

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Кураковой Татьяны Петровны на тему «Имитация радиоканалов миллиметрового диапазона поколения 5G», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Рост численности абонентов сотовой связи, развитие технологии «Интернета вещей» и рост требований к качеству предоставления услуг приводят к росту потребности увеличения скорости передачи информации в инфотелекоммуникационном пространстве. Ведущие мировые производители телекоммуникационного оборудования откликнулись на решения Международного союза электросвязи (МСЭ) о развитии нового поколения сотовой связи со скоростями передачи данных не менее 10 Гбит/с при времени отклика от одной миллисекунды и приступили к разработке стандартов и аппаратуры поколения 5G. Рост уровня развития отечественного научноемкого производства современной инфокоммуникационной техники невозможен без создания научной базы, элементами которой являются научно-технические решения в данной области. В частности, разработке оборудования радиосредств сотовой связи и для верификации готовых устройств и систем поколения 5G потребуется проведение многочисленных испытаний нового оборудования. Поэтому диссертационная работа Кураковой Т.П., посвященная исследованию свойств радиоканалов миллиметрового диапазона частот и направленная на разработку комплекса имитации радиоканалов миллиметрового диапазона частот поколения 5G, является своевременной и актуальной.

Работа изложена на 132 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 5 приложений.

**В первой главе** диссертации проведен анализ путей развития нового высокоскоростного поколения подвижной радиосвязи на основании которого

показано, что эффективное развитие поколения связи 5G возможно лишь в миллиметровом диапазоне (ММД) частот. В результате выполненного аналитического обзора Кураковой Т.П. определены основные факторы, влияющие на ослабление сигналов ММД при передаче информации стационарным и подвижным абонентам подвижной связи.

Показано, что при разработке, создании и верификации новой аппаратуры для сетей 5G наличие специализированного комплекса имитации радиоканалов ММД может оказать существенную пользу. Это позволило определить целью диссертационного исследования проведение анализа свойств радиоканалов миллиметрового диапазона частот и разработку комплекса имитации радиоканалов миллиметрового диапазона частот. Для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи диссертационной работы, которые и были решены в следующих главах диссертационного исследования.

**Во второй главе**, посвященной разработке математической модели радиоканалов миллиметрового диапазона частот, предложено передаточную функцию каналов ММД описать суммой детерминированной составляющей затухания сигналов и случайной составляющей затухания миллиметровых волн. Постоянная составляющая ослабления сигналов ММД на трассах связи в работе определена суммой ослаблений вызываемых потерями в свободном пространстве, в газах атмосферы, за счет гидрометеоров различного характера, а также затуханием сигналов ММД при пересечении лесных массивов. Переменная составляющая ослабления сигналов ММД на трассах связи определяется многолучевостью принимаемого радиосигнала, возникающей из-за интерференции приходящих прямого и отраженных от подстилающей поверхности и от местных предметов сигналов.

В работе определены выражения для постоянной составляющей ослабления сигнала на трассе связи в зависимости от таких причин, как гидрометеоры (дождь, снег, туман и др.) и ослабление растительностью. Для моделирования случайной составляющей ослабления сигнала предложено использовать модель множества точечных рассеивателей радиосигналов,

описываемую четырехпараметрическим законом распределения вероятностей, частные случаи которого при описании замираний сигнала и наблюдаются на трассах связи.

**Третья глава** посвящена разработке методики моделирования радиоканалов ММД. Проведен анализ известных моделей радиоканалов сотовой связи, в том числе и рекомендованных МСЭ. Для построения имитатора предложена модель канала ММД как совокупность множества радиоволн, пришедших к приемнику от передатчика по ломанным маршрутам после многократных отражений от зданий и местных предметов, а также от подстилающей поверхности.

На основании анализа известных многочисленных экспериментальных данных получено общее выражение для математического описания детерминированного затухания сигналов на трассах связи ММД. Уточнены модели передаточных функций радиоканалов ММД для стационарных и для мобильных абонентов систем связи. Показано, что для движущихся абонентов доплеровские сдвиги частоты в каналах ММД могут быть соизмеримы с допустимыми по требуемой стабильности частоты отклонениями несущих частот систем связи ММД.

**В четвертой главе** предложена и детально разработана структура комплекса имитации радиоканалов ММД поколения 5G. Рассмотрены вопросы практической реализации его основных узлов - имитатора затуханий сигналов в канале, имитатора фазовых флуктуаций принимаемых сигналов, имитатора запаздывания сигналов отраженных лучей, имитатора доплеровских сдвигов частоты. Разработана методика управления комплексом имитации радиоканалов ММД при использовании его для верификации систем связи поколения 5G. В ходе исследований предложен алгоритм имитации затухания сигналов при распространении по радиоканалам ММД. Предложенные методика и алгоритм строго обоснованы и описаны аналитически.

**Основными новыми научными результатами**, полученными в диссертации, являются:

1. Синтезированные выражения для имитации ослаблений сигналов и замираний в радиоканалах ММД при разных климатических и географических параметрах моделируемых трасс связи.
2. Предложенные модели передаточных функций радиоканалов ММД для стационарных и мобильных абонентов.
3. Разработанная структура комплекса имитации радиоканалов ММД с переносом частот исследуемых систем на промежуточные частоты.
4. Предложенная методика управления комплексом при исследовании и верификации устройств и систем ММД.

**Практическая значимость результатов**, полученных в диссертации заключается в том, что:

- Разработан комплекс имитации радиоканалов ММД, позволяющий в лабораторных условиях оценивать эффективность устройств и систем поколения 5G, повышающий оперативность получения результатов по сравнению с полевыми испытаниями более чем в 10 раз.
- Определены серийные устройства для построения имитаторов затухания, замираний, задержек сигналов и допплеровских сдвигов частоты, что существенно сокращает экономические затраты на создание имитатора радиоканалов ММД.
- Предложенный в работе комплекс имитации каналов ММД может применяться для решения задач в различных телекоммуникационных системах как сотовой связи, так и других и может моделировать различную шумовую и помеховую обстановку.

Следует отметить, что большинство предложенных в работе устройств для создания имитатора отечественного производства, а построение его на промежуточных частотах обеспечит универсальность применения комплекса. Практическая значимость диссертационной работы Кураковой Т.П. высока, что подтверждается использованием результатов исследования в реальных разработках, что отражено в актах внедрения, приложенных к диссертации.

**Степень достоверности научных положений** диссертации Кураковой Т.П. подтверждается апробацией результатов исследований на

научных конференциях и публикацией основных результатов в 12 статьях в том числе в двух ведущих журналах, входящих в перечень ВАК. Доказательства, описывающие основные свойства исследуемых процессов, разработанной методики и предложенного алгоритма выполнены корректно и хорошо согласуются с экспериментальными данными по распространению сигналов миллиметрового диапазона. Выводы в работе логично вытекают из текста диссертации и достаточно подробно обоснованы.

Полученные в работе результаты основаны на многочисленных экспериментальных данных, полученных исследователями многих стран, имеют практическую направленность и полезность и могут использоваться как разработчиками, так и производителями устройств и систем стационарной и подвижной радиосвязи миллиметрового диапазона.

**Замечания по диссертационной работе.** К недостаткам диссертационной работы Кураковой Т.П. следует отнести:

1. Не указано, что потребуется интерфейс для стыковки исследуемых систем поколения 5G с имитатором.
2. Разработку выражения (57) для моделирования детерминированной составляющей ослабления передаточной функции радиоканалов ММД логичнее было выполнить в главе 2.
3. Не отражено положительное свойство имитатора проводить повторные испытания при тех же условиях распространения сигналов, включая статистику замираний
4. Рекомендованы основные устройства для построения комплекса без указания их стоимости.

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне.

**Заключение по диссертационной работе.** Тема исследования соответствует паспорту специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций и является актуальной. Результатом исследований

являются модель радиоканалов ММД, разработанный имитатор радиоканалов ММД, методика и алгоритм управления имитатором.

Считаю, что представленная диссертационная работа является завершенным научно-квалификационным исследованием в котором изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития телекоммуникационных систем. Проведенное исследование удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам, а автор работы, Куракова Татьяна Петровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

### Официальный оппонент

Профессор кафедры сетей связи и передачи данных федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)



Александр Иванович Парамонов

«10» января 2018 г.

Подпись Парамонов А. И.  
ЗАВЕРЯЮ

Ведущий специалист по кадрам

СПбГУТ



Губинин С. А.