

На правах рукописи



КУРАКОВА ТАТЬЯНА ПЕТРОВНА

**ИМИТАЦИЯ РАДИОКАНАЛОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ПОКОЛЕНИЯ 5G**

Специальность: 05.12.13. – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017 г.

Работа выполнена на базовой кафедре «Электромагнитной совместимости и управления радиочастотным спектром» Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) при ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», г. Москва.

Научный руководитель

Сарьян Вильям Карпович

доктор технических наук, академик Национальной академии наук Республики Армения, руководитель научного центра ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», г. Москва.

Официальные оппоненты: Пармонов Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. С. Петербург.

Рябокоть Алексей Владимирович

кандидат технических наук, инженер 1-ой категории ОАО "Владимирское конструкторское бюро радиосвязи", г. Владимир.

Ведущая организация

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт связи», г. Москва.

Защита состоится 20 февраля 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, корп. 3, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 15 декабря 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Численность населения нашей планеты постепенно растет и превысило 7 миллиардов человек. Растут информационные потребности населения и активно развиваются технологии «Интернета вещей» (IoT-устройств). По прогнозам специалистов ежемесячный объем передаваемой информации к 2020 году будет измеряться в Зеттабайтах ($1 \cdot 10^{21}$ байт). Численный рост количества абонентов и все более объемные запросы к информационному сервису настоятельно требуют роста скорости передачи информации в инфотелекоммуникационном пространстве.

Отвечая на эти запросы Международный союз электросвязи принял решение о развитии нового поколения сотовой связи 5G со скоростями передачи данных не хуже 10 Гбит/с при времени отклика от одной миллисекунды. Ведущие мировые производители средств передачи информации дружно откликнулись на это решение, уделяя особое внимание разработке стандартов, исследованиям и развитию оборудования поколения 5G. Однако рост скорости передачи информации в основном возможен за счет расширения полосы используемых частот и требования, предъявляемые к сетям передачи информации поколения 5G, возможно реализовать лишь в миллиметровом диапазоне (ММД) частот.

Степень разработки темы. Исследованиям ММД уделено большое внимание в работах как отечественных, так и зарубежных ученых всего мира, таких как Быстров Р.П., Соколов А. В., Чеканов Р.Н., Яковлев О.И., Калмыков Ю.П, Титов С.В., Андреев Г.А., Паршин В. В., Третьяков М. Ю., Кошелев М. А., Павельев В.А., Хаминов Д.В., Зражевский А.Ю., Красюк В.Н., Anderson C.R., Rappaport T.S., Alejos A., Sanchez M.G., Frenzel L., Pi Z., Khan F., Cuinas I., Doann C.H., Xu H. и многих другие. Моделированию радиоканалов посвящены работы Кловского Д.Д., Самойлова А.Г., Галкина А.П., Шинакова Ю.С., Маркова В.В., Иванова А.П., Ермолаева В.Т., Erceg V., Schumacher L., Watterson S.S., Jroshek J.R., Dtnsema V.D., Bello P., Son V.V. и других.

Диапазон миллиметровых волн (ММВ) достаточно хорошо изучен, но используется не полностью, что объясняется как сильным затуханием ММВ при распространении, так и высокой сложностью разработки и производства оборудования этого диапазона частот. Это противоречие ставит важную научную и практическую задачу разработки и создания программно-аппаратных средств, способных стать универсальным инструментарием для оценки качества разработок новых устройств для миллиметрового диапазона частот.

В качестве такого универсального инструментария может выступать имитатор радиоканалов ММД частот, позволяющий в лабораторных условиях и без значительных расходов выполнять множество практических задач, способствующих развитию ММД частот, а именно:

- экспериментально исследовать и находить наилучшие технические решения устройств, узлов и систем ММД;
- осуществлять технический контроль разработанного и серийно производимого оборудования;
- оптимизировать системы передачи информации;
- экспериментально исследовать и находить наилучшие варианты обработки используемых сигналов.

Задача разработки и создания имитатора радиоканалов ММД достаточно амбициозная, но необходимая для развития поколения сотовой связи 5G. Эта задача актуальна, а большое количество экспериментальных исследований миллиметрового диапазона частот создали для ее решения необходимую базу.

Целью диссертационного исследования является анализ свойств радиоканалов миллиметрового диапазона частот и разработка комплекса имитации радиоканалов поколения 5G миллиметрового диапазона частот.

- Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:
- выполнить анализ и определить характеристики факторов, влияющих на передачу информации по радиоканалам ММД;

- разработать математическую модель канала ММД;
- предложить структуру комплекса имитации радиоканалов (КИРК) ММД;
- предложить практические рекомендации по построению комплекса имитации радиоканалов ММД;
- разработать методику верификации устройств и систем поколения 5Gc помощью КИРК.

Предметом исследования являются характеристики радиоканалов миллиметрового диапазона частот.

Объектом исследования являются пути программно-аппаратной имитации радиоканалов миллиметрового диапазона частот.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы, основанные на положениях общей теории связи, теории распространения сигналов, методов теории вероятностей и математической статистики, теории эксперимента.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Определены выражения для имитации ослаблений сигналов и замираний в радиоканалах ММД при разных климатических и географических параметрах моделируемых трасс связи.

2. Предложены модели передаточных функций радиоканалов ММД для стационарных и мобильных абонентов.

3. Предложена структура комплекса имитации радиоканалов ММД с переносом частот исследуемых систем на промежуточные частоты в диапазон 17ГГц -27 ГГц, что придает универсальность комплексу.

4. Разработана методика управления КИРК для верификации устройств и систем ММД.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс имитации радиоканалов ММД, позволяющий в лабораторных условиях оценивать эффективность устройств и систем поко-

ления 5G. Оперативность получения оценок по сравнению с полевыми испытаниями по экспертным оценкам повышается более чем в 10 раз.

2. Предложен алгоритм имитации потерь энергии сигнала на линиях связи ММД, учитывающий как климатические, так и географические условия на трассах связи.

3. Определены серийные устройства для построения имитаторов затухания, замираний, задержек сигналов и доплеровских сдвигов частоты, что более чем в 2 раза сокращает затраты на создание КИРК.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются корректным использованием положений теории распространения сигналов и общей теории связи, применением апробированных методик, а также не противоречием результатов, полученных в работе, известным из литературы.

Личный вклад автора. На основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования, предложены модели передаточной функции радиоканалов ММД для стационарных и мобильных абонентов. Разработана структура комплекса имитации радиоканалов ММД. Предложены также алгоритм учета потерь энергии ММВ на линиях ММД, методика управления комплексом, устройства для его построения. Лично подготовлены и опубликованы основные результаты исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура комплекса имитатора радиоканалов ММД должна обеспечивать моделирование затуханий, задержек, многолучевости распространения и статистических свойств замираний сигналов,

2. Алгоритм учета потерь энергии ММВ на линиях связи ММД, комплексно учитывающий разнородные причины затухания сигналов.

3. Методика управления КИРК, позволяющая осуществлять верификацию устройств и систем поколения 5G.

Апробация работы. Основные положения диссертации обсуждались на следующих научно – технических конференциях: XII Международной научно-

технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации»-ПТСПИ-2017, г. Суздаль; 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Инфотелекоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения», 2017 г., г. Курск; XXXVI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», 2017 г. г. Серпухов; Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2017, г. Рязань; Четвертой международной конференций «Инжиниринг & Телекоммуникации» - En&T - 2017 г., г. Москва.

Публикации по работе. Опубликовано 12 научных работ, из них 2 статьи в журналах из списка ВАК, 1 статья в ITU News и 9 материалов докладов на научных конференциях.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в качестве рекомендаций по разработке устройств и систем связи в ФГУП Научно-исследовательский институт радио – (НИИР), г. Москва, в ООО «НИИР Связь», г. Москва, в учебный процесс базовой кафедры МТУСИ при ФГУП «НИИР» что подтверждено соответствующими актами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 125 наименований. Объем работы 132 страницы, 27 рисунков, 15 таблиц, 5 приложений на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, изложены научные результаты, представляемые к защите.

В первой главе проведен обобщенный анализ путей развития нового высокоскоростного поколения подвижной радиосвязи 5G на основании кото-

рого показано, что эффективное развитие поколения связи 5G возможно лишь в миллиметровом диапазоне частот. Определены основные факторы, влияющие на ослабление сигналов ММД при передаче информации стационарным и подвижным абонентам. Рассмотрены возможные направления для создания стандарта подвижной связи 5G путем применения таких технологий как: использования фазированных антенных решеток с большим коэффициентом усиления; применения технологии разнесенного приема и технологии ММО, когда посылают и принимают несколько сигналов одновременно; применения помехоустойчивого кодирования при передаче информации.

Выполнен анализ ограничений на развитие нового поколения мобильной связи и определены основные факторы, мешающие передаче информации по радиоканалам ММД. Показано, что при создании и верификации оборудования сетей 5G большую пользу может оказать специализированный комплекс имитации радиоканалов ММД. Определена цель диссертационного исследования, а именно: анализ свойств радиоканалов миллиметрового диапазона частот и разработка комплекса имитации радиоканалов миллиметрового диапазона частот. Сформулированы задачи исследования. Показано, что для построения имитатора радиоканалов ММД необходимо исследовать воздействия на сигналы, распространяющиеся по радиоканалам ММД, разработать математическую модель передаточной функции радиоканалов, предложить структуру имитатора радиоканалов, разработать методику управления имитатором, обосновать техническую реализацию основных узлов имитатора.

Вторая глава посвящена разработке математической модели радиоканалов миллиметрового диапазона частот. Предложено передаточную функцию каналов ММД описывать суммой постоянной составляющей затухания сигналов ММВ и флуктуирующей составляющей затухания.

Поскольку из-за малого размера диполей ММД отражающие сигнал поверхности создают множество отраженных сигналов, то на выходе каналов ММД имеются интерференционные замирания, которые при множестве от-

ражателей в можно описать четырехпараметрической моделью плотности вероятностей

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{S=0}^{\infty} \frac{(2k+2S-1)! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2S} \sigma_x^{2S}}{k!(2S)! 2^k \sigma_y^{2k+4S} m_x^{k+S}} H^{k+S} I_{k+S}\left(\frac{m_x}{\sigma_x} H\right), \quad (1)$$

где H - модуль передаточной функции канала связи;

$I_{k+s}(z)$ - модифицированная функция Бесселя порядка $k+s$;

$\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ - параметры четырехпараметрического распределения.

Показано, что при разных значениях параметров $\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ выражение (1) упрощается и в 70% времени сеанса связи при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ может сводиться к релейскому закону распределения вероятностей

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma^2}\right).$$

В 30% времени сеанса связи распределение (1) преобразуется к другим распределениям вероятностей.

При $\sigma_x = \sigma_y = \sigma, m_y \neq 0$, в обобщенно-релейское распределение вероятностей $w(H) = \left(\frac{H}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{(H^2 + m_x^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(m_x \frac{H}{\sigma^2}\right)$, где $I_0(\cdot)$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. При σ_x или σ_y равных нулю (1) преобразуется в усеченно-нормальное распределение вероятностей

$$w(H) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{x,y} \sqrt{\pi}}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{x,y}^2}\right). \text{ При } m_x = m_y = 0 \text{ уравнение (1) вырождается}$$

в подрелейское распределение вероятностей

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left[-\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2}\right)\right] I_0\left[\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2}\right)\right].$$

Рассмотрение двухлучевой модели распространения ММВ, показанной на рис. 1, позволило определить выражение для длительности замираний

$\tau = \frac{2\lambda}{\pi\alpha^2} \frac{dt}{dR}$. Из этого выражения следует, что с уменьшением длины волны и

ростом интервала связи R частота замираний растет, а их длительность убывает. С ростом расстояния h между лучами распространения сигналов растет

угол α , и частота замираний увеличивается, а длительность замираний суммарного сигнала убывает по квадратичному закону, что хорошо согласуется с

экспериментальными результатами целого ряда исследователей ММД из разных стран.

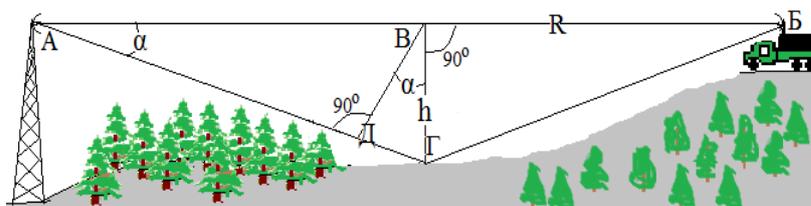


Рис.1. Двухлучевая модель распространения сигнала

Показано, что длительность T_3 замираний сигнала у движущегося со скоростью V абонента относительно некоторого среднего уровня $T_0 \cong \tau$ может

быть аппроксимирована выражением
$$T_3 = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi V}} \frac{\sqrt{2}\sigma}{T_0} \left[\exp\left(\frac{T_0^2}{2\sigma^2}\right) - 1 \right].$$

Определено изменение частоты сигнала из-за доплеровского расширения спектра $f = f_0 \left(\frac{C+V}{C-U} \right)$, где C - скорость света, а V и U - скорости движения абонентов. Показано, что отклонение частоты несущей систем ММД из-за доплеровского сдвига частот превышает допустимые отклонения стабильности частоты. Поэтому сделан вывод о том, что имитатор радиоканалов ММД обязательно должен содержать модуль имитации доплеровских сдвигов частоты.

В этой же главе конкретизированы и сведены в таблицы необходимые для имитирования радиоканалов ММД данные, описывающие такие факторы как: ослабление ММВ в атмосфере, в дождях, снегу, дымке, пыли, поглощение миллиметровых волн листвой и препятствиями.

Третья глава посвящена разработке методики моделирования радиоканалов ММД. Проведен анализ известных моделей ММД, на основании которого для построения имитатора выбрана модель канала как совокупность множества радиоволн, пришедших к приемнику от передатчика по ломаным маршрутам после многократных отражений от зданий и местных предметов, а также от подстилающей поверхности. В каждом луче такая модель на интервалах времени сеанса связи должна иметь соответствующее этому лучу ослабление сигнала, свое рассеяние по частоте и по времени, а результирующие замирания передаточной функции канала должны на интервалах времени сеанса связи соответствовать четырехпараметрическому закону распределения вероятностей (1) и его частным случаям.

На основе проведенного анализа свойств радиоканалов ММД определены выражения, описывающие ослабление ММВ гидрометеорами различного характера и ослабление сигналов ММВ при прохождении через листву деревьев и растительность. Получено выражение для моделирования детерминированной составляющей ослабления передаточной функции радиоканалов ММД в виде

$$H = 20 \lg \left(\frac{4\pi R f_0}{C} \right) + R(K_D Y^\alpha + L_T V_T) + 0,2 f_0^{0,0143} r^{0,6} [\text{дБ}], \quad (2)$$

где R - расстояние между передатчиком и приемником; C - скорость света, м/с; f_0 - частота несущей, Гц; Y - интенсивность осадков, мм/ч; K_D - параметр, зависящий от частоты, температуры, поляризации, дБч/м²; α - безразмерный параметр, также зависящий от частоты, температуры, поляризации; L_T - удельный погонный коэффициент ослабления ММВ в тумане; V_T - коэффициент содержания воды в атмосфере, определяемый по оптической видимости; r - глубина закрывающего трассу связи слоя листвы, м.

Уточнены модели передаточных функций радиоканалов ММД для стационарных и для мобильных абонентов систем связи. Показано, что для движущихся на автомашинах абонентов доплеровские сдвиги частоты могут

быть более 100 кГц и это превышает допустимые отклонения несущих частот систем связи по требуемой стабильности частоты. При движущихся абонентах выражение (2) для прямого и отраженных лучей должно применяться различно, поскольку при сближении абонентов с уменьшением расстояния затухание будет уменьшаться, а для отраженных лучей из-за роста углов падения на отражающую поверхность затухание будет расти.

В четвертой главе рассмотрены реализационные основы построения комплекса имитации радиоканалов (КИРК) ММД. Основываясь на разработанной математической модели предложена структурная схема многолучевого комплекса, состоящая из двух модулей:

- модуль имитации (МИ) передаточной функции радиоканала ММД;
- модуль управления (МУ), задающий необходимые параметры для моделирования параметров трассы связи и конкретных условий при распространении сигнала.

Предлагаемый модуль имитации передаточной функции одного луча распространения ММД показан на рис. 2.

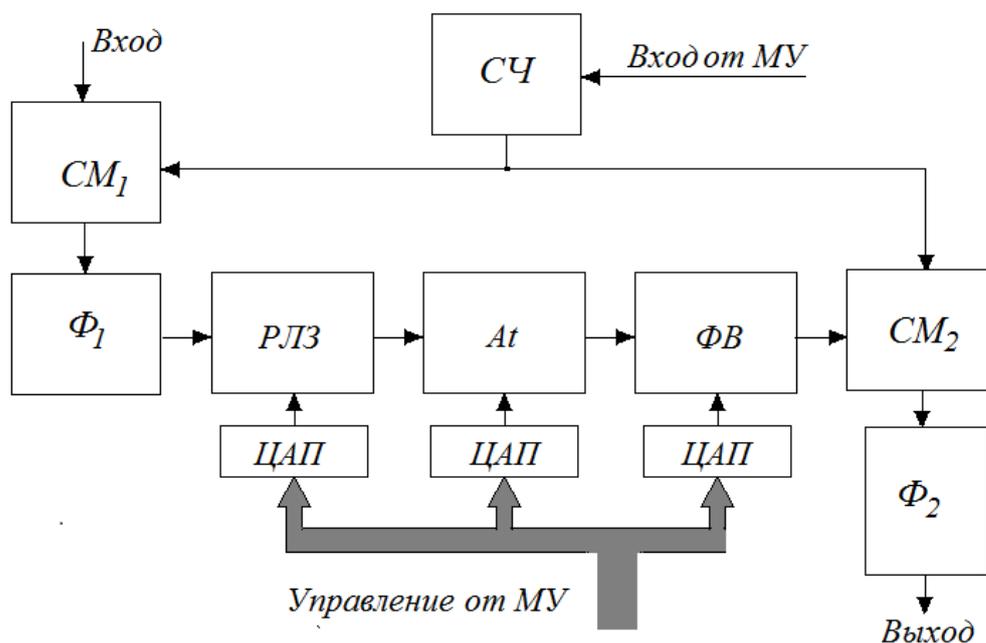


Рис. 2. Модуль имитации передаточной функции одного луча ММД (РЛЗ - регулируемая линия задержки; At - управляемый аттенюатор; ФВ - управляемый фазовращатель; ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь; синтезатор частот; СМ- смесители; Ф- фильтры)

Для обеспечения универсальности применения КИРК с системами ММД, работающими на различных частотах, предложено реализовать КИРК

на промежуточных частотах с полосой частот от 17 ГГц до 27 ГГц, что потребовало введения в МИ управляемого синтезатора частоты, двух смесителей и двух фильтров.

Поскольку системы поколения 5G в большинстве своем ориентированы на использование методов пространственного кодирования сигналов (MIMO - Multiple Input Multiple Output), то КИРК должен быть многолучевым, даже независимо от наличия лучей распространения ММВ, отраженных от подстилающей поверхности или от зданий и местных предметов. Поэтому МУ должен иметь выходы по количеству моделируемых лучей распространения ММВ, определяемому видом MIMO и типом трассы связи. Соответственно МУ должен иметь свою программу управления для каждого моделируемого

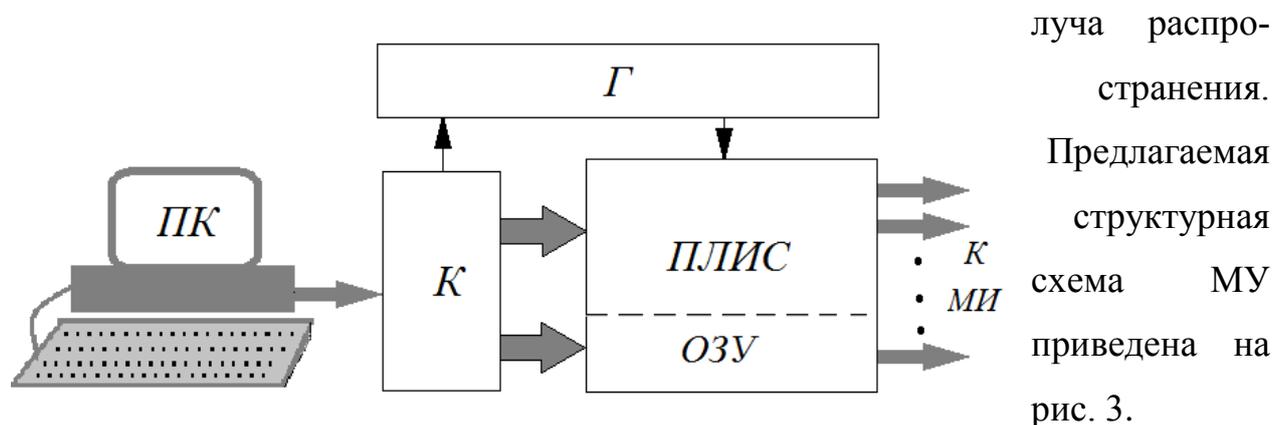


Рис. 3. Структура модуля управления КИМ

На рис. 3 приняты следующие обозначения: ПК- персональный компьютер; Г - генератор; К - контроллер; ПЛИС - программируемая логическая интегральная схема с оперативным запоминающим устройством - ОЗУ.

При использовании КИРК для верификации и технического контроля выпускаемых устройств и систем ММД частот к МИ и МУ добавляется устройство контроля (УК), сравнивающее переданный и принятый информационные сигналы. УК должно определять процент ошибок после прохождения сигнала через имитатор и выводить результат исследования на печать. Структурная схема верификации систем связи ММД частот показана на рис.4.

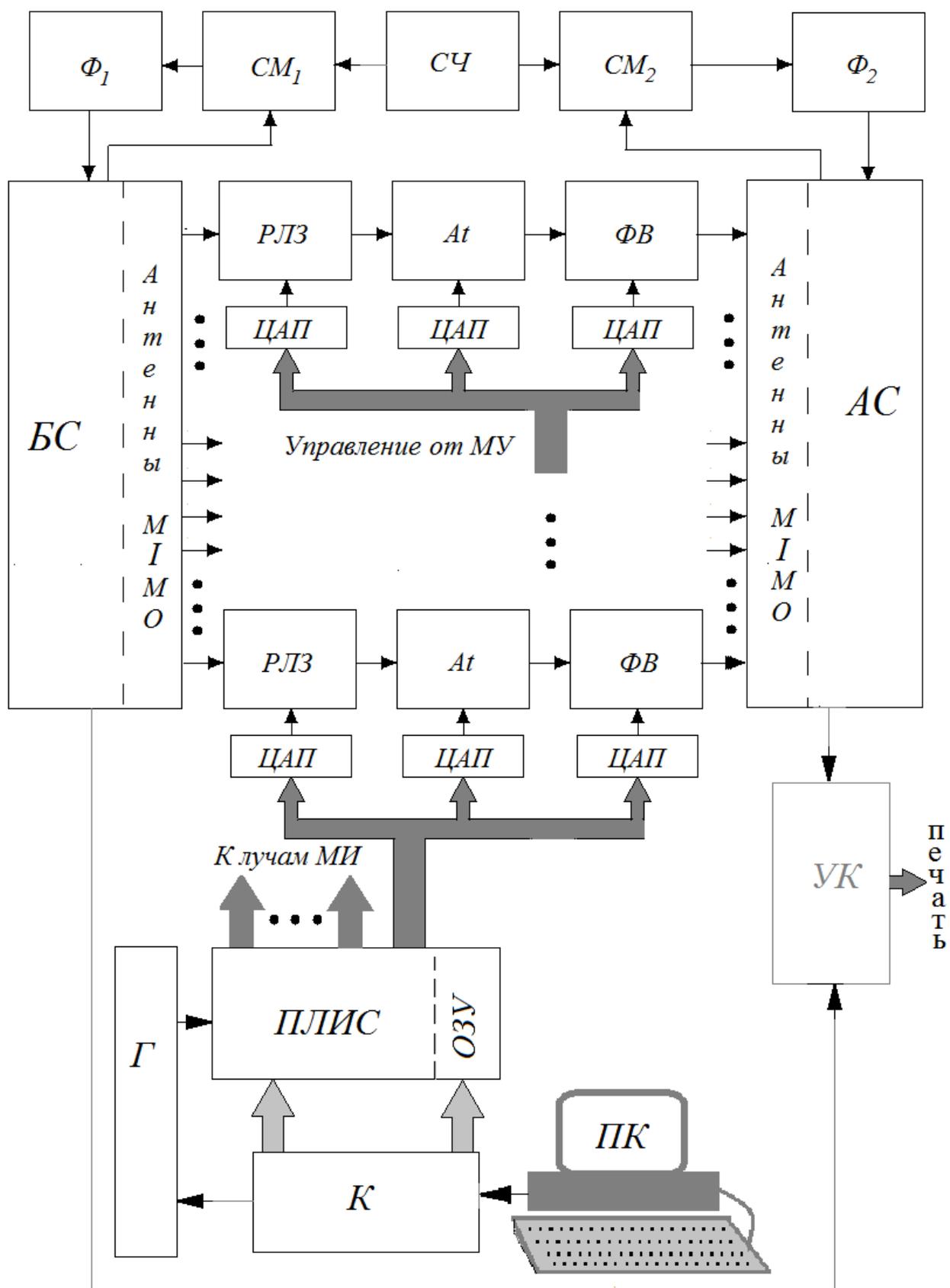


Рис. 4. Схема технического контроля систем связи ММД частот

Разработана методика работы комплекса имитации радиоканалов ММД при использовании его для технического контроля выпускаемых устройств или систем связи ММД, которую пошагово можно описать следующим образом:

Шаг первый. Для каждого управляемого устройства имитатора разрабатывается своя программа управления, учитывающая особенности радиоканала конкретного луча распространения ММВ и специфику сигналов исследуемой системы передатчик – приемник ММД.

Шаг второй. Через контроллер (К), обеспечивающий интерфейс ПК с программируемой логической интегральной схемой, при участии тактового генератора (Г) программы записываются в ПЛИС.

Шаг третий. Имеющаяся в ПЛИС оперативная память (ОЗУ) доставляет в программы необходимые значения параметров моделируемой трассы связи для управления определенными узлами имитатора.

Шаг четвертый. ПЛИС формирует сигналы управления имитатором для всех моделируемых лучей распространения сигналов ММВ.

Шаг пятый. Сигналы с выходов ПЛИС в ЦАП модуля имитации преобразуются в аналоговые сигналы управления устройствами РЛЗ, Аt, ФВ.

Шаг шестой. В имитируемых лучах распространения сигнал БС ослабляется и претерпевает искажения, вызываемые изменениями передаточной функции радиоканалов.

Шаг седьмой. Устройство контроля (УК) сравнивает информационный сигнал, поступавший с базовой станции, с информационным сигналом на выходе аппаратуры абонента.

Шаг восьмой. УК делает вывод о наличии или отсутствии технической пригодности комплекта аппаратуры и дает команду на печать результатов.

Шаг девятый. Распечатываются результаты технического контроля исследуемой с помощью комплекса аппаратуры связи.

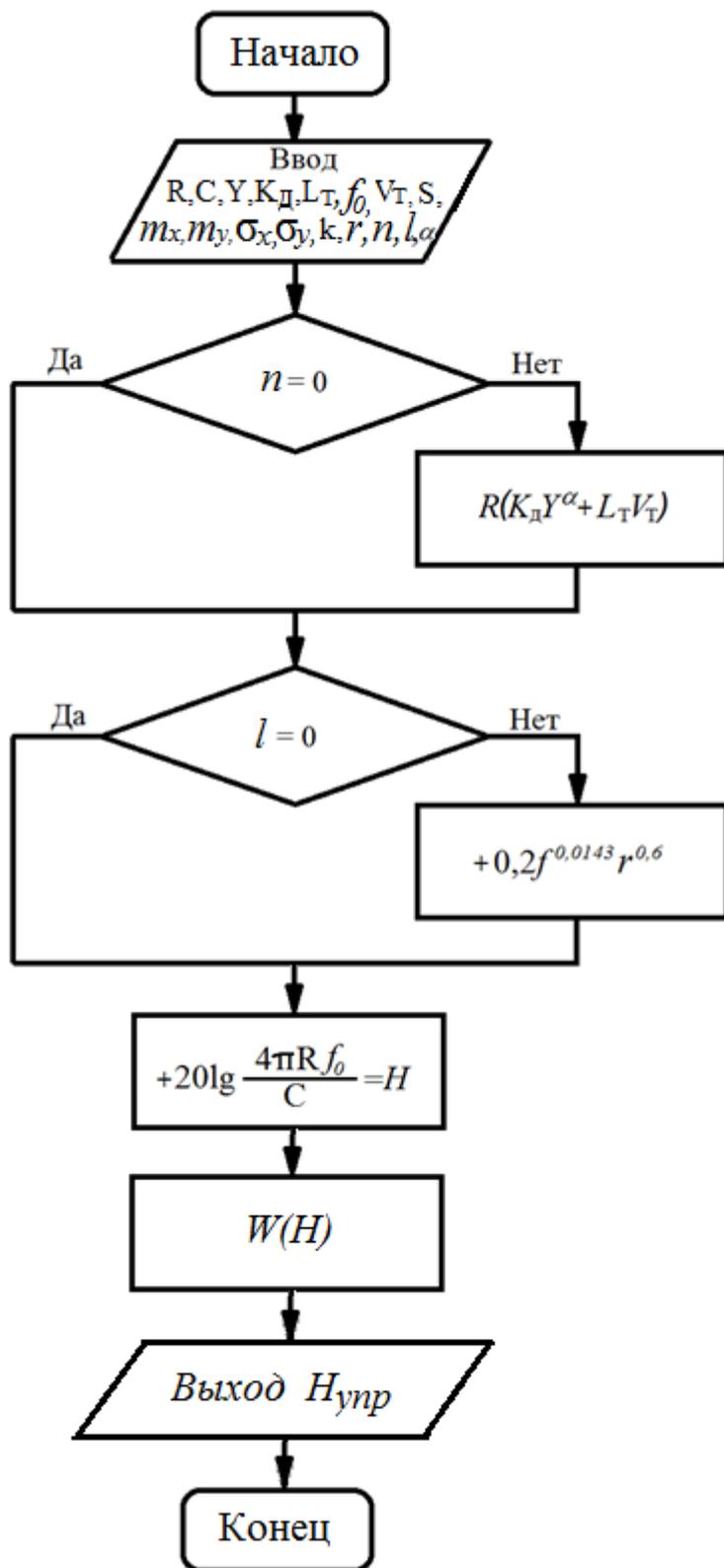
Представлены рекомендации по построению основных узлов комплекса имитации радиоканалов ММД, основанные на использовании серийно выпускаемых ведущими мировыми фирмами устройств и узлов СВЧ. В качестве СЧ предложено использовать синтезатор серии SPS 50, отечественного производства фирмы ООО Спектран, который имеет программируемый блок управления с внешними интерфейсами RS232, USB, SPI, LAN, что позволяет моделировать доплеровские сдвиги частоты. Выходные сигналы синтезатора SPS 50 при необходимости умножаются по частоте широкополосным умножителем частоты, например типа 7009 производства НИИПИ "Кварц".

Для имитации фазовых флуктуаций принимаемых сигналов в комплексе можно применять широкополосный отечественный волноводный фазовый модулятор на р-і-пдиодах, реализуемый на основе микроэлектромеханических систем. Другой вариант управляемого фазовращателя для нужного диапазона частот (17-27 ГГц), с цифровым управлением фазой от 0 до 360°, выпускает фирма G.T. Microwave Inc.

В качестве управляемой линии задержки для имитатора радиоканалов ММД подходит серийно выпускаемая линия задержки с емкостным управлением, реализуемый на основе микроэлектромеханических систем, с параметрами, указанными в таблице 1.

Таблица 1.

Управление	Полоса частот, ГГц	Потери, дБ	Ууправления, В	Неравномерность фазочастотной характеристики, град.	Габариты, мм
Регулировка емкости	1-40	1,5	20	10	8,4x2,1



Управляемые аттенюаторы разработаны и выпускаются серийно целым рядом отечественных и зарубежных фирм и предприятий и выбор их большой.

Для КИРК можно применить управляемые стандартные аттенюаторы типа НМС985ALP4КЕ, работающие в диапазоне 10 ГГц - 40 ГГц, включаемые последовательно при необходимости ослабления сигналов испытываемых устройств более чем на 33,0 дБ.

Для имитации затухания сигналов на основании анализа многочисленных известных экспериментальных данных синтезировано уравнение (2) и разработан алгоритм управления аттенюатором, приведенный на рис. 5.

Рис.5. Алгоритм управления имитатором затухания сигналов ММД (At) при распространении луча

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Показано, что построение новых высокоскоростных систем подвижной радиосвязи поколения 5G возможно в основном за счет освоения миллиметрового диапазона частот.
2. Предложено для исследования, создания и верификации устройств и систем поколения сотовой связи 5G создать имитатор радиоканалов ММД, позволяющий в лабораторных условиях оценивать качество новых разработок.
3. Изучены причины ослабления ММВ и определены основные факторы, влияющие на ослабление сигналов ММД при передаче информации.
4. Предложена методика моделирования радиоканалов ММД, основанная на имитации реальных воздействий по времени, частоте, фазе и амплитуде на сигналы ММД при их распространении по радиоканалам.
5. Определены выражения для имитации ослаблений сигналов и замираний в радиоканалах ММД при разных климатических и географических параметрах моделируемых трасс связи.
6. Предложены модели передаточной функции радиоканалов ММД для стационарных и мобильных абонентов.
7. Разработана структура комплекса имитации радиоканалов ММД с переносом частот исследуемых систем на промежуточные частоты. В качестве промежуточных частот для комплекса имитации радиоканалов ММД выбран наиболее освоенный диапазон частот от 17 ГГц до 27 ГГц, в котором достаточно серийных изделий и устройств для реализации комплекса.
8. Разработана методика управления комплексом КИРК ММД.
9. Разработан алгоритм имитации затухания сигналов ММД в зависимости от географических и климатических условий трасс связи.
10. Определены устройства для реализации имитаторов затухания, амплитудных и фазовых искажений, задержек при распространении сигнала, доплеровских сдвигов частоты.

В приложении приведена таблица распределения осадков по климатическим зонам мира, основные параметры синтезатора частоты SPS50 и акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Куракова, Т.П. Моделирование радиоканалов миллиметрового диапазона частот / Т.П. Куракова, В.К. Сарьян // Труды НИИР. - 2017, №1. – С.33-39.
2. Куракова, Т.П. Использование миллиметрового диапазона волн для мобильной связи поколения 5G / Т.П. Куракова // Проектирование и технология электронных средств. - 2016, №4. – С. 3-7.

Прочие публикации

3. Kurakova, T. How ITU can help develop future networks / T. Kurakova, M.Valdburger // ITU News. - 2013, № 1. – p. 38-41.
4. Куракова, Т.П. Методика моделирования радиоканалов миллиметрового диапазона / Т.П. Куракова, В.К. Сарьян // Материалы XIII Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации"-ПТСПИ-2017 в 2-х томах. - г. Суздаль, 5-7 июля 2017.- Т.2.- С.87-90.
5. Куракова, Т.П. Доплеровские сдвиги частоты в высокоскоростных каналах мобильной связи /Т.П. Куракова //Материалы XIII Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации"-ПТСПИ-2017 в 2-х томах. - г. Суздаль, 5-7 июля 2017. - Т.1.- С.47-48.
6. Куракова, Т.П. Моделирование каналов сотовой связи нового поколения /Т.П. Куракова, С.Н. Михайлов //Сб. статей по материалам 1-ой ВНК "Инфотелекоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения". – Курск. - В 2-х частях. – 2017, ч.1. – С.61-66.

7. Куракова, Т.П. О моделировании радиоканала миллиметрового диапазона / Т.П. Куракова //Материалы XXXVI Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем" в 5 томах. - Серпухов, 2017, Том 5. – С.177-180.
8. Куракова, Т.П.О моделировании каналов связи поколения 5G /Т.П. Куракова, А.Г. Самойлов //Материалы международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» - (СТНО-2017). - Рязань, РГРТУ, 2017, Том 3. - С.102-106.
9. Куракова, Т.П. Разработка имитатора радиоканалов мобильной связи поколения 5G / Т.П. Куракова, А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов // Четвертая международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T. - 2017. - Москва, МФТИ. – С. 85-87.
10. Куракова Т.П. Имитация многолучевых радиоканалов / Т.П. Куракова, А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В.К. Сарьян// Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Intermatic - 2017) в 5 томах. - 2017, Москва, МИРЭА. - Том 4. - С. 1190-1195.
11. Kurakova, T. Overview of the Internet of things / T.Kurakova // Conference INTHTEN ((INternet of THings and ITs ENablers), 3 – 4 June, 2013, St. Petersburg. - p. 82-94.
12. Kurakova, T. 5G in simple words / [http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Pages/CB-Future Networks.aspx](http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Pages/CB-Future%20Networks.aspx) . -October 2017.

Подписано в печать

Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ _____

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.