

1534/315

На правах рукописи

Бижан Арабязди

УДК 621.376

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ
ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛИНИЯХ СВЯЗИ С
НИЗКООРБИТАЛЬНЫМИ ИСЗ**

Специальность 05.12.21 – Радиотехнические системы специального
назначения, включая технику СВЧ и технологию их производства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва – 1997

Работа выполнена в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Розанов Б.А.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Пираманов А.А.

–Кандидат технических
наук С.Н.С. Несвит Н.Н.

Ведущая организация Московский НИИ радиосвязи

Защита состоится " 11 июня " 1997г. В _____ час. _____ мин.
на заседании диссертационного совета К 053.15.02 в Московском
государственном техническом университете.

Адрес

МГТУ.

С д

МГТУ.

Ученый
кандидат

1554 315





1554315

Арабязди Б. Анализ и синте

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность темы. Сегодня нет ни одного аспекта человеческой деятельности, который не был бы связан с использованием различных средств телекоммуникаций. Требования современной жизни приводят к тому, что в силу своих профессиональных и персональных задач человек постоянно вынужден перемещаться в пределах населенного пункта, региона, страны или всего Земного шара. Следовательно, возрастают потребности в обеспечении мобильного абонента средствами персональной связи, которые можно использовать немедленно и независимо от местоположения абонентов.

Современное состояние развития систем спутниковой связи (ССС) характеризуется все более широким использованием сотовых принципов, которые позволяют создавать глобальные сети персональной связи, обеспечивающие высокое качество и надежность передачи сообщений. Чтобы создать глобальную зону обслуживания, покрывающую даже малонаселенные районы, целесообразно использовать средства спутниковой связи с низкоорбитальными НО ИСЗ.

В Исламской республике Иран ведутся работы по созданию низкоорбитальной СССР, работающей как в режиме "электронной почты" (отправитель и получатель могут не находиться в зоне радиовидимости одного ИСЗ), так и в режиме передачи в реальном масштабе времени (отправитель и получатель находятся в зоне радиовидимости одного ИСЗ).

В силу специфических требований к аппаратуре потребителей (портативные переносные наземные терминалы с антеннами, имеющими диаграммы направленности в пределах всей верхней полусферы) и сложных условий эксплуатации (горная и сильно пересеченная местность), приводящих к появлению в точке приема кроме прямого луча еще и отраженных и возникновению вследствие этого интерференционных замираний сигнала,

1554315

оказывается целесообразным применение в подобных ССС широкополосных сигналов с большим значением произведения полосы F на длительность T ($FT = B \gg 1$, где B - база сигнала). К таким сигналам относятся шумоподобные сигналы (ШПС), представляющие собой несущую, модулированную по фазе на $\pm 90^\circ$ по закону псевдослучайной кодовой последовательности (ПСП).

Приемник ШПС включает в себя как звено установления и поддержания синхронизма местного опорного сигнала и принимаемого ШПС -переносчика сообщения, так и звено обработки принятого ШПС и выделения из него информации. Работа приемника происходит в условиях не только неопределенности по времени прихода сигнала, но и доплеровского сдвига по частоте. Кроме того, наличие многолучевого распространения сигнала в радиоканале ССС требует применения методов разнесенного приема для повышения достоверности передачи сообщений.

Таким образом актуальным является поиск оптимальных путей построения устройств обработки ШПС в приемниках низкоорбитальной системы спутниковой связи с шумоподобными сигналами, работающей в условиях многолучевого распространения и доплеровского сдвига частот. Качество работы приемника зависит от последовательностей, используемых для непосредственной модуляции несущей, числа мешающих сигналов, относительных уровней мощности последних и от реализуемого метода обработки в приемнике.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является исследование характеристик приема ШПС в спутниковой радиолинии связи с использованием НО ИСЗ при замираниях и затенениях сигналов, а также оценка помехоустойчивости системы для разных вариантов трассы распространения и внутрисистемных помехах, соответствующих условиям работы системы IRSATCOM. На основе предложенной математической

имитационной модели канала получены результаты, дающие возможность синтезировать приемники ШПС, обеспечивающие высокую помехоустойчивость наряду с достаточной простотой их реализации.

Для исследования основных характеристик спутниковых систем связи с ШПС на базе НО ИСЗ при замираниях и затенениях, а также методов обработки сигналов в диссертационной работе рассмотрены следующие вопросы:

- анализ характеристик каналов с многолучевым распространением и затенением сигналов и внутрисистемной помехой;

- построение модели канала и оценка помехоустойчивости приемника ШПС, реализующего принцип разделения сигналов отдельных лучей и их комбинирование при замираниях и затенениях сигналов;

- сравнительный анализ помехоустойчивости систем связи с узкополосными и широкополосными сигналами при их замираниях и затенениях;

- анализ помехоустойчивости разнесенного приема ШПС в канале с комплексом помех методами имитационного моделирования.

Методы исследований. При решении поставленных задач использован аппарат математического анализа, теории вероятностей и случайных процессов, вычислительной математики и программирования. Основные теоретические результаты проверены путем статистического имитационного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты, выносимые на защиту.

Проведен анализ оптимального приема ШПС методами математического и имитационного моделирования для спутниковой системы связи на базе НО ИСЗ. Для различных методов приема при замираниях и затенениях сигналов, а также внутрисистемных помехах разработаны модели с целью оценки помехоустойчивости и сравнения характеристик приемников. В случае малого

числа абонентов (или числа лучей) предложенная имитационная модель позволяет произвести более точную оценку вероятности ошибки.

Показано, что при сильных затенениях сигналов просто использование ШПС не даст выигрыша, и для повышения помехоустойчивости необходимо применять разнесенный прием или помехоустойчивое кодирование.

Практическая ценность работы. Разработаны программы моделирования для вычисления вероятности ошибки приема ШПС при различных характеристиках трассы распространения радиоволн и негауссовских внутрисистемных помехах.

Проведена оптимизация приемника ШПС для различных вариантов разнесения сигналов при затенениях и замираниях на трассе распространения.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты исследований использованы при разработке пилот-проекта по CCC IRSATCOM.

Апробация результатов. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: VI научно-практической конференции московского НТОРЭС имени А.С. Попова «ОТИЧЕСКИЕ, СОТОВЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ» (г. Псков, 1995 г.), международном форуме информатизации МФИ-95 (г. Москва, 1995 г.), научно-технической конференции МГТУ имени Н.Э. Баумана (г. Москва, 1996 г.), международном форуме информатизации МФИ-96 (г. Москва, 1996 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи в журнале ВЕСТНИК МГТУ имени Н.Э. Баумана (Серия Приборостроение, № 4, 1995 и

№ 4, 1996 г.). Результаты работы отражены в тезисах докладов автора на перечисленных выше конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Она изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 36 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 96 названий. В приложении приведены программы моделирования, написанные на языке ТУРБО ПАСКАЛЬ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых в диссертационной работе вопросов, указывается цель и направление исследований, определяется общий подход к рассматриваемым задачам обработки сигналов, обосновывается преимущество выбранного подхода.

В первой главе выполнен обзор литературы по основным направлениям исследования, дается общая характеристика системы связи на низкоорбитальных искусственных спутниках Земли IRSATCOM. Приводятся параметры орбит и особенности канала связи в этой системе.

Во второй главе проводится оценка помехоустойчивости системы спутниковой связи с НО ИСЗ. Описываются различные методы разнесенного приема в системе связи с шумоподобными сигналами. Проводится сравнительный анализ методов разнесения в условиях замираний сигналов и затенения трассы распространения для случаев узкополосных и широкополосных сигналов. Из возможных методов разнесенного приема рассматриваются два наиболее просто реализуемых: схема с перескочками

приемников отдельных ветвей разнесения и двух антенн и схема с линейным объединением ветвей.

При отсутствии основного луча закон распределения огибающей сигнала приближается к закону Рэлея. В данном случае фаза сигнала любого луча полагается случайной и равномерно распределенной на интервале $[0, 2\pi)$. Если на длительности двух последовательно переданных посылок фазы сигналов лучей существенно не изменяются, то для передачи сообщений применяют относительную фазовую модуляцию (ОФМ).

При одновременной работе многих абонентов в общей полосе частот (многостанционный доступ с кодовым разделением) и использовании ШПС сигнал на входе приемника может быть представлен как :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M A\beta_{km} a_k(t - \tau_{km}) b_k(t - \tau_{km}) \cos[\omega_c t + \varphi_{km}] + n(t) \quad (1)$$

$$= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M A\beta_{km} a_k(t - \tau_{km}) b_k(t - \tau_{km}) \cos[\omega_c t + \varphi_{km}] + \\ + n_c(t) \cos(\omega_c t) - n_s(t) \sin(\omega_c t),$$

где m – номер луча, k – номер абонента, M – число лучей, K – число абонентов, A – постоянная амплитуда переданного сигнала, $\{a_k\}$ – код псевдослучайной последовательности, $\{b_k\}$ – последовательность передаваемых символов сообщения, ω_c – частота несущей, φ_{km} – фаза несущей, $n(t)$ – аддитивный узкополосный гауссовский процесс ($n_c(t)$, $n_s(t)$ представляют собой медленно меняющиеся случайные функции (относительно f_c) с низкочастотным спектром и мощностями $\overline{n_c^2(t)} = \overline{n_s^2(t)} = \overline{n^2(t)} = N$).

Таким образом, решающая статистика для одной ветви может быть представлена как:

$$\xi = \operatorname{Re} [Z_1 Z_2^*], \quad (2)$$

где $*$ – символ комплексной сопряженности, Z_1, Z_2 – сигнал на входе решающего устройства.

При использовании метода автовыбора лучшей ветви решающая статистика

$$\xi = \max_{i=1, \dots, M} (\xi_i), \quad (3)$$

где ξ_i , $i=1, 2, \dots, M$, являются независимыми случайными величинами, определяемыми выражением (2).

При использовании метода с линейным сложением ветвей решающая статистика

$$\xi = \sum_{i=1}^M \xi_i. \quad (4)$$

При равной вероятности появления информационных символов " +1 " и " -1 " вероятность ошибки P_e может быть представлена как :

$$P_e = P(\xi < 0 | b_1^0 b_1^{-1} = 1) = P(\xi > 0 | b_1^0 b_1^{-1} = -1). \quad (5)$$

Чтобы проследить зависимость помехоустойчивости разнесенного приема от отношения сигнал-шум в отдельной ветви, а также от числа ветвей разнесения (кратности разнесения), построены графики функций $P_e = f(E_b/N_0)$ для одиночного приема ($M=1$) в гауссовском (идеальном) и рэлеевском каналах и для разнесенного приема с автовыбором и линейным объединением ветвей. Сравнение их показывает, что метод с линейным объединением ветвей оказывается более эффективным, так при $E_b/N_0=30$ дБ автовыбор даст в 100 раз

больший уровень "неустраняемых" ошибок, чем линейное сложение ветвей при одинаковом числе ветвей разнесения $M=8$. Заметим, что "неустраняемые" ошибки в данном случае обусловлены действием внутрисистемной помехи.

Далее в главе рассматривается помехоустойчивость ССС с НО ИСЗ с учетом реальных особенностей канала связи. При этом предполагается, что условия распространения в спутниковом канале таковы, что компонента сигнала, связанная с распространением в пределах прямой видимости, всегда присутствует в точке приема (сигнал прямого луча). Прямой луч подвергается затенениям (ослабления в листве, закрытие трассы распространения домами эстакадами и т.п.). Степень затенения определяется следующим образом:

–затенения считают слабыми, если интенсивность прямого луча существенно больше интенсивности переотраженных лучей,

–затенения считают сильными, если интенсивность прямого луча значительно меньше интенсивности переотраженных лучей,

–затенения считают умеренными, если интенсивность прямого и переотраженного лучей практически одинаковы.

Интенсивность сигнала прямого луча описывается логнормальным законом распределения. Кроме сигнала прямого луча на входе приемника наблюдается переотраженная многолучевая компонента. Она является суммой сигналов от большого числа отдельных рассеивателей вокруг наземной абонентской станции. Полагая, что сигналы от всех точечных источников рассеяния имеют одинаковые амплитудные распределения и равномерно распределенные фазы, можно показать, что амплитуда многолучевой компоненты будет описываться распределением Рэлея. Эти предположения используются при построении математической модели канала.

Сигнал на входе приемника будет иметь следующий вид :

$$U(t) = r \exp(j\varphi) + n(t) = z \exp(j\varphi_0) + w \exp(j\theta) + n(t), \quad z, w \geq 0, \quad (6)$$

где z, w, ϕ, θ , – случайные величины, имеющие распределения логнормальное, рэлеевское, гауссовское и равномерное соответственно, $n(t)$ – аддитивный гауссовский шум с двухсторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$.

Плотность вероятности огибающей принимаемого сигнала

$$p(r) = r / (b_0 \sqrt{2\pi d_0}) \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp \left[-(\ln z - \mu_0)^2 / 2d_0 - (r^2 - z^2) / 2b_0 \right] I_0(rz/b_0) dz, \quad (7)$$

где b_0 – средняя мощность переотраженного многолучевого сигнала (рассеянной составляющей), $I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $\sqrt{d_0}$ и μ_0 – соответственно среднеквадратичное отклонение и среднее значение интенсивности прямого луча.

При слабом и умеренном затенении наибольшая доля мощности принимаемого сигнала приходится на прямой луч, а меньшая доля – на переотраженные. При сильном затенении основной луч ослабляется, а влияние переотраженных усиливается. Если в системе с ШПС для приема используется только основной луч, то ее эффективность снижается и оказывается даже меньше эффективности системы с узкополосным сигналом. Поэтому в канале с сильным затенением для увеличения помехоустойчивости системы связи с ШПС необходимо использовать методы разнесенного приема.

В случае сильного затенения, когда прямой сигнал слабый, из-за внутрисистемной помехи от большого числа абонентов велик уровень “неустраняемых” ошибок. Разнесение позволяет снизить уровень этих ошибок от 5×10^{-2} до 5×10^{-6} (при использовании комбинирования, максимизирующего отношения сигнал-шум, и числе ветвей разнесения $M=8$).

Третья глава посвящена имитационному моделированию при замираниях и затенениях сигналов с использованием результатов экспериментальных исследований характеристик канала спутниковой связи с **НО ИСЗ**.

Разработана имитационная модель системы. Ее применение особенно целесообразно, когда число пользователей K или число лучей M невелико. При

этом внутрисистемные помехи не подчиняются гауссовскому закону распределения. В данном случае имитационная модель даст более правильную оценку помехоустойчивости системы связи.

На рис. 1. изображен общий вид схемы имитационной модели. Если в приемнике оказывается возможным точно отслеживать фазу сигнала первого луча, то необходимо учитывать лишь влияние замираний огибающей сигнала, что и предусмотрено в имитационной модели.

Формируемый на передающей стороне сигнал на входе канала разделяется на несколько ветвей, каждая из которых имеет свой коэффициент усиления β_{mk} и задержку τ_{mk} (рис. 2.). Поскольку синхронизация производится по основному лучу, то можно не учитывать задержку в соответствующей ветви. После сложения лучей добавляется аддитивный гауссовский шум. Коэффициенты β_{11} , β_{mk} - случайные величины, имеющие логнормальный и рэлеевский законы распределения соответственно, τ_{mk} - задержка m -го луча k -го абонента, $m, k \neq 1$.

На рис.3. приведены значения вероятности ошибки с учетом только замираний огибающей и соответствующие слабому, среднему и сильному затенению. Значения системных параметров полагались следующими: $T_c=0.1$ мкс (T_c - длительность элемента ПСП), длина кода Голда $L=4095$, $1/T_c=2400$ бит/с. На рисунке использованы следующие обозначения: сплошные линии - расчетные кривые, точки соответствуют имитационному моделированию для случаев различной степени затенения: $\circ$ - слабое затенение, $\square$ - среднее затенение, Δ - сильное затенение. Как видно из рисунка хорошо совпадают с аналитическими результаты имитационного моделирования.

Из результатов математического и имитационного моделирования следует, что при сильных затенениях сигналов вероятность ошибки даже в случае ШПС сильно возрастает. Для того чтобы улучшить характеристики системы, следует применять разнесенный прием, который позволяет существенно повысить помехоустойчивости системы связи с НЧ ИСЗ. Так использование

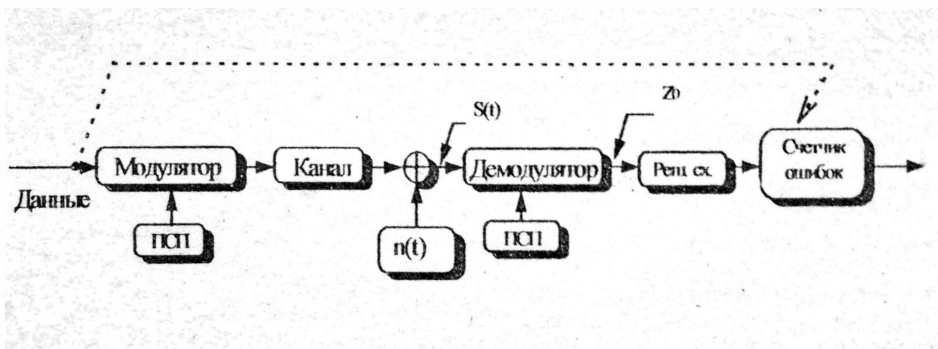


Рис. 1. Модель системы связи с ПО ИСЗ

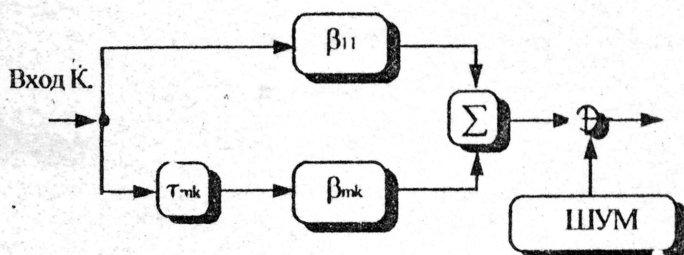


Рис. 2. Модель канала

комбинирования, максимизирующее отношение сигнал-шум в условиях умеренного затенения при вероятности ошибки $P_e=10^{-4}$ и восьми ветвях разнесения дает выигрыш около 5 дБ по сравнению с одиночным приемом. Кроме того при этом вероятность неустранимых ошибок снижается с 6×10^{-5} ($M_d=1$) до 10^{-6} ($M_d=8$). В случае сильного затенения комбинирование, максимизирующее отношение сигнал-шум, при наличии 8 ветвей разнесения позволяет снизить вероятность неустранимых ошибок с 8×10^{-2} ($M_d=1$) до 8×10^{-6} ($M_d=8$). Автовыбор при любых условиях распространения обеспечивает худшие качественные показатели, чем комбинирование, максимизирующее отношение сигнал-шум. Так в случае сильного затенения при восьми ветвях разнесения автовыбор даст вероятность неустранимых ошибок в 10 раз большую чем комбинирование, максимизирующее отношение сигнал-шум.

На рис. 4. приведены зависимости $P_e=f(E_b/N_0)$ для случаев малого числа абонентов ($K=1$, $K=2$) и для числа лучей $M=2$ при среднем затенении, полученные путем имитационного моделирования, а также зависимость $P_e=f(E_b/N_0)$, полученная при использовании математической модели, основанной на гауссовской аппроксимации внутрисистемной помехи. Из приведенных графических зависимостей следует, что при $E_b/N_0 < 10$ расчетные результаты и результаты моделирования практически совпадают. При больших значениях отношения E_b/N_0 расчет вероятности ошибки при использовании гауссовской аппроксимации приводит к погрешности, причем с увеличением E_b/N_0 точность расчета ухудшается.

В заключении отражены основные результаты диссертационной работы.

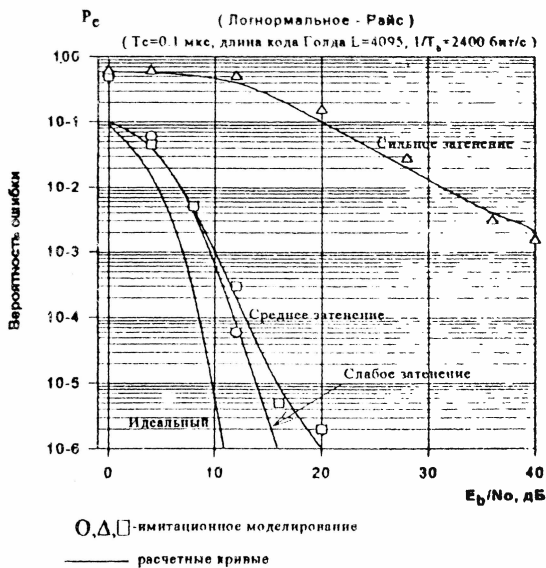


Рис. 3. Сравнение результатов имитационного моделирования с аналитическими

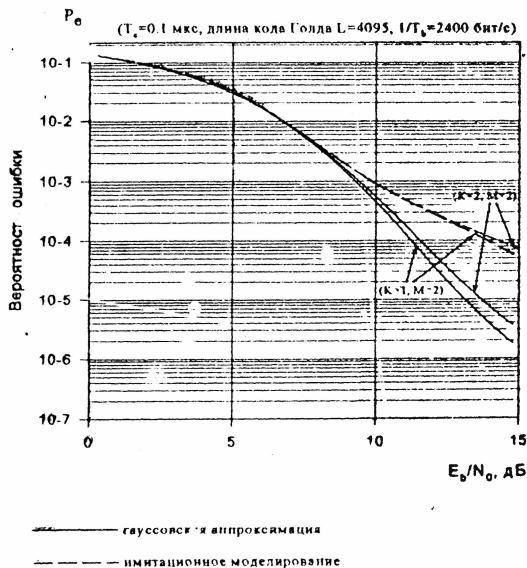


Рис. 4. Вероятность ошибки приема ППС при среднем затенении и малом числе элементов K

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проведено исследование характеристик спутниковой радиолинии связи с наземными объектами с использованием низкоорбитальных искусственных спутников Земли (НО ИСЗ).

В такой системе связи для передачи информации применяются широкополосные шумоподобные сигналы—ШПС. Система реализует многостанционный доступ с кодовым разделением (МДКР) абонентов. На выходе канала связи присутствует прямой луч с логнормальным законом распределения интенсивности и многолучевая компонента с рэлеевским законом распределения. Сигнал прямого луча может быть значительно ослаблен из-за затенения трассы распространения местными предметами (деревья, эстакады, здания и т. п.).

В работе получены аналитические соотношения, позволяющие оценить помехоустойчивость радиолинии связи с НО ИСЗ, использующей ШПС, в условиях, наиболее характерных для ее работы: затенения трассы, замирания сигнала, внутрисистемная помеха при МДКР.

Рассмотрены случаи обработки ШПС в указанных условиях приемниками без разнесения и при различных вариантах разнесения (линейное сложение, автовыбор).

Разработана имитационная модель системы связи с НО ИСЗ, позволяющая оценить ее помехоустойчивость при малом числе одновременно работающих абонентов и малом числе лучей.

На ее основе с использованием результатов экспериментальных исследований характеристик канала спутниковой связи с НО ИСЗ проведено имитационное моделирование при затенениях и замираниях сигнала в радиолинии.

Результаты имитационного моделирования показывают, что при большом числе абонентов и большом числе лучей результаты расчетов вероятности ошибки при гауссовской аппроксимации внутрисистемной помехи и результаты имитационного моделирования хорошо согласуются во всем диапазоне значений отношения E_b/N_0 , встречающихся в системах передачи информации. При малом числе одновременно работающих абонентов и малом числе лучей совпадение результатов наблюдается при $E_b/N_0 < 10$ дБ. При больших значениях E_b/N_0 результаты расчетов при использовании гауссовской аппроксимации внутрисистемной помехи оказываются недостаточно точными, причем с увеличением отношения E_b/N_0 погрешность определения вероятности ошибки возрастает. В этих условиях имитационное моделирование позволяет получить более достоверную оценку вероятности ошибки.

Проведенный анализ методов приема ШПС в системах связи с НО ИСЗ приводит к выбору приемного устройства, реализующего принцип разнесения сигналов отдельных лучей и их комбинирования для дальнейшей совместной обработки. При этом выигрыш от применения разнесенного приема возрастает с увеличением степени затенения. Конкретный вариант метода разнесения выбирают как с учетом требований обеспечения необходимой достоверности, так и ограничений, связанных с построением приемника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Арабязди Б. Моделирование процедуры обработки шумоподобных сигналов для систем связи через низколетящие ИСЗ // Сборник тезисов VI Научно-практической конференции "Оптические, сотовые и спутниковые сети и системы связи". — Псков, 1996. — С. 72.
2. Арабязди Б. Моделирование приемника шумоподобных сигналов

- // Сборник тезисов международного форума информатизации МФИ-95.
–М., 1995. –С. 145.
3. Васин В.А., Арабязди Б. Моделирование процедуры поиска шумоподобных сигналов в спутниковых системах связи и навигации // Вестник МГТУ. Приборостроение. –1995. – №4. –С. 50–59.
 4. Арабязди Б. Моделирование системы спутниковой подвижной связи при замираниях и затенениях сигналов // Вестник, МГТУ. Приборостроение. –1996. –№4. –С. 88-95.
 5. Арабязди Б. Моделирование системы спутниковой подвижной связи // Сборник тезисов международного форума информатизации МФИ-96. –М., 1996. –С. 180.
 6. Арабязди Б. Васин В.А. Поиск шумоподобных сигналов в спутниковых системах связи и навигации // Тезисы докладов научно–технической конференции МГТУ. –М., 1995. –С. 67.

Подписано к печати 13.05.97 г. Зак. 125 объем 1,0 п.л. Тир. 100

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.