

На правах рукописи

Семенов Виталий Юрьевич

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ
В ИНФОРМАЦИОННЫХ РАДИОСИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ
МНОГОЛУЧЕВОГО КАНАЛА С УГЛОВОЙ ДИСПЕРСИЕЙ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Флакман А.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор Орлов И.Я.
доктор технических наук
Кейстович А.В.

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН

Защита состоится «_____» _____ 2012г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. _____, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В современном мире происходит интенсивное развитие информационных радиосистем. Одним из актуальных направлений исследований в этой области является определение местоположения мобильного объекта с помощью инфраструктуры систем сотовой связи или локальных беспроводных сетей. Интерес к проблеме позиционирования обусловлен возможностью использования существующих сетей беспроводной передачи данных и реализации методов обработки сигнала на программном уровне.

Основными препятствиями для достижения высокой точности определения местоположения объекта являются сложные условия распространения радиоволн в пространственном канале связи, обусловленные многолучевым характером распространения сигналов в случайной рассеивающей среде и движением пользователя. Многолучевость приводит к глубоким замираниям сигнала, является причиной возникновения частотной и угловой дисперсий сигнала наиболее значительных в городских условиях. Перемещение объекта среди рассеивателей приводит к изменению характеристик канала связи, временной масштаб которых определяется его скоростью и размерами различных отражателей (зданий и других сооружений).

Решить задачу позиционирования мобильного пользователя внутри помещения с достаточно высокой точностью возможно, если он является частью локальной сети беспроводного доступа в Интернет. Данный сервис востребован в настоящее время, поскольку сети Wi-Fi нашли широкое практическое применение. При определении местоположения объекта внутри помещения важную роль играет метрика позиционирования. Это характеристика, которая позволяет отличить с некоторой вероятностью одну точку в пространстве от другой. Поиск метрики позиционирования для высокоточного определения местоположения является актуальной задачей.

Существует класс задач, в которых не требуется достижения высокой точности определения местоположения пользователя. Главным критерием в них является простота системы позиционирования, как с аппаратной, так и с вычислительной стороны. Для таких задач целесообразно применение «упрощенных» методов определения местоположения с достаточно простыми метриками.

Методы позиционирования объектов внутри помещения условно делятся на два класса. К первому классу относятся методы, известные в зарубежной литературе как «fingerprint». В их основе лежит идея позиционирования с использованием заранее сформированной базы данных, в которой хранятся сведения о значениях метрики для точек сетки с известными координатами. Совокупность координат опорных передатчиков обычно образует данную сетку. Позиционирование производится путем

сравнения выбранной метрики для текущего положения объекта со значениями метрики из базы данных и выбора координат ближайшего по метрике опорного передатчика в качестве оценки местоположения объекта.

Инфраструктуру, подходящую для реализации методов позиционирования первого класса, используют локальные сети беспроводного доступа в Интернет. Они основаны на технологии ортогонального частотного мультиплексирования сигналов (так называемая Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) - технология), в соответствии с которой информационные символы передаются параллельно на наборе ортогональных поднесущих.

На сегодняшний день наиболее распространенным методом определения местоположения первого класса является «мощностной» метод. Метрикой позиционирования в нем выступает распределение мощности принятого сигнала на конечном наборе частот. Для OFDM-систем мощность на некоторой частоте вычисляется как квадрат модуля передаточной характеристики канала. Процесс определения местоположения заключается в сравнении распределения мощности сигналов на наборе частот, принятых точкой доступа от объекта позиционирования, и распределения мощности сигналов от опорных передатчиков на этом же наборе частот через минимальное среднеквадратическое отклонение. В качестве оценки местоположения выбираются координаты того опорного передатчика, для которого различие в метрике минимально. Однако в многолучевом канале точность «мощностного» метода является невысокой, в первую очередь из-за достаточно сильных изменений передаточной характеристики канала даже при относительно небольших перемещениях пользователя, поэтому он не всегда может удовлетворить предъявляемым требованиям по точности позиционирования.

Ко второму классу относятся методы, общим у которых является отсутствие заранее сформированной базы данных. В большинстве случаев в качестве метрики позиционирования в них выступает величина мощности принятого сигнала. В этом классе методов не применяется сетка опорных передатчиков, за счет чего система определения местоположения значительно упрощается. Однако отсутствие опорной сетки и базы данных в большинстве случаев приводит к уменьшению точности позиционирования.

В системах мобильной связи актуальна проблема создания эффективных методов обработки сигнала на базовой станции в условиях многолучевого распространения и априорной неопределенности углового положения источника излучения. Достижению этих целей мешают некоторые особенности распространения сигналов в городских условиях, такие как: отсутствие прямой видимости между передающим и приемным устройствами; сильные флуктуации основного направления прихода сигнала внутри некоторого углового сектора; наличие быстрых и медленных замираний сигналов; частотная селективность канала связи.

В настоящее время на большинстве базовых станций располагаются секторные антенны, которые излучают сигналы в широком угловом секторе,

не имея возможности оценить азимутальное положение пользователя. Таким образом, происходит нерациональное расходование мощности сигнала передаваемого с базовой станции, что в конечном итоге приводит к относительно невысокой пропускной способности.

Применительно к следующим поколениям систем мобильных коммуникаций использование на базовых станциях частотно-сканирующих антенных решеток (АР) представляется перспективным. Главной особенностью такого типа антенн является однозначная связь между угловой координатой источника и частотой принимаемого сигнала. Это дает возможность передавать информацию конкретному пользователю без оценки его углового положения, что является сложной проблемой в условиях канала с угловой дисперсией, а на основе измерения спектра принятого от него сигнала. Данное свойство может эффективно использоваться при работе OFDM-системы с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов в многолучевом канале. В самом деле, если измерить частотный спектр принятого сигнала пользователя и затем излучить сигнал на соответствующих поднесущих, то будет обеспечена передача в направлении пользователя с учетом угловой дисперсии. Поскольку мощность сигнала с базовой станции излучается направленно за счет использования АР, поэтому у пользователя увеличивается отношение сигнал-шум. При этом одновременное обслуживание абонентов может быть реализовано за счет их частотного разделения.

В связи с вышесказанным представляет интерес объединение частотного сканирования с широко используемым в настоящее время ортогональным частотным мультиплексированием для обработки сигналов и исследование основных характеристик OFDM-системы мобильной связи с частотно-сканирующей АР на базовой станции. К таким характеристикам можно отнести вероятность битовой ошибки и пропускную способность системы в релеевском канале с угловой дисперсией сигнала при изменяющемся числе пользователей и различных модуляциях (бинарной, квадратурной, 16- и 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции и др.).

Определить местоположение мобильного объекта вне помещения возможно, в частности, если он является абонентом системы сотовой связи с частотно-сканирующими антенными решетками на базовых станциях. Сервис позиционирования абонента в системе мобильной связи (вне помещения) уже существует в настоящее время. Такой вид услуг необходим, например, для целевой пересылки информации о ситуации с дорожным трафиком, для работы специальных служб (полиция, служба спасения) и т.д. Однако гарантируемая операторами точность позиционирования не всегда является удовлетворительной для пользователя.

Наиболее точным методом определения координат пользователя через его пеленгацию с трех базовых станций, на которых размещены частотно-сканирующие АР, является минимизация функционала правдоподобия. Однако использование данного метода предполагает наличие некоторых априорных сведений об угловой дисперсии в многолучевом канале и имеет

высокую вычислительную сложность из-за достаточно большого числа параметров системы.

Созданию новых методов определения местоположения мобильного объекта внутри и вне помещения в перспективных информационных радиосистемах посвящена настоящая диссертационная работа. Актуальность выбранной темы подтверждается не только большим объемом публикаций в научно-технических изданиях, посвященных этому вопросу, но также активной работой проводимой в данном направлении в некоторых компаниях-производителях коммуникационного оборудования (Intel, Symeo GmbH, RTL Service, UbiTEL, ЭлТэк и др.).

Задачи работы

1. Синтез методов определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой локальной сетью беспроводного доступа в Интернет, основанных на функции частотной когерентности передаточной характеристики канала и на распределении мощности сигнала по набору используемых частот.

2. Анализ вероятности битовой ошибки и пропускной способности в OFDM-системе мобильной связи с частотно-сканирующей AP на базовой станции для многолучевого канала с угловой дисперсией сигнала.

3. Разработка методов определения местоположения пользователя в системе мобильной связи с частотно-сканирующими AP на базовых станциях в условиях многолучевого распространения и угловой дисперсии сигналов.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории информации, высшей алгебры, векторного анализа и теории матриц, а также математическое и компьютерное моделирование.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается как в постановке ряда нерешенных ранее задач, так и в полученных оригинальных результатах:

1. Синтезирован метод определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в Интернет, использующий функцию частотной когерентности передаточной характеристики канала в качестве метрики позиционирования. Метод предполагает предварительное формирование базы данных с измеренной функцией частотной когерентности для выбранного расположения опорных передатчиков.

2. Разработаны методы определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в

Интернет, основанные на оценивании параметров в законе затухания сигнала и не предполагающие формирование базы данных.

3. Результаты исследования эффективности OFDM-системы мобильной связи с частотно-сканирующей AP на базовой станции определяют неизвестные до этого выражения для вероятности битовой ошибки и пропускной способности в канале с релеевскими замираниями и угловой дисперсией сигнала при различном числе одновременно обслуживаемых пользователей и при бинарной, квадратурной, 16- и 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции.

4. Разработан метод определения местоположения пользователя с помощью трех базовых станций OFDM-системы мобильной связи с частотно-сканирующими антенными решетками в многолучевом канале с угловой дисперсией и замираниями сигнала, основанный на оценивании частоты максимума в спектре принимаемого сигнала на каждой базовой станции и нахождении координат точки пересечения биссектрис пеленгационного треугольника, которая выбирается в качестве оценки местоположения пользователя.

Практическая значимость результатов

Представленные в диссертации методы определения местоположения пользователя и обработки сигналов в системах мобильной связи и беспроводного доступа в Интернет в условиях многолучевого канала с угловой дисперсией сигнала могут быть использованы при проектировании перспективных систем позиционирования, работающих внутри и вне помещений, а также при разработке высокоскоростных цифровых систем связи.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается их сравнением с результатами, полученными с помощью математического и компьютерного моделирования, с опубликованными результатами для частных случаев, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям теории статистической радиофизики и теории информации.

Положения выносимые на защиту

1. Метод определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в Интернет, использующий функцию частотной когерентности передаточной характеристики канала в качестве метрики позиционирования. Метод предполагает предварительное формирование базы данных с измеренной функцией частотной когерентности для выбранного расположения опорных передатчиков.

2. Методы определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в Интернет, основанные на оценивании параметров в законе затухания сигнала и не предполагающие формирование базы данных.

3. Аналитические выражения, позволяющие найти вероятность битовой ошибки и пропускную способность в OFDM-системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой на базовой станции в канале с релеевскими замираниями и угловой дисперсией сигнала при различном числе одновременно обслуживаемых пользователей и при бинарной, квадратурной, 16- и 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции.

4. Метод определения местоположения пользователя с помощью трех базовых станций OFDM-системы мобильной связи с частотно-сканирующими антенными решетками в многолучевом канале с угловой дисперсией и замираниями сигнала, основанный на оценивании частоты максимума в спектре принимаемого сигнала на каждой базовой станции и нахождении координат точки пересечения биссектрис пеленгационного треугольника, которая выбирается в качестве оценки местоположения пользователя.

Апробация результатов и публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 15 работах. Среди них 5 статей в рецензируемых журналах («Вестник ННГУ. Серия Радиофизика» [1-3], «Известия вузов. Радиоэлектроника» [4], «Известия вузов России. Радиоэлектроника» [5]), и 10 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов на научных конференциях [6-15].

Результаты диссертационной работы докладывались на 12-й научной конференции по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2008 г.), на 13-й научной конференции по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2009 г.), на 12-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2010 г.), на международной научно-технической конференции по интеллектуальным системам AIS'10 (Геленджик-Дивноморское, 2010 г.), на 15-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2010 г.), на 14-й научной конференции по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2010 г.), на IV всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2010 г.), на 13-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2011 г.), на 16-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2011 г.), на 15-й научной конференции по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2011 г.).

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 02.740.11.0003 («Исследование и разработка систем беспроводной широкополосной связи»).

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие, как в постановке задач, так и в расчетах, построении аналитических моделей, обсуждении и физической интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка сокращений. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, включая 89 рисунков и список литературы из 99 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении освещается современное состояние проблемы определения местоположения пользователя в системах мобильной связи и беспроводного доступа в Интернет в условиях многолучевого канала с угловой дисперсией сигнала, обосновывается актуальность темы диссертации, кратко излагается содержание работы.

В первой главе рассмотрена проблема определения местоположения пользователя внутри помещения с применением инфраструктуры сетей беспроводного доступа в Интернет (Wi-Fi сетей) и ортогонального частотного мультиплексирования сигналов. Получены интегральные функции распределения ошибки позиционирования с помощью предложенных методов позиционирования в различных помещениях.

В разделе 1.1 рассмотрены принципы функционирования системы позиционирования объекта в локальной беспроводной сети. Получены аналитические выражения для дифференциальной функции плотности вероятности $w(q)$ ошибки позиционирования (1) из-за дискретности сетки опорных передатчиков внутри помещения (см. рис. 1), а также для среднего значения потенциально достижимой точности позиционирования объекта внутри помещения (2) в зависимости от размера Δ :

$$w(q) = \begin{cases} \frac{2\pi q}{\Delta^2}, & 0 \leq q < \frac{\Delta}{2}; \\ \frac{2q}{\Delta^2} \left[\pi - 4 \arccos \left(\frac{\Delta}{2q} \right) \right], & \frac{\Delta}{2} \leq q < \frac{\Delta}{2} \sqrt{2}; \end{cases}, \quad (1)$$

$$\langle q \rangle = \frac{\Delta}{6} \left[\sqrt{2} + \operatorname{Re}(\operatorname{arcth} \sqrt{2}) \right]. \quad (2)$$

В качестве метрики позиционирования предлагается использовать функцию частотной когерентности Ψ передаточной частотной характеристики канала H , оценка которой применительно к OFDM-системе определяется выражением (3)

$$\Psi(l\Delta f_{sc}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{sub}-l} H_k H_{k+l}^*}{\sum_{k=1}^{N_{sub}} |H_k|^2}, \quad (3)$$

где $H_k = H(f_k)$ - значение передаточной функции на k -й поднесущей, l - разность значений индексов поднесущих (определяет значение частотного разноса), Δf_{sc} - расстояние между соседними поднесущими, N_{sub} - число используемых частот.

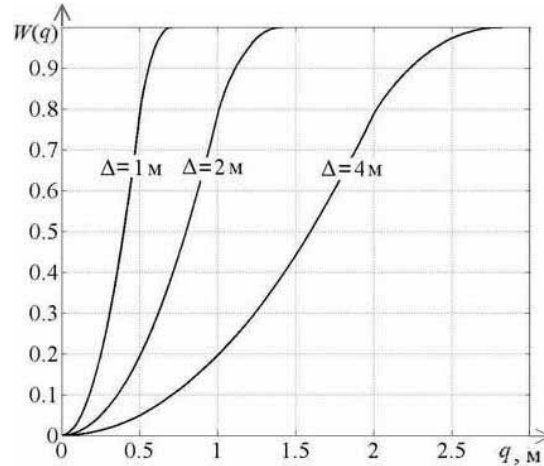


Рис. 1. Интегральные функции распределения ошибки q позиционирования из-за дискретности сетки опорных передатчиков для разных размеров Δ ячейки

Предлагается оригинальный метод позиционирования, дающий высокую точность при определении координат объекта. С учетом введенной метрики (3) алгоритм описывается выражением

$$\{\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0\} = \arg \min_p \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{l=0}^{N_{sub}-1} \left| \hat{\Psi}(l\Delta f_{sc}, x_0, y_0, z_0)^{(j)} - \hat{\Psi}(l\Delta f_{sc}, x_p, y_p, z_p)^{(j)} \right|^2 \right\}, \quad (4)$$

где J - число точек доступа (приемников сигнала), работающих в локальной сети, (x_p, y_p, z_p) - координаты p -го передатчика опорной сетки. Таким образом, пользователю приписываются координаты ближайшего опорного передатчика по среднеквадратической метрике, основанной на функции частотной когерентности. На рис. 2а приведены интегральные функции распределения $W(q)$ ошибки q позиционирования, полученные с помощью алгоритма (4) при одной точке доступа ($J=1$) в прямоугольной однородной комнате размером 60×40 м. На рис. 2б изображены средние ошибки позиционирования для разной используемой полосы частот Ω .

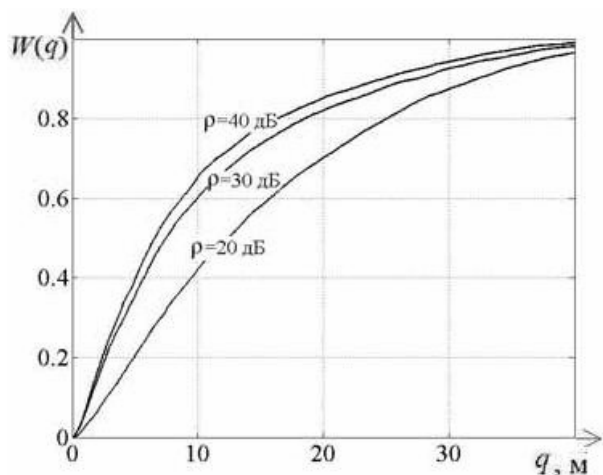


Рис. 2а. Интегральные функции распределения ошибки q позиционирования для разного ОСШ ρ ($\Delta=4$ м, $\Omega=40$ МГц)

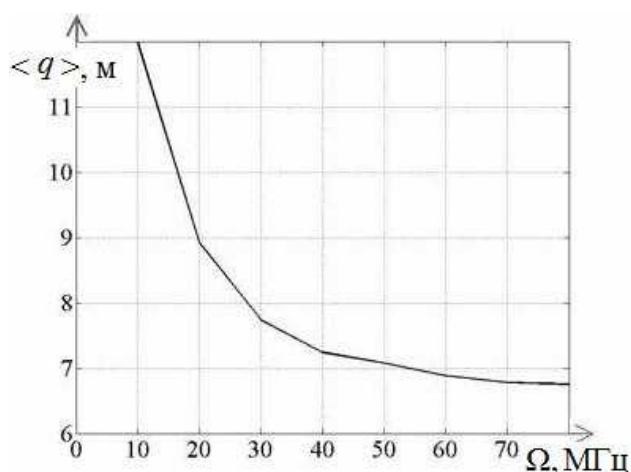


Рис. 2б. Медианная ошибка позиционирования для разной полосы частот Ω ($\Delta=2$ м, $\rho=40$ дБ)

В разделе 1.2 предлагаются упрощенные методы позиционирования, обладающие меньшей точностью определения местоположения, но большей простотой при практической реализации за счет отсутствия сетки опорных передатчиков. В упрощенных методах также используется инфраструктура Wi-Fi сети и ортогональное частотное мультиплексирование. В качестве метрики позиционирования в них применяется распределение мощности сигнала по набору частот. Будем считать, что коэффициент затухания сигнала, выраженный в децибелах, соответствует формуле

$$L(d) = L_0 - n 10 \lg d, \quad (5)$$

где L_0 и n – параметры подлежащие оценке. Тогда один из предложенных упрощенных методов позиционирования представляет собой минимизацию функционала, определяемого следующим выражением

$$\begin{cases} \{\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0\} = \underset{x_0, y_0, z_0}{\operatorname{arg\,min}} \{ \gamma(x, y, z) \}, \\ \gamma(x, y, z) = \sum_{i=2}^J \left| \frac{L_i}{L_1} - \frac{\lg[d_i(x, y, z)]}{\lg[d_1(x, y, z)]} \right|^2, \end{cases} \quad (6)$$

где L_1 и L_i – это мощность сигнала в децибелах принятая соответственно 1 и i -й точкой доступа, d_1 и d_i – расстояния соответственно от 1 и i -й точки доступа до текущей точки с координатами (x, y, z) .

Точности позиционирования, получаемые с помощью предложенных упрощенных алгоритмов, сопоставимы по точности с наиболее популярным сейчас «мощностным» методом, также использующего мощность принятого сигнала в качестве метрики, но нуждающегося в сетке опорных передатчиков.

В разделе 1.3 рассмотрены «реальные» помещения с различными топологиями и размерами. Для них проведено компьютерное моделирование по позиционированию объекта с помощью предложенных методов.

Получены интегральные функции распределения ошибки позиционирования и проведено их сравнение. Так на рис. 3 справа приведены интегральные функции распределения ошибки позиционирования, полученные с помощью метода (4), использующего функцию частотной когерентности (при дискретности сетки $\Delta=4$ м) для «реального» помещения с окнами и перегородками, топология которого изображена на рис. 3 слева.

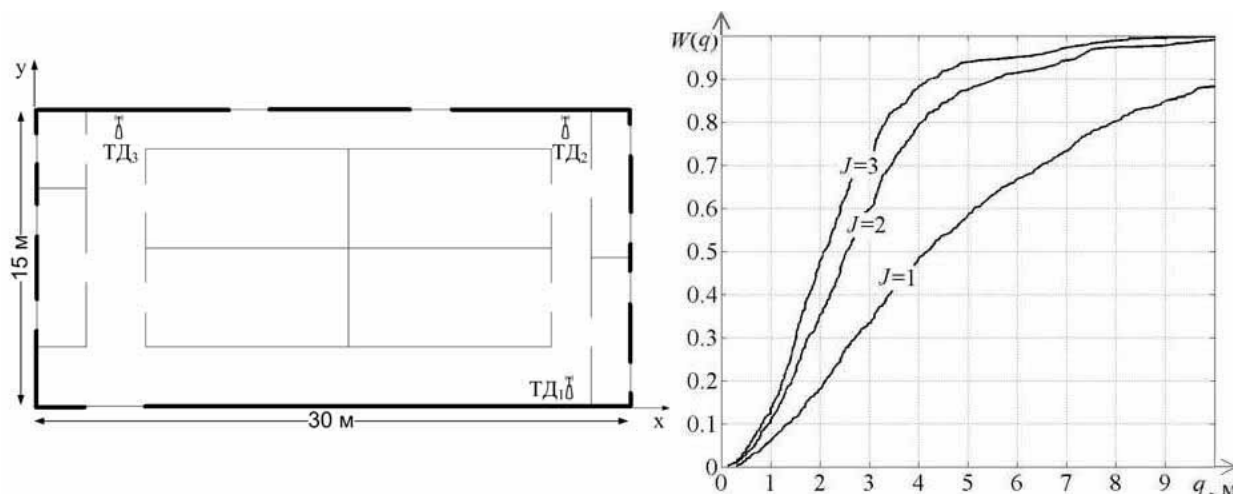


Рис. 3. Интегральные функции распределения ошибки позиционирования q (справа) при различном числе точек доступа J для помещения, топология которого изображена слева

Во второй главе рассмотрена система мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой (АР) на базовой станции (БС). Получены основные характеристики системы связи. Проведено сравнение с используемыми ныне антеннами на БС.

В разделе 2.1 рассматриваются принципы функционирования частотно-сканирующей антенной решетки в составе системы мобильной связи. Исследуются отклики частотно-сканирующей АР на различные модели источников сигнала: точечную, гауссову и 3GPP. Для 3GPP модели сигнала приводятся численные оценки отклика АР. Получено приближенное аналитическое выражение (7) для отклика частотно-сканирующей АР на гауссову модель источника сигнала

$$D(\theta_1, f) = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + \sigma^2}} \exp\left(-\frac{[\theta_1 - \theta_0(f)]^2}{2(\delta^2 + \sigma^2)}\right), \quad 2\delta \approx 0,85 \Delta\theta_{0,5} \quad (7)$$

где θ_1 – угол соответствующий направлению на абонента, $\theta_0(f)$ – азимутальное направление диаграммы направленности (ДН) на частоте f , σ – полуширина источника излучение по уровню $1/\sqrt{e}$, $\Delta\theta_{0,5}$ – ширина точной ДН по уровню -3 дБ.

В разделе 2.2 выведено среднее значение отношения сигнал/шум (ОСШ), определяемое выражением (8), в системе мобильной связи с частотно-сканирующей АР на БС для гауссовой модели источника сигнала с угловой дисперсией

$$\rho_0 = \frac{\delta P_0}{\sqrt{\delta^2 + \sigma^2}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{sub}} \exp \left[\frac{[\theta_1 - a(f_i - f_n)]^2}{2(\delta^2 + \sigma^2)} \right] \right\}^{-1} \frac{G h_1^2 h_2^2 N_{FFT}}{N_n k_B T_0 \Omega Q N_{sub}}, \quad (8)$$

где P_0 – излучаемая с БС мощность сигнала, Q – число пользователей в системе связи, G – коэффициент усиления АР, Ω – общая полоса частот, N_{FFT} – размерность быстрого преобразования Фурье, N_n – шум-фактор, k_B – постоянная Больцмана, T_0 – абсолютная температура, h_1 – потери сигнала на трассе, h_2 – коэффициент, описывающий крупномасштабные замирания сигнала. Показано, что ОСШ имеет релеевскую статистику.

Получены приближенные аналитические выражения для трех основных характеристик системы мобильной связи с частотно-сканирующей АР для многолучевого канала с угловой дисперсией сигнала и 2-ФМ модуляции: вероятности битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) (9), вероятности блоковой ошибки (BLER – BLock Error Rate) (10) и эффективной пропускной способности (Throughput) (11) (см. рис. 4).

$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_0 + Q}} \right), \quad (9)$$

$$BLER = 1 - \sum_{j=0}^v \frac{M!}{j!(M-j)!} BER^j (1-BER)^{M-j}, \quad (10)$$

$$Th = Q \sum_{j=0}^v \frac{M!}{j!(M-j)!} (BER)^j (1-BER)^{M-j} \frac{\Delta f_{0,5}}{\Omega} m R_c, \quad (11)$$

где M – число бит в передаваемом блоке данных, $\Delta f_{0,5}$ – полоса частот выделяемая одному пользователю, m – уровень модуляции, R_c – скорость кодирования.

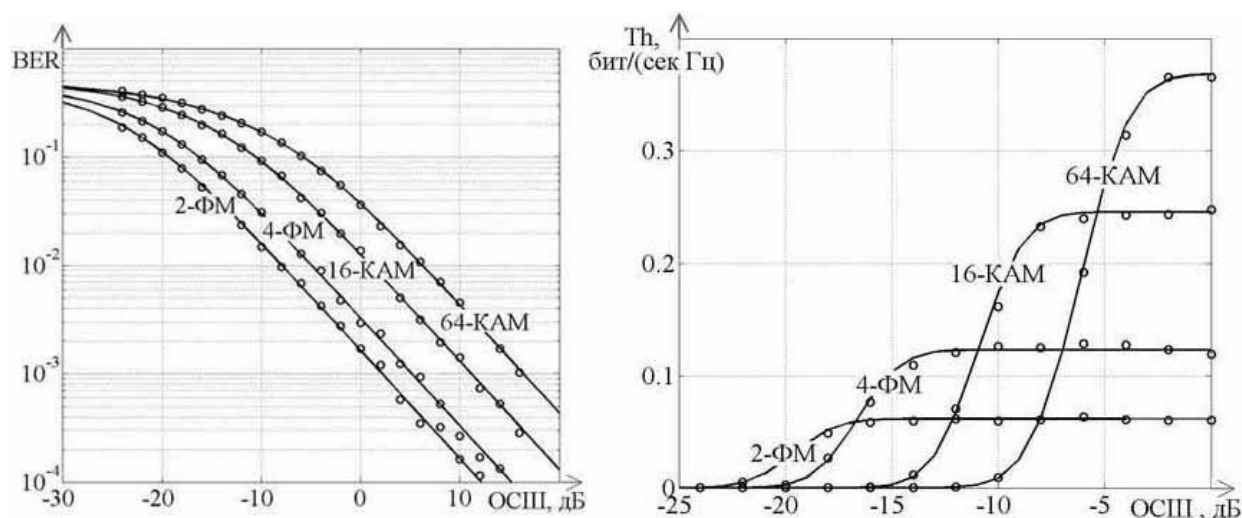


Рис. 4. Вероятность битовой ошибки (слева) и пропускная способность (справа) для системы мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой при одном пользователе в сети и 2-ФМ, 4-ФМ, 16-КАМ и 64-КАМ модуляций. Кривые соответствуют теоретическим формулам, кружочки – результатам моделирования

В разделе 2.3 проведено сравнение системы связи с частотно-сканирующей АР на базовой станции и систем с другими типами антенн. Рассматривались секторная антенна, многолучевая антенная решетка, а также ММО-система в качестве альтернативы частотно-сканирующей АР на базовой станции. Показано, что средняя пропускная способность системы связи с частотно-сканирующей АР, определяемая выражением (12), возрастает с увеличением числа пользователей в сети и ограничивается используемой полосой частот.

$$\langle Th \rangle = \int_0^{\infty} Th(\rho)w(\rho)d\rho, \quad (12)$$

где $w(\rho)$ – плотность вероятности ОСШ в системе связи, полученная с учетом (8). Показано (см. рис. 5), что при максимальном числе Q пользователей в сети средняя пропускная способность при использовании частотно-сканирующей АР превышает пропускную способность системы связи с секторной антенной на БС, наиболее распространенную в настоящее время.

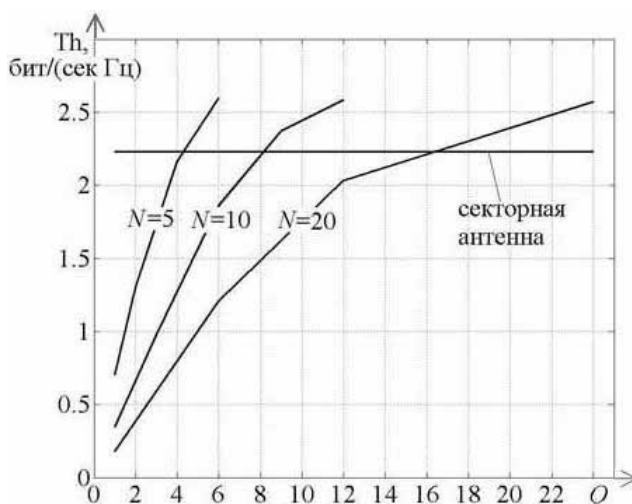


Рис. 5. Средняя пропускная способность систем связи с секторной антенной и частотно-сканирующей АР на базовой станции для различного числа излучателей N в АР

В третьей главе рассмотрена проблема определения местоположения пользователя для системы мобильной связи с частотно-сканирующими АР на базовых станциях в условиях многолучевого канала. Предложен метод позиционирования пользователя с помощью трех базовых станций.

В разделе 3.1 рассматривается проблема пеленгации источника излучения с помощью частотно-сканирующей АР на БС. Предлагается метод позиционирования с помощью трех БС, в котором измеряются три пеленга пользователя (с каждой их БС). Однако из-за различных ошибок при измерениях данные пеленги в общем случае имеют не одну, а три точки пересечения, и образуют некий пеленгационный треугольник. В качестве

оценки местоположения пользователя используется точка пересечения биссектрис пеленгационного треугольника.

В разделе 3.2 получены плотности вероятности ОСШ и эффективной угловой дисперсии в системе мобильной связи с частотно-сканирующими АР на БС. Считалось, что три БС, используемых для позиционирования, образуют равносторонний треугольник со стороной D (гексагональная структура сот) и находятся в вершинах соседних гексагонов. Рассматривалась стандартизированная 3GPP модель канала, а также гауссова модель многолучевого канала с угловой дисперсией сигнала, согласно которой плотность вероятности расположения рассеивателей вокруг антенны пользователя имеет вид $p(r)=(1/\pi r_{eff}^2) \exp(-r^2/r_{eff}^2)$, где r – расстояние от пользователя до рассеивателя, r_{eff} – эффективный радиус источника, равный расстоянию, на котором функция $p(r)$ убывает в e раз.

Поскольку положение пользователя в соте случайно, поэтому ОСШ и угловая ширина источника также случайные величины, а их мгновенные значения определяются выражениями (13) и (14) соответственно.

$$\rho_i = \rho_0 (R_0/R_i)^4, \quad (13)$$

$$\varphi_{eff} = 2 \arctg(r_{eff}/R_i), \quad (14)$$

где ρ_0 – ОСШ в точке касания трех сот, которая находится на одинаковом расстоянии R_0 от всех трех БС, R_i – расстояние от пользователя до i -й БС. Плотности вероятности ОСШ и эффективной угловой дисперсии источника сигнала, наблюдаемой с трех базовых станций изображены на рис. ба и рис. бб соответственно.

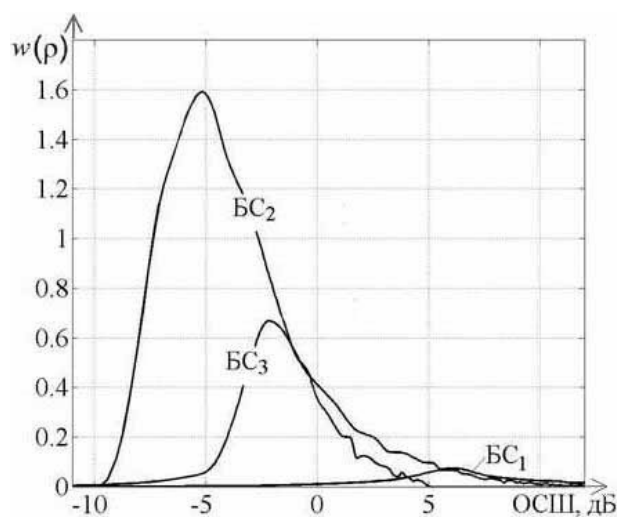


Рис. ба. Плотность вероятности ОСШ для гауссовой модели канала (расстояние между базовыми станциями $D=1000$ м)

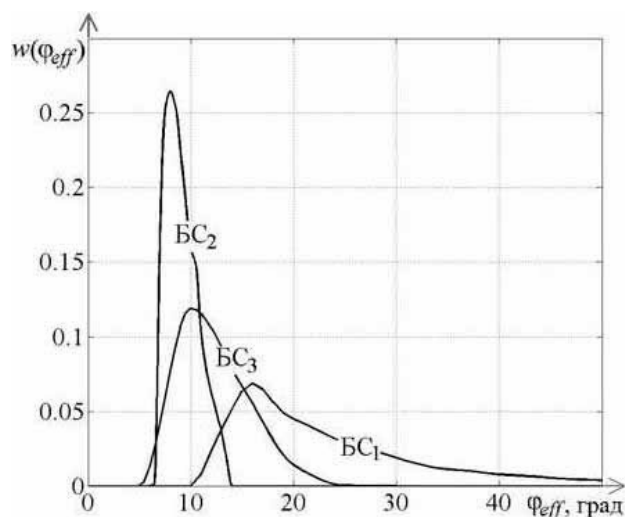


Рис. бб. Плотность вероятности эффективной угловой дисперсии для гауссовой модели канала (эффективный радиус источника $r_{eff}=70$ м)

В разделе 3.3 получены интегральные функции распределения ошибки позиционирования пользователя при использовании трех базовых станций для гексагональной структуры сот. Проведено сравнение интегральных функций распределения для гауссовой и 3GPP моделей канала.

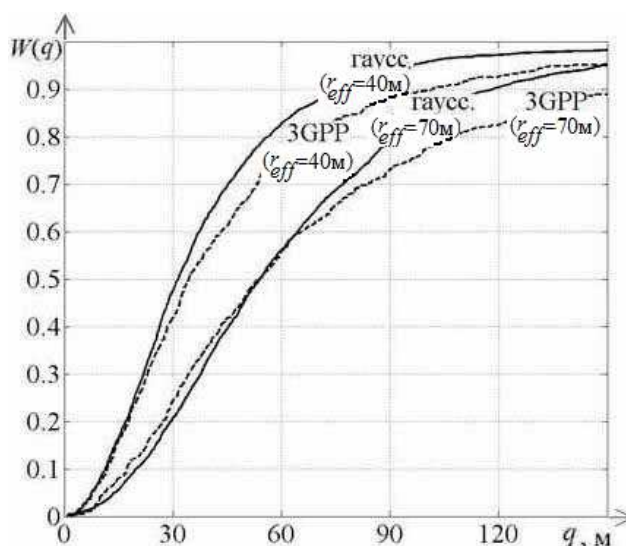


Рис. 7. Интегральные функции распределения ошибки позиционирования при использовании 3-х базовых станций для гауссовой и 3GPP моделей канала при разных r_{eff} (расстояние между базовыми станциями $D=1000$ м)

Полученные в результате математического моделирования численные оценки точности определения местоположения мобильного пользователя с помощью трех БС (см. рис. 7) удовлетворяют существующим на сегодняшний день требованиям по точности позиционирования как со стороны гражданских, так и со стороны специальных служб.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Синтезированный метод определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в Интернет, использующий в качестве метрики позиционирования функцию частотной когерентности передаточной характеристики канала и предполагающий предварительное формирование базы данных с измеренной функцией частотной когерентности для выбранного расположения опорных передатчиков, обеспечивает точность на 20%-40% ниже потенциально достижимой, обусловленной дискретностью регулярной сетки опорных передатчиков.

2. Разработанные упрощенные методы определения местоположения пользователя внутри помещения с развернутой OFDM-системой беспроводного доступа в Интернет, основанные на оценивании параметров в законе затухания сигнала и не предполагающие формирование базы данных, обладают меньшей точностью, чем точность метода на основе функции

частотной когерентности. Однако они значительно удобнее и проще при практическом использовании.

3. Результаты исследования средней пропускной способности системы мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой на базовой станции показали, что при максимальном числе обслуживаемых пользователей в сети пропускная способность предложенной системы связи на 15%-20% выше, чем пропускная способность системы связи с секторной антенной на базовой станции, наиболее популярной в настоящее время.

4. Разработанный метод определения местоположения пользователя с помощью трех базовых станций OFDM-системы мобильной связи с частотно-сканирующими антенными решетками в многолучевом канале с угловой дисперсией, основанный на оценивании частоты максимума в спектре принимаемого сигнала на каждой базовой станции, построении пеленгационного треугольника и нахождении координат точки пересечения его биссектрис, обладает точностью на 20%-40% выше, чем существующие на сегодняшний день требования по точности определения местоположения со стороны гражданских и специальных служб.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, В.Ю. Семенов / Пропускная способность широкополосной системы сотовой связи, использующей антенную решетку с частотным сканированием на базовой станции // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 2010 г. №4. С. 54-61.

2. И.М. Аверин, В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флакман / Определение местоположения пользователя в системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой на базовой станции // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 2011 г. №3(1). С. 65-71.

3. И.М. Аверин, В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, В.Ю. Семенов / Определение местоположения пользователя в Wi-Fi сети // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 2011 г. №5(3). С. 249-256.

4. В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.Е. Рубцов, С.А. Тираспольский, В.Ю. Семенов, М.А. Соколов / Применение технологии ММО в широкополосных системах беспроводной связи миллиметрового диапазона волн // Известия высших учебных заведения. Радиоэлектроника. Киев: Изд. Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», 2011 г. Т. 4. С. 55-64.

5. В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, В.Ю. Семенов / Пропускная способность системы мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой в пространственном канале с угловой дисперсией // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. С.-Петербург. Изд. СПбГУЭТУ «ЛЭТИ», 2011 г. Вып. 2. С. 41-50.

6. А.Г. Флакман, А.М. Зуев, В.Ю. Семенов / Точные выражения для вероятности битовой ошибки в ММО-системах с двумя собственными подканалами // Труды (двенадцатой) научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения М.М. Кобрин. Нижний Новгород, 2008 г. С. 156-158.

7. В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, В.Ю. Семенов / Эффективность антенн с частотным сканированием в системах беспроводной связи // Труды (тринадцатой) научной конференции по радиофизике, посвященной 85-летию со дня рождения М.А.Миллера. Нижний Новгород, 2009 г. С. 133-134.

8. В.Ю. Семенов / Пропускная способность широкополосной системы сотовой связи на основе антенной решетки с частотным сканированием в многолучевом канале // Труды двенадцатой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA'2010» Москва, 2010 г. С. 165-268.

9. В.Ю. Семенов / Аналитические выражения для вероятности битовой ошибки и пропускной способности в системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой для пространственного канала с угловой дисперсией сигнала// Труды конференции «Международная научно-техническая конференция по интеллектуальным системам AIS'10». Геленджик-Дивноморское, 2010 г. С. 318-324.

10. В.Ю. Семенов / Вероятность битовой ошибки и пропускная способность в системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой для пространственного канала с угловой дисперсией сигнала // Труды «15-ой Нижегородской сессии молодых ученых (естественные науки)». Нижний Новгород, 2010 г. С. 85-86.

11. В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, В.Ю. Семенов / Пропускная способность системы беспроводной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой // Труды (четырнадцатой) научной конференции по радиофизике, посвященной 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н. Бабанова. Нижний Новгород, 2010 г. С. 236-238.

12. И.М. Аверин, В.Ю. Семенов / Позиционирование пользователей с использованием инфраструктуры локальных беспроводных сетей // Труды IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 2010. С. 474-479.

13. В.Ю. Семенов, И.М. Аверин / Определение местоположения пользователя внутри помещения с развернутой Wi-Fi сетью // Труды тринадцатой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA'2011». Москва, 2011 г. С. 238-242.

14. В.Ю. Семенов / Определение местоположения объекта внутри помещения с развернутой сетью беспроводного Интернета // Труды «16-ой Нижегородской сессии молодых ученых (естественные науки)». Нижний Новгород, 2011 г. С. 65-68.

15. В.Ю. Семенов / Определение местоположения пользователя в системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой на базовой станции в условиях многолучевого радиоканала // Труды

(пятнадцатой) научной конференции по радиофизике, посвященной 110-й годовщине со дня рождения А.А. Андропова. Нижний Новгород, 2011 г. С. 174-175.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

ГЛАВА I. Определение местоположения пользователя внутри помещения с использованием инфраструктуры сетей беспроводного Интернета (Wi-Fi сети)

- 1.1. Метод, основанный на функции частотной когерентности передаточной характеристики канала
 - 1.1.1. Функция частотной когерентности
 - 1.1.2. Метод определения местоположения пользователя
 - 1.1.3. Результаты моделирования для прямоугольной однородной комнаты
- 1.2. Упрощенные методы определения местоположения
 - 1.2.1. Методы позиционирования
 - 1.2.2. Результаты моделирования для прямоугольной однородной комнаты
- 1.3. Эффективность методов определения местоположения пользователя в «реальных» помещениях
 - 1.3.1. Рассмотренные топологии помещений
 - 1.3.2. Метод на основе функции частотной когерентности
 - 1.3.3. Упрощенные методы
- 1.4. Заключение по первой главе

ГЛАВА II. Основные характеристики системы мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой на базовой станции

- 2.1. Обработка сигналов в системе мобильной связи
 - 2.1.1. Пространственное разделение пользователей
 - 2.1.2. Параметры антенной решетки с частотным сканированием
 - 2.1.3. Выходной сигнал антенной решетки для разных моделей угловой дисперсии канала
- 2.2. Аналитические выражения для основных характеристик системы
 - 2.2.1. Отношение сигнал-шум
 - 2.2.2. Вероятность битовой и пакетной ошибки
 - 2.2.3. Пропускная способность
- 2.3. Сравнительный анализ с системами на основе других типов антенн
 - 2.3.1. Система с секторной антенной
 - 2.3.2. Система с многолучевой антенной решетки
 - 2.3.3. MIMO-система с обратной связью
- 2.4. Заключение по второй главе

ГЛАВА III. Определение местоположения пользователя в системе мобильной связи с частотно-сканирующими антенными решетками на базовых станциях

- 3.1 Методы определения местоположения пользователя
- 3.2 Плотность вероятности отношения сигнал-шум и угловой дисперсии сигнала на базовых станциях
- 3.3 Интегральные функции распределения ошибки позиционирования
 - 3.3.1 Гауссова модель многолучевого канала
 - 3.3.2 3GPP модель многолучевого канала
- 3.4 Заключение по третьей главе

Заключение

Список литературы

Список сокращений