

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1>

УДК 621.391

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

А. А. Молев, К. Д. Титов

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2020 г.

**Аннотация.** Разработана имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех, основанная на представлении системы связи и источников радиопомех в виде совокупности кусочно-линейных агрегатов. Приведена общая характеристика назначения, взаимосвязи моделей, а также общий алгоритм моделирования и расчета показателей эффективности. Разработанная модель позволяет учесть особенности функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех, в интересах сравнительного анализа различных вариантов построения системы связи, характеристик их быстрогодействия, оценки степени использования возможностей по передаче данных (пропускной способности) с учетом маршрутизации и адаптации к сигнально-помеховой обстановке.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, сверхширокополосная радиосвязь, воздействие помех, Anylogic.

**Abstract.** An article describes results of development of simulation model of the operation of an ultra-wideband radio communication system under the conditions of influence of interference, based on the representation of the communication system and sources of radio interference in the form of a set of piecewise linear units. A general description of the purpose, the relationship of the models, as well as general algorithm for modeling and calculating performance indicators was given. The developed model allows take into account the peculiarities of the functioning of the

ultra-wideband radio communication system in conditions of interference, in the interests of a comparative analysis of various options for building a communication system, their characteristics performance, assessing the degree of use of data transmission capabilities (bandwidth) taking into account routing and adaptation to the signal-interference environment.

**Key words:** simulation modeling, ultra-wideband, jamming, Anylogic package.

## Введение

Развитие информационных технологий в настоящее время привело к появлению множества стандартов и технологий беспроводной связи, таких как GSM, LTE, IEEE 802.11, UWB, ZigBee и др. повсеместно используемых в различных коммуникационных устройствах для предоставления услуг передачи данных. Одной из основных тенденций развития телекоммуникационных систем является интеграция различных технологий в рамках одного устройства и взаимодействие между ними в реальном масштабе времени. В ходе создания перспективных систем и средств радиосвязи, используемых для организации связи в экстремальных и сложных природно-географических условиях, широко внедряются возможности, реализуемые коммерческими системами связи – передача различных видов информации (данные, графика, мультимедиа), наличие доступа к общим базам данных, взаимный обмен информацией между абонентами различных уровней данными о состоянии обстановки [1, 2]. В настоящее время отчетливо прослеживается развитие таких систем в направлении внедрения новых способов и технических решений излучения и приема сверхширокополосных (СШП) сигналов, существенно превосходящих возможности узкополосных (обычных) систем.

К отличительным особенностям систем сверхширокополосной радиосвязи по сравнению с традиционными, обеспечивающими их устойчивое и эффективное функционирование в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех от различных источников, следует отнести:

излучение и прием сигналов в сверхширокой полосе (от 0,5 до 70 ГГц) с

высокой скоростью передачи информации (до 1 Тбит/сек), что требует наличия быстродействующей аппаратуры для формирования и обработки принимаемых и излучаемых сигналов;

энергетическая скрытность СШП сигналов (гораздо ниже уровня фоновых шумов), обуславливающая необходимость разработки новых алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов, базирующихся не исключительно на энергетической обработке сигналов, а на комбинации энергетических, статистических и нейросетевых алгоритмов;

компенсация помех за счет использования активных фазированных антенных решёток (АФАР) с узкими диаграммами направленности (ширина луча порядка нескольких градусов) с электронным управлением лучом, приводящая к отсутствию необходимости точного позиционирования антенн для связи с мобильными абонентами;

возможность оперативной смены диапазона рабочих частот при воздействии помех, что позволяет повысить эффективность использования спектрального ресурса, путем своевременного выбора наиболее подходящего частотного поддиапазона;

отсутствие заранее определенных узлов, осуществляющих управление сетью и коммутацию трафика, исключающее возможность блокирования работы системы связи в целом за счет целенаправленного воздействия только на них.

В силу того, что современные и перспективные системы сверхширокополосной радиосвязи представляют собой организационно и технически сложные пространственно-распределенные системы, включающие в свой состав большое количество взаимодействующих унифицированных средств связи, объединённых едиными правилами взаимодействия, решение задач исследования различных аспектов создания, функционирования и оценки эффективности, на уровне системы связи в целом аналитическими методами весьма затруднительно, поскольку позволяет получить лишь самые общие качественные выводы о характере протекающих в системе процессах. При этом

для исследования функционирования системы связи в целом 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 надежности и вероятностно-временным характеристикам доставки информации. В этом случае разработка аналитических моделей систем сверхширокополосной радиосвязи возможна только путем введения упрощений, что приводит к снижению точности и достоверности получаемых результатов.

Поэтому применительно к системам сверхширокополосной радиосвязи, имеющим 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.

С учетом сказанного, целью работы является разработка имитационной модели функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех.

В качестве основы для создания модели системы сверхширокополосной радиосвязи может быть использована разработанная ранее имитационная модель функционирования когнитивной системы связи в условиях воздействия помех [3, 4], в которой выполнены следующие доработки:

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 сверхкороткоимпульсных излучений (в диапазоне рабочих частот 1...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 критерия критического дестабилизирующего воздействия на системы связи со сверхширокополосными сигналами определены полученные в [6] отношения помеха/сигнал.

### **1. Общее описание имитационной модели**

Для разработки имитационной модели (рис. 1) проведена детализация процесса передачи данных в системе сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех по различным уровням модели взаимодействия открытых систем, соответствующих различным этапам процесса передачи данных в системе сверхширокополосной связи. Частные модели формализуются в виде совокупности 8 взаимосвязанных по входам и выходам кусочно-линейных агрегатов [7], воспроизводящих следующие процессы:

пакетирования сообщений и обработки принятых пакетов, интерпретируемых в виде многофазной одноканальной системы массового обслуживания с групповым обслуживанием заявок на фазах разбиения сообщения на пакеты, накопления принимаемых пакетов, окончательного формирования сообщений из принятых пакетов, выбора очередного интервала на маршруте передачи пакетов;

функционирования узлов связи, воспроизводимого в виде многоканальной системы массового обслуживания с ограничением на время пребывания заявок в системе с количеством каналов обслуживания, равным количеству радиостанций на узле связи (УС), с учетом влияния интенсивности передаваемого разнородного трафика на их загрузку и задержку пакетов вследствие ожидания доступа к коллективному радиоканалу;

передачи пакетов по одноинтервальным радиолиниям, формализуемой в виде вероятностного автомата, учитывающей вероятностно-временные характеристики

задержек и сбоев при передаче пакетов в условиях воздействия помех;

оценки текущей сигнально-помеховой обстановки, адаптации системы связи к ее изменению по диапазону частот, виду и форме сигнала, скорости передачи данных, а также динамической маршрутизации пакетов путем прямого имитационного моделирования алгоритмов работы типовых радиоэлектронных средств в соответствии со стандартами современных и перспективных систем радиосвязи (например стандарты IEEE 802.11ad, 802.11ay, и семейства стандартов IEEE 802.15.3, 802.15.4).

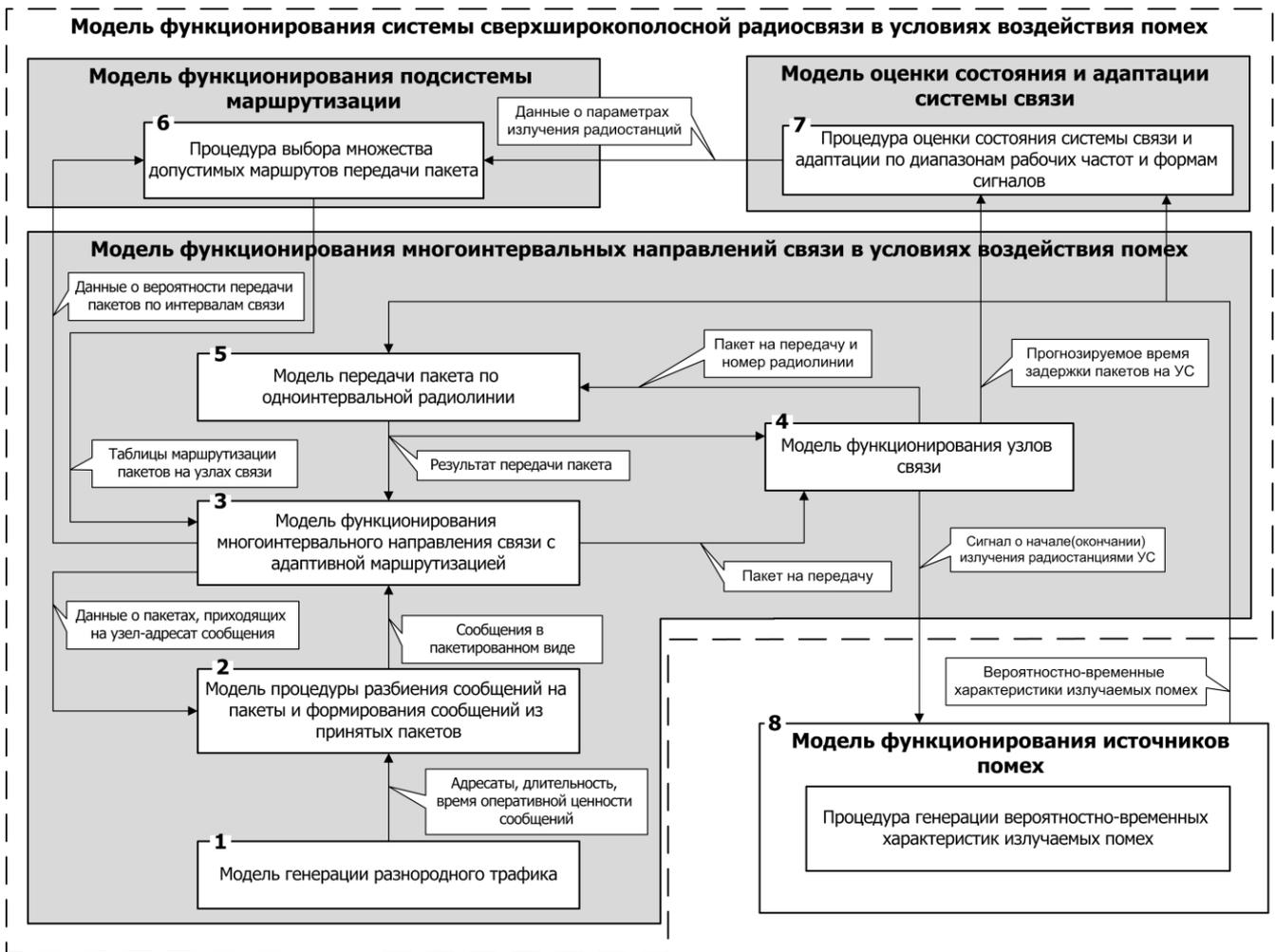


Рис. 1. Структурная схема модели функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях помех.

Четырехуровневая структура моделирования передачи данных в системе радиосвязи имеет вид, представленный на рис. 2. На верхнем уровне находится система связи, которая включает перечни направлений руководства, узлов

связи и массив объектов, воспроизводящих функционирование направлений руководства. Каждое направление руководства, включает перечень УС-абонентов, а также массив активных объектов, воспроизводящих функционирование каждого абонента, входящего в состав направления руководства. Для каждого абонента задаются текущее направление, узел связи и активные объекты классов, воспроизводящие генерацию сообщений, их пакетирование и обработку принятых пакетов. Распределение функций и процедур, воспроизводимых агрегатами – фрагментами имитационной модели по различным уровням модели взаимодействия открытых систем приведено на рис. 3. Формализация поведения каждого из агрегатов осуществляется путем задания множеств входных и выходных сигналов, состояний агрегатов и операторов изменения их состояний.

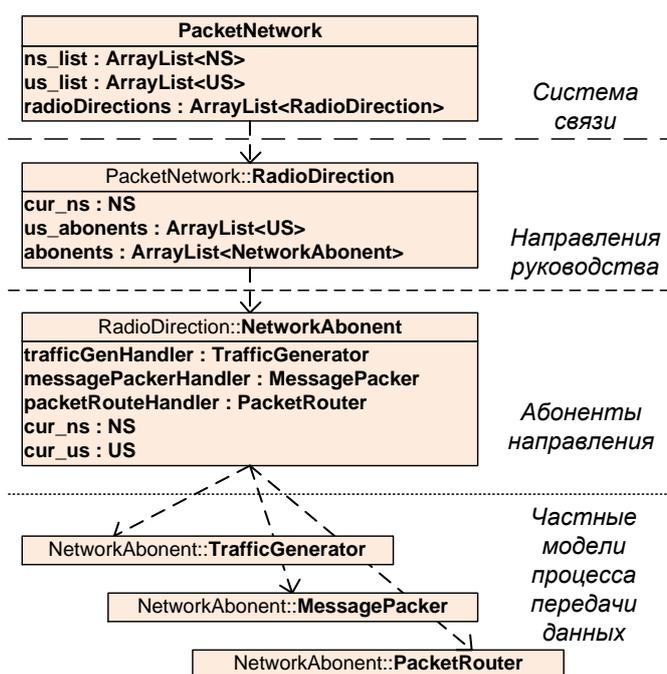


Рис. 2. Иерархическое представление структуры моделируемой системы связи и ее элементов.



Рис. 3. Распределение агрегатов по уровням модели открытых систем.

Общий алгоритм моделирования в виде блок-схемы приведен на рис. 4. Алгоритм построен в соответствии с принципом «особых» состояний. Под

«особыми» понимаются состояния агрегата в моменты времени получения входного сигнала или выдачи выходного сигнала. Взаимодействие элементов в описываемой агрегативной системе сводится к обмену сигналами в опорные моменты времени и реакциям агрегатов на поступившие сигналы (скачки состояний). В интервалах времени между опорными моментами моделируемая система «разбивается» на отдельные элементы, функционирующие независимо друг от друга, но с учетом влияний сигналов, поступивших в предыдущие опорные моменты времени.

Входными данными имитационной модели являются характеристики системы сверхширокополосной радиосвязи, включающие пространственно-временные характеристики размещения абонентов; перечень, состав и основные характеристики направлений руководства; характеристики радиостанций.

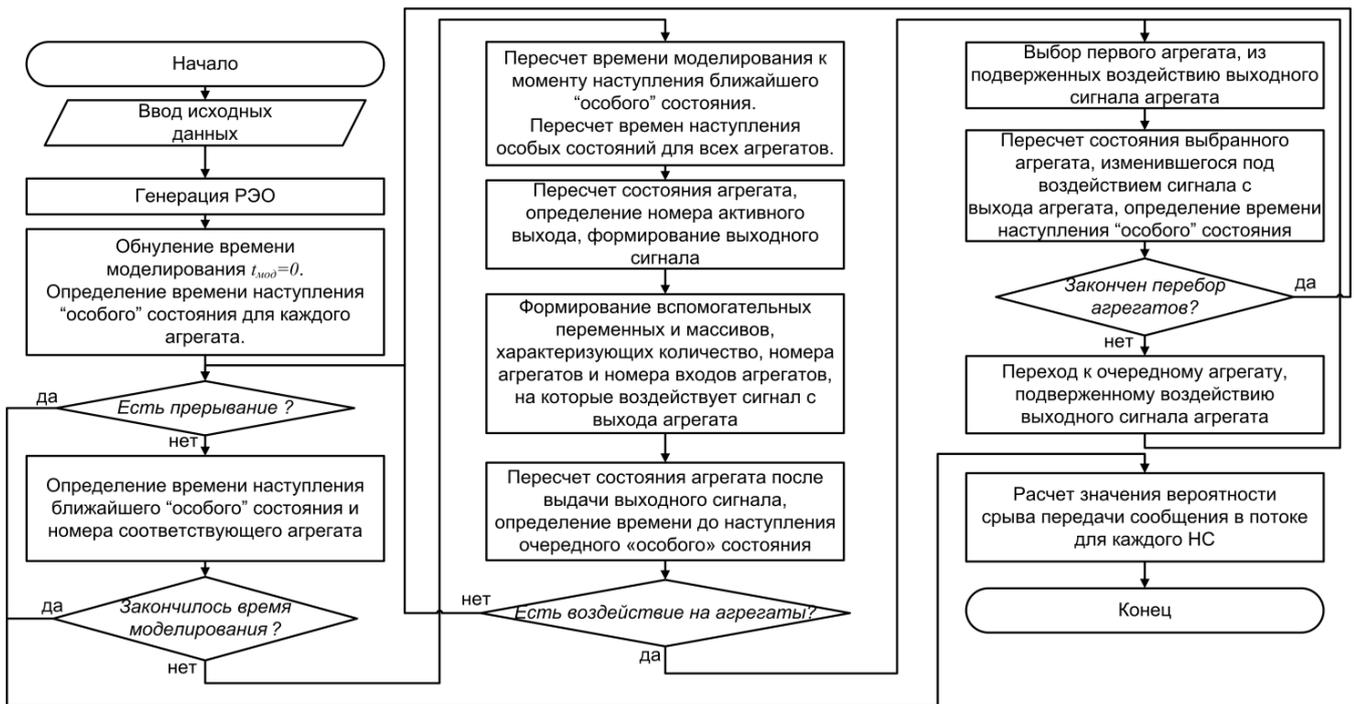


Рис. 4. Общий алгоритм моделирования.

К выходным данным относятся значения показателей эффективности системы сверхширокополосной радиосвязи и динамика их изменения во времени моделирования. В качестве показателей эффективности используются:

реализуемая пропускная способность системы связи,  
математическое ожидание количества эффективно функционирующих направлений руководства,

вероятность успешной передачи произвольного пакета.

Совокупность указанных показателей позволяет осуществить всестороннее рассмотрение особенностей функционирования системы связи в целом и ее структурных элементов в условиях воздействия помех, в интересах сравнительного анализа различных вариантов построения системы связи, характеристик их быстродействия, оценки степени использования возможностей по передаче данных (пропускной способности) с учетом маршрутизации и адаптации к сигнально-помеховой обстановке.

Проведение оценки эффективности системы сверхширокополосной радиосвязи при воздействии помех на ее элементы состоит в выполнении последовательности операций:

ввода/корректировки исходных данных;

определения необходимого объема экспериментов;

проведения имитационных экспериментов;

сбора и анализа результатов.

## **2. Расчет частотно-энергетических характеристик линий радиосвязи между абонентами и уровнем помех, воздействующих на приемные устройства**

Расчет частотно-энергетических характеристик для оценки дальности связи между абонентами, а также уровней помех, воздействующих на приемные устройства, необходимо осуществлять с применением аналитических соотношений теории распространения радиоволн для сверхкороткоимпульсных излучений [5]. Проведенный в работе [5] анализ показал, что причина невозможности использования для СШП сигналов классических уравнений дальности передачи-приёма сигналов в связных и локационных системах, состоит в том, что в них фигурируют основные характеристики элементов системы, такие, например, как коэффициент направленного действия (КНД)

передающей антенны, эффективная площадь (ЭП) приёмной антенны и эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта, определённые (или измеренные) только на одной частоте. Это допустимо в случае узкополосных сигналов, поскольку из-за малой ширины спектра эти характеристики остаются неизменными и на любой частоте в пределах данного спектра. Однако для СШП сигналов из-за очень большой ширины спектра, соизмеримой с его центральной частотой, указанное допущение нарушается. Суть предложенного решения для СШП сигналов заключается в переходе к интегральной форме описания основных характеристик системы. В результате, наряду с парциальными, обычными для данной частоты характеристиками, имеющими физический смысл мощностных характеристик, вводятся новые, интегральные по спектру характеристики, имеющие смысл энергетических характеристик, в частности, энергетический КНД передающей антенны, энергетическая ЭП приёмной антенны, энергетическая ЭПР объекта, энергетический эффективный момент системы.

Определение возможности организации связи между радиостанциями УС осуществляется для каждой пары корреспондентов, путем расчёта напряженности поля сигнала 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  $E_{прд}$

в точке размещения приемного корреспондента в обе стороны:

$$E_{прд} \geq E_{\min}, \quad (1)$$

где  $E_{\min}$  – минимальное значение напряженности на входе приемника радиостанции, при котором обеспечивается устойчивая связь, типовое значение которого составляет от -30 до -70 дБм.

В зависимости от организационной принадлежности, степени мобильности

и требований к дальности связи, в системе связи могут применяться следующие радиостанции:

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 18...50 ГГц с пропускной способностью до 200 Гбит/с и высотой поднятия антенн порядка 20 м – для низкомобильных (стационарных) абонентов, использующих для связи радиолинии дальностью до 100 км.

Характерными примерами радиостанций первого типа являются принятые в США в 2002 году на снабжение средства радиосвязи DRACO и ORION со всенаправленными антеннами, в основу которых положена технология импульсного радио (СШП сигналы с позиционно-импульсной модуляцией). Примером перспективных средств связи второго типа являются разрабатываемые в рамках программы MIDAS (Millimeter-wave digital arrays) цифровые антенные решетки миллиметрового диапазона в интересах создания систем связи нового поколения со сверхширокополосными сигналами.

Система связи будет иметь двухуровневую структуру, нижний уровень которой образован локальными сетями мобильных радиостанций, а верхний – стационарными узлами, образующими опорную сеть связи. Связь между корреспондентами организуется по принципу «каждый с каждым», при необходимости связи с удаленным корреспондентом осуществляется маршрутизация через опорную сеть связи.

Оценка степени воздействия помех на приемные устройства осуществляется путем расчёта отношения «помеха-сигнал» по пиковой мощности  $h_n^2$  и сравнения его с пороговым значением коэффициента подавления  $K_n$ , при превышении которого достигается срыв передачи информации между абонентами [8]:

$$h_n^2 = \left( \frac{E_n}{E_c} \right)^2, \quad (2)$$

где  $E_n$  и  $E_c$  значения напряжённости поля помехи и поля сигнала в точке

размещения приёмной радиостанции.

Для расчета напряженности поля в заданной точке используются выражения, приведенные в [5], в качестве исходных данных для расчетов используются рабочая частота в диапазоне 18-50 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 до 30 дБ.

### **3. Порядок адаптации к воздействию помех**

Изменение параметров радиостанций происходит адаптивно в зависимости от текущего состояния канала связи, причем смена параметров происходит таким образом, чтобы обеспечивалось, во-первых, сохранение качества канала связи, и во-вторых, сохранение возможности обмена данными с теми же радиостанциями в сети, с которыми ранее была установлена связь. Используемые меры реакции на изменение сигнально-помеховой обстановки включают корректировку главного лепестка диаграммы направленности АФАР при воздействии помех, смену частотного канала и вида модуляции сигналов.

Применение пространственной фильтрации сигналов за счет применения АФАР или цифровых антенных решёток (ЦАР)) позволяет достичь уменьшения отношения помеха/сигнал. Основной особенностью адаптивных антенных решёток (ААР) является возможность управления формой характеристики направленности (ХН) с целью ослабления воздействия помех вплоть до полного их исключения. Управление ХН ААР осуществляется путём изменения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в апертуре антенны. При известном распределении в пространстве источников сигналов и помех определение оптимального в некотором смысле АФР может быть выполнено относительно простыми средствами (например, решением известной задачи синтеза ХН). Однако возможно формирование оптимального АФР и в условиях априорной неопределённости сигнально-помеховой обстановки. В этом случае управление АФР производится посредством процессора с использованием минимальной информации о сигналах и их источниках. При автоматической

фильтрации помех важным параметром является время, необходимое для адаптации к изменившейся ситуации, так как слишком медленная адаптация может сделать систему бесполезной в масштабе реального времени. Поскольку большинство известных алгоритмов адаптации заключаются в объемных и сложных вычислениях и требуют скоростного процессора, их можно реализовать на практике только в цифровой области.

Необходимая для работы ААР информация включает сведения о пространственных, поляризованных, временных, частотных параметрах сигналов и помех. Повышение отношения сигнала к смеси шума и помехи достигается путём формирования минимумов ХН в направлениях на источники помех. При этом возможен автоматический учёт взаимной связи между антенными элементами, неидентичности каналов ААР, выхода из строя отдельных элементов и т. п. Таким образом, форма ХН как бы приспособляется к конкретной сигнально-помеховой обстановке с учётом всех факторов. Подавление помех в ААР возможно лишь при различных углах прихода полезных сигналов и помех, либо при различии их поляризационных параметров. Чем больше это различие, тем выше эффективность ААР. В процессе адаптации обработка входящих на адаптивную антенну сигналов производится на частоте сигнала в реальном масштабе времени [9].

С использованием ААР возможна минимизация влияния мешающих непреднамеренных излучений (теоретически до нуля) и подавление любых мешающих сигналов, действующих в полосе частот полезного сигнала. Это открывает новые возможности для повторного немешающего использования одних и тех же диапазонов частот системами связи разных операторов в одной зоне обслуживания. Применение ААР на физическом уровне способно привести к росту эффективности в значительной части областей применения радиосвязи, что непосредственно сказывается на качестве выполнения функциональных задач элементов систем связи. Использование технологий ААР в системах связи с СШП сигналами позволит создавать компактные ЦАР миллиметрового диапазона способные обеспечить коэффициент усиления

антенны до 30 дБ, что позволит увеличить дальность связи до 100 км, скорость передачи данных до 200 Гбит/с с одновременным формированием до 32 пространственных потоков.

Применительно к радиостанциям, указанным выше, для мобильных абонентов применяются 16-элементные адаптивные антенные решетки, для стационарных – 64- или 256-элементные.

Помимо использования пространственной фильтрации сигналов используются технологии адаптивной смены частотного канала и вида модуляции сигналов, в соответствии с утвержденными стандартами (IEEE 802.11ad, 802.11ay, и семейства стандартов IEEE 802.15.3, 802.15.4), в зависимости от отношения сигнал/шум на входе приёмника.

При смене частотного канала предпочтительным вариантом является отыскание нового, для которого пропускная способность обеспечивается не хуже исходной. Для этого оценивается возможность организации связи с заданной шириной полосы и наличие минимального уровня шумов, а также загруженность частотных каналов другими абонентами. Применение указанной меры помехозащиты осуществляется при наличии свободных частотных каналов, причем, в первую очередь выбираются те, для которых пропускная способность обеспечивается не хуже исходной. Перестройка радиостанций на новую частоту оказывает существенное влияние на связность абонентов системы связи, а также приводит к значительному росту задержки передачи данных.

#### **4. Критериальные уровни дестабилизирующего воздействия на систему связи**

В качестве исходных данных в модели используются полученные в работе [6] отношения помеха/сигнал, в которой исследовалась эффективность воздействия сигналподобных помех различного вида и различными параметрами на обнаружители СШП сигналов с различной структурой. Сигналподобные помехи в данной работе отождествлялись с мешающими квазидетерминированными сигналами, присутствующими в наблюдаемой реализации вместе с полезным сигналом. Проведенный в работе сравнительный

анализ видов и параметров помех позволяет оценить степень дестабилизирующих воздействий на приёмники СШП сигналов с различной структурой, а также при наличии критерия качества функционирования системы радиосвязи определить предельно допустимые значения отношений помеха/сигнал.

Поскольку класс СШП сигналов весьма широк и включает в себя большое количество различных математических моделей, исследование воздействия мешающих сигналов на приёмники СШП сигналов любого типа довольно затруднительно. Поэтому среди СШП сигналов в работе [6] рассмотрен один из наиболее перспективных подклассов таких сигналов, структура которых подобна узкополосным радиосигналам, однако условие узкополосности для них не выполняется. Такие сигналы в литературе названы СШП квазирадиосигналами (КРС) [6,10,11]. В качестве помех при оценке эффективности обнаружителя СШП КРС в работе [6] рассматривалось три вида мешающих сигналов: СШП КРС с отличными от полезного сигнала параметрами (сигналоподобная помеха), сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-помеха), сверхкороткий импульс (СШП видеосигнал). Выбранные виды помех могут быть как преднамеренными и непреднамеренными, и представляют наибольший интерес к рассмотрению в сформулированной постановке, поскольку имеют схожую с полезным сигналом структуру и, оказывают наибольшее деструктивное влияние на корректный приём полезного сигнала.

В работе [6] установлено, что функционирование системы связи и передачи данных с СШП КРС может быть нарушено либо путём воздействия помех и невозможности приёма полезного сигнала, либо путём приёма мешающего сигнала вместо полезного. Сравнение эффективности обнаружения при воздействии трёх видов помех показало, что большей степенью деструктивного воздействия на сигнальном уровне обладают сигналоподобные и ЛЧМ-помехи. При этом изменение параметров мешающего сигнала может приводить к снижению вероятности правильного приёма полезного сигнала на

несколько порядков. На практике, к детерминированным сигналам (сигналоподобным помехам) возможно адаптировать приёмник, но из-за наличия случайной составляющей в ЛЧМ-помехе это нереализуемо, и такое воздействие будет иметь гарантированный деструктивный эффект.

### **Заключение**

Разработана имитационная модель, позволяющая воспроизводить функционирование систем сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех и оценивать эффективность функционирования на уровне системы связи в целом и отдельных ее элементов, на основе учета влияния интенсивности передаваемого разнородного трафика на загрузку узлов связи и задержку передачи вследствие ожидания доступа к каналу связи, динамическую маршрутизацию пакетов и адаптивный выбор диапазонов частот, форм сигналов и режимов работы радиостанций в зависимости от состояния сигнально-помеховой обстановки. Оценка эффективности функционирования системы связи в целом и ее структурных элементов в условиях воздействия помех проводится по показателям «реализуемая пропускная способность», «математическое ожидание количества эффективно функционирующих направлений руководства» и «вероятность успешной передачи произвольного пакета».

Имитационная модель может быть использована для проведения научно-исследовательских экспериментов по сравнительному анализу различных вариантов систем сверхширокополосной радиосвязи, алгоритмов их функционирования, характеристик быстродействия, оценки достигаемой производительности при их проектировании и в ходе эксплуатации.

### **Литература**

1. Разгуляев А. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для сухопутных войск США. *Зарубежное военное обозрение*. 2008. №1. С.35-39.

2. Корчагин С., Паршин С. Направления развития информационно-телекоммуникационного обеспечения сетей боевого управления сухопутных войск США. *Зарубежное военное обозрение*. 2019. №3. С.40-48.
3. Зайцев И.В., Молев А.А. Программный комплекс имитационного моделирования когнитивных систем радиосвязи в условиях воздействия помех. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2017. N.15. №10. С.42-52.
4. Зайцев И.В., Молев А.А. Оценка пропускной способности когнитивной системы связи в условиях воздействия помех на ее ключевые элементы. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. №5. С.52-62.
5. Авдеев В.Б., Авдеева Д.В. Уравнения радиосвязи при использовании СШПС. *Телекоммуникации*. 2002. №9. С.2-10.
6. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Обнаружение сверхширокополосного квазирадиосигнала на фоне мешающих сигналов. *Радиотехника*. 2020. №9. С.72-82.
7. Бусленко Н.П. *Моделирование сложных систем*. Москва, Наука. 1978. 400 с.
8. Осипов А.С. *Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП: учебник*. Красноярск, Сиб. федер. ун-т. 2013. 344 с.
9. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л., Распаев Ю.А., Лагутенко О.И., Щесняк А.С. *Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. Часть 1*. СПб, Университет ИТМО. 2016. 179 с.
10. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. *Обработка сверхширокополосных сигналов и помех*. Москва, Радиотехника. 2009. 288 с.
11. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. *Синтез и анализ алгоритмов обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов*. Воронеж, Издательский дом ВГУ. 2019. 128 с.

**Для цитирования:**

Молев А.А., Титов К.Д. Имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1>