структуры сети СШП радиосвязи при моделировании.

Структура моделируемой сети СШП радиосвязи формируется автоматически на основе введенных исходных данных. После начала работы сети, осуществляется размещение источников помех (красные кружки) и их включение (рис. 4). По окончании реализации модели отображаются значения выходных показателей, которые вычисляются по результатам моделирования.

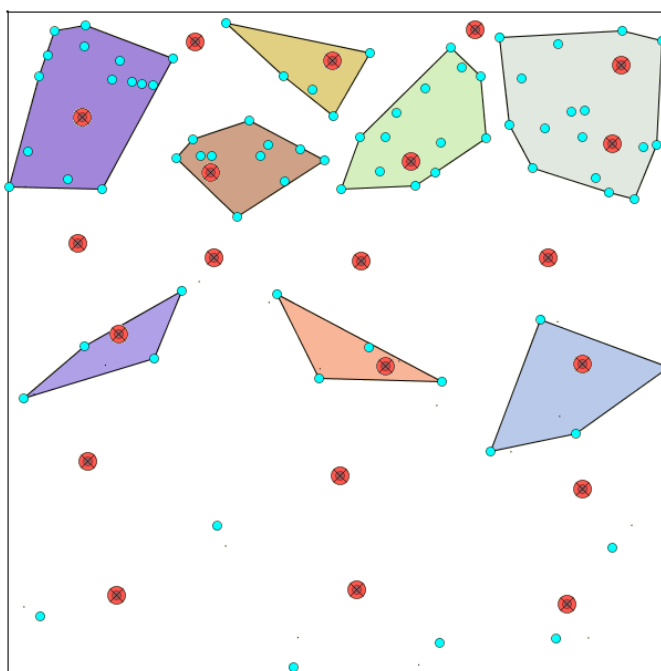


Рис. 4. Отображение моделируемых источников помех.

Для оценки структуры сгенерированной системы связи предусматривается возможность отображения взаимосвязей между узлами связи как на основе информации об иерархии системы управления, так и на основе топологии сети радиосвязи. Данная возможность проиллюстрирована на рис. 5. Видно, что для ряда узлов отсутствие прямого взаимодействия не означает отсутствия взаимосвязей между ними. В интересах определения узлов связи, оказывающих наибольший вклад в процесс передачи данных, реализована возможность отображения интенсивности передаваемых данных изменением цвета заливки знака, чем интенсивнее – тем темнее.

На основе информации об источниках помех осуществляется расчет зон, в которых уровень помехового сигнала превышает заданный. Для оценки помехозащищенности системы связи и отдельных ее элементов от воздействия помех используется совмещенное отображение информации о структуре системы связи и зонах воздействия помех (рис. 5), позволяющее оценить возможности по адаптации к воздействию помех и использованию различных мер помехозащиты.

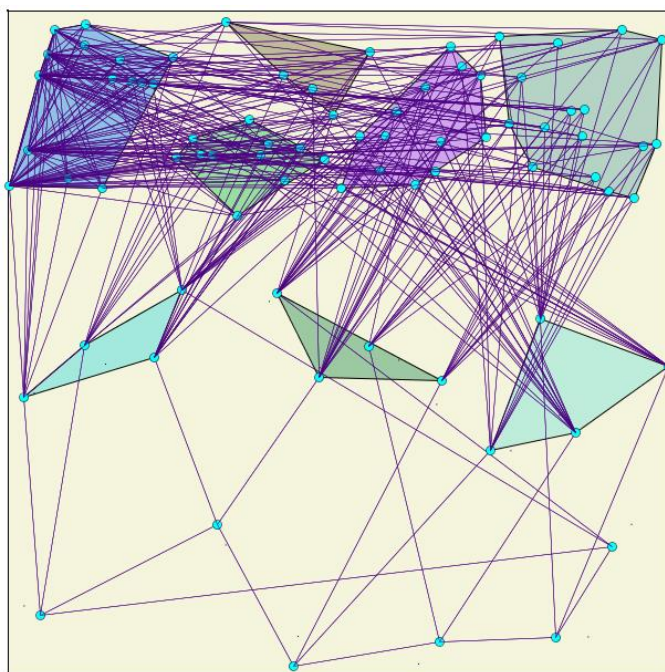


Рис. 5. Отображение взаимосвязей между абонентами сети.

Определение результата воздействия помех на радиолинии выполняется с применением расчетных соотношений, приведенных выше, и сравнивается с заданным критериальным уровнем [14]. При расчетах также учитывается направления ориентации антенн и ширина их диаграмм направленности, как для антенн радиостанций, так и для источников помех. Для высокоомобильных абонентов чаще всего применяются всенаправленные антенны, для низкоомобильных и стационарных абонентов – с диаграммой направленности $1-10^\circ$.

При проведении имитационных экспериментов в модели автоматически вычисляются значения и динамика изменения всех показателей. Результатами моделирования является динамика изменения пропускной способности сети СШП радиосвязи, отображаемая в виде графика, приведенного на рис. 6, который показывает, как изменяется во времени моделирования текущее значение пропускной способности сети радиосвязи Q_c . На рисунке 6 обозначены: А – момент времени начала воздействия помех, 1 – пропускная способность без воздействия помех, 2 – пропускная способность, достигаемая в результате воздействия помех.

При отсутствии помехового воздействия в установившемся режиме работы сети СШП радиосвязи, значение реализуемой пропускной способности Q_c будет оставаться неизменным или сохраняться в пределах некоторого интервала значений, как правило, составляющего 5-10% от текущего значения пропускной способности (кривая 1 на рис. 6). После воздействия помех (точка А на рис. 6), пропускная способность сети радиосвязи снижается, при этом, за счет адаптации сети радиосвязи путем реализации мер помехозащиты, маршрутизации пакетов данных, изменении частотно-энергетических характеристик, осуществляется частичное снижение до некоторого уровня, при котором возможность передачи данных сохраняется (кривая 2 на рис. 6).

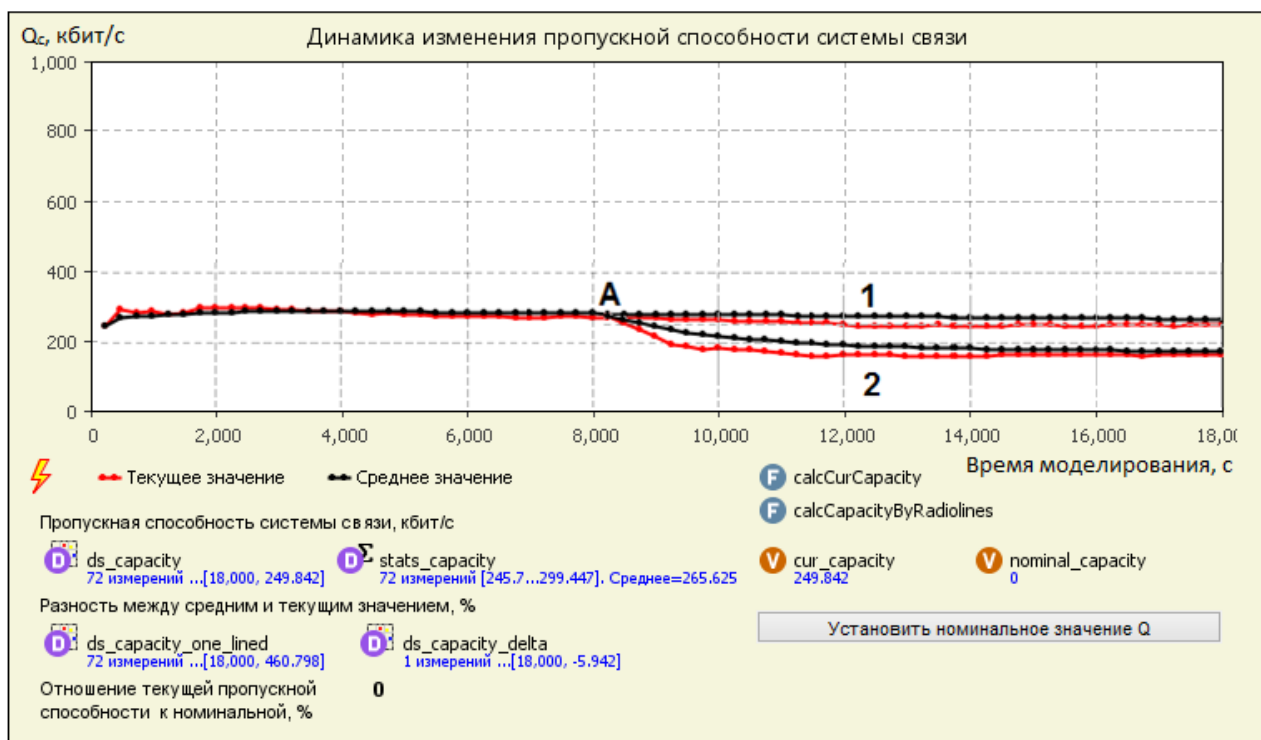


Рис. 6. Отображение результатов моделирования.

4. Результаты оценки эффективности функционирования сети СШП радиосвязи

На рис. 7, 8 представлены результаты оценки эффективности функционирования сети СШП радиосвязи. Оценки проведены для одноранговой и трёхуровневой иерархической сети радиосвязи. Рассматривалось воздействие на сеть СШП радиосвязи двух видов помех – СШП и узкополосных (традиционных). В ходе исследования рассматривались различные варианты взаимного размещения источников помех и элементов сети радиосвязи – вблизи абонентов, равномерно распределенных по всей области размещения радиостанций; плотности размещения источников помех – низкой (количество источников помех значительно меньше количества абонентов), высокой (количество источников помех сопоставимо с количеством абонентов); мощности излучения помех – маломощные (сравнимые по мощности с передатчиком радиостанции), с высокой мощностью (значительно превышающие мощность передатчика радиостанции).

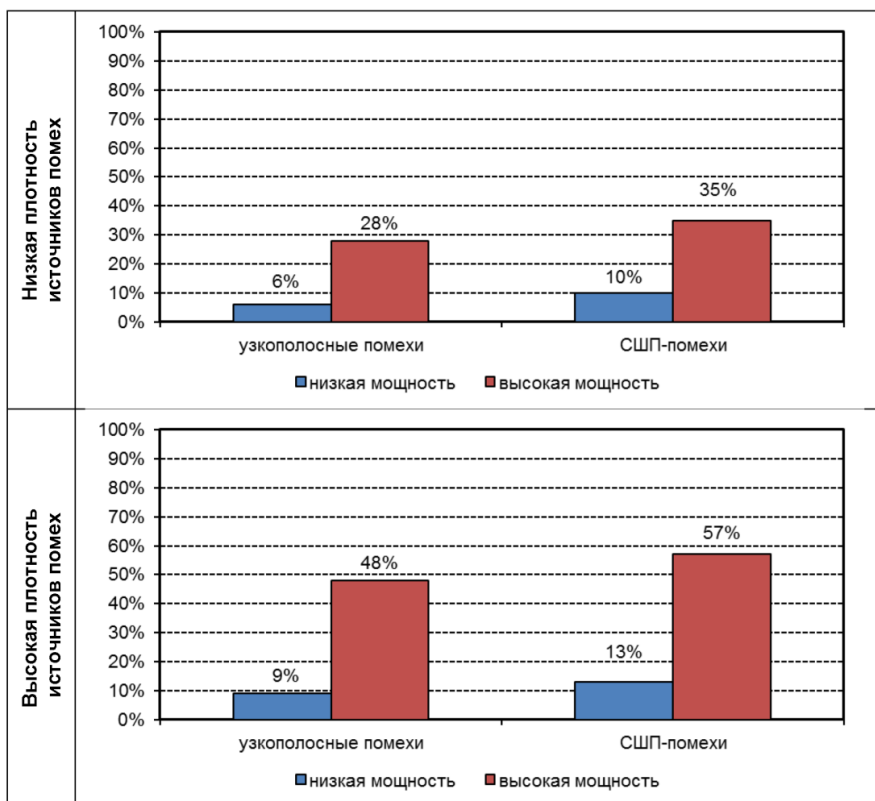


Рис. 7. Снижение пропускной способности сети СШП радиосвязи при равномерном размещении источников помех.

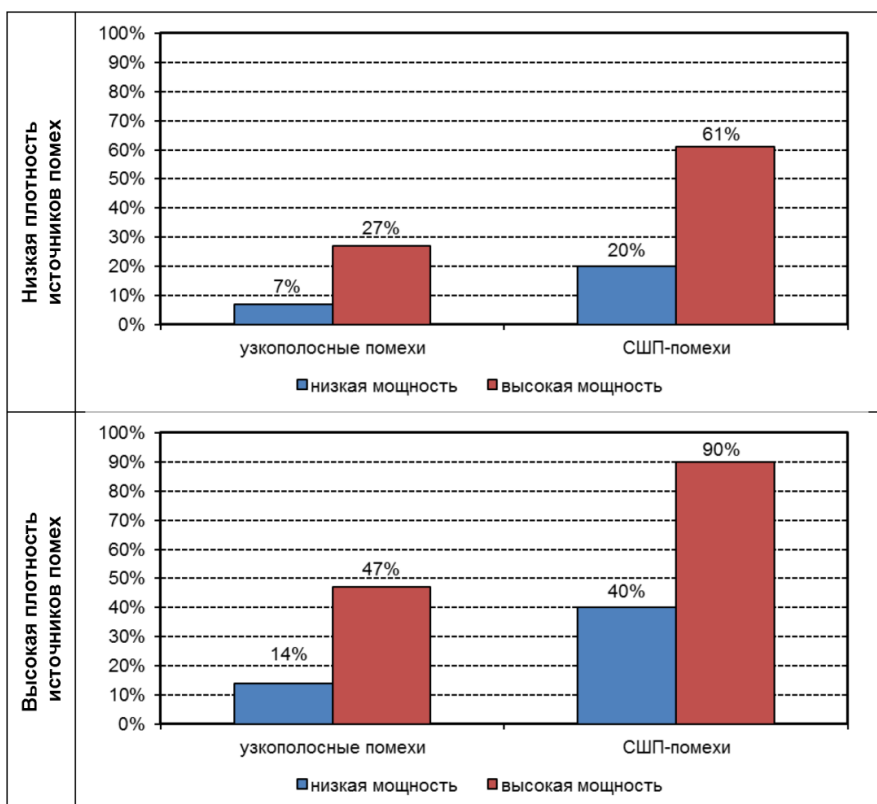


Рис. 8. Снижение пропускной способности сети СШП радиосвязи при размещении источников помех вблизи абонентов.

Из представленных гистограмм видно, что в условиях воздействия помех,

СШП связь обеспечивает эффективное функционирование и наибольший эффект от воздействия помех наблюдается при наличии большого количества источников помех высокой мощности.

При равномерном размещении источников помех низкой мощности сеть СШП радиосвязи функционирует в состоянии «Устойчиво», а при воздействии помех высокой мощности пропускная способность снижается до состояний «Затруднено» и «Нарушено» с сохранением возможности передачи информации. При фиксированной мощности излучения СШП помех обеспечивается большее (до 10%) снижение пропускной способности относительно узкополосных помех. Повышение плотности размещения и мощности источников помех приводит к значительному (до 60%) снижению пропускной способности (состояние «Нарушено»).

При размещении маломощных источников узкополосных помех вблизи абонентов пропускная способность сети СШП радиосвязи практически не снижается (состояние «Устойчиво»), а при расширении спектра помех до СШП пропускная способность снижается до состояния «Затруднено» с сохранением возможности передачи информации. При повышении мощности помех пропускная способность снижается до состояния «Нарушено» для узкополосных помех и состояния «Сорвано» для СШП помех. При равной мощности излучения в случае воздействия СШП помех обеспечивается большее (до 45%) снижение пропускной способности относительно узкополосных помех, что приводит к срыву передачи информации. Повышение плотности размещения и мощности источников помех приводит к значительному (до 90%) снижению пропускной способности (состояние «Сорвано»).

Характер размещения источников узкополосных помех не оказывает существенного влияния на снижение пропускной способности, а наличие источников СШП помех вблизи абонентов приводит к снижению пропускной способности сети СШП радиосвязи дополнительно более чем на 30% (с 57% до 90%).

Поскольку в ходе исследований рассматривалось воздействие шумовых СШП помех на сеть радиосвязи, то и при низкой плотности размещения источников помех значительного воздействия от них не наблюдается. При условии воздействия сигналоподобных помех, предположительно, будет наблюдаться более деструктивный результат воздействия на сеть СШП радиосвязи.

Оценка снижения пропускной способности, достигаемой при воздействии помех на приемные устройства, показывает, что за счет использования механизмов адаптации, при передаче данных и изменении частотно-энергетических характеристик сеть СШП радиосвязи сохраняет способность осуществлять эффективную передачу информации с требуемой достоверностью во всех случаях кроме размещения источников СШП помех высокой мощности вблизи абонентов.

Заключение

В результате проведенного сравнительного анализа различных вариантов воздействия помех от различных источников (с разной конфигурацией) видно, что сеть СШП радиосвязи обеспечивает эффективное функционирование в условиях воздействия узкополосных помех, а также СШП помех низкой мощности при равномерном размещении источников помех с низкой плотностью. Значительное снижение эффективности функционирования сети СШП радиосвязи достигается в случае воздействия СШП помех высокой мощности при равномерном размещении источников помех с высокой плотностью и размещении источников помех вблизи абонентов.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Литература

1. Молев А.А., Титов К.Д. Имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех // Журнал радиоэлектроники: электрон. журн. 2021. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan21/1/text.pdf>. Дата публикации: 31.01.2021 г.
2. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Обнаружение сверхширокополосного квазирадиосигнала на фоне мешающих сигналов // Радиотехника. 2020. № 9. С.72–82.
3. Молев А.А., Зайцев И.В., Титов К.Д., Воронов А.А. Создание имитационных моделей систем радиосвязи в условиях воздействия помех: учеб. пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. 328 с.
4. Выпасняк В.И., Гуральник А.М. Оценка состояния системы управления войсками в ходе операции (боя) // Военная мысль. 2008. № 7. С. 31–40.
5. Молев А.А., Титов К.Д., Кондаурова В.В. Алгоритм формирования топологии сети сверхширокополосной радиосвязи // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 9. С.85–97.
6. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связьиздат. 1951. 491 с.
7. Титов К.Д., Степкин В.А., Кондаурова В.В. Исследование энергетических характеристик сверхширокополосных квазирадиосигналов // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции. 2022. С. 104–114.
8. Авдеев В.Б., Авдеева Д.В. Уравнения радиосвязи при использовании сверхширокополосных сигналов // Телекоммуникации. 2002. № 9. С. 2–10.
9. Антенны измерительные: сайт. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/24810-16-antenny-izmeritelnye-antenny-izmeritelnye> (дата обращения: 17.07.2023).
10. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г. Исследование особенностей беспроводных персональных сетей передачи данных стандарта IEEE 802.15.4-2020. Теория и техника радиосвязи. 2022. № 3. С.30–44.
11. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб: Любавич. 2011. 312 с.

12. Бард Д., Коварик В.Д. Архитектура сетей связи на базе программируемых радиосредств. М.: Техносфера. 2013. 461 с.
13. Александров С., Туров Д. Перспективные системы и средства и радиосвязи тактического звена управления ВС США // Зарубежное военное обозрение. 2018. № 11. С. 42–48.
14. Корчагин С., Паршин С. Направления развития информационно-телекоммуникационного обеспечения сетей боевого управления сухопутных войск США // Зарубежное военное обозрение. 2019. № 3. С. 40–48.
15. Агалаков Ю.Г. Особенности моделирования телекоммуникационных компонентов автоматизированных систем управления // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. № 2. С. 26–36.
16. Осипов А.С. Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2013. 344 с.

Для цитирования:

Молев А.А., Титов К.Д., Кондаурова В.В. Оценка помехозащищенности сети сверхширокополосной радиосвязи на основе имитационного моделирования в среде Anylogic. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.1>.