

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»**

Факультет физико-математических и естественных наук

Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой
прикладной информатики
и теории вероятностей

д.т.н., профессор

_____ К.Е. Самуйлов

«____» _____ 20__ г.

**Выпускная квалификационная работа
бакалавра**

Направление 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные
технологии»

ТЕМА «Использование датчиков смартфона для борьбы с эффектами
микромобильности в терагерцовом диапазоне частот»

Выполнил студент Дугаева Светлана Анатольевна

Группа НФИБд-01-18

Студ. билет № 1032182508

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Молчанов Дмитрий Александрович,
д.т.н., профессор кафедры прикладной
информатики и теории вероятностей

(Подпись)

Автор

(Подпись)

г. Москва

2022 г.

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»**

АННОТАЦИЯ

выпускной квалификационной работы

Дугаева Светлана Анатольевна

(фамилия, имя, отчество)

на тему: Использование датчиков смартфона для борьбы с
эффектами микромобильности в терагерцовом диапазоне частот.

В данной работе проведено математическое моделирование эффектов микромобильности абонентских устройств в зависимости от различных показателей (расстояние от базовой станции до пользовательского устройства, скорость движения пользовательского устройства, вероятности дрефта смартфона в центр, точности датчиков позиционирования), а также проведен анализ качества соединения. Данное исследование может быть полезно при оценке влияния микромобильности на качество связи в сетях терагерцового диапазона частот и для разработки алгоритмов, которые с помощью датчиков позиционирования мобильных устройств могут минимизировать негативное влияние данного эффекта.

Автор ВКР

(Подпись)

Дугаева С.А.

(ФИО)

Оглавление

Список используемых сокращений	4
Введение	5
Глава 1. Эффекты микромобильности в терагерцовом диапазоне частот. 8	8
1.1. Основные свойства микромобильности	9
1.2. Эффекты микромобильности при различных сценариях применения пользовательского устройства	13
1.3. Постановка задачи исследования	17
Глава 2. Алгоритмы моделирования эффектов микромобильности с поиском луча	19
2.1. Теоретические основы для разработки алгоритма	19
2.2. Алгоритмы движения пользовательского устройства	26
2.3. Методы расчета вероятностно-временных характеристик	29
Глава 3. Анализ показателей качества.....	31
3.1. Система без внешней помощи в поиске луча	31
3.2. Система с внешней помощью в поиске луча	35
Заключение	40
Литература.....	42
Приложение. Листинг программы	45

Список используемых сокращений

Русскоязычные сокращения:

БС	–	базовая станция
ПУ	–	пользовательское устройство
ФАР	–	фазированные антенные решетки

Англоязычные сокращения:

P2P	–	Point-To-Point
SE	–	Spectral Efficiency
VR	–	Virtual Reality
LoS	–	Line of Side
HPBW	–	Half-Power Beamwidth
AP	–	Access Point

Введение

Актуальность данной работы обусловлена быстрым развитием и созданием новых технологий, которые с каждым годом требуют все более высокие скорости передачи данных. Активная разработка сетей 6-го поколения началась уже несколько лет назад. В прошлом году этим озаботились крупные компании, например, Apple, Intel и т.д.

По оценкам экспертов Терагерцовый диапазон частот(0,3ТГц-300ТГц) будет использоваться в сетях следующего поколения, а именно 6G. В связи с уменьшением длины волны станет возможным передавать большие объемы информации за единицу времени, но с другой стороны это приведет к появлению определенных проблем. Разработчики уже сталкивались с данными особенностями при создании сетей пятого поколения, но при использовании терагерцового диапазона частот эти эффекты будут усиливаться. Существует целый ряд задач, которые необходимо решить перед запуском сети шестого поколения в массовое использование:

- Сверхвысокие потери распространения сигнала, которые придется компенсировать сверхнаправленными антенными решетками.
- Атмосферная абсорбция молекулами воды, на некоторых частотах потери достигают более 100Дб, эти значения являются критическими для нормальной передачи данных.
- При создании миниатюрных антенных решеток может возникнуть проблема перегрева, так как расстояние между антенными элементами будет порядка 0,5мкм.
- Блокировка прямой видимости, сигнал все еще имеет не нулевое значение отражения, препятствием для передачи может стать тело человека, стена и т.д.

Наравне с уже существующими проблемами в сетях шестого поколения возникает новая, еще не изученная – микромобильность. В процессе

использования мобильного устройства пользователь неизбежно вращает его или смещает по осям, что приводит к периодической потере связи.

Подводя итог, изучение микромобильности абонентских устройств является одной из самых главных задач в обеспечении качественной беспроводной связи.

Цели работы

Целью работы является моделирование эффектов микромобильности, вычисление показателей качества связи и анализ эффективности использования датчиков смартфона для борьбы с негативными последствиями данного эффекта.

Методы исследования

Методами исследования является математическое моделирование эффектов микромобильности с использованием аппарата теории вероятностей, а именно случайного блуждания с непрерывным временем.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что эффекты микромобильности в сетях терагерцового диапазона частот плохо изучены на данный момент. Исследования в выпускной работе являются уникальными, так как метод, используемый в данной работе, не был предложен ранее, в связи с тем, что тема микромобильности ПУ не является достаточно популярной сейчас.

Структура работы

Первый раздел выпускной работы описаны основные характеристики свойств сетей связи, сделан упор на описание эффектов микромобильности в терагерцовом диапазоне частот.

Второй раздел выпускной работы посвящен разработке алгоритма для построения имитационной модели движения ПУ и расчета показателей качества связи в сетях терагерцового диапазона частот. В данном разделе описаны теоретические основы для разработки алгоритма, а также приведены методы вычисления вероятностно-временных характеристик.

В заключительной части работы приведены графики, полученные при моделировании, а также проведен их анализ.

Апробация работы

Подготовлены тезисы на конференцию с международным участием «Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2022». Доклад был представлен в виде постера.

Глава 1. Эффекты микромобильности в терагерцовом диапазоне частот.

Терагерцовый диапазон частот(0,3-3ТГц) представляет особый интерес для создания сети следующего поколения. Именно терагерцовый диапазон частот еще сохраняет свойства радиочастот: может проникать сквозь некоторые препятствия и отражается от различных поверхностей. Он является последним оплотом радиодоступа в таких сетях доступа (с использованием радиоволн), в будущем для наращивания скорости необходимо будет создавать совершенно новые технологии. В связи с уменьшением длины волны возрастает проблема затухания сигнала с расстоянием, отражение от поверхностей сводится к нулю, и передача данных становится невозможной.

Сети связи шестого поколения позволят достигнуть высоких скоростей, в сотни раз выше, чем сети пятого поколения. Несмотря на наличие определенных препятствий в виде атмосферной абсорбции, блокировок, сильного затухания сигнала с расстоянием, микромобильности (эти проблемы будут рассмотрены более подробно в разделе 1.1), использование фазированных антенных решеток и окон прозрачности позволит свести негативное воздействие к минимуму.

В связи с уменьшением длины волны станет возможным создание миниатюрных фазированных антенных решеток, причем расстояние между антенными элементами будет порядка 0,5мкм, а размер самой ФАР составит от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Использование ФАР с тысячами антенных элементов приведет к возможности генерации сверхнаправленного луча сигнала.

Благодаря использованию ФАР значительно повышается безопасность соединения. Терагерцовый диапазон частот не так просто прослушать, для этого нужно попасть в тот небольшой угол, по которому передаются данные. Чтобы избежать перехвата данных можно использовать несколько различных путей передачи сигнала, как прямой, так и несколько отраженных, в этом

случае перехват будет практически невозможен, причем скорость снизится всего на 5-20%, а безопасность увеличивается на 5-40%.

С переходом к использованию сетей связи терагерцового диапазона частот увеличится полоса пропускания сигнала, по сравнению с миллиметровым диапазоном частот она станет больше в сотни раз, что позволит передавать информацию намного более эффективно. Будут достижимы скорости в сотни гигабит в секунду.

1.1. Основные свойства микромобильности

Терагерцовый диапазон частот имеет много особенностей, таких как: атмосферная абсорбция, быстрое затухание сигнала с увеличением расстояния, блокировки сигнала, микромобильность. Далее рассмотрим эти свойства подробнее:

Блокировка сигнала. При рассмотрении макромобильности пользователя часто возникает проблема блокировки прямой видимости (сигнал может перекрываться человеком, транспортом или любым другим препятствием), что приводит к резкому ухудшению уровня принимаемого сигнала. Время выхода из связи может составить сотни миллисекунд, что является критичным в некоторых сценариях использования мобильного устройства. Одним из возможных решений для расширения области покрытия сигнала является внедрение процедуры формирования луча, однако, это не сильно уменьшает блокировку сигнала. Альтернативным решением является процедура множественного подключения, которая позволит обеспечить непрерывность сеанса пользователя [1]. Таким образом, устройство может быть подключено сразу к нескольким базовым станциям, но одновременно допускается использование только одного подключения. Каждый раз при возникновении блокировки LoS ПУ будет иметь возможность переключиться на другую базовую станцию. Для поддержания альтернативного соединения ПУ должно выполнить 3 этапа:

1. Получить сигнал от AP с использованием всенаправленного режима антенны.
2. Выполнить процедуру ассоциации AP (например, с использованием процедуры случайного доступа)
3. Начать отслеживание луча AP

Первые два шага повторяются только однажды (при первом подключении), третий шаг нужно повторять с определенной периодичностью, чтобы резервное соединение оставалось в активном состоянии. Если устройство будет одновременно подключено к больше, чем одной альтернативной AP, это приведет к снижению производительности как ПУ, так и базовой станции, это связано с тем, что устройства постоянно тратят вычислительные мощности на процедуру отслеживания лучей (для поддержания резервного соединения) [2].

Сверхвысокие потери при распространении сигнала. Полные потери распространения сигнала включают в себя как атмосферную абсорбцию, которая будет рассмотрена более подробно далее, так и угасание сигнала с расстоянием. График полных потерь распространения сигнала представлен на рис. 1.

Полные потери распространения сигнала:

$$L_T(f, d) = L_P(f, d) + L_A(f, d) \quad (1.1)$$

Потери распространения сигнала в атмосфере:

$$L_P(f, d) = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (1.2)$$

где f – частота сигнала, d – расстояние от источника до ПУ

Из формулы (1.2), можно увидеть, что в числителе стоит частота сигнала, при этом значение возводится в квадрат, следовательно, при увеличении

частоты потери увеличиваются пропорционально квадрату частоты, что, определенно, приведет к уменьшению области покрытия терагерцовых сетей доступа.

Атмосферная абсорбция:

$$L_A(f, d) = \frac{1}{\tau(f, d)}, \text{ где } \tau(f, d) = e^{-k(f)d} = e^{-\sum_{G,L} k_{G,L}(f)d} \quad (1.3)$$

где τ – проводимость среды (закон Бугера-Ламбета-Бира)[3]

Для преодоления таких потерь необходимо будет использовать ФАР, причем они будут использоваться и на базовой станции, и на приемнике. Для штатной (нормальной) передачи данных усиление на базовой станции должно быть минимум 20-30дБи, а на приемнике минимум 10-15дБи.

Атмосферная абсорбция. Частоты молекул воды лежат именно в терагерцовом диапазоне частот, и при прохождении электромагнитной радиации (сигнала) сквозь атмосферу часть энергии поглощается. На рис. 1 представлен график зависимости полных потерь распространения в атмосфере на высоте 0м относительно земли.

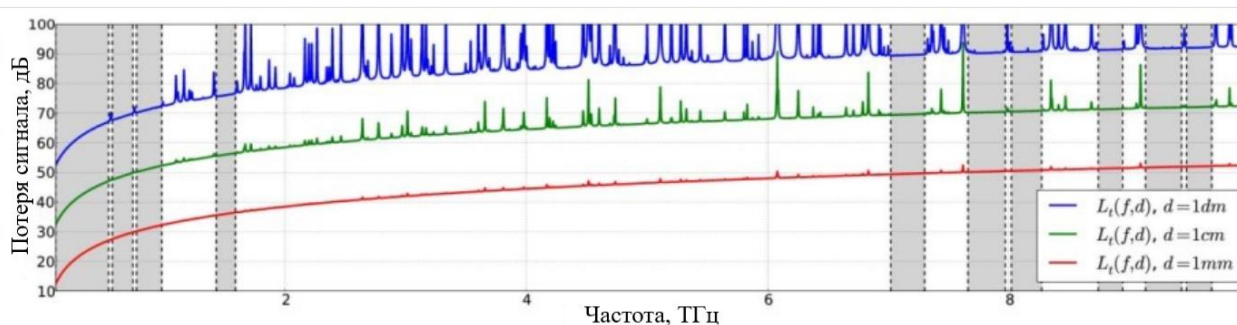


Рис. 1.1. Полные потери распространения сигнала [4]

На графике можно заметить, что помимо стандартных потерь распространения, которые можно предсказать, используя стандартную модель Фрииса дополнительно существуют резкие всплески, связанные именно с эффектом атмосферной абсорбции. Данный график описывает поведение системы в стандартных условиях влажности, но в регионах с повышенной влажностью молекулярная абсорбция будет достигать еще больших значений. На большинстве частот потери оказываются слишком большими и их полноценное использование не имеет смысла. Исходя из графика можно выделить определенные диапазоны частот, на которых атмосферная абсорбция практически отсутствует. Такие диапазоны называются окнами прозрачности.

Микромобильность является абсолютно новой проблемой, с которой разработчики еще не сталкивались при создании сетей пятого поколения. В связи с крайне высокими потерями при распространении сигнала будут использоваться сверхнаправленные ФАР как на передатчиках, так и на приемниках [5]. При таких усилениях сигнала ширина главного лепестка рассчитывается по формуле: $\sim 120/N$, где N – количество антенных элементов ФАР на BS. Исходя из формулы становится понятно, что ширина луча будет примерно равна 1 градусу, или даже меньше.

Проблема микромобильности заключается в том, что пользовательское устройство в большинстве случаев не является неподвижным, оно претерпевает различные манипуляции такие как вращение по различным осям или небольшое смещение (вправо, влево, вниз, вверх). В связи с этим, будет происходить постоянный выход из связи, соответственно возникает необходимость в минимизации времени нахождения устройства в состоянии поиска нужной конфигурации антенных решеток. Одним из наиболее важных вопросов является выбор метода поиска луча, который позволит достигнуть нужного результата с минимальными негативными последствиями для энергоэффективности ПУ.

Существует 2 алгоритма поиска луча:

- Итеративный – инициализация поиска луча происходит до полной потери сигнала, то есть запускается через определенные временные промежутки. Такой метод является эффективным с точки зрения улучшения качества связи, но в то же время возникает критически важная проблема: постоянный поиск наилучших конфигураций является достаточно энергоемким процессом, а беспроводные ПУ имеют ограниченный запас автономности.
- По требованию – инициализация поиска луча происходит только в момент полной потери сигнала, и для восстановления соединения будет использоваться алгоритм полного перебора всех возможных углов, данная процедура может занимать десятки секунд. Такой алгоритм не является эффективным и с точки зрения затраченного времени, и с точки зрения производительности. Для решения данной проблемы предполагается использование датчиков позиционирования, это необходимо для сужения области поиска луча, а соответственно и минимизации времени нахождения вне связи [6].

1.2. Эффекты микромобильности при различных сценариях применения пользовательского устройства

В данном случае рассматривается связь R2P между стационарной базовой станцией ТГц-диапазона и мобильным пользовательским устройством, как показано на рис. 1.1. Как ТГц BS, так и ПУ оснащены идентичными плоскими двумерными антенными решетками с $NB * NB$ и $NU * NU$ элементами каждый. Предполагается диаграмма направленности конусной антенны с ненулевым коэффициентом усиления по основному лепестку круглой формы и HPBW, аппроксимируемой $102^\circ/NB$ и $102^\circ/NU$. В рассматриваемой системе предлагается случай, когда BS прочно закреплена, а ПУ подвержено влиянию микромобильности.

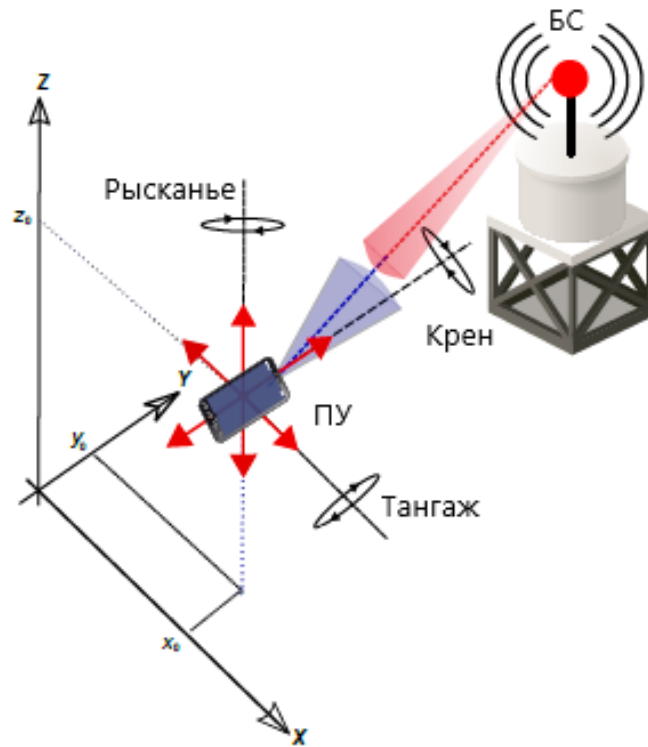


Рис. 2.2. Рассматриваемый сценарий терагерцового взаимодействия между пользовательским устройством и базовой станцией[7]

Используя геометрическую интерпретацию, показанную на рис. 1.2 можно заметить, что система переходит в состояние отключения, когда центр луча UE покидает область круговой формы, соответствующую HPBW ТГц БС. Это может произойти из-за небольших перемещений UE по осям x и y , а также из-за рыскания (вертикальная ось) и тангажа (поперечная ось) ПУ в руках пользователя. Стоит отметить, что небольшие перемещения по оси z , а также по крену (продольной оси) не сильно влияют на связь. Таким образом, чтобы охарактеризовать влияние микромобильности ПУ на связь, достаточно описать движение центра пучка ПУ.

Для отслеживания положения ПУ не использовались датчики движения смартфона, измерения проводились с помощью лазерной указки, прочно

закрепленной на смартфоне, движение луча определялось с помощью видеокамеры.

В статье [7] было рассмотрено 4 сценария использования ПУ: просмотр видео, просмотр виртуальной реальности, телефонный звонок и гоночная игра. Исходя из данных представленных на рис. 1.3 можно заметить, первые три приложения непосредственно не влияют на модель микромобильности ПУ, в то время как последнее заставляет пользователя выполнять полурегулярные движения. Проиллюстрированные данные позволяют сделать общие выводы об основных характеристиках моделей микромобильности рассматриваемых приложений.

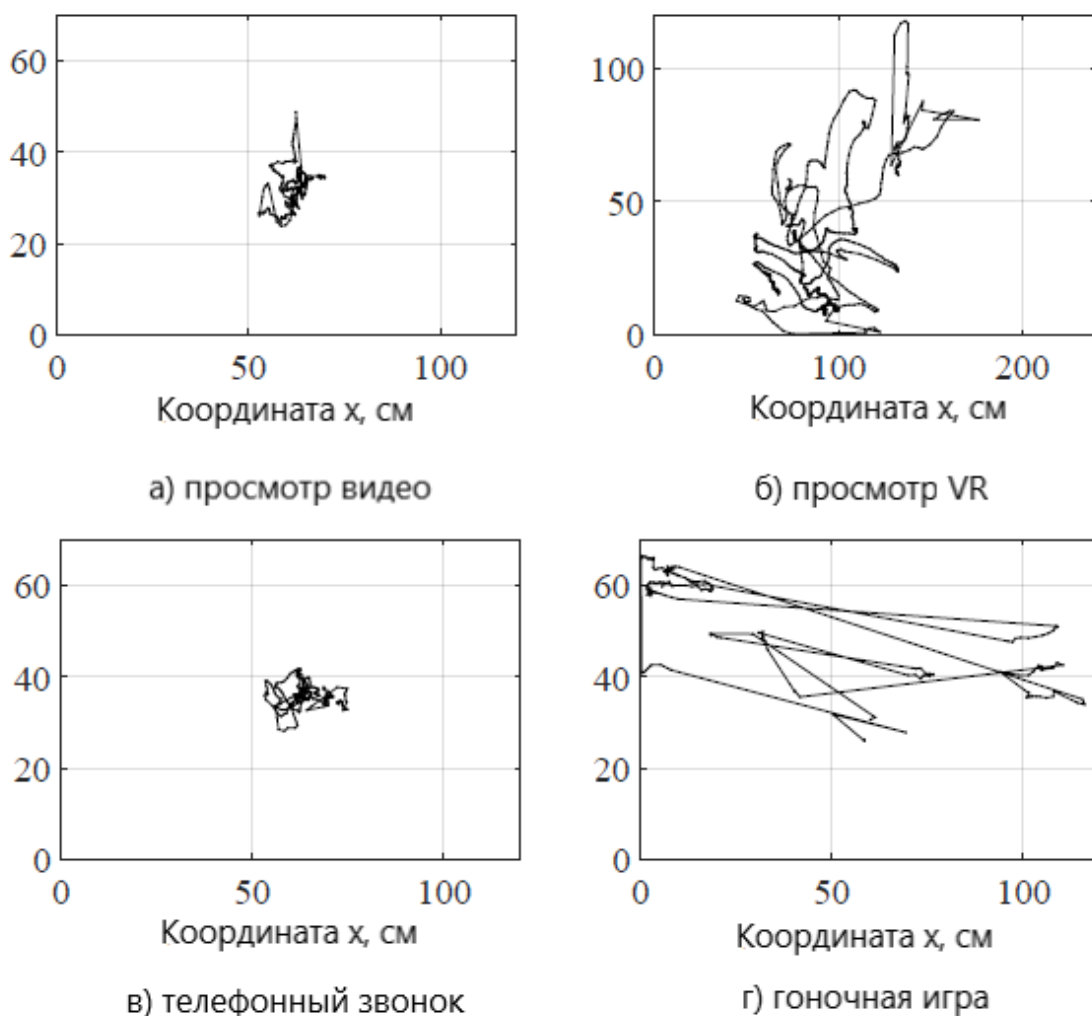


Рис. 3.3. Графики перемещения пользовательского устройства при различных сценариях использования [7].

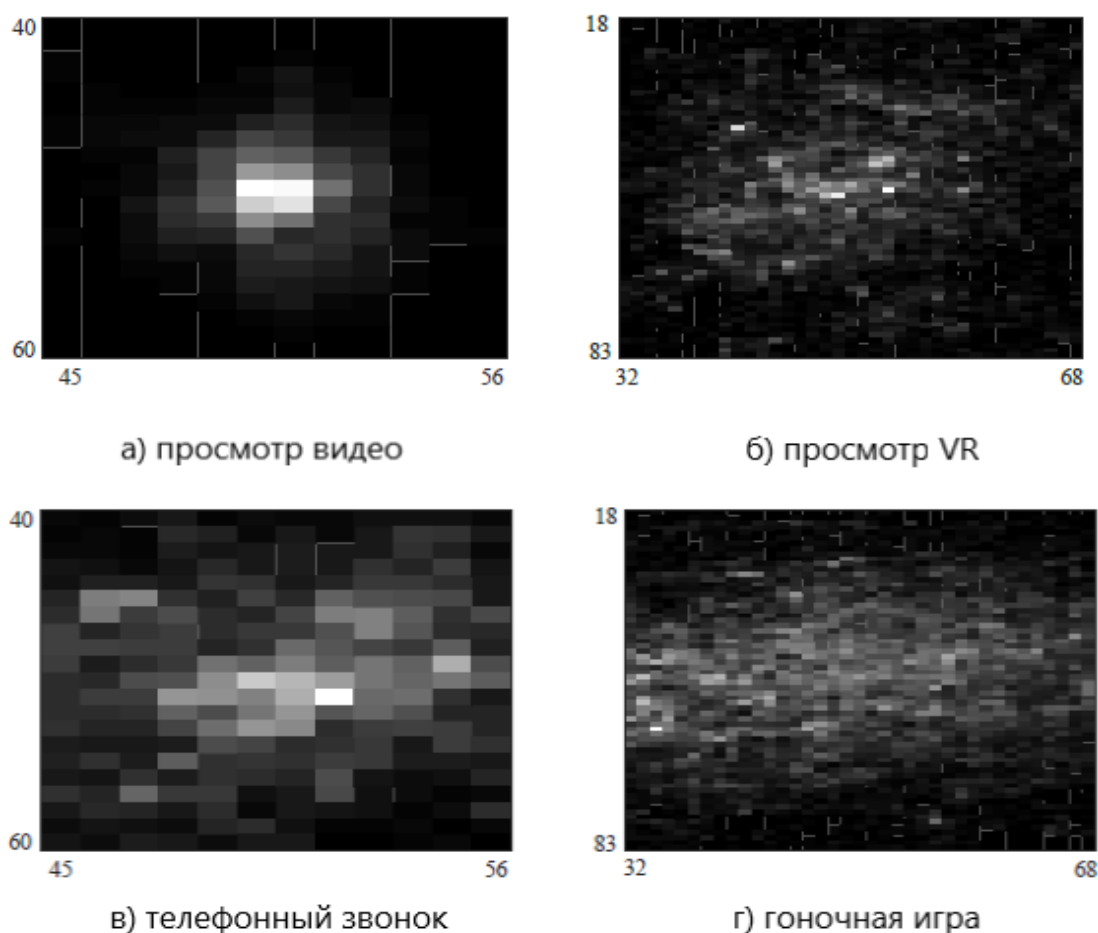


Рис. 4.4. Двумерная функция распределения для рассматриваемых приложений [7].

Анализируя результаты, представленные на рис. 1.4, можно резюмировать, что в рассматриваемых графиках отсутствуют признаки радиальной симметрии. Данные, представленные на рис. 1.4 подтверждают выводы, сделанные с использованием выборочных путей, за одним заметным исключением: приложение для телефонных звонков, по-видимому, характеризуется более высокой амплитудой, чем первоначально ожидалось. В частности, связанная функция распределения является более рассеянной по сравнению с приложением для просмотра видео. Обоснование заключается в том, что в последнем случае пользователь фокусирует свой взгляд на ПУ в руке, в то время как при телефонном звонке такого фокуса не существует. То

же самое относится и к приложению просмотра виртуальной реальности, где пользователь полностью дезориентирован. Наибольшая дисперсия наблюдается для гоночной игры, это связано с тем, что само приложение заставляет пользователя совершать движения влево/вправо с помощью UE.

1.3. Постановка задачи исследования

Проблема микромобильности может стать препятствием для внедрения сетей шестого поколения, исследователи до сих пор не пришли к общему решению как можно бороться с негативными последствиями данного эффекта. Данная работа является одним из множества шагов на пути к получению исчерпывающей информации по данной теме.

Для решения поставленной задачи в выпускной квалификационной работе необходимо сделать следующее:

- проанализировать существующие схемы поиска луча и выявить наиболее эффективную для дальнейшего моделирования;
- выбрать показатели для оценки качества соединения в сетях терагерцового диапазона частот;
- создать алгоритм, который может быть реализован при моделировании. Алгоритм должен быть наиболее приближен к броуновскому движению в непрерывном времени;
- реализовать имитационную модель для оценки влияния эффектов микромобильности беспроводных устройств на качество связи в сетях терагерцового диапазона частот. Модель должна вычислять выбранные показатели в зависимости от разных значений следующих параметров: Скорость движения ПУ, расстояние от БС до ПУ, вероятность дрейфа ПУ в центр, точность датчиков позиционирования;
- провести оценку полученных данных и сделать вывод насколько эффективно использовать датчики позиционирования для

минимизации негативного влияния микромобильности на качество связи в терагерцовом диапазоне частот.

Глава 2. Алгоритмы моделирования эффектов микромобильности с поиском луча

2.1. Теоретические основы для разработки алгоритма

Первым и наиболее важным шагом для разработки алгоритма является выбор алгоритма поиска луча. Существует две схемы:

- Схема 1. Выравнивание по требованию. Процедура выравнивания луча выполняется каждый раз, когда микромобильность ПУ приводит к потере связи. Эта схема отражает конструкцию WLAN.

- Схема 2. Периодическое выравнивание. Процедура подстройки антенных конфигураций выполняется через определенные промежутки времени. Эта схема отражает системы сотового типа с централизованным управлением.

В статье [8] подробно описываются математические модели микромобильности и двух вариантов алгоритма выравнивания луча. Результаты моделирования представлены на рис. 2.1, 2.2.

На рис. 2.1(a) представлена зависимость доли времени нахождения ПУ без связи от интервалов последовательных инициализаций процесса выравнивания луча (TU), в данном случае применялась вторая схема поиска луча. При анализе графика можно заметить, что слишком низкое значение TU приводит к тому, что система тратит большую часть своего времени на выравнивание луча, в то время как слишком редкие обновления ($TU > 1с$) также приводят к снижению производительности. Существует “оптимальный” TU для каждой из конфигураций, и его типичное значение лежит в пределах 200-300 мс и уменьшается с уровнем микромобильности.

На рис. 2.1(b), представлена зависимость SE от размера антенной решетки на ПУ (NU), при NA (размер антенной решетки на AP) = 100 и Δx (расстояние между AP и ПУ) = 0,1 м, а также используются “оптимальные” значения TU, полученные из рис. 2.1(a). На данном графике можно заметить, что увеличение количества антенных элементов приводит к увеличению

спектральной эффективности, но при этом усложняет задачу выравнивания луча. В частности, схема 1 обеспечивает наивысшую производительность при $NU = 21$ для $\Delta\phi = 3^\circ$ (угол поворота) и при $NU = 15$ для $\Delta\phi = 4^\circ$. Для двух схем справедлива тенденция, что с увеличением угла поворота меньший размер антенной решетки становится предпочтительным. Из данного графика следует, что, исходя из значений спектральной эффективности, поиск луча по требованию показывает лучшие значения.

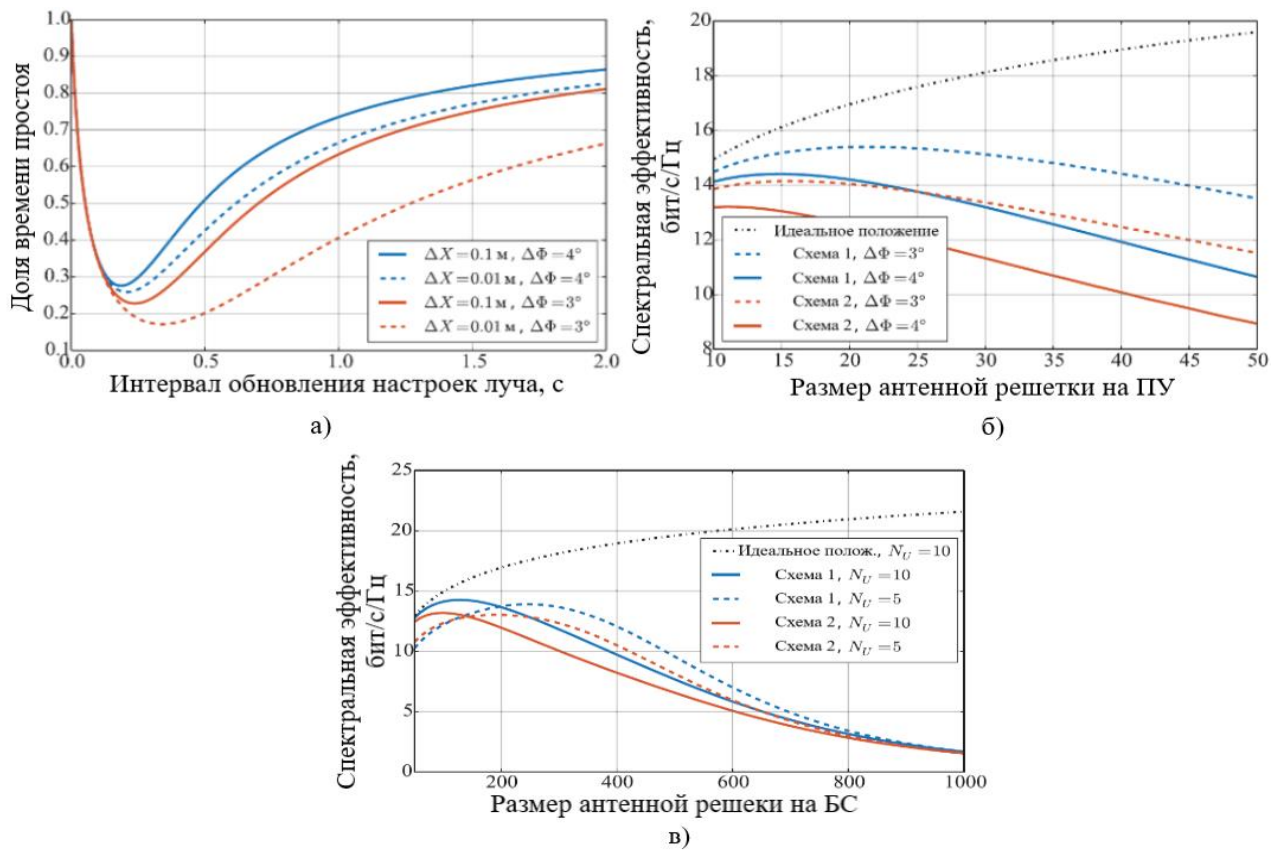
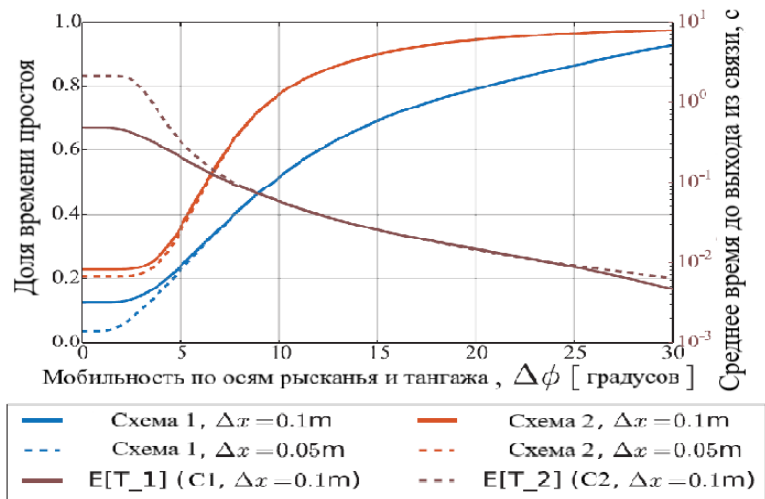
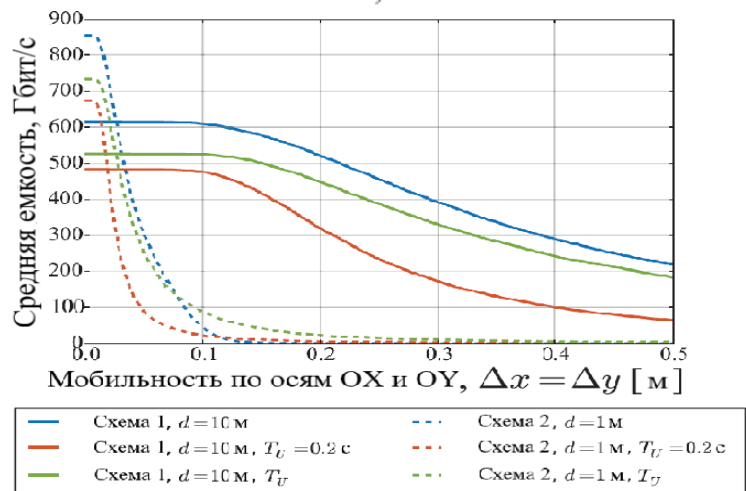


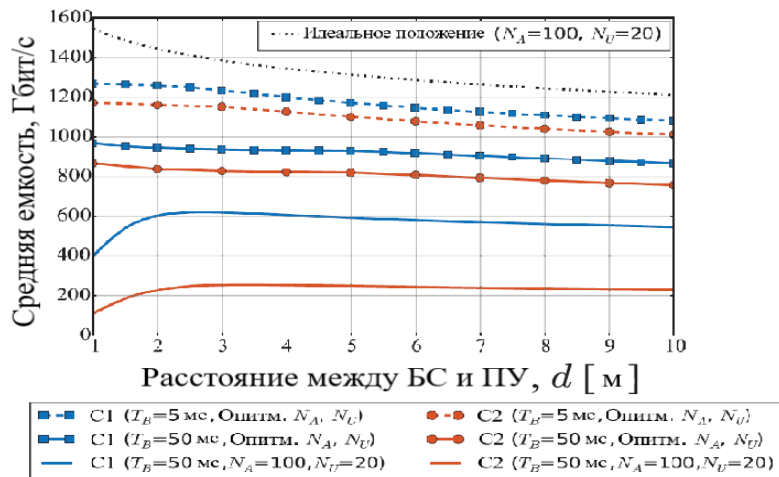
Рис 2.1. Корректировка TU, NU и NA для рассматриваемых уровней микромобильности ПУ [8] а) зависимость доли времени простоя от интервала обновления настроек луча для схемы 2, б) зависимость средней спектральной эффективности от размера ФАР на ПУ для обеих схем, в) зависимость средней спектральной эффективности от размера ФАР на БС для обеих схем



а)



б)



в)

Рис 2.2. Влияние характеристик микроподвижности ПУ на мощность и время нахождения вне связи [8] а) доля времени простоя в зависимости от поворота ПУ по осям, б) средняя емкость в зависимости от перемещения по осям, в) средняя емкость в зависимости от расстояния между ПУ и БС

На рис. 2.1(с), представлено среднее значение SE в зависимости от NA. Проведены те же наблюдения, что и на рис. 2.2(b). Исходя из представленного графика можно сделать тот же вывод, что и в предыдущем пункте, значение SE максимизируется при меньшем NA. В частности, для схемы 2 SE является наибольшим при $NA = 190$ с $NU = 5$, и при $NA = 100$ с $NU = 10$.

На рис. 2.2(с) представлена зависимость пропускной способности от расстояния между AP и ПУ. График демонстрирует максимально достижимую мощность ТГц-связи, когда все параметры – NA, NU и TU – совместно оптимизируются в соответствии с эффектами на рис. 1.1. Из этого рисунка вытекают два основных замечания. Во-первых, пропускная способность для ТВ (время, затрачиваемое на процедуру поиска луча) = 50 мс на 350 Гбит/с ниже, чем для ТВ = 5 мс. Таким образом, разработка надежной и эффективной процедуры поиска луча имеет решающее значение для сетей терагерцового диапазона частот. Во-вторых, существует разница в 0,6-1,1 Тбит/с между теоретическим значением и практическим (с параметрами $NB=50$ мс, $NA=100$, $NU=20$ и δ (время обработки одной конфигурации) = 5мс). Таким образом, важно учитывать микромобильность при оценке производительности мобильных ТГц-систем. Игнорирование этого фактора приводит к серьезной переоценке достижимых скоростей передачи данных.

Рис. 2.2(a) иллюстрирует долю времени простоя (вертикальная ось слева) и среднее время до первого смещения (вертикальная ось справа) в зависимости от $\Delta\phi$, $NA = 100$, а $NU = 20$. Для обеих схем существует режим, $\Delta\phi < 7^\circ$, где производительность системы в основном ограничена декартовой микромобильностью, поэтому незначительные изменения в $\Delta\phi$ не оказывают заметного влияния. Напротив, при $\Delta\phi > 10^\circ$ влияние угловой подвижности доминирует. Следовательно, кривые для $\Delta x = 0,1$ м и $\Delta x = 0,01$ м одинаковы для обеих схем. Также стоит отметить, что схема 1 превосходит схему 2 по доле времени простоя.

На рис. 2.2(b) представлена средняя пропускная способность канала в зависимости от Δx при $NA = 100$ и $NU = 20$. Здесь для $d = 10$ м наблюдается

аналогичный эффект, как на рис. 2.2(а): небольшие значения Δx не имеют непосредственных последствий для метрики, поскольку система в основном ограничена относительно высоким $\Delta\varphi = 6^\circ$. В то же время для $d = 1$ м этот эффект больше не присутствует, так как луч, генерируемый АР на расстоянии 1 м, меньше 2 см в ширину. Следовательно, даже небольшие дрейфы, вызванные декартовой микромобильностью, приводят к немедленному снижению пропускной способности, именно поэтому особенно важно учитывать декартову микромобильность на коротких расстояниях. В данном случае вторая схема значительно превосходит первую для всего диапазона Δx для обоих рассматриваемых расстояний.

Выводы:

- Микромобильность ПУ может уменьшить пропускную способность терагерцового канала связи на сотни Гбит/с.
- Спектральная эффективность процедуры поиска луча по требованию на 10-15% больше, чем при периодическом выравнивании луча.
- Большое количество антенных элементов на АР и ПУ снижает производительность линии связи.

Исходя из всего сказанного выше для моделирования в данной работе был выбран сценарий просмотра видео с поиском луча по требованию. После того как выбран сценарий использования ПУ и алгоритм поиска луча необходимо определить начальные данные (средние значения показателей при микромобильности):

- Количество антенных элементов на БС: $N = 32, 48, 64$. Рассматривается различное количество антенных элементов для выявления наиболее оптимального значения.

- Количество антенных элементов на ПУ: $M = 16$. Это среднее значение, к которому склоняется большинство авторов в своих работах(ссылка?)

- Расстояние от БС до ПУ: $l = 10$ м (стандартное значение), при исследовании влияния данного параметра на качество связи рассматривается диапазон значений от 5 м до 15 м.

- Угол для расчета радиуса области, в которой есть устойчивая связь – $102/N$ (где N – размер ФАР).

- Полоса пропускания 50ГГц.

- Скорость света – 299792458 м/с.

- Коэффициент абсорбции – 0,2.

- Время, необходимое на рассмотрение одной антенной конфигурации – 0,000002с.

- Длина волны – 0,001м.

- Спектральная эффективность на 1Гц, $V=1$.

- Мощность на БС – 0,2 Вт.

- Усиление антенной решетки БС – N^2

- Усиление антенной решетки ПУ – M^2

- Шум на 1 Гц – $3.9810717055e-21$ Гц

- Радиус окружности, внутри которой поддерживается устойчивое соединение:

$$R = l * \tan \frac{\alpha\pi}{180^\circ} \quad (2.1)$$

где l – расстояние от БС до ПУ, α – угол.

- Время, необходимое на восстановление связи (перебор всех возможных антенных конфигураций):

$$\tau = N^2 M^2 \Delta \quad (2.2)$$

где N – количество антенных решеток на БС, M – количество антенных решеток на ПУ, Δ – время необходимое на рассмотрение одной антенной конфигурации.

- Смещение по оси x за одну итерацию 0,001м

- Смещение по оси y за одну итерацию 0,001м

- Вероятность движения в центр 0,5

- Точность значений датчиков от 0 до 0,9 с шагом 0,1

Показатели качества связи, необходимые для анализа:

Для расчета принимаемой на ПУ мощности используется следующая формула [9]. Представленная ниже формула немного отличается от указанной

в источнике, это связано с тем, что в реальных условиях распространение сигнала значительно хуже, подробное объяснение данного явления представлено в статье [10]:

$$P_r = \left(\frac{P_t}{4\pi l^{3,19}} \right) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \quad (2.3)$$

где P_t – мощность на передатчике, l – расстояние между БС и ПУ, λ – длина волны.

Формула для расчета теоретической спектральной эффективности на 1 Гц [8]:

$$C = B G_T G_R \log_2 \left(1 + \frac{P_R}{v N_0} \right) \quad (2.4)$$

где B – указывает на то, что спектральная эффективность рассчитывается на 1 Гц, G_T , G_R – усиление на БС и ПУ соответственно, P_R – принимаемая на ПУ мощность, v – полоса пропускания, N_0 – шум на 1 Гц.

Формула для расчета эргодической спектральной эффективности при микромобильности:

$$C_E = p_c C \quad (2.5)$$

где C – теоретическая спектральная эффективность (из прошлой формулы), p_c – рассчитывается как сумма времени нахождения в состоянии устойчивой связи во время всех итераций делить на общее время моделирования.

При использовании датчиков позиционирования появляется возможность сократить время, затраченное на поиск наилучшей антенной конфигурации. Таким образом, при максимальной точности датчиков мы получим минимальное время поиска луча. Формула для расчета времени, необходимого на восстановление связи:

$$\text{search} = \theta * \tau \quad (2.5)$$

где θ – доля времени поиска луча (от полного перебора), τ – рассчитывается по формуле 2.2.

Данные параметры были выбраны для исследования в данной работе, согласно анализу, проведенному в статье [2].

2.2. Алгоритмы движения пользовательского устройства

В большинстве литературных источников предполагается, что движение ПУ наиболее похоже на броуновское движение [11]. Найти готовую реализацию броуновского движения не удалось, поэтому был разработан алгоритм наиболее точно отражающий движение ПУ при микромобильности. Далее будет описан сам алгоритм.

Считаем, что изначально точка имеет координаты (0,0), для перехода во второе состояние первоначально нужно выбрать направление движения, выбор производится из диапазона (0, 2π). После этого необходимо рассчитать новые координаты по x и y, учитывая, что за один шаг ПУ может переместиться на расстояние d_x по оси x и d_y по оси y рассчитываем новые координаты исходя из формул:

$$x = d_x * \cos dir$$

$$y = d_y * \sin dir$$

где d_x – максимальное перемещение по оси x, d_y – максимальное перемещение по оси y, dir – угол (направление перемещения).

Для расчета остальных состояний используется следующий алгоритм для каждой следующей итерации:

1. Используя распределение Бернули разыгрывается случайная величина, если выпала единица, значит точка будет двигаться в центр, если выпал ноль, значит точка будет двигаться от центра.
2. Разыгрывается случайная величина нового направления из диапазона значений (0, π/2), так как значения синуса и косинуса будут одинаковыми для любой четверти, бет отличаться только знак.
3. Производится проверка в какой четверти находится предыдущая точка, это нужно для того, чтобы правильно определить какой знак нужно поставить для движения в центр или от центра.
4. Рассмотрим 7 различных вариантов положения предыдущей точки:
 - 4.1. Точка находится в первой четверти($x>0$, $y>0$). Если выпала единица, то движемся в центр, то есть используем формулы:

$$x_i = x_{i-1} - d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} - d_y * \sin dir$$

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

4.2. Точка находится во второй четверти ($x < 0, y > 0$). Если выпала единица – движемся в центр, используем формулы:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} - d_y * \sin dir$$

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} - d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

4.3. Точка находится в третьей четверти ($x < 0, y < 0$). Если выпала единица – движемся в центр, используем формулы:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} - d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} - d_y * \sin dir$$

4.4. Точка находится в четвертой четверти ($x > 0, y < 0$). Если выпала единица – движемся в центр, используем формулы:

$$x_i = x_{i-1} - d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} - d_y * \sin dir$$

4.5. Точка находится на оси x ($x=0, y \neq 0$). Если выпала единица – движемся в центр, используем формулы:

$$x_i = x_{i-1}$$
$$y_i = y_{i-1} \pm d_y * \sin dir$$

То есть по оси x мы находимся в максимально близкой к центру точке. Для y выбираем знак исходя из положения: если $y > 0$, то знак «-», если $y < 0$, то знак «+».

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$
$$y_i = y_{i-1} \pm d_y * \sin dir$$

То есть по оси x мы удаляемся от центра, не важно в какую сторону, в данном случае было выбрано положительное направление. Для y выбираем знак исходя из положения: если $y > 0$, то знак «+», если $y < 0$, то знак «-».

4.6. Точка находится на оси y ($x \neq 0, y=0$). Если выпала единица – движемся в центр, используем формулы:

$$x_i = x_{i-1} \pm d_x * \sin dir$$
$$y_i = y_{i-1}$$

То есть по оси y мы находимся в максимально близкой к центру точке. Для x выбираем знак исходя из положения: если $x > 0$, то знак «-», если $x < 0$, то знак «+».

Если выпал ноль, то движемся от центра, используя следующие формулы:

$$x_i = x_{i-1} \pm d_x * \cos dir$$
$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

То есть по оси y мы удаляемся от центра, не важно в какую сторону, в данном случае было выбрано положительное направление. Для x выбираем знак исходя из положения: если $x > 0$, то знак «+», если $x < 0$, то знак «-».

4.7. Точка находится в центре осей координат ($x=0, y=0$). Если выпала единица – не изменяем координаты точки относительно прошлого состояния:

$$x_i = x_{i-1}$$

$$y_i = y_{i-1}$$

Так как точка уже находится в центре, то двигаться бессмысленно.

Если выпал ноль, то движемся от центра, как и в предыдущих пунктах не важно в какую сторону, для упрощения выбираем положительное направление. Формулы для расчета новых состояний:

$$x_i = x_{i-1} + d_x * \cos dir$$

$$y_i = y_{i-1} + d_y * \sin dir$$

Выше был описан алгоритм для одной итерации, как только новое положение найдено алгоритм начинается сначала.

2.3. Методы расчета вероятностно-временных характеристик

Для описания методов расчета вероятностно-временных характеристик предлагается псевдокод программы. Полный код программы на языке программирования Matlab находится в приложении.

Для моделирования траектории движения ПУ, а также расчета необходимых показателей из раздела 2.1

Шаг 1. Описание начальных данных из подраздела 2.1

Шаг 2. Расчет коэффициента P_R (принимаемую на ПУ мощность) и спектральной эффективности.

Шаг 3. Задание массивов для хранения координат по осям x и y , массива для хранения времени нахождения в состоянии связи, максимальное смещение по осям и вероятность движения в центр.

Шаг 4. Начало замера общего времени моделирования (для 100 итераций).

Шаг 5. Начало цикла для проведения 100 экспериментов.

Шаг 6. Расчет всех состояний (координат) ПУ до момента выхода из состояния связи. Для проверки нахождения ПУ внутри окружности, в которой есть связь используется цикл while условие задается следующим образом[12]:

$$\sqrt{(x_{i-1} - x_0)^2 + (y_{i-1} - y_0)^2} < R \quad (2.6)$$

где (x_0, y_0) – координаты ПУ на момент начала моделирования, (x_{i-1}, y_{i-1}) – координаты ПУ на предыдущем шаге, R – радиус окружности, внутри которой есть устойчивая связь (формула для расчета представлена в подразделе 2.1). Далее моделирование производится согласно алгоритму из подраздела 2.2. После расчета каждого состояния производится пауза, время паузы равно 0,0001с. Время паузы выбрано следующим образом: средняя скорость движения ПУ равна 10м/с [8], т.к. в данной работе расстояние, на которое точка может переместиться за 1 шаг равно 0,001м, то пауза должна составлять 0,0001с. Для каждой итерации производится замер времени нахождения в состоянии связи.

Шаг 7. Остановка времени всего моделирования

Шаг 8. Расчет показателей среднего времени нахождения в состоянии связи (сумма времени на всех итерациях делить на количество итераций), доли времени нахождения в состоянии устойчивой связи, спектральной эффективности при микромобильности (формулы указаны в подразделе 2.1).

Глава 3. Анализ показателей качества

3.1. Система без внешней помощи в поиске луча

В данном подразделе проводится анализ полученных данных, для наглядности они представлены в виде графиков. Исследование было проведено для ситуаций, когда датчики позиционирования не используются и для восстановления связи проводится полный перебор всех возможных антенных конфигураций.

Для оценки показателей качества связи были выбраны 3 параметра:

- Расстояние между БС и ПУ, выбран диапазон от 5м до 15м
- Вероятность движения ПУ в центр (то есть к наиболее стабильному положению), выбран диапазон от 0,4 до 0,5
- Скорость движения ПУ, выбран диапазон от 6м/с до 16м/с

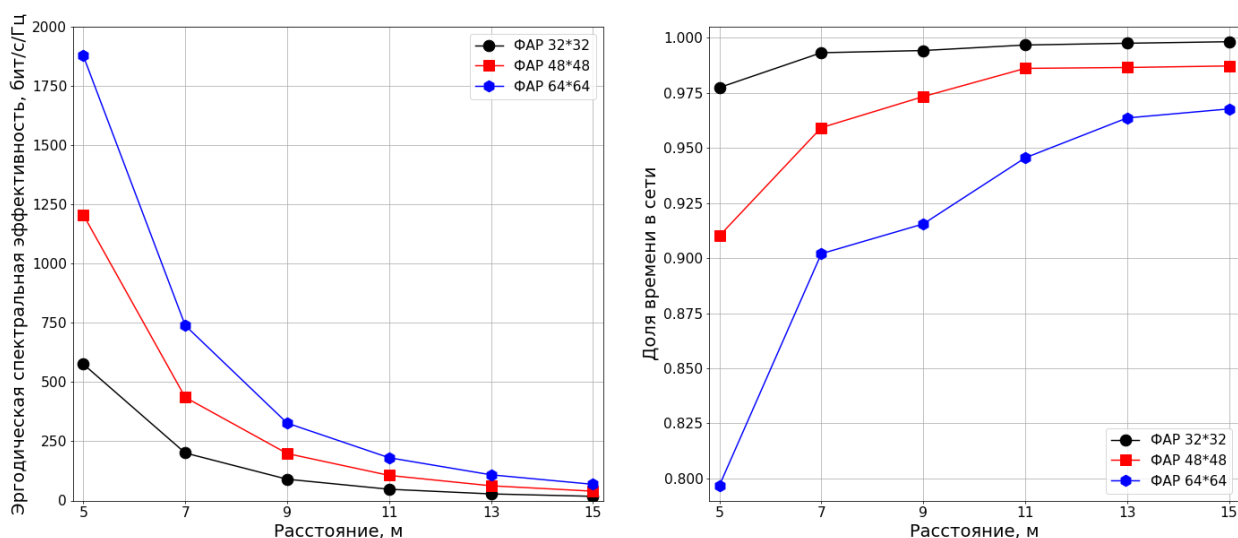


Рис. 3.1. Зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от расстояния между БС и ПУ.

Одним из основополагающих аспектов для оценки качества связи является совместное рассмотрение показателей спектральной эффективности и доли времени в состоянии устойчивой связи в зависимости от заданных параметров. Можно заметить, что наибольшая спектральная эффективность достигается при максимальном размере ФАР, но при этом доля времени в состоянии связи принимает наименьшие значения.

На рис. 3.1 представлена зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от расстояния до БС. При увеличении расстояния значение СЭ уменьшается, так же важно заметить, что чем больше размер ФАР, тем быстрее значения убывают. Волны терагерцового диапазона частот в значительной степени поглощаются при распространении, соответственно, чем дальше находится ПУ от БС тем хуже СЭ, а, следовательно, ниже скорость передачи данных. При этом, доля времени в состоянии связи увеличивается в связи с тем, что радиус окружности, внутри которой есть связь увеличивается с расстоянием.

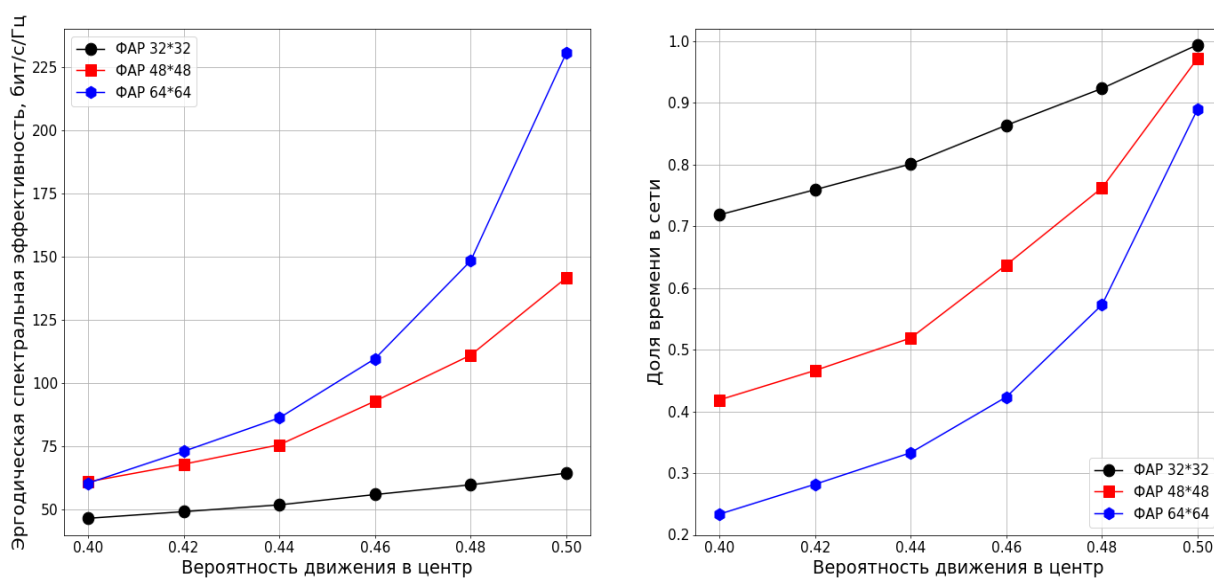


Рис. 3.2. Зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от вероятности движения ПУ в центр.

На рис. 3.2 представлены графики зависимости эргодической спектральной эффективности и доли времени в состоянии связи от вероятности движения ПУ в центр. В различных приложениях вероятность движения в центр может отличаться. Например, при использовании ПУ для гоночной игры движения являются более предсказуемыми, с большой вероятностью после отклонения телефона в одну сторону произойдет возврат мобильного устройства в близкое к изначальное положение. При анализе других показателей стандартным значением была выбрана вероятность 0,5, но

в данном случае важно было использовать наиболее широкий из возможных и близких к действительности диапазон. При вероятности движения в центр больше 0,5 время нахождения в состоянии устойчивой связи увеличивается экспоненциально, такой вариант мало вероятен в реальных условиях. Если значение вероятности меньше 0,4, то значения эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети приближается к значениям, при которых нормальное использование интернета на ПУ становится практически невозможным.

Логично заметить, что чем больше вероятность движения ПУ в центр, тем лучше значения эргодической спектральной эффективности и доли времени в состоянии устойчивой связи.

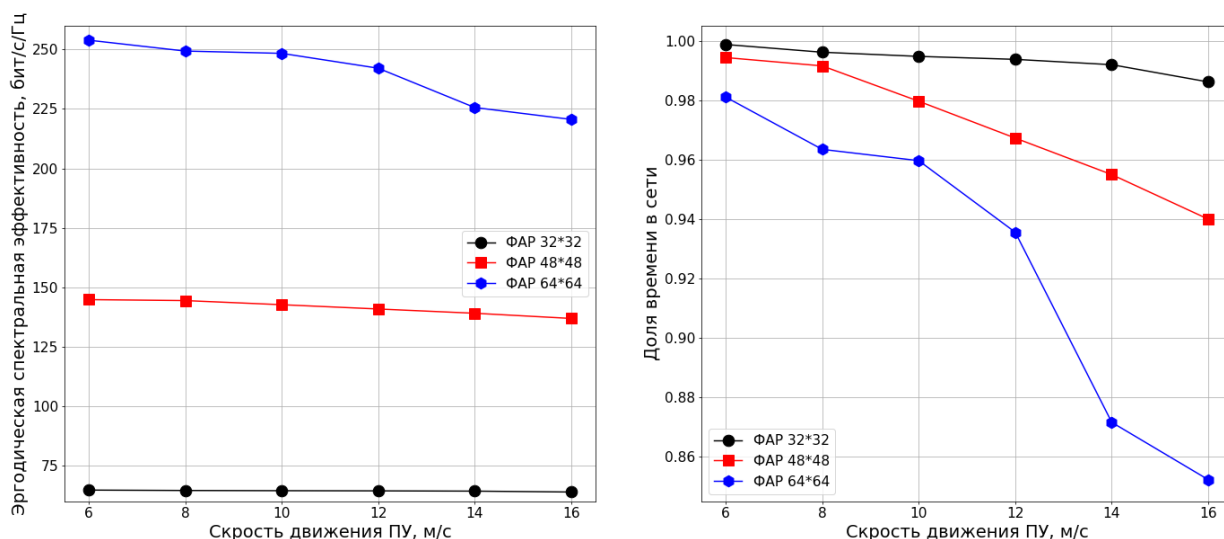


Рис. 3.3. Зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от скорости движения ПУ.

На рис. 3.3 представлены графики зависимости эргодической спектральной эффективности и доли времени в состоянии устойчивой связи от скорости движения ПУ. Именно скорость движения ПУ является основным показателем, который меняется в зависимости от сценария использования. Для просмотра видео и телефонного звонка значение является наименьшим, а для гоночной игры и просмотра VR значения значительно выше. Ранее авторы в других исследованиях предполагали, что в зависимости от используемого приложения показатели качества связи будут сильно отличаться, но в данном

исследовании можно заметить, что значения эргодической спектральной эффективности изменяются очень слабо. Относительно доли времени нахождения в состоянии устойчивой связи показатели не являются настолько же стабильными, но все же не достигают критически низких значений.

Для ФАР 32*32 ухудшение значений спектральной эффективности практически отсутствует, а доля времени в сети уменьшается меньше, чем на 0,02. Для ФАР 48*48 и 64*64 ухудшение показателей более заметно (особенно для доли времени в состоянии устойчивой связи), но, как уже было сказано ранее, такое падение качества связи не является критичным и может быть сведено к минимуму за счет использования датчиков позиционирования, это будет рассмотрено более подробно в подразделе 3.2.

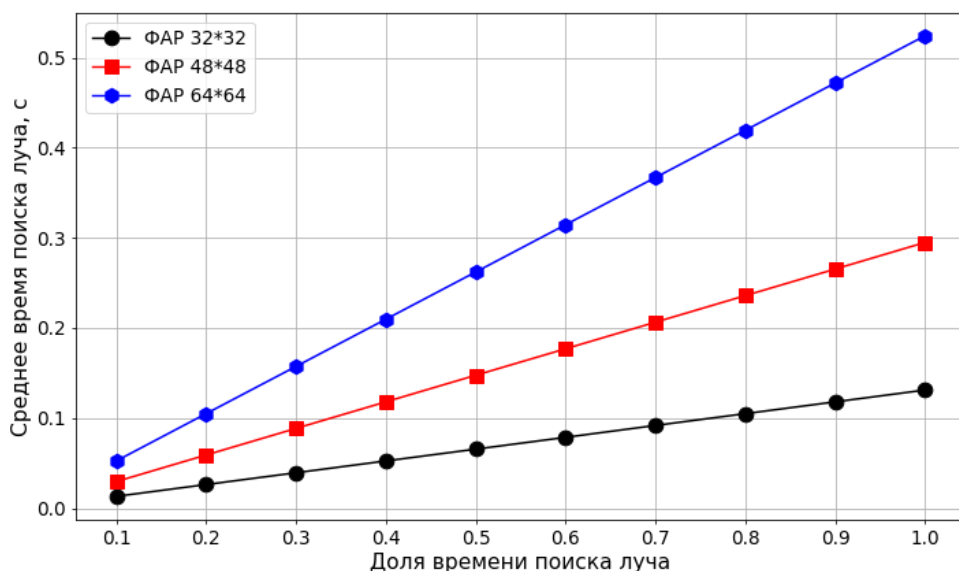


Рис. 3.4. Зависимость среднего времени от доли времени поиска луча.

Одной из основополагающих характеристик для сетей шестого поколения является время, проводимое пользователем без связи из-за микромобильности. Так как конкретные данные о точности датчиков смартфонов найти не удалось, то рассматриваются значения в пределах от 0,1 до 0,9. На данном графике данные представлены таким образом, что при

максимальной точности датчика доля времени поиска луча является минимальной (ось y).

На данный момент точно не известно какой размерности будут использоваться фазированные антенные решетки, поэтому рассматривается 3 случая: $32*32$, $48*48$, $64*64$. Логично заметить, что чем больше антенных элементов содержит антенна решетка, тем показатели среднего времени отсутствия связи больше, это связано с тем, что устройство должно перебрать большее количество антенных конфигураций для определения наилучшей. В данном случае важно учитывать, что при большем размере ФАР спектральная эффективность тоже увеличивается, то есть нужно определить оптимальное соотношение между размером ФАР, спектральной эффективностью и долей времени в состоянии устойчивой связи.

Исходя из графика можно заметить, что при увеличении точности датчиков среднее время поиска луча уменьшается (зависимость линейная), это является ключевым моментом для минимизации задержек при отправке или загрузке данных. Для просмотра видео или отправки сообщений максимальное значение $0,5$ с не является критичным, но, если пользователь играет в видео игру или проводит видео-звонок такая задержка становится существенной. Именно поэтому следующий раздел посвящен анализу эффективности использования датчиков смартфона для борьбы с эффектами микромобильности.

3.2. Система с внешней помощью в поиске луча

Эффекты микромобильности оказывают значительное негативное влияние на качество соединения в сетях терагерцового диапазона частот. Эффективного решения на данный момент не существует. В данной работе выдвинуто предложение использовать датчики позиционирования ПУ для минимизации времени, затрачиваемого на поиск луча при потере связи. С помощью датчиков можно определять предыдущее положение смартфона или любого другого беспроводного устройства с некоторой точностью, в момент,

когда соединение было наиболее устойчивым. То есть становится возможным создание алгоритма, который сможет сократить область поиска нужной конфигурации антенных решеток во много раз (в зависимости от точности датчиков устройства). Этот алгоритм позволит значительно сократить время, затрачиваемое на процедуру поиска луча.

Акселерометр, гироскоп и магнитометр являются наиболее популярными датчиками позиционирования в современных смартфонах, именно эти датчики предполагается использовать для отслеживания положения мобильного устройства, что позволит свести негативное влияние эффектов микроподвижности к минимуму.

Акселерометр в ПУ используется для определения ускорения по трем осям: x , y , z . С помощью двойного интегрирования становится возможным получать конкретные данные о перемещении мобильного устройства, но за счет проведения таких манипуляций с полученными результатами ухудшается точность измерений. Гироскоп в смартфонах и носимых устройствах используется для определения угла наклона по трем осям: угол наклона, угол поворота и угол крена. Принцип работы гироскопа заключается в том, что он преобразовывает угловую скорость в электрический сигнал, который уже используется ПУ. Обычно акселерометр и гироскоп работают в связке дополняя и уточняя данные друг друга. Магнитометр способен определять магнитное поле, что позволяет идентифицировать положение ПУ относительно сторон света.

Для начала необходимо определить погрешности измерения данных датчиков. Из спецификаций датчиков, предоставляемых производителем невозможно вычлениить конкретные значения погрешностей, а в различных статьях удалось найти подходящее исследование только для магнитометра. Есть несколько смежных статей по поводу исследования точности рассматриваемых сенсоров. В работе [13] рассматривается определение перемещений пользователя в случаях, когда GPS не доступно. В статье [14]

авторы создали 3 различных приложения для повышения точности данных, получаемых от магнитометра.

В статье [15] приведено исследование точности магнитометра, анализ проводился для целого ряда мобильных устройств разных производителей. Исходя из вывода, полученного в исследовании ошибки измерений в среднем составляют $0,5^\circ - 3^\circ$ для углов поворота и вращения меньше 85° , при больших углах ошибка становится критически большой, что не позволяет достоверно судить о положении ПУ в пространстве. Важно отметить, что для борьбы с эффектами микромобильности необходимо получать достаточно точные данные, поэтому использование магнитометра не представляет особого интереса в дальнейших исследованиях.

Изучив предложенные статьи и спецификации производителей не удалось определить точную погрешность показаний датчиков, именно поэтому в данной работе предлагается рассмотрение не конкретного числа, а целого диапазона значений (от 10% до 90%).

В данном случае для моделирования были выбраны стандартные (общепринятые) значения следующих значений:

- скорость движения ПУ – 10м/с;
- расстояние от БС до ПУ – 10м;
- вероятность движения ПУ к центру – 0,5.

На рис. 3.5 представлена зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от доли времени поиска луча. В данном случае важно уточнить, что доля времени поиска зависит от точности датчиков позиционирования. Рассмотрим на примере: при точности датчика 90% область поиска нужной антенной конфигурации так же сокращается на 90%, тогда нужно перебрать лишь 10% от всех возможных вариантов (на графиках это указывается как 0,1).

Исходя из данных, полученных при моделировании (представлены на рис. 3.5 можно сделать вывод, что использование датчиков позиционирования не сильно влияет на значения эргодической спектральной эффективности, но

оказывает значительное воздействие на долю времени в состоянии устойчивой связи. Как и для графиков из предыдущего раздела в данном случае сохраняется тенденция максимизации эргодической спектральной эффективности и минимизации доли времени устойчивого соединения с увеличением размера ФАР [16].

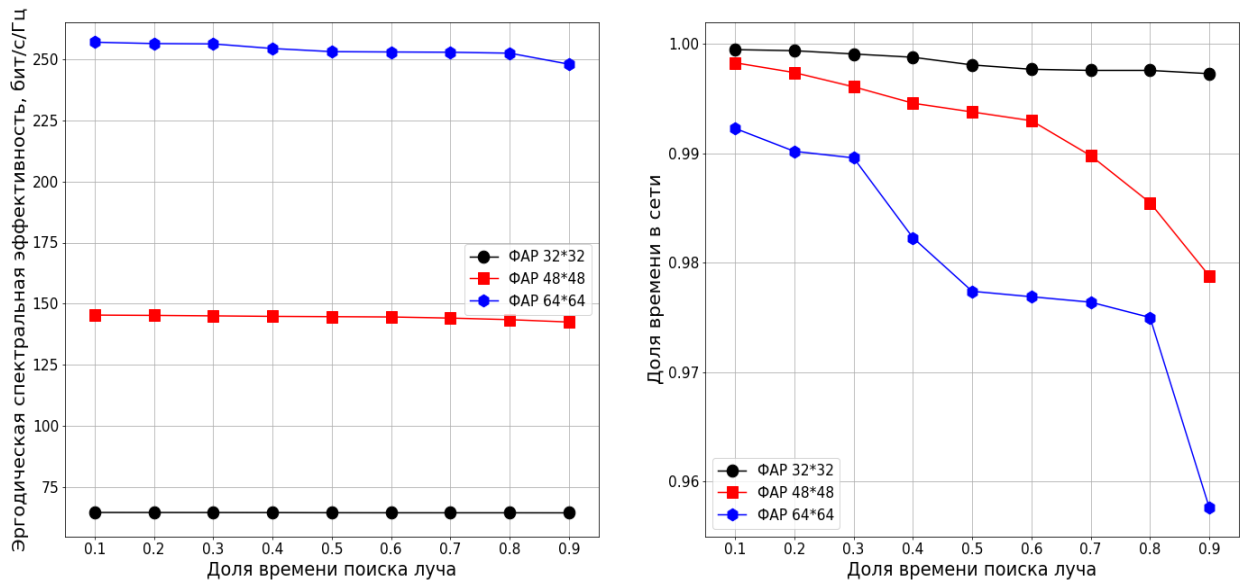


Рис. 3.5. Зависимость эргодической спектральной эффективности и доли времени в сети от доли времени поиска луча (расстояние между ПУ и БС – 10м, скорость движения ПУ 10м/с).

Рассмотрим поведение значений эргодической спектральной эффективности более подробно. Можно заметить, что данный показатель практически не изменяется в зависимости от точности датчиков. Для объяснения данного явления необходимо обратиться к формулам 2.4 и 2.5. С учетом того, что вводные данные являются идентичными, значение спектральной эффективности не изменяется, а значение эргодической спектральной эффективности зависит так же от доли времени в состоянии устойчивой связи, которое варьируется в диапазоне от 0.9995 до 0.9576. Соответственно, такие небольшие колебания не оказывают сильного влияния на скорость передачи информации.

Доля времени в состоянии устойчивой связи в данном случае сильно зависит от точности датчиков. Это объясняется довольно просто: сокращая время поиска луча мы увеличиваем относительное время устойчивого соединения. В зависимости от размера ФАР тенденция по снижению рассматриваемого показателя становится более явной. Разброс значений может показаться не существенным, но это не так, для некоторых сценариев использования ПУ даже доли секунды могут оказывать значительное влияние.

Важным показателем при создании сетей следующего поколения является скорость передачи информации, чем она больше, тем лучше. Большая скорость может быть достигнута увеличением размера ФАР, но при этом эффекты микробильности усиливаются. Исходя из проведенного исследования можно точно сказать, что негативные последствия могут быть сведены к минимуму при помощи использования датчиков позиционирования. Если датчики будут достаточно точными (около 90% и более), то размер ФАР не будет оказывать такое сильное влияние на устойчивость связи и соединение будет восстанавливаться настолько быстро, что пользователь не заметит этого при любом сценарии использования беспроводного устройства.

Заключение

В данной работе подробно описаны теоретические основы возникновения микромобильности, рассмотрены 2 процедуры поиска луча, поведение ПУ при использовании различных приложений, выявлены наилучшие критерии оценки качества связи, создан алгоритм движения пользовательского устройства.

Была представлена имитационная модель для исследования эффектов микромобильности, а также оценка качества связи в зависимости от следующих показателей: расстояние от БС до ПУ, скорость движения ПУ, вероятность дрифта ПУ в центр, точность датчиков ПУ. Проведенный анализ может быть полезен при оценке эффективности работы терагерцовых сетей и разработку алгоритма поиска луча при помощи датчиков мобильных устройств.

Основной целью данной работы являлось не получение точных показателей, а исследование тенденции увеличения или уменьшения показателей качества связи в зависимости от выбранных параметров. Удалось выявить, что расстояние от БС до ПУ и вероятность движения в центр имеют значительное влияние на оба показателя качества связи. Причем влияние усиливается с увеличением размера ФАР. Обратный эффект был получен для показателей скорости движения ПУ и точности датчиков позиционирования: эргодическая спектральная эффективность остается практически неизменной, а показатель доли времени в состоянии устойчивой связи уменьшается не так стремительно.

Авторы других работ предполагали, что качество связи в сетях терагерцового диапазона частот в значительной степени зависит от используемого приложения. В ходе исследования было обнаружено, что эргодическая спектральная эффективность практически не зависит от скорости движения ПУ (именно этот показатель является ключевым отличием

использования различных приложений). Показатель доли времени устойчивой связи менее стабильно, но все же остается в пределах допустимых значений.

В работе была доказана эффективность использования датчиков позиционирования мобильных устройств для борьбы с эффектами микромобильности. При высокой точности датчиков (90% и более) и использовании ФАР больших размеров, качество связи практически не страдает (ухудшение менее, чем на 1% от идеальных значений, за идеальные берется максимально достижимая скорость для данных показателей и отсутствие временных промежутков без связи). Таким образом, можем сделать вывод, что использование датчиков позиционирования является одним из наиболее действенных методов минимизации негативных последствий микромобильности, при котором скорость передачи информации остается на высоком уровне.

В дальнейших исследованиях предполагается нахождение оптимального соотношения размера ФАР, эргодической спектральной эффективности и доли времени устойчивой связи. Это позволит определить наилучший из возможных вариантов реализации сетей терагерцового диапазона частот, который будет удобен пользователю, а также позволит свести негативные эффекты к минимуму.

Литература

1. Moltchanov D. et al. Uninterrupted Connectivity Time in THz Systems Under User Micromobility and Blockage //2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – IEEE, 2021. – С. 01-06.
2. Gerasimenko M. et al. Capacity of multiconnectivity mmWave systems with dynamic blockage and directional antennas //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Т. 68. – №. 4. – С. 3534-3549.
3. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2011. – Т. 10. – №. 10. – С. 3211-3221.
4. Boronin P. et al. Capacity and throughput analysis of nanoscale machine communication through transparency windows in the terahertz band //Nano Communication Networks. – 2014. – Т. 5. – №. 3. – С. 72-82.
5. Moltchanov D. et al. Ergodic Outage and Capacity of Terahertz Systems Under Micromobility and Blockage Impairments //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021.
6. Petrov V. et al. The effect of small-scale mobility on terahertz band communications //Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication. – 2018. – С. 1-2.
7. Stepanov N. V. et al. Statistical Analysis and Modeling of User Micromobility for THz Cellular Communications //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021.
8. Petrov V. et al. Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Т. 69. – №. 6. – С. 6822-6827.

9. Free-space path loss [Электронный ресурс]: Wikipedia. -URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_path_loss // (дата обращения: 10.03.2022)
10. Rappaport T. S. et al. Wireless communications: principles and practice. – New Jersey : prentice hall PTR, 1996. – Т. 2.
11. Stepanov N. et al. Accuracy assessment of user micromobility models for THz cellular systems // Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems. – 2021. – С. 37-42.
12. Nain P. et al. Properties of random direction models // Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. – IEEE, 2005. – Т. 3. – С. 1897-1907.
13. Elarabi T., Suprem A. Orientation and displacement detection for smartphone device based inertial measurement units // 2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). – IEEE, 2015. – С. 122-126.
14. Elias M., Maas H. G. Investigation on multi-sensor fusion strategies for improved orientation determination in mobile phone imaging applications // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2020. – Т. 5. – №. 1.
15. Kuhlmann T., Garaizar P., Reips U. D. Smartphone sensor accuracy varies from device to device in mobile research: The case of spatial orientation // Behavior research methods. – 2021. – Т. 53. – №. 1. – С. 22-33.
16. Дугаева С.А., Молчанов Д.А., Бегишев В.О. // Имитационная модель поиска луча в системах связи терагерцового диапазона частот в условиях микромобильности абонентских терминалов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием.

Москва, РУДН, 18–22 апреля 2022 г., стр.102-104. — Москва: РУДН,
2022. — 453 с. : ил.

Приложение. Листинг программы

```
N = 64; % количество антенных решеток на БС
M = 16; % количество антенных решеток на ПУ
l = 5; % расстояние от БС до ПУ
alpha = 102/N; % угол для расчета радиуса области, в которой есть устойчивая связь
R = l*tan(alpha*pi/180); % радиус окружности, где есть связь
disp(R);
v = 300*10.^9; % частота
c = 299792458; % скорость света
K = 0.2; % коэф абсорбции
delta = 0.000002; % время необходимое на обработку одной антенной конфигурации
lambda = 0.001; %длина волны
search = (N.^2)*(M.^2)*delta; % длительность переключения решетки
B = 1; % спектральная эффективность на 1 Гц
P_T = 0.2; % мощность на БС (W)
G_T = N.^2; % усиление антенны БС
G_R = M.^2; % усиление антенны ПУ
N_0 = 3.9810717055e-21; % шум на 1 Гц
P_R = (P_T/(4*pi*l.^3.19))*((lambda.^2)/(4*pi)); % рассчитывается из модели распространения и
расстояния между БС и ПУ
disp(P_R);
C_E = B*G_T*G_R*log2(1+(P_R/(v*N_0))); % спектральная эффективность
disp(C_E);
x = zeros(1, 100); % массив координат по x
y = zeros(1, 100); % массив координат по y
t = zeros(1, 10); % массив времени устойчивой связи
d_x = 0.001; % смещение по x
d_y = 0.001; % смещение по y
p = 0.5; % вероятность движения в центр
start_time = tic; % замер начального времени

for j = 1:100 % проводится 100 итераций(то есть 100 выходов из сети)
    i = 3;
    tic % замер времени для текущей итерации
    dir = 2*pi*rand(1); % выбор направления
    x(2) = d_x*cos(dir); % расчет первой координаты по x(которая после 0)
    y(2) = d_y*sin(dir); % расчет первой координаты по y(которая после 0)

    while sqrt((x(i-1)-x(1)).^2+(y(i-1)-y(1)).^2)<R % пока находимся внутри области
        z = rand(1);
        dir = (pi/2)*rand(1); % выбираем направление от 0 до pi/2 (то есть x и y положительные)

        if (x(i-1)>0) && (y(i-1)>0) % если находимся в первой четверти
            if z < p % если выпало 1, то движемся к центру
                x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
                y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
            else % если выпало 0, то движемся от центра
                x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
                y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
            end
        end
    end

    if (x(i-1)<0) && (y(i-1)>0) % если находимся во второй четверти
        if z < p % если выпало 1, то движемся к центру
            x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
        else % если выпало 0, то движемся от центра
            x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
        end
    end
end
```

```

if (x(i-1)>0) && (y(i-1)<0) % если находимся в четвертой четверти
    if z < p % если выпало 1, то движемся к центру
        x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
        y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
    else % если выпало 0, то движемся от центра
        x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
        y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
    end
end
end

if (x(i-1)<0) && (y(i-1)<0) % если находимся в третьей четверти
    if z < p % если выпало 1, то движемся к центру
        x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
        y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
    else % если выпало 0, то движемся от центра
        x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
        y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
    end
end
end

if x(i-1) == 0 % если координата по x = 0
    if y(i-1) > 0 % если y > 0
        if z < p % движемся в центр
            y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
            x(i) = x(i-1); % x оставляем из прошлого состояния, т.е. 0
        else % движемся от центра
            y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
            x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
        end
    else % если y < 0
        if z < p % движемся в центр
            y(i) = y(i-1) + d_y*sin(dir);
            x(i) = x(i-1); % x оставляем из прошлого состояния, т.е. 0
        else % движемся от центра
            y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
            x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
        end
    end
end
end

if y(i-1) == 0 % если координата по y = 0
    if x(i-1) > 0 % если x > 0
        if z < p % движемся в центр
            x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1); % оставляем y из прошлого состояния, т.е. 0
        else % движемся от центра
            x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
        end
    else % если x < 0
        if z < p % движемся в центр
            x(i) = x(i-1) + d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1); % оставляем y из прошлого состояния, т.е. 0
        else % движемся от центра
            x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
            y(i) = y(i-1) - d_y*sin(dir);
        end
    end
end
end
end
if (x(i-1)==0) && (y(i-1)==0)
    if z < p

```

```

        x(i) = x(i-1);
        y(i) = y(i-1);
    else
        x(i) = x(i-1) - d_x*cos(dir);
        y(i) = y(i-1) - d_y*cos(dir);
    end
end
i = i + 1;
pause(0.0001)
end
t(j) = toc; % остановка времени для одной итерации, т.е. произошел обрыв связи
disp(t(j))
%comet(x, y)
pause(search) % пауза на поиск нужной конфигурации (т.е. возвращение точки в 0)
end
finish_time = toc(start_time); % остановка времени для всего моделирования
p_c = (sum(t))/finish_time; % расчет части времени, что мы находились в состоянии устойчивой
связи
disp('Среднее время в состоянии связи: ');
disp(sum(t)/10);
disp('Часть времени в состоянии связи: ');
disp(p_c);
E_C = C_E*p_c; % расчет эргодической спектральной эффективности
disp('Спектральная эффективность: ');
disp(E_C);

```