

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## **Գրիգորյան Լևոն Ներսեսի**

**ԲԶԶԱՅԻՆ ԿԱՊԻ ՀԻՆԳԵՐՈՐԴ ՄԵՐՆԴԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ  
ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՍՈՂՈՒԼՅԱՑԻԱՅԻ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

### **ՄԵՂՄԱԳԻՐ**

Ե.12.03 «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

Երևան 2019

---

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Григорян Левон Нерсесович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА В СИСТЕМАХ  
СОТОВОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 05.12.03 –  
“Телекоммуникационные сети, оборудование и системы”

Ереван 2019

---

---

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.թ Մ.Յ. Այվազյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Վ.Հ. Ավետիսյան  
տ.գ.թ. Տ.Ս. Հովհաննիսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և  
Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2019թ. հունիսի 14-ին, ժամը 14:00-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:

Մեղմագիրն առաքված է 2019 թ. մայիսի 3-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Մ.Յ. Այվազյան

---

---

Тема диссертации утверждена в национальном политехническом университете  
Армении.

Научный руководитель: к.т.н. М.Ц. Айвазян

Официальные оппоненты: д.т.н. В.Г. Аветисян  
к.т.н. Т.С. Оганнисян

Ведущая организация: Институт радиофизики и  
электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 14-го июня 2019г. в 14:00 на заседании Специализированного совета 046 — “Радиотехники и электроники”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 3-го мая 2019г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета 046  
к.т.н.



М.Ц. Айвазян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** За последние десятилетия мобильная связь оказала значительное влияние на экономическое и социальное развитие развитых и развивающихся стран. Сегодня использование услуг мобильных сетей является неотъемлемой частью повседневной жизни миллиардов людей, прогнозируется, что эта тенденция не только сохранится в будущем, но и станет более распространенной.

В настоящее время сотовые сети четвертого поколения (СЧП) начинают широко использоваться многими операторами мобильной связи по всему миру, предоставляя абонентам более надежное соединение, меньшую задержку и более высокую эффективность, чем сети третьего поколения. Со временем возникает потребность в увеличении объемов передаваемых данных, количества различных абонентских терминалов и создании новых видов услуг, что порождает новые требования к сетям сотовой связи. Удовлетворение данных требований, в свою очередь, приводит к созданию систем с более продвинутыми и расширенными возможностями.

Сети пятого поколения (СПП) в первую очередь будут предназначены для предоставления услуг мобильной широкополосной связи, облуживания устройств интернета вещей, обеспечения сверхнадежных услуг связи с низкой задержкой.

Объединение отмеченных применений в сотовой сети пятого поколения требует применения новой сетевой архитектуры и протоколов, которые будут существенно отличаться от существующих, которые ориентированы только на человека. Объединение в единую сеть потоков данных, созданных людьми и машинами, является сложной задачей.

Генерируемый машинами поток данных может быть высокоскоростным или низкоскоростным, толерантным или чувствительным к задержкам, устойчивым к ошибкам или требующим большой надежности передачи, что приводит к дополнительным трудностям.

Перечисленные выше применения мобильной связи предъявляют различные требования к СПП. Для мобильной широкополосной связи важны: пропускная способность сети, максимальная скорость передачи данных, мобильность абонентских терминалов, энергетическая и спектральная эффективность.

Для сверхнадежных услуг связи с низкой задержкой большое значение имеют малое время задержки при передаче информации и мобильность абонентских терминалов.

В свою очередь для облуживания устройств интернета вещей наиболее важными являются максимальная плотность обслуживаемых устройств, низкая стоимость и энергоэффективность оборудования.

Для удовлетворения требований, предъявляемых к СПП, необходимы структурные изменения существующих сетей, в том числе изменения физического уровня и модуляции радиосигнала. Повышение качества услуг связи может быть обеспечено как за счет развития существующих технологических и алгоритмических решений, так и путем применения новых подходов.

Диссертация посвящена исследованию возможных способов модуляции сигнала для СПП и разработке новых алгоритмических и технологических решений.

**Объект исследования.** Способы модуляции, технологии передачи информации, методы их улучшения и оптимизации. Предложение методов модуляции и технологии передачи информации удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к СПП. Реализация и экспериментальное исследование

предложенных методов передачи и модуляций. Расширение возможностей сотовых сетей связи.

**Методы исследования.** В процессе исследования использованы теоретический анализ, математическое моделирование и научно-производственное прототипирование.

**Цель и задачи диссертации.** Целью диссертационной работы является исследование передовых технологий передачи сигнала и методов модуляции, предложение технологий передачи и метода модуляции сигнала, удовлетворяющих требованиям СПП. Разработка приемо-передающей системы с использованием предложенных методов и предложение средств, повышающих эффективность модуляции и передачи, а также всей системы в целом.

Для достижения этой цели в диссертации были решены следующие задачи:

- уточнение требований к способам модуляции и технологиям передачи в СПП;
- уточнение ширины требуемой частотной полосы и возможных рабочих частот. Исследование существующих и находящихся в стадии разработки моделей каналов связи;
- изучение параметров радиоканала в диапазонах частот, предложенных в рамках WRC-2015, и выделение частот обеспечивающих относительно большое покрытие соты;
- проведение сравнительного анализа передовых технологий передачи сигнала, на основе предъявляемых требований, и выделение методов, наиболее соответствующих требованиям СПП;
- разработка приемо-передающей системы с использованием разработанной технологии передачи и совместимых способов модуляции;
- предложение метода предотвращения интерференционных помех и решения задач электромагнитной совместимости, вызванных внеполосным излучением сигнала. Обоснование необходимости адаптивного выбора технологии передачи на пользовательском оборудовании;
- предложение алгоритма определения угла приема радиосигнала для точного позиционирования абонентского оборудования, предназначенного для совместного использования с технологиями MU-MIMO и CP-OFDM, Разработка прототипа;
- демонстрация применимости алгоритма и определение точности измерения угла посредством разработанной системы.

**Научная новизна работы.** В процессе выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

1. результаты разработки методов модуляции и технологий передачи, предназначенных для сетей мобильной связи пятого поколения;
2. предложенный алгоритм определения угла приема радиосигнала, который выделяется низкой вычислительной сложностью и предназначен для совместного использования с технологиями MU-MIMO и CP-OFDM;
3. разработанная система и программные модули.

**Практическая ценность работы.** Диссертация имеет прикладную направленность.

- Результаты разработки методов модуляции и методов передачи рекомендуются к применению при проектировании систем мобильной связи.

- Разработанный алгоритм определения угла приема радиосигнала может использоваться в системах, базирующихся на технологиях MU-MIMO и OFDM, в том числе в разрабатываемых сотовых сетях.
- Разработанные программные модули использованы в программном обеспечении платформы MIMO прототипирования и в дальнейшем могут использоваться для исследований и разработок.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена разработанным прототипом системы и программными модулями. Разработанные программные модули использовались при создании более сложных интегрированных систем и установлены в хранилище со свободным доступом.

**Внедрение.** Результаты работы были внедрены в разрабатываемое ООО "YEA Engineering" программное обеспечение, предназначенное для платформы MIMO прототипирования, и используются для определения угловых координат абонентского устройства относительно базовой станции.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты разработки методов модуляции и технологий передачи сигнала для сетей мобильной связи пятого поколения.
2. Обоснование применения метода перекрытия и суммирования в СПП.
3. Предложенный алгоритм определения угла приема радиосигнала для совместного использования с технологиями MU-MIMO и CP-OFDM.
4. Разработанные программные модули для определения угла приема радиосигнала.
5. Разработанный прототип с применением предложенного алгоритма.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и демонстрировались на:

- 4-й международной конференции "Технологии Мобильной и Беспроводной Связи. Тренды и Перспективы" (Санкт-Петербург, Россия, 2016 г.);
- 14-ом международном симпозиуме "EWDTS: East-West Design & Test" (Ереван, Армения, 2016 г.);
- ежегодных научных конференциях НПУА (Ереван, Армения, 2016 г., 2017 г.);
- научных семинарах факультета "Радиотехника и системы связи" НПУА (Ереван, Армения, 2016 г.);
- научных семинарах института "Информационные и телекоммуникационные технологии и Электроника" НПУА (Ереван, Армения, 2017 г., 2018 г.);
- школе молодых ученых (Цахкадзор, Армения, 2016 г.);
- выставках "DigiTec Expo" (Ереван, Армения, 2016 г., 2017 г., 2018 г.);
- 16-й отраслевой научно-технической конференции "Развитие Радиоэлектроники – Основа Цифровой Экономики России" (Омск, Россия, 2017 г.);
- исследовательских дней ISTC (Ереван, Армения, 2017 г., 2018 г.).

**Публикации.** По материалу диссертации опубликовано 4 научные работы, 2 из которых опубликованы в научных изданиях включенных в перечень изданий Scopus и 2 работы без соавторов. Полный список работ приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и двух приложений. Основной текст диссертации, включая 65 рисунков и 3 таблицы, изложен на 150 страницах. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна, практическое значение полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены особенности сотовой сети пятого поколения и возможные технологические решения. Изучены основные применения сетей пятого поколения и требования, предъявляемые со стороны этих применений. На основе требований предъявляемым к СПП, были сформулированы критерии оценки способов модуляций и технологий передачи.

СПП будут в первую очередь предназначены для предоставления услуг связи, необходимых для решения задач, приведенных на рис. 1.

### ШИРОКОПОЛОСНАЯ МОБИЛЬНАЯ СВЯЗЬ



Рис. 1. Применения сетей пятого поколения

Для решения приведенных выше задач с применением мобильной связи требуется, чтобы сети пятого поколения были более производительными, чем существующие сети третьего и четвертого поколений. Для удовлетворения требований, предъявляемых к СПП, необходимы структурные и компонентные изменения существующих сетей. Улучшение качества услуг связи предполагается достичь как за счет развития существующих технологических и алгоритмических решений, так и применением новых подходов.

Для применения в СПП претендуют перечисленные ниже сетевые структуры и технологии.

- Использование гетеросетей использующих существенно отличающиеся технологии радиодоступа.
- Использование сантиметровых и миллиметровых волн радиоспектра.

- Формирование диаграммы направленности антенн в диапазоне миллиметровых волн.
- Применение технологии массивного MIMO.
- Широкое применение связи типа устройство–устройство (Device-to-Device, D2D).
- Одновременный прием и передача сигнала в одной и той же полосе частот.

Оптимальный выбор способов модуляций в СПП зависит от ряда факторов, основными из которых являются параметры радиоканала и технологии передачи сигналов. Способ модуляции и технология передачи часто рассматриваются совместно, поскольку при применении некоторых технологий передачи сигнала невозможно использовать определенные способы модуляции (например, при когерентной передаче и приеме OFDM сигнала невозможно использовать частотную модуляцию поднесущих). В диссертации способ модуляции и технология передачи рассматривались совместно.

В результате исследования выделены основные требования, предъявляемые к способу модуляции и технологии передачи. Оптимальная комбинация способа модуляции и технологии передачи должна удовлетворять следующим требованиям.

- Иметь малый коэффициент отношения максимальной и средней мощности (PAPR, Peak to average power ratio). Выходной усилитель мощности радиопередатчика потребляет значительную мощность. Её энергоэффективность в значительной степени зависит от PAPR передаваемого сигнала. Чем выше PAPR, тем меньше к.п.д. усилителя мощности и, соответственно, тем меньше энергоэффективность передатчика. Этот параметр особенно важен для абонентских устройств, так как они питаются от батарей и должны работать как можно дольше.
- Обладать высокой спектральной эффективностью.
- Обладать высокой эффективностью временного использования радиоканала. Использование циклического префикса позволяет применить частотное выравнивание сигнала, но сокращает время передачи полезной информации.
- Использовать узкие полосы радиочастотного спектра и иметь низкий уровень внеполосного излучения. В выделенном для телевидения частотном спектре имеются высвобожденные частоты. Эти свободные частоты можно использовать в сотовых сетях, но необходимо, чтобы передатчики сотовой связи не создавали помех на соседних радиоканалах.
- Иметь небольшую сложность реализации. Сложно реализуемый способ модуляции приводит к увеличению энергопотребления блока цифровой обработки сигнала, а также увеличению размеров и себестоимости оборудования.
- Обеспечивать максимально низкое значение вероятности ошибки для определенного значения коэффициента отношения сигнал / шум.
- Обладать гибкостью распределения ресурсов сети и высокой эффективностью технологии множественного доступа.
- Быть совместимым с технологией MIMO. Технология MIMO будет играть важную роль в развитии сотовой связи, по данной причине совместимость с технологией MIMO является важным условием.
- Обеспечивать возможность применения модуляций высокого уровня. Совмещение адаптивной модуляции с технологией помехоустойчивого

кодирования позволяет максимально приблизиться к теоретическому пределу Шеннона.

- Готовность технологии к применению. Важно, чтобы технология была отлаженной и готовой к быстрому внедрению и применению.

**Во второй главе** рассмотрены диапазоны рабочих частот СПП и исследованы параметры каналов радиосвязи для определения способа модуляции. Уточнена ширина требуемой частотной полосы, исследованы существующие и находящиеся на стадии разработки модели каналов радиосвязи.

В настоящее время 3GPP (партнерский проект 3-го поколения) для функционирования мобильных СЧП выделил 52 частотные полосы различной ширины. Эти частотные полосы согласуются с соответствующими органами разных стран и в некоторых случаях могут перекрываться.

В СПП могут использоваться лицензированные частотные полосы и технологии передачи сигналов используемые для СЧП. Однако СПП должны удовлетворять более жестким требованиям надежности, пропускной способности, максимальной скорости передачи данных, плотности обслуживаемого оборудования и времени задержки, чем СЧП, по этой причине СПП потребуют более широкую полосу рабочих частот. По оценкам ITU-R, до 2020 года системам мобильной связи потребуется суммарная полоса частот 1340...1960 МГц в зависимости от плотности абонентов без существенных изменений качества услуг сотовой связи, предоставляемых в настоящее время.

В диапазоне частот до 6 ГГц, который в настоящее время используется в СЧП, расширение спектра возможно благодаря перелицензированию уже используемых и широкому применению нелицензируемых частот. Диапазон частот до 6 ГГц почти полностью занят, поэтому освобождение и перелицензирование широкой полосы частот является трудно реализуемой задачей.

Перераспределение радиочастотного спектра до 6 ГГц может определенно увеличить используемую полосу, но не может удовлетворить требованию СПП, которое, согласно оценке исследовательского проекта METIS, в зависимости от плотности абонентов, составляет 1...3 ГГц. Для предоставления требуемой полосы рабочих частот необходимо использовать частоты, превышающие 6 ГГц.

С учетом предложенных на всемирной конференции радиосвязи в 2015 г. (WRC-2015) частотных полос, были исследованы параметры канала радиосвязи и предложены частоты, обеспечивающие максимальное покрытие соты [1].

Основываясь на частотной зависимости потерь радиосигнала в различных материалах, зависимости затухания радиоволн от интенсивности дождя и поглощения в кислороде и водяных парах атмосферы, можно выделить следующие предпочтительные полосы частот: 24,25...27,5 ГГц, 31,8...33,4 ГГц, 37...40,5 ГГц, 42,5...43,5 ГГц.

Эти частоты предпочтительны из-за малых потерь при распространении. В местах, где сконцентрировано большое количество обслуживаемых устройств (площади, стадионы) и необходима широкая частотная полоса, также предпочтительны диапазоны 66...76 ГГц и 81...86 ГГц, обеспечивающие широкие частотные полосы.

Важным параметром радиоканала является разброс задержки распространения радиосигнала. В системах с выравниванием в частотной области от значения разброса задержки зависит длительность циклического префикса, а в системах с

выравниванием во временной области - количество ветвей цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой или сложность эквалайзера.

В некоторых работах указывается, что увеличение частоты радиосигнала приводит к очевидному уменьшению значения разброса задержки. Однако результаты, полученные в ходе исследовательского проекта mmMAGIC, показывают, что измерение разброса задержки в значительной степени зависит от динамического диапазона измерительного оборудования. После калибровки оборудования и выравнивания комплексной амплитудно-частотной характеристики измерения во всех частотных областях дают примерно одинаковый результат и зависимость от частоты не наблюдается. Для частот 15 ГГц, 28 ГГц и 60 ГГц измеренные кривые разброса задержки приведены на рис. 2.

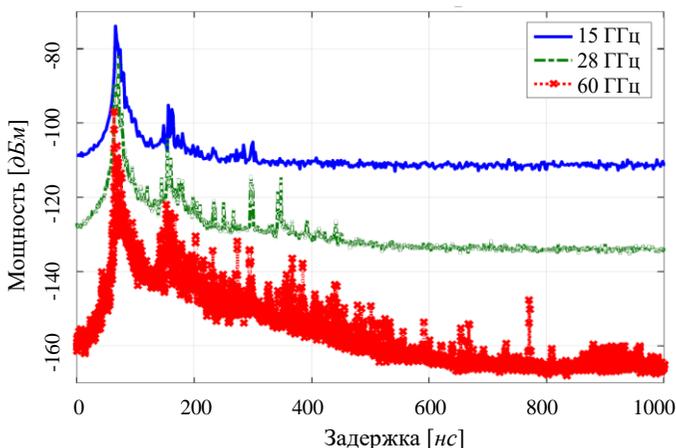


Рис. 2. Временное распределение принятой мощности радиосигнала на несущих частотах 15, 28 и 60 ГГц

Результаты выполненного в диссертации исследования показывают, что радиоволны с частотой выше 6 ГГц по сравнению с радиоволнами с частотой ниже 6 ГГц имеют значительно большие потери при распространении, а значения разброса задержки отличаются незначительно. С увеличением частоты размеры сот будут уменьшаться и в частотных диапазонах, обсужденных в рамках WRC-2015, будут во много раз меньше размера нынешних сот.

Уменьшение размера сот ограничит использование высоких частот. Их будет целесообразно использовать вместе с низкими частотами и только в густонаселенных районах.

**В третьей главе** исследованы технологии передачи сигнала CP-OFDM, SC-FDMA, OQAM-FBMC, TF-FTN и GFDM, рассмотрены совместимые с ними способы модуляции. Разработана технология передачи сигнала и способ модуляции. Для применения в СПП предложен метод "перекрывтия и суммирования". Обоснована возможность и необходимость адаптивного выбора технологии передачи сигнала на абонентском оборудовании. Предложены пути решения проблем электромагнитной совместимости, возникающих из-за внеполосного излучения OFDM.

В настоящее время мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM) используется СЧП в качестве технологии передачи сигнала. Параметры OFDM приняты за основу и с ними сравниваются соответствующие параметры других методов.

OFDM имеет следующие преимущества.

- Используя выравнивание комплексной амплитудно-частотной характеристики радиоканала в частотной области и устранение межсимвольной интерференции, OFDM резко уменьшает количество выполняемых в приемнике вычислений, и аппаратная сложность вычислительных узлов приемника становится меньше, чем в системах с одной несущей.
- За счет перекрытия частотных спектров поднесущих OFDM имеет большую спектральную эффективность по сравнению с традиционным частотным мультиплексированием сигналов с одной несущей.
- Для формирования и анализа сигнала используются БПФ и ОБПФ, для которых разработаны эффективные алгоритмы.
- Поднесущие могут быть модулированы независимо друг от друга, посредством чего можно увеличить пропускную способность и помехоустойчивость канала связи.
- Для мультиплексирования сигналов различных абонентов возможно применение метода мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDMA), который устраняет необходимость применения ортогональных кодов (CDMA) и дает возможность предоставлять разные поднесущие одного и того же OFDM символа разным абонентам.
- OFDM совместим с технологией передачи MIMO.
- OFDM является отлаженной и готовой к быстрому внедрению и применению технологией передачи и используется в ряде стандартов.

OFDM имеет следующие недостатки.

- OFDM имеет большое значение коэффициента отношения максимальной и средней мощности сигнала. Это обусловливается тем, что OFDM сигнал является комплексной суммой всех модулированных поднесущих и, при определенной последовательности данных, поднесущие в некоторые моменты времени оказываются синфазными и складываются, а в другие моменты - противофазными и вычитаются.
- OFDM чувствителен к нулям амплитудно-частотной характеристики, и для безошибочного приема передаваемых данных должно использоваться помехоустойчивое кодирование.
- Поскольку в традиционном OFDM поднесущие не фильтруются и символ имеет прямоугольную огибающую, сигнал имеет большой уровень внеполосного излучения. Для подавления внеполосного излучения используются защитные нулевые поднесущие, которые в некоторой степени уменьшают спектральную эффективность OFDM технологии.

Для технологии множественного доступа с частотным разделением с одной несущей (Single carrier frequency division multiple access, SC-FDMA) используется распределенный OFDM с дискретным преобразованием Фурье (Discrete Fourier Transform spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DFT-s-OFDM). В настоящее время SC-FDMA используется в СЧП в качестве технологии

множественного доступа и передачи сигналов для восходящей линии связи абонентского оборудования.

SC-FDMA по сравнению с OFDMA имеет следующие преимущества.

- Меньшее значение коэффициента отношения максимальной и средней мощности сигнала.
- Лучшую устойчивость, SC-FDMA более устойчив к нулям амплитудно-частотной характеристики канала связи.
- Менее чувствителен к нестабильности несущей частоты.

SC-FDMA имеет следующие недостатки по сравнению с OFDMA.

- Требуется сравнительно сложный, мультиабонентный приемник.
- Для больших значений отношения сигнал/шум вероятность блочковой ошибки намного выше, чем в OFDMA.
- Из-за дополнительного БПФ вычислительная сложность передатчика выше, чем в OFDMA.
- OFDMA является более гибким, чем SC-FDMA. В системах, работающих в реальном времени, изменение количества точек ДПФ является сложной задачей, а в OFDMA за счет нулевых поднесущих можно без особой сложности изменять количество поднесущих, предоставляемых абоненту.
- В условиях передачи MIMO при одинаковом отношении сигнал/шум OFDMA имеет лучшие характеристики, чем SC-FDMA.

Аналогичные исследования были проведены для технологий многочастотной передачи с гребенчатой фильтрацией (Filter Bank Multi Carrier, FBMC), частотно-временной сигнализации «Быстрее, чем Найквист» (Time-Frequency Faster Than Nyquist, TF-FTN) и обобщенного мультиплексирования с частотным разделением (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM).

Помимо исследованных технологий передачи сигналов известны также другие технологии. К ним относятся: универсально отфильтрованная мультинесущая (Universal Filtered Multicarrier, UFMC), биортогональное мультиплексирование с частотным разделением (Biorthogonal Frequency Division Multiplexing, BFDM), импульсоформированное спектрально эффективное мультиплексирование с частотным разделением (Pulse Shaped Spectral Efficient Frequency Division Multiplexing) и т.д. Они представляют собой различные комбинации исследованных технологий с небольшими изменениями. Из-за сложности их реализации и нахождения «на уровне идеи» для использования в СПП они не рассматривались.

В таблице 1 приведены технологии передачи сигнала и проведено их сравнение по уровню удовлетворения требованиям СПП.

Как следует из таблицы, пара CP-OFDM SC-FDMA уступает другим технологиям по спектральной эффективности (TF-FTN), временному использованию канала (OQAM-FBMC, TF-FTN, GFDM) и внеполосным излучениям (OQAM-FBMC, GFDM). В свою очередь, другие методы имеют ряд недостатков. Среди них сложность реализации (для всех технологий) и сложная совместимость с технологией MIMO (OQAM-FBMC).

Всего лишь удвоив вычислительную сложность системы, для технологий CP-OFDM и SC-FDMA можно применить метод "перекрытия и суммирования", который позволяет без использования циклического префикса в частотной области выравнивать принятые сигналы. Применение этого метода улучшит параметры

временного использования канала связи технологиями и обеспечит максимально возможную эффективность.

Таблица 1.

Уровень удовлетворения требованиям СПП различных технологий передачи

Параметры и требования	Требуемое значение	Технология передачи (вид модуляции)				
		CP-OFDM	SC-FDMA	OQAM-FBMC	TF-FTN	GFDM
Отношение максимальной мощности к средней (PAPR)	Низкое	Высокое	Низкое	Высокое	Высокое	Высокое
Спектральная эффективность	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
Временное использование канала	Высокое	Низкое	Низкое	Высокое	Среднее	Среднее
Внеполосное излучение	Низкое	Высокое	Высокое	Низкое	Высокое	Низкое
Сложность реализации (вычислительная)	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Гибкость распределения ресурсов	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя
Совместимость с технологией ММО	Простая	Простая	Простая	Сложная	Нет данных	Простая
Поддержка адаптивного выбора модуляции	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Степень готовности технологии к внедрению	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая

В прикладных системах также возможно уменьшить внеполосные излучения технологий CP-OFDM и SC-FDMA. Кроме того, что предложены и могут применяться цифровые методы уменьшения внеполосных излучений, такие как адаптивное изменение символов, расширение символьного созвездия, передача последовательностей с множественным выбором, использование дополнительных компенсирующих поднесущих и т. д. На практике используется подавление внеполосного излучения сигнала связанное с ограниченностью полосы пропускания цифро-аналогового преобразователя, и применяются специальные полосовые фильтры.

Кроме подавления внеполосных излучений сигнала в передатчике, также возможно изменение политики выделения спектра. Вместо прямого использования выделенных для нужд эфирного телевидения и со временем освобожденных частотных полос, возможно в освобожденные частотные полосы переместить другие телевизионные каналы, за счет чего в конце частотного диапазона выделенного для эфирного телевидения освободить довольно широкую полосу. В дальнейшем эта частотная полоса может быть выделена операторам сотовой связи.

Проведенное исследование параметров радиоканала показывает, что в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн в приемнике также должны выполняться

выравнивание принятого радиосигнала и устранение межсимвольной интерференции. Благодаря гибкому выбору частотного интервала между поднесущими и длительности циклического префикса, CP-OFDM и SC-FDMA также могут использоваться в этом диапазоне волн. Таким образом, для освоения нового частотного диапазона необходимо заменить только радиочастотный тракт и с минимальными модификациями использовать алгоритмы цифровой обработки сигнала разработанные для диапазона частот до 6 ГГц.

Использование общего блока цифровой обработки сигналов позволит еще больше упростить устройство абонентского оборудования. Поскольку абонентское оборудование каждого последующего поколения сотовых сетей обычно совместимо с сетями предыдущих поколений, общий блок цифровой обработки сигналов и программно определяемый радиотракт также возможно использовать для установления связи с СЧП. Низкая вычислительная сложность предложенных технологий позволит получить относительно недорогое абонентское оборудование с низким энергопотреблением.

Выполненное исследование технологий CP-OFDM и SC-FDMA показывает, что для большого значения отношения сигнал–шум принятого сигнала и при использовании технологии MIMO, характеристики CP-OFDM превосходят соответствующие характеристики SC-FDMA. Для низкого значения отношения сигнал–шум, которое обычно соответствует случаю расположения абонентского устройства на краю соты, SC-FDMA более эффективна.

Учитывая сходство технологий CP-OFDM и SC-FDMA, на абонентском устройстве в направлении передачи рекомендуется применение адаптивного выбора технологии передачи сигнала. В областях, расположенных вблизи центра соты, где абонентскому устройству доступно высокое отношение сигнал–шум, и для обеспечения больших скоростей передачи данных, необходимо использовать технологию MIMO, должна применяться технология CP-OFDM, а во всех остальных случаях технология SC-FDMA.

В диссертации обосновано, что когерентный прием OFDM сигнала несовместим с частотной модуляцией поднесущих. В комплексном пространстве, для обеспечения максимального евклидова расстояния между модулированными информационными символами, наиболее целесообразно применение M-точечной квадратурной амплитудной модуляции.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментального исследования характеристик OFDM с применением программно определяемого радиооборудования. Разработан и реализован алгоритм определения угла приема радиосигнала для сочетания технологий MU-MIMO и CP-OFDM. Измерена точность определения угла.

Результаты экспериментальных исследований свойств OFDM и характеристик адаптации квадратурной амплитудной модуляции опубликованы в работах [2,3].

Для исследования свойств OFDM была разработана работающая в реальном времени приемно-передающая система на основе программно определяемого радиооборудования USRP-2952R.

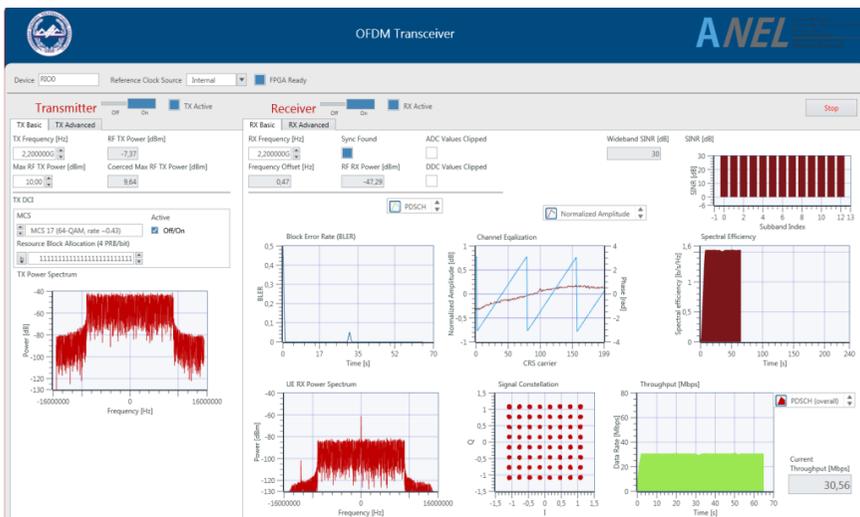


Рис. 3. Лицевая панель программы управления OFDM приемно-передающей системой

С помощью системы, в режиме эфирного приема и передачи сигнала были измерены радиочастотный спектр OFDM сигнала и доступная абоненту скорость передачи данных для разных созвездий квадратурных амплитудных модуляций, а также для разных параметров помехоустойчивого кодирования.

В случае QPSK, 16-QAM, 64-QAM модуляций поднесущих измеренные частотные спектры суммарного OFDM сигнала имеют практически одинаковые уровни внеполосных излучений. Подавление в соседнем канале относительно основного канала составляет 40 дБ. Полученные экспериментальные результаты в части уровней внеполосных излучений совпадают с теоретическими результатами.

Путем программного изменения уровня OFDM-сигнала, для QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляций поднесущих была измерена зависимости величины вектора ошибки (Error Vector Magnitude, EVM) от отношения сигнал-шум и исследованы характеристики адаптации способов модуляций. Учитывая результаты измерений, в случае отношения сигнал-шум больше 27 дБ наиболее целесообразна модуляция 64-QAM, при 12...27 дБ – модуляция 16-QAM, при 8...12 дБ – модуляция QPSK.

Описание и реализация разработанного алгоритма определения угла приема радиосигнала рассмотрены в работе [4]. Алгоритм может применяться для точного определения местоположения абонентского оборудования и имеет низкую вычислительную сложность.

Результаты экспериментального определения угла приема радиосигнала были получены для трех углов. Принимая во внимание наличие нулей в общей диаграмме направленности в направлениях вверх и вниз от базовой станции, мы избегали попадания мобильной станции в эти зоны. Если антенна базовой станции установлена вертикально, точность определения угла приема радиосигнала из этих направлений резко снижается.

Лицевая панель программы для определения угла приема радиосигнала показана на рис. 4.

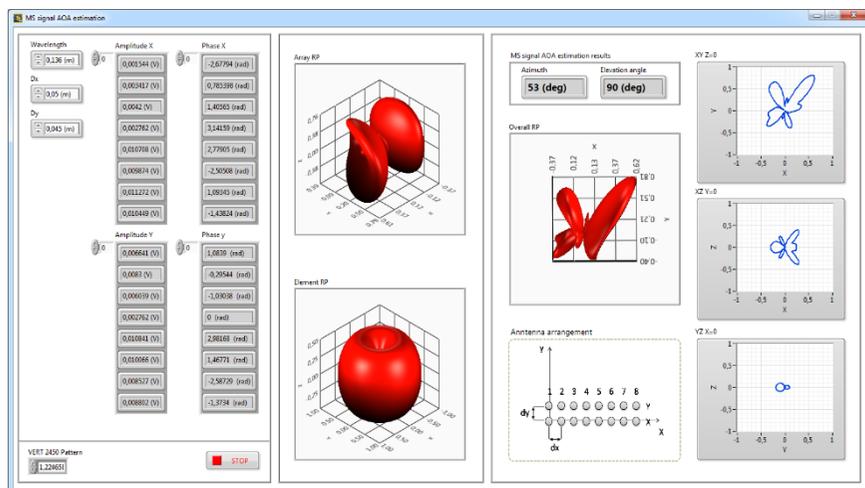


Рис. 4. Лицевая панель программы для определения угла приема радиосигнала

Лицевая панель программы приведена для одного из случаев определения угла приема радиосигнала. В ходе эксперимента мобильная станция относительно базовой станции в азимутальной плоскости была расположена под углом  $54^\circ$ , угол места оставался постоянным и составлял  $90^\circ$  (обе станции были расположены на одной высоте).

При экспериментах измеренные значения угла приема радиосигнала находились в пределах  $\pm 1^\circ$  от действительного значения. Принимая во внимание тот факт, что отражения от стен также влияют на точность измерения, можно считать, что получен хороший результат.

Трехмерная диаграмма вероятности пеленгации абонента, построенная по результатам описанного выше эксперимента, показана на рис. 5.

В результате будущих улучшений программного обеспечения, для всех поднесущих OFDM сигнала углы приема радиосигнала могут определяться независимо друг от друга. Используя усреднение и статистическую фильтрацию измеренных углов, возможно повышение точности определения угла приема. Это позволит получить точные результаты даже при малом отношении сигнал-шум.

При работе с одной базовой станцией использование параметров задержки распространения сигнала (Time Of Arrival, TOA) и задержки между передачей сигнала и приемом ответа (Round Trip Time Of Arrival, RTTOA), а при наличии нескольких базовых станций также использование параметра разницы задержки сигнала (Differential Time Of Arrival, DTOA) позволит определить расстояние между базовой и мобильной станциями. Это, в свою очередь, позволит определить местоположение абонента и отслеживать его.

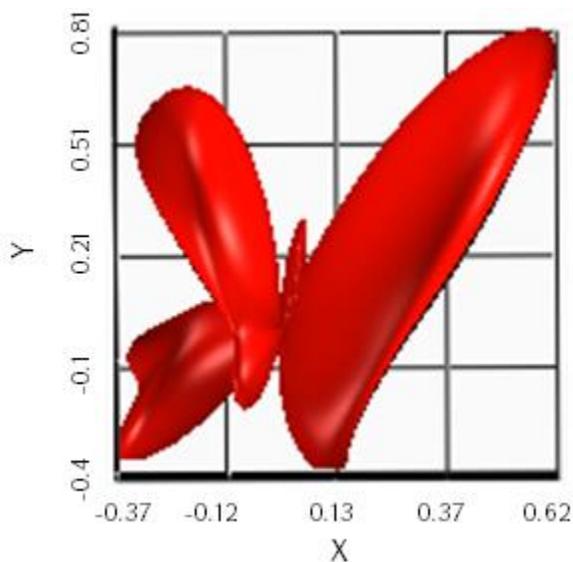


Рис. 5. Пространственная диаграмма вероятности пеленгации абонента

Разработанное программное обеспечение размещено на сетевом ресурсе со свободным доступом. Ссылка на ресурс приведена в конце автореферата.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Сформулированы требования к сотовым сетям пятого поколения, технологические решения для их удовлетворения, критерии оценки технологий передачи и способов модуляции [1-3].
2. Уточнены возможные рабочие частоты для применения в сотовых сетях пятого поколения и для этих частот исследованы параметры радиоканала. Результаты исследований свидетельствуют о незначительной зависимости значения временной дисперсии радиосигнала в радиоканале от частоты и больших затуханиях радиосигнала в рассмотренных сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн [1].
3. Проведен сравнительный анализ передовых технологий передачи и способов модуляций на основе параметров отношения максимальной и средней мощности (PAPR), спектральной эффективности, коэффициента временного использования канала связи, внеполосного излучения, вычислительной сложности, гибкости распределения сетевых ресурсов, совместимости с технологией MIMO, использования адаптивных методов модуляции, готовности технологии к применению. Предложены технологии которые наилучшим образом соответствуют требованиям СПП [2,3].
4. Предложен метод, позволяющий избежать проблем электромагнитной совместимости связанных с внеполосными излучениями OFDM, обоснована

возможность и необходимость адаптивного выбора технологии передачи сигнала на абонентском оборудовании [2].

5. Для детального изучения свойств предлагаемой технологии передачи и способов модуляции на основе программно определяемого радиооборудования была разработана система приема-передачи и проведены экспериментальные измерения [2,3].
6. Предложен алгоритм для определения угла приема радиосигнала. Алгоритм имеет малую вычислительную сложность, предназначен для совместного использования с технологиями MU-MIMO и CP-OFDM и может использоваться для точного определения местоположения абонентского оборудования [4].
7. Разработана система, которая базируется на программно определяемом радиооборудовании и при помощи описанного выше алгоритма позволяет определить угол приема радиосигнала с точностью  $\pm 1^\circ$  [4].
8. Разработанные программные модули размещены в хранилище со свободным доступом [5] и указаны направления дальнейших исследований [4].

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. Գրիգորյան Լ.Ն. Հինգերորդ սերնդի բջջային կապի ցանցերում նադիոկապուղու պարամետրերի վերածությունը և աշխատանքային հաճախությունների տիրույթի ընտրությունը // ՀԱՊՀ Լրաբեր: - Եր.: Ճարտարագետ, 2018: Մաս 1.- 404 էջ. - էջ. 277-284.
2. Գրիգորյան Լ.Ն. Исследование типов модуляции сигнала в системах мобильной связи пятого поколения // ՀԱՊՀ Լրաբեր: - Եր.: Ճարտարագետ, 2017: Մաս 1.- 526 էջ. - էջ. 422-428.
3. Aivazyan M., Avetisyan H., Grigoryan L., Babayan A. Waveform modulation for the 5G mobile telecommunication systems // East-West Design & Test, October 14 – 17, 2016, Yerevan, Armenia, ISSN: 2472-761X, doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807714, pp 261-264.
4. Grigoryan L.N., Aivazyan M.Ts., Babayan A.S. MIMO OFDM DOA estimation algorithm implementation and validation using SDR platform. // 1, March 2019, Journal of Communications Software and Systems, Vol. 15, pp. 1-8. ISSN 1845-6421, doi: 10.24138/jcomss.v15i1.618.

Программное обеспечение размещено по ссылке:

5. Grigoryan L.N. MIMO OFDM Host DOA estimator. // NPUA. Yerevan, Armenia, September 2018. Available: <https://github.com/LevonGR/DOA-Estimator>.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Վերջին մի քանի տասնամյակների ընթացքում շարժական կապը էականորեն ազդել է զարգացած և զարգացող երկրների տնտեսական և հասարակական զարգացման վրա: Այսօր շարժական կապի ծառայությունների օգտագործումը միլիարդավոր մարդկանց առօրյա կյանքի անբաժանելի մասն է հանդիսանում և ակնկալվում է, որ այս միտումը ոչ միայն կշարունակվի սպազայում այլ կդառնա ավելի յայնատարած:

Ներկայում չորրորդ սերնդի ցանցերը սկսում են բազմաթիվ բջջային կապի օպերատորների կողմից յայնորեն կիրառվել ամբողջ աշխարհում, բաժանորդներին տրամադրելով ավելի հուսալի կապ, ցածր հապաղմամբ և երրորդ սերնդի ցանցերի համեմատ ավելի արդյունավետ: Ժամանակի ընթացքում, մեծ ծավալով տվյալների հաղորդման պահանջը, տարատեսակ ծառայություններից օգտվող մեծաքանակ սարքավորումների առկայությունը ցանցի մատուցվող ծառայությունների նկատմամբ առաջացնում են նոր պահանջներ, որոնց բավարարման համար էլ ստեղծվում են նոր, ավելի զարգացած և ընդլայնված հնարավորություններով համակարգեր:

Հինգերորդ սերնդի ցանցերը նախ և առաջ նախատեսված են լինելու յայնաչերտ շարժական կապի տրամադրման, մեծաքանակ մեքենա տիպի բաժանորդների սպասարկման, գերհուսալի և ցածր հապաղմամբ կապի ծառայությունների մատուցման համար:

Այս կիրառությունների միավորումը մեկ հինգերորդ սերնդի բջջային կապի ցանցում, պահանջում է ցանցի նոր կառուցվածք և արձանագրություններ, որոնք էականորեն կտարբերվեն ավանդական՝ մարդկանց սպասարկող, ցանցերի կառուցվածքից և արձանագրություններից: Մարդկանց և մեքենաների կողմից ստեղծվող տվյալների հոսքերի միավորումը մեկ ցանցում բարդ խնդիր է:

Մեքենաների կողմից ստեղծվող տվյալների հոսքը կարող է լինել տարբեր՝ մեծ կամ փոքր արագությամբ, ժամանակային հապաղման նկատմամբ զգայուն կամ հապաղման նկատմամբ կայուն, սխալների նկատմամբ կայուն կամ մեծ հուսալիություն պահանջող, որը ստեղծում է լրացուցիչ բարդություն:

Նշված կիրառությունները հինգերորդ սերնդի ցանցերին ներկայացնում են տարատեսակ պահանջներ: Լայնաչերտ շարժական կապի համար կարևոր են ակնկալվող բաժանորդին հասանելի տվյալների հաղորդման արագությունը, միավոր մակերեսին բաժին ընկնող ցանցի թողունակությունը, տվյալների հաղորդման առավելագույն արագությունը, շարժունակությունը, էներգա և սպեկտրալ արդյունավետությունը:

Գերհուսալի և ցածր հապաղմամբ կապի համար մեծ նշանակություն ունեն ցանցի հապաղման ժամանակը և բաժանորդային սարքավորումների շարժունակությունը:

Մեծաքանակ մեքենա տիպի բաժանորդների սպասարկման համար առավել էական է ցանցի ռեսուրսներից օգտվողների խտությունը, սարքավորումների էժանությունը և էներգաարդյունավետությունը:

Հինգերորդ սերնդի ցանցերին ներկայացվող պահանջները բավարարելու համար անհրաժեշտ են արդեն առկա առաջադեմ ցանցերի կառուցվածքային, ֆիզիկական մակարդակի, այդ թվում՝ նաև մոդուլյացիայի եղանակի փոփոխություններ կամ շտկումներ: Կապի ծառայությունների որակի բարձրացման հնարավոր է հասնել արդեն առկա տեխնոլոգիական, այգորիթմական լուծումների զարգացման և նոր տեխնոլոգիական լուծումների կիրառման միջոցով:

Ատենախոսությունը նվիրված է հինգերորդ սերնդի ցանցերում հնարավոր կիրառելի մոդուլյացիայի եղանակների և նոր ալգորիթմական ու տեխնոլոգիական լուծումների մշակմանը:

Ատենախոսության նպատակին հասնելու համար կատարվել են ստորև թվարկված աշխատանքները:

Ձևակերպվել են հինգերորդ սերնդի բջջային կապի ցանցերին ներկայացվող պահանջները, դրանց բավարարելու հնարավորությունն սովոր տեխնոլոգիական լուծումները, հաղորդման տեխնոլոգիաների և մոդուլյացիայի եղանակների գնահատման չափանիշները [1-3]:

Հստակեցվել են հինգերորդ սերնդի բջջային կապի ցանցերում կիրառման հնարավորություն ունեցող հաճախաշերտերը և այդ հաճախաշերտերի համար հետազոտվել են ռադիոկապուղու պարամետրերը: Հետազոտության արդյունքները վկայում են կապուղուն ռադիոազդանշանի ժամանակային դիսպերսիայի արժեքի հաճախությունից փոքր կախվածության և հնարավոր կիրառելի սանտիմետրային, միլիմետրային ալիքների տիրություն ռադիոազդանշանի մեծ մարման մասին [1]:

Կատարվել է առաջադեմ հաղորդման տեխնոլոգիաների և նրանց հետ կիրառելի մոդուլյացիայի եղանակների համեմատական վերլուծություն ելնելով առավելագույն և միջին հզորությունների հարաբերության (PAPR), սպեկտրալ արդյունավետության, կապուղու ժամանակային օգտագործման, աշխատանքային հաճախաշերտից դուրս ճառագայթման, հաշվողական բարդության, ռեսուրսների հատկացման ճկունության, MIMO տեխնոլոգիայի հետ համատեղելիության, ադապտիվ մոդուլյացիայի եղանակների օգտագործման, տեխնոլոգիայի հասունության պարամետրերից: Առաջարկվել են ՀՄՑ-ի պահանջներին բավարարող եղանակներ [2,3]:

Առաջարկվել է OFDM-ի բարձր աշխատանքային հաճախաշերտից դուրս ճառագայթման պատճառով առաջացող ինտերֆերենցից և էլեկտրամագնիսական համատեղելիության խնդիրներից խուսափելու եղանակ և հիմնավորվել է վերբեռնման ուղղությամբ հաղորդման տեխնոլոգիայի ադապտիվ ընտրության անհրաժեշտությունն ու հնարավորությունը [2]:

Առաջարկված հաղորդման տեխնոլոգիայի և նրա հետ կիրառելի մոդուլյացման եղանակների հատկությունների փորձնական հետազոտման համար մշակվել է ծրագրորեն որոշվող ռադիոսարքավորման վրա հիմնված հաղորդիչ-ընդունիչ համակարգ և կատարվել են փորձնական չափումներ [2,3]:

Առաջարկվել է, MU-MIMO և CP-OFDM տեխնոլոգիաների համադրության դեպքում, բաժանորդային սարքավորումների ճշգրիտ տեղորոշման համար անհրաժեշտ ռադիոազդանշանի ընդունման անկյան որոշման ցածր հաշվողական բարդություն ունեցող ալգորիթմ [4]:

Ալգորիթմի կիրառմամբ մշակվել է ծրագրորեն որոշվող ռադիոսարքավորումների վրա հիմնված համակարգ, որը հնարավորություն է տալիս որոշել ռադիոազդանշանի ընդունման անկյունը  $\pm 1^\circ$  ճշտությամբ [4]:

Մշակված ծրագրային ապահովումը տեղադրվել է ազատ հասանելիությամբ պահոցում [5]:

## LEVON NERSES GRIGORYAN

### DEVELOPMENT OF WAVEFORM MODULATION FOR FIFTH GENERATION MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

#### SUMMARY

During the last several decades, mobile communications have significantly contributed to the economic and social development of both developed and developing countries. Today, mobile communications form an inseparable part of the daily lives of billions of people in the world. It is expected that this situation will continue and will become even more widespread in the future.

Currently, the fourth generation (4G) mobile communication systems is widely being deployed by many operators worldwide in order to offer subscribers more reliable radio access with lower latency and more efficiency than third generation (3G) systems. In the future, demand for higher volumes of data traffic, myriad of connected devices with diverse service requirements, will bring a need for extended network capabilities. In order to meet these new requirements new evolved systems are created.

The fifth generation (5G) networks will be intended to serve subscribers in enhanced mobile broadband, massive machine type communication and ultra-reliable and low-latency communication usage scenarios.

The integration of these usage scenarios in a single 5G mobile communication network require new network architecture and protocols those will be significantly different from architecture and protocols of traditional human based networks. The integration of human and machine type traffic in a single 5G network is a complex challenge.

In addition, machine type data traffic can be diverse, from low to high throughput, from delay sensitive to delay tolerant, from error tolerant to requiring high reliability, which creates additional complexity.

Mentioned usage scenarios pose different requirements to 5G networks. For enhanced mobile broadband usage scenario most important parameters are user experienced data rate, area traffic capacity, peak data rate, mobility, energy efficiency and spectrum efficiency

In the ultra-reliable and low latency communications scenario, low latency and high mobility are of highest importance.

In the massive machine type communication scenario, high connection density is needed to support huge number of devices in the network. Devices should have low cost and high energy efficiency to maintain long operational lifetime.

In order to meet the performance requirements of the 5G networks, existing advanced networks should undergone architectural, physical level modifications, including modifications or corrections of waveform modulation. Improvement of the quality of communication services can be achieved through the advancements of existing technological, algorithmic solutions and application of new disruptive approaches. The PhD thesis is dedicated to development of modulation techniques, new algorithmic and technical solutions for the 5G networks.

To achieve the objective of the thesis, the following tasks were fulfilled.

Main requirements to the fifth generation communication networks have been formulated. Main technical solutions for the challenges were highlighted. Transmission and modulation techniques evaluation criterions were formulated [1-3].

Frequency bands, which can be used in the 5G cellular networks, have been clarified and for these frequencies radio channel parameters have been studied. The results of the research show that channel delay spread has small dependence on the frequency of the radio signal and high signal attenuation is observed in possible cmWave and mmWave bands [1].

Analysis and evaluation of advanced transmission techniques and compatible modulation schemes, based on peak-to-average power ratio (PAPR), spectral efficiency, time overhead, out-of-band (OOB) emissions, computational complexity, resource allocation flexibility, compatibility with conventional MIMO technology, adaptive modulation scheme usage and technology maturity parameters have been performed. A method that best meets the requirements of 5G networks has been proposed [2,3].

Approach to avoiding interference and electromagnetic compatibility issues caused by OFDM OOB emissions has been suggested. Necessity and feasibility of adaptive selection of transmission technique in mobile station uplink direction has been justified [2].

Based on proposed technique and modulation schemes software defined radio (SDR) based transceiver has been developed and experimental measurements for validation were performed [2,3].

MIMO OFDM direction of arrival (DOA) estimation algorithm with low computational complexity has been proposed [4].

Trial prototype system has been developed, based on proposed algorithm and SDR technology. Implemented system estimates signal direction by  $\pm 1^\circ$  precision [4].

Developed software has been placed on an open access repository [5].

