

На правах рукописи



Аль Тахар Инас Ануар

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ
В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ
РАЗНЕСЕНИЕМ**

Специальность: 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Владимир – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" - (ВлГУ) на кафедре радиотехники и радиосистем.

Научный руководитель:	Самойлов Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиотехники и радиосистем ВлГУ, г. Владимир
Официальные оппоненты:	Бабанов Николай Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроника и сети ЭВМ» Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород. Зеленов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, руководитель сектора ОАО «Владимирское КБ радиосвязи, г. Владимир
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород.

Защита состоится 27 мая 2022 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 53 42328, E-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан 25 марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Отражения и рассеяние радиоволн на неоднородностях, встречающихся на линии радиосвязи, приводят к многолучевости и к интерференционным замираниям принимаемых радиосигналов. Одним из основных методов борьбы с замираниями сигналов стал разнесенный прием и развившиеся на его основе разнородное семейство методов пространственно-временного кодирования (Space-Time Coding – STC) сигналов. Применение нескольких антенн не только на приемной, а и на передающей стороне линии связи выделило методы пространственного кодирования сигналов, названные ММО (Multiple Input Multiple Output). Эти методы позволили расширить полосу пропускания радиоканала и существенно снизить вероятность ошибки.

В результате использования методов разнесения на приемники линии связи с ММО приходят сигналы в разной степени, пораженные некоррелированными замираниями и шумами. На приемной стороне таких линий связи устройства обработки должны выделять из совокупности принятых сигналов полезный сигнал с минимальной вероятностью ошибки. В Ираке большинство радиорелейных линий связи используют разнесенный прием. Однако применяемые методы обработки принимаемых сигналов справляются с этой задачей не всегда отлично, что подтверждается претензиями абонентов к операторам связи. Наблюдается противоречие между техническими возможностями методов ММО и достигаемым в настоящее время качеством обработки разнесенных сигналов. Это противоречие и определило задачи настоящего исследования, направленного на изучение причин противоречия и разработку новых методов обработки разнесенных сигналов.

Степень разработанности темы. В области обработки совокупностей радиосигналов с некоррелированными, либо слабо коррелированными искажениями и шумами на первый взгляд сделано все возможное. Известно большое количество работ отечественных и зарубежных ученых еще в прошлом веке решавших задачи сложения разнесенных и параллельных сигналов: Финк Л.М., Андронов И.С., Хворостенко Н.П., Немировский А.С., Быховский М.А., Смирнов А.А., Полушин П.А., Самойлов А.Г., Turin G.L., Bello P., Pierce J, Voelker H.B., Lindsey W.C., Brennan L.E., Alamouti S.M. и другие. Однако основанное на экспериментальных исследованиях многолучевых радиоканалов описание

замираний сигналов многопараметрическими законами распределения вероятностей дают дополнительные возможности повышения качества приема цифровой информации по многолучевым радиоканалам. Это и определяет цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов и реализующих их алгоритмов обработки принимаемых многолучевых сигналов для повышения помехоустойчивости систем связи, использующих технологии ММО.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поочередно решаются следующие задачи:

- Анализ методов пространственно-временной обработки сигналов в радиоканалах с многолучевостью и замираниями.
- Анализ алгоритмов объединения разнесенных сигналов на приемной стороне.
- Разработка методов и реализующих их алгоритмов обработки сигналов на приемной стороне линии связи с технологией ММО.
- Разработка модели обработки сигналов, принимаемых системой радиосвязи с технологией ММО.
- Экспериментальное исследование помехоустойчивости известных и предложенных методов объединения разнесенных сигналов систем связи с технологией ММО.

Объект диссертационного исследования. Объектом исследования являются линии радиосвязи, использующие разнесенный прием и технологии ММО.

Предмет исследования. Предметом исследования являются алгоритмы и методы объединения сигналов, принимаемых системой радиосвязи с технологией ММО.

Научная новизна достигнутых результатов состоит в следующем:

1. Обоснована необходимость использования многопараметрических законов распределения вероятностей при описании интерференционных замираний, возникающих при приеме сигналов в системах ММО.
2. Предложена методика оценки вероятности срывов связи в радиоканале одного приемного устройства при достаточно общей четырехпараметрической модели замираний.
3. Разработана модель и реализующая ее программа для сравнения методов сложения разнесенных сигналов ММО.

4. Предложена и исследована новая методика субоптимального сложения разнесенных сигналов.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан метод субоптимального сложения сигналов ММО, всегда обеспечивающий выигрыш по отношению сигнал/шум по сравнению с известными методами.
2. Алгоритм субоптимального сложения сигналов обеспечивает уменьшение вероятности ошибки не менее чем в 10 раз при двух каналах разнесения ММО.
3. Для разработчиков линий связи с многолучевыми радиоканалами предложены рекомендации по необходимости добавления запаса энергопотенциала для противодействия глубоким многопараметрическим интерференционным замираниям.
4. Результаты работы практически использованы при разработке радиорелейных линий связи "Иракской службой по метеорологии и сейсмологии".

Методологические и теоретические основы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории радиосвязи, теории передачи дискретных сообщений, теории вероятностей и математической статистики, интегрального исчисления и эмпирические методы имитационного моделирования. Имитационное моделирование выполнялось как с помощью МАТЛАБ, так и языка программирования С++.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Интерференционные замирания в радиоканалах с ММО бывают более глубокие, чем при описании их релеевским распределением вероятностей, что требует увеличения бюджета энергопотенциала (в зависимости от требований к каналу до 2 дБ) при расчетах линий связи, работающих в многолучевых радиоканалах.
2. Предложенный субоптимальный метод обработки разнесенных сигналов дает выигрыш до 1дБ по отношению сигнал/шум по сравнению с линейным методом сложения и автовыбором.

Степень достоверности и апробация полученных результатов.

Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами имитационного моделирования, публикациями результатов в известных рецензируемых журналах, а также обсуждением их на конференциях и семинарах. Достоверность подтверждается внедрением результатов работы в Ираке и в России, что отражено соответствующими актами.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии, Владимир; Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, Moscow; Физика, техника и технологии сложных систем, Ярославль; Aerospace-III: Advanced Technologies in Aerospace, Engineering and Automation, Krasnoyarsk; Interference Compensator for Communication Systems with Space-Time Coding, IEEE № 51389 Moscow; Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем, Серпухов; Перспективные технологии в средствах передачи информации, Владимир.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них: 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [1-4], 1 государственная регистрация программы на ЭВМ [19], 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных [5-11], 7 статей - в материалах научных конференций [12-18].

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 12 и 14 паспорта специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты выполненного исследования получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, автор лично ставил и решал задачи, проводил анализ литературы, выполнял имитационное моделирование и обобщал полученные результаты, подготавливал публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка литературы и 6 приложений. Общий объем диссертационной работы 152 страницы, из них основного текста 134 страниц, в том числе рисунков 56, таблиц 7.

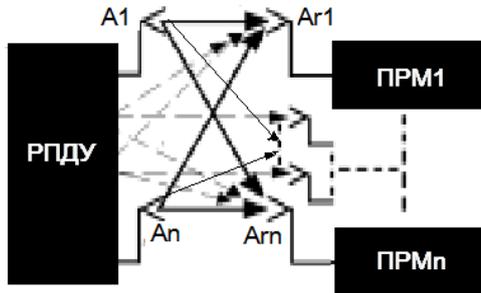
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования с освещением текущего состояния проблемы в области обработки сигналов, прошедших многолучевые радиоканалы, кратко приводится содержание диссертационной работы, представлены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор методов разнесенного приема сигналов в системах радиосвязи, использующих технологию пространственно-временного

кодирования (MIMO). Рассмотрены варианты использования MIMO и практического применения его модификаций - SIMO, MISO, V-BLAST, H-BLAST.

Поставлена цель исследования, заключающаяся в разработке методов и реализующих их алгоритмов обработки принимаемых многолучевых сигналов для



повышения помехоустойчивости систем связи, использующих технологии MIMO. Определены задачи диссертационного исследования.

Результаты первой главы опубликованы в работе [12].

Рис.1. Схема системы связи использующей MIMO.

Во второй главе рассмотрены критерии оценки помехоустойчивости принимаемых системами MIMO сигналов и выполнен анализ известных алгоритмов обработки разнесенных сигналов. Рассмотрены методы комбинирования сигналов при разнесенном приеме и предложен алгоритм для оценки производительности системы связи с MIMO, структура которого показана на рис. 2.

Исследовано применение разнесенного приема для системы связи на основе MIMO в различных вариантах использования методов комбинирования, в том числе и гибридных, для обеспечения высокой помехоустойчивости.

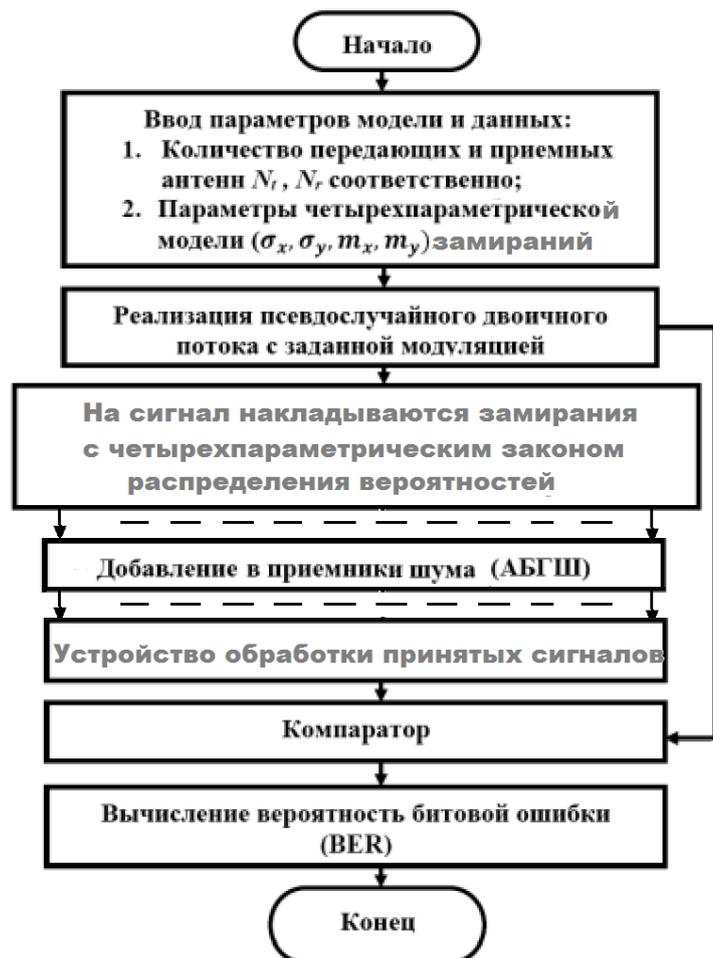


Рис. 2. Алгоритм сравнения помехоустойчивости устройств комбинирования сигналов

В третьей главе исследуется влияние быстрых интерференционных замираний сигналов в многолучевых радиоканалах, на помехоустойчивость

приема по радиоканалам ММО. В работе показано, что наиболее точным описанием интерференционных замираний сигнала является распределение вероятностей, называемое четырехпараметрическим законом распределения замираний, частными случаями которого являются многие другие распределения:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_X \sigma_Y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_X^2 \sigma_Y^2 + m_Y^2 \sigma_X^2}{2\sigma_X^2 \sigma_Y^2}\right) \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} \frac{(2l+2g-1)! (\sigma_Y^2 - \sigma_X^2)^l m_Y^{2g} \sigma_X^{2g}}{l!(2g)! 2^l \sigma_Y^{2l+4g} m_X^{l+g}} \times$$

$$\times H^{l+g} I_{l+g}\left(H \frac{m_X}{\sigma_X}\right); \quad w(\phi) = \frac{\sigma_X \sigma_Y \exp\left(\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right)}{2\pi(\sigma_Y^2 \cos^2 \phi + \sigma_X^2 \sin^2 \phi)} [1 + L[1 + F(\sqrt{2}L)]\sqrt{\pi} \exp(L^2)],$$

где $L = \frac{m_X \sigma_Y^2 \cos \phi + m_Y \sigma_X^2 \sin \phi}{\sigma_X \sigma_Y \sqrt{\sigma_Y^2 \cos^2 \phi + \sigma_X^2 \sin^2 \phi}}$; $I_{l+g}(\cdot)$ - модифицированная функция Бесселя

порядка $l+g$; $m_X, m_Y, \sigma_X, \sigma_Y$ - параметры распределения, H - модуль передаточной функции канала связи; $F(\cdot)$ - интеграл вероятности.

В зависимости от значений параметров распределение (1) вырождается в более простое. Например, при σ_X или σ_Y равных нулю закон распределения вероятностей (1) преобразуется в усеченно-нормальное распределение:

$$w(H) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{X,Y} \sqrt{\pi}}\right) \exp\left(\frac{H^2}{2\sigma_{X,Y}^2}\right). \quad (2)$$

При усеченно-нормальном распределении замираний наблюдаются наиболее глубокие замирания радиосигнала, что приводит к большей вероятности ошибок по сравнению с распределением Релея. На практике при расчетах линий связи запас энергopotенциала выбирают ориентируясь на глубину релейских замираний, что снижает помехоустойчивость системы связи. Поэтому при анализе помехоустойчивости будем ориентироваться на усеченно-нормальное распределение замираний, как на наихудший случай замираний в каналах связи.

При $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma$ в распределение (1) вырождается в распределение Рэлея

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-H^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3)$$

Если $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma$ и $m_Y \neq 0$ уравнение (1) преобразуется в распределение вероятностей Райса:

$$w(H) = \left(\frac{H}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2 + m_X^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(m_X \frac{H}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где: $I_0(\cdot)$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

А при $m_X = m_Y \neq 0$ уравнение (1) вырождается в подрелеевское распределение:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_X \sigma_Y} \exp\left[-\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_X^2} + \frac{1}{\sigma_Y^2}\right)\right] I_0\left[\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_X^2} - \frac{1}{\sigma_Y^2}\right)\right], \quad (5)$$

Разработан алгоритм моделирования замираний с четырехпараметрическим законом распределения вероятностей, показанный на рис. 3,

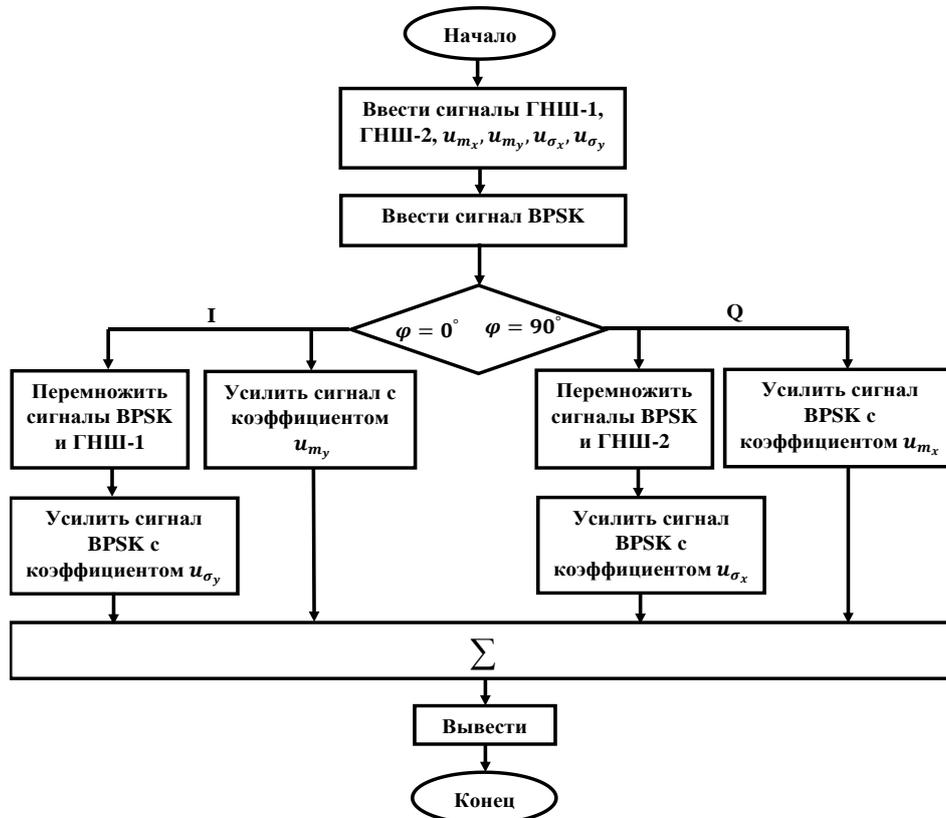


Рисунок 3. Алгоритм работы имитатора замираний системы связи с BPSK.

Кроме того, разработана программа для моделирования алгоритма MIMO, основанного на пространственно-временной обработке сигналов при использовании техники кодирования Аламути при различных видах модуляции (2-BPSK, 4-QAM, 16-QAM). На рисунке 4 показаны результаты моделирования алгоритма. Значения вероятности ошибки для всех видов модуляции при соотношении сигнал/шум (SNR) 6 и 10 дБ для систем MISO и MIMO, при которых получены графики рисунков, приведены в таблице 1 и 2, соответственно.

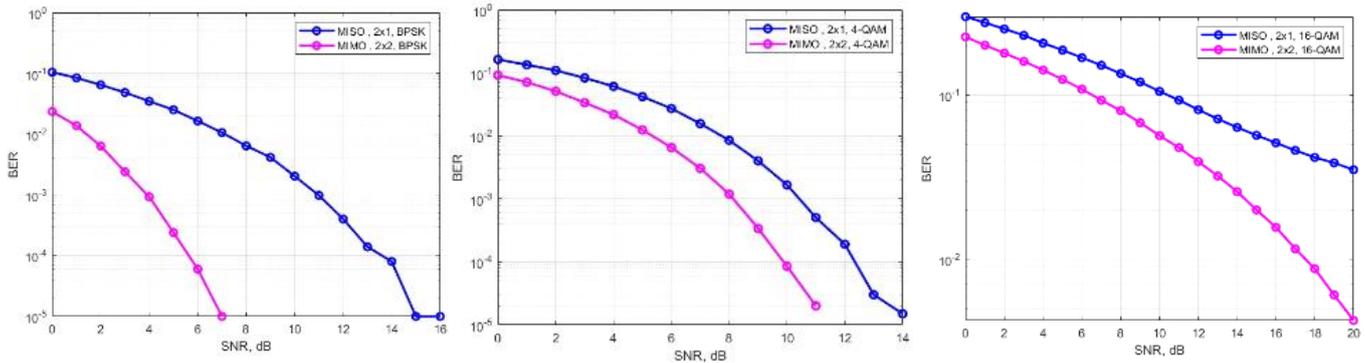


Рисунок 4. Вероятность битовой ошибки систем MISO и MIMO при различных видах модуляции.

Таблица 1. Для MISO

Мод.	SNR	BER	SNR	BER
BPSK	6	$0,5 \cdot 10^{-2}$	10	$1 \cdot 10^{-3}$
4-QAM	6	$2 \cdot 10^{-2}$	10	$1 \cdot 10^{-3}$
16-QAM	6	$5 \cdot 10^{-1}$	10	10^{-1}

Таблица 2. Для MIMO.

Мод.	SNR	BER	SNR	BER
BPSK	6	$5 \cdot 10^{-5}$	10	0
4-QAM	6	$5 \cdot 10^{-3}$	10	$7 \cdot 10^{-5}$
16-QAM	6	10^{-1}	10	$5 \cdot 10^{-2}$

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что как система MISO, так и система MIMO чувствительны к выбранному закону модуляции несущих, а увеличение скорости передачи за счет применения многосекционных видов модуляции приводит к существенному росту битовой ошибки.

В главе также предложены и исследованы известные алгоритмы сложения разнесенных сигналов при четырехпараметрической модели замираний в многолучевых радиоканалах. Наиболее простой алгоритм автовыбора сигнала наименее пораженного замираниями, можно осуществлять по двум критериям: по максимальному уровню сигнала из всех принятых приемниками системы MIMO, и по максимальному значению отношения сигнал/шум в ветвях разнесения. Для

оценки помехоустойчивости связи определим вероятность падения уровня сигнала относительно порогового уровня, зависящего от пороговых свойств приемников в системе ММО. При четырехпараметрической модели быстрых замираний эту вероятность можно определить как

$$P_{Na} = P\{\rho_N < \rho_m\} = \prod_{i=1}^N P\{r_i < \rho_m\} = \rho_m^{2N} \prod_{i=1}^N \frac{\sigma_{\phi i}^2}{\sigma_{x_i} \sigma_{y_i}} \exp\left(-\frac{m_{x_i}^2}{2\sigma_{x_i}^2} - \frac{m_{y_i}^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right) \quad (6)$$

где N – кратность разнесения в системе ММО, ρ_N – отношение сигнал/шум на выходе устройства комбинирования N ветвей; ρ_m – пороговое отношение сигнал/шум приемника; r_i – отношение сигнал/шум; R_i – амплитуда сигнала; $\sigma_{\phi i}$ – средняя мощность аддитивных шумов i -й ветви соответственно, причем

$$r_i = R_i / \sqrt{2\sigma_{\phi i}}. \quad (7)$$

Для определения вероятности срыва связи при выборе по максимальной амплитуде сигнала обозначим

$$K_i = \frac{1}{\sigma_{x_i} \sigma_{y_i}} \exp\left(-\frac{m_{x_i}^2}{2\sigma_{x_i}^2} - \frac{m_{y_i}^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right), \quad (8)$$

$$F_i(R_i) = P\{R_i < R_m\} = \int_0^{R_m} \omega_i(R_i) dR_i = \frac{K_i R_m^2}{2}, \quad (9)$$

$$R_{im} = \sqrt{2} \sigma_{\phi i} \rho_m. \quad (10)$$

Сигнал на выходе каждой антенны системы ММО можно представить в виде совместного распределения плотности вероятности величин R_1, R_2, \dots, R_N

$$W(R_1, \dots, R_N) = \prod_{i=1}^N \omega_i(R_i) = \prod_{i=1}^N K_i R_i, \quad (11)$$

поскольку R_1, \dots, R_N полагаются некоррелированными. Вероятность срыва связи при автовыборе по максимальной амплитуде сигнала будет

$$P\{\rho < \rho_m\} = \sum_{i=1}^N P_i, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_i &= \int_0^{R_{im}} \left[\int_0^{R_i} \dots \int_0^{R_i} W(R_1, \dots, R_N) dR_1 \dots dR_{i-1} \cdot dR_{i+1} \dots dR_N \right] dR_i = \\ &= K_i \int_0^{R_{im}} R_i \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N K_j \int_0^{R_i} R_j dR_j \right] dR_i = \frac{R_{im}^{2N} \prod_{j=1}^N K_j}{N \cdot 2^N}. \end{aligned} \quad (13)$$

Отсюда с учетом (9) и (10) получаем формулу помехоустойчивости системы при N -кратном сложении сигналов по методу автовыбора:

$$P_{Na} = \frac{\rho_m^{2N}}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{\phi i}^{2N} \prod_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_j} \sigma_{y_j}} \exp\left(-\frac{m_{x_j}^2}{2\sigma_{x_j}^2} - \frac{m_{y_j}^2}{2\sigma_{y_j}^2}\right). \quad (14)$$

Эта вероятность коррелирована с вероятностью ошибки при приеме информации. По разработанному алгоритму в соответствии с выражением (14) выполнены расчеты зависимости вероятности падения уровня сигнала ниже порогового уровня при автовыборе от роста кратности разнесения N в системе

ММО. Результаты расчетов приведены на рис. 6 а). На рисунке 6 б) и 6 в) показано сравнение помехоустойчивости по методу автовыбора с оптимальным сложением для случая двухкратного и четырехкратного разнесения сигналов.

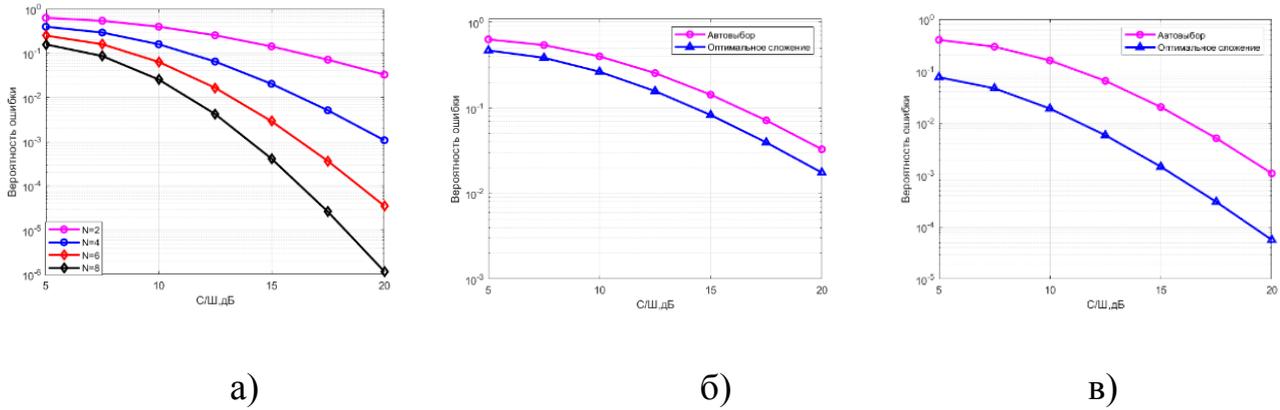


Рисунок 6. Сравнение методов сложения разнесенных сигналов.

Оптимальное сложение в ветвях разнесения более помехоустойчиво по сравнению с автовыбором, причем разница увеличивается с ростом кратности разнесения. Однако практическая реализация устройств оптимального сложения значительно сложнее.

При сложения сигналов ММО по методу линейного сложения критерием качества сигналов может быть уровень сигнала. Для двухкратного разнесения

$$S_2 = R_1 + R_2, \quad (15)$$

где R_1 и R_2 – сигналы приходящие на первую и вторую антенны системы ММО. Для большего числа разнесения $S_N = \sum_{i=1}^N R_i$, где S_N – суммарный сигнал при N -кратном разнесении.

Вероятность ошибки при двукратном разнесении определим как

$$P\{S_2 < R_m\} = \int_0^{R_m} \int_0^{S_2} \omega_1(R_1)\omega_2(S_2 - R_1)dR_1dS_2 = \frac{k_1k_2R_m^4}{24} = qR_m^4, \quad (16)$$

где ω_1, ω_2 – распределение плотности вероятности величин R_1, R_2 ; R_m - пороговое значение уровня принимаемого сигнала.

Пусть помехоустойчивость устройства линейного сложения ветвей разнесения

$$\begin{aligned} P\{S_N < R_m\} &= qR_m^{2N}, \\ \frac{dP\{S_N < R_m\}}{dS_N} &= 2qNS_N^{2N-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, что $S_{N+1} = S_N + R_{N+1}$, получаем, что помехоустойчивость линейного сложения $N+1$ разнесенных сигналов определится как

$$P\{S_{N+1} < R_m\} = \int_0^{R_m} \int_0^{S_{N+1}} \omega_{N+1}(S_{N+1} - S_N) \times \frac{dP\{S_N < R_m\}}{dS_N} dS_N dS_{N+1} = \frac{qk_{N+1}R_m^{2N+2}}{2(N+1)(2N+1)}.$$

Таким образом, рекуррентная формула

$$P\{S_{N+1} < R_m\} = \frac{k_{N+1} R_m^2}{2(N+1)(2N+1)} P\{S_N < R_m\}. \quad (18)$$

$$P\{S_N < R_m\} = R_m^{2N} \prod_{i=1}^N \frac{k_i}{2i(2i-1)}. \quad (19)$$

Для кратности разнесения N пороговое соотношение сигнал/шум на выходе устройства линейного сложения

$$\rho_m = \frac{R_m}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^N \sigma_{\emptyset i}^2}}. \quad (20)$$

Помехоустойчивость при линейном сложении разнесенных сигналов определяется вероятностью падения уровня сигнала относительно пороговых уровней в приемниках системы ММО. Поэтому формула помехоустойчивости устройства для N -кратного линейного сложения разнесенных сигналов будет:

$$P\{\rho_N < \rho_m\} = \rho_m^{2N} \left(\sum_{i=1}^N \sigma_{\emptyset i}^2 \right)^N \times \frac{1}{N!} \prod_{i=1}^N \frac{1}{(2i-1)\sigma_{xi}\sigma_{yi}} \exp\left(-\frac{m_{xi}^2}{2\sigma_{xi}^2} - \frac{m_{yi}^2}{2\sigma_{yi}^2}\right). \quad (21)$$

Для оценки помехоустойчивости связи при оптимальном сложении определяется отношение сигнал/шум относительно порогового уровня, зависящего от пороговых свойств приемников в системе ММО. Отношение сигнал/шум при оптимальном сложении l сигналов

$$\rho_l = \sqrt{\sum_{i=1}^l \frac{R_i^2}{2\sigma_{\emptyset i}^2}}, \quad (22)$$

где R_i^2 - мощность сигнала i -ой ветви ММО; $\sigma_{\emptyset i}^2$ - мощность шума в i -ой ветви ММО. Для $l=2$ вероятность срыва связи (вероятность падения уровня сигнала ниже порогового уровня детектора приемника) определится как

$$P\{\rho_{l+1} < \rho_m\} = k_1 k_2 \sigma_{\emptyset 1}^2 \sigma_{\emptyset 2}^2 \rho_m^4, \quad (23)$$

где ρ_m - пороговое отношение сигнал/шум приемника; σ_i - средняя мощность шумов i -ой ветви ММО; $k_i = \frac{1}{\sigma_{xi}\sigma_{yi}} \exp\left(-\frac{m_{xi}^2}{2\sigma_{xi}^2} - \frac{m_{yi}^2}{2\sigma_{yi}^2}\right)$ при четырехпараметрическом законе распределения замираний в лучах разнесения.

Рекуррентная формула имеет вид

$$P\{\rho_{l+1} < \rho_m\} = \frac{k_{l+1} \rho_m^2 \sigma_{\emptyset, l+1}^2}{l+1} P\{\rho_l < \rho_m\}. \quad (24)$$

Тогда вероятность срыва связи, то есть помехоустойчивость метода оптимального сложения разнесенных сигналов при большом числе ветвей разнесения в ММО определится по формуле

$$P_{N_0} = \frac{\rho_m^{2N}}{N!} \prod_{i=1}^N \frac{\sigma_{\emptyset i}^2}{\sigma_{xi}\sigma_{yi}} \exp\left(-\frac{m_{xi}^2}{2\sigma_{xi}^2} - \frac{m_{yi}^2}{2\sigma_{yi}^2}\right). \quad (25)$$

Таким образом, получены выражения для оценки помехоустойчивости при четырехпараметрической модели замираний в многолучевых радиоканалах для разных методов сложения разнесенных сигналов: (14) при автовыборе, (21) при линейном сложении, (25) при оптимальном.

Разработана также методика оценки вероятности срывов связи в радиоканале одного приемного устройства ММО при достаточно общей четырехпараметрической модели замираний. Срывы связи наступают в тех случаях, когда уровень сигнала R становится меньше некоторого уровня R_{min} ,

определяемого пороговыми свойствами используемого приемника. Тогда вероятность срыва связи P_{dc} будет равна вероятности попадания конца вектора R внутрь круга радиусом R_{min} , как показано на рис. 7.

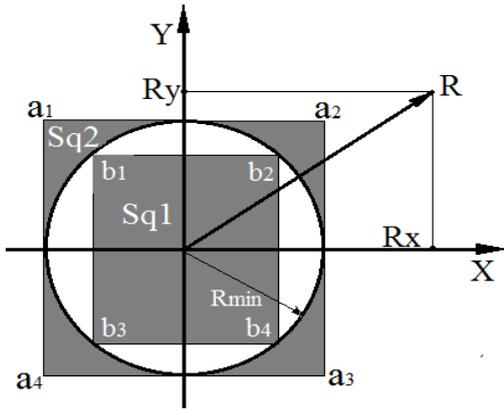


Рисунок 7. Геометрическая интерпретация приема сигнала R .

$$P_{dc} = P\{R < R_{min}\}. \quad (26)$$

Будем использовать два квадрата - вписанный $Sq1$ и описанный $Sq2$ вокруг окружности радиусом R , как показано на рис. 7. Из рисунка 7, следует что вероятность срыва связи определится неравенством.

$$P\{R \in Sq1\} < P_{dc} = P\{R < R_{min}\} < P\{R \in Sq2\}. \quad (27)$$

Поскольку известно, что законы распределения ортогональных компонент сигнала R при четырехпараметрических замираниях подчинены нормальному закону распределения вероятностей, то это позволяет найти вероятности попадания конца вектора R внутрь квадратов $Sq1$ и $Sq2$.

$$\begin{aligned} P\{R \in Sq1\} &= P\{|R_x| < b_1 b_2\} \cdot P\{|R_y| < b_2 b_3\} = \\ &= \left[F\left(\frac{\left(\frac{R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_x}{\sigma_x}\right) - F\left(\frac{\left(\frac{-R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_x}{\sigma_x}\right) \right] \cdot \left[F\left(\frac{\left(\frac{R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_y}{\sigma_y}\right) - F\left(\frac{\left(\frac{-R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_y}{\sigma_y}\right) \right], \end{aligned} \quad (28)$$

где $F(Z)$ - интеграл вероятности.

$$\begin{aligned} P\{R \in Sq2\} &= P\{|R_x| < a_1 a_2\} \cdot P\{|R_y| < a_2 a_3\} = \\ &= \left[F\left(\frac{(R_{min} - m_x)}{\sigma_x}\right) - F\left(\frac{(-R_{min} - m_x)}{\sigma_x}\right) \right] \cdot \left[F\left(\frac{(R_{min} - m_y)}{\sigma_y}\right) - F\left(\frac{(-R_{min} - m_y)}{\sigma_y}\right) \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Используя (28) и (29) можно получить выражение, определяющее помехоустойчивость радиосвязи при быстрых замираниях, возникающих из-за

интерференции сигналов на входе каждого приемника системы ММО в виде следующего неравенства.

$$\left[F\left(\frac{\left(\frac{R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_X}{\sigma_X}\right) - F\left(\frac{\left(\frac{-R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_X}{\sigma_X}\right) \right] \cdot \left[F\left(\frac{\left(\frac{R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_Y}{\sigma_Y}\right) - F\left(\frac{\left(\frac{-R_{min}}{\sqrt{2}}\right) - m_Y}{\sigma_Y}\right) \right] < P_{dc} \\ < \left[F\left(\frac{R_{min} - m_X}{\sigma_X}\right) - F\left(\frac{-R_{min} - m_X}{\sigma_X}\right) \right] \cdot \left[F\left(\frac{R_{min} - m_Y}{\sigma_Y}\right) - F\left(\frac{-R_{min} - m_Y}{\sigma_Y}\right) \right]. \quad (30)$$

Выражение (30) позволяет оценить помехоустойчивость на выходе одного приемного устройства ММО при достаточно общей модели замираний, описываемой четырехпараметрическим законом распределения вероятностей. В работе показано, что среднеквадратический уровень сигнала аналитически связан с параметрами четырехпараметрического закона распределения вероятностей следующим выражением.

$$\bar{R}^2 = m_X^2 + m_Y^2 + \sigma_X^2 + \sigma_Y^2. \quad (31)$$

$$\text{При выполнении условий } R_{min} \ll \sigma_X \text{ и } R_{min} \ll \sigma_Y, \quad (32)$$

внутри квадрата Sq2 можно пренебречь изменением величины $F\left(\frac{Z - m_{X,Y}}{\sigma_{X,Y}}\right) - F\left(\frac{-Z - m_{X,Y}}{\sigma_{X,Y}}\right)$. Тогда неравенство (30) преобразуется к виду

$$\frac{S_{Sq2}}{\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp\left(-\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right) < P_{dc} < \frac{S_{Sq1}}{\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp\left(-\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right), \quad (33)$$

где S_{Sq1}, S_{Sq2} площади квадратов Sq1 и Sq2 и для условий (32) неравенство (33) можно заменить приближенным равенством

$$P_{dc} = P\{R < R_{min}\} \approx \frac{S_{0R_{min}}}{2\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp\left(-\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right) = \frac{R_{min}^2}{2\sigma_X\sigma_Y} \exp\left(-\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right), \quad (34)$$

где $S_{0R_{min}^2} = \pi R_{min}^2$ площадь круга радиусом R_{min} . При этом вероятность срыва связи определяется попаданием вектора R на ось OY или на ось OX и вероятность срыва связи

$$P_{dc} = F\left(\frac{R_{min}}{\sigma_X}\right) - F\left(\frac{-R_{min}}{\sigma_X}\right). \quad (35)$$

А при соблюдении неравенства $R_{min} \ll \sigma_X$, выражение (35) еще более упрощается к виду

$$P_{dc} \approx \frac{R_{min}}{\sigma_X} \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \quad (36)$$

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования с помощью компьютерного моделирования на языке программирования C++. Разработана модель сигнала пораженного замираниями и шумом и реализующая ее программа для сравнения методов сложения

разнесенных сигналов ММО. При моделировании замираний использован четырехпараметрический закон распределения вероятностей, при котором квадратурные составляющие сигнала искажаются некоррелированными шумами с нормальным распределением и нулевым математическим ожиданием. Для ускорения вычислений была предложена модель аддитивных фазовых шумов в виде:

$$U(t) = U_{max} \sin(\omega t + f(t)), \quad (37)$$

где $f(t)$ – шумовая компонента с нормальным законом распределения.

Результаты модельных экспериментов приведены на рис.12 и сведены в таблицу 3.

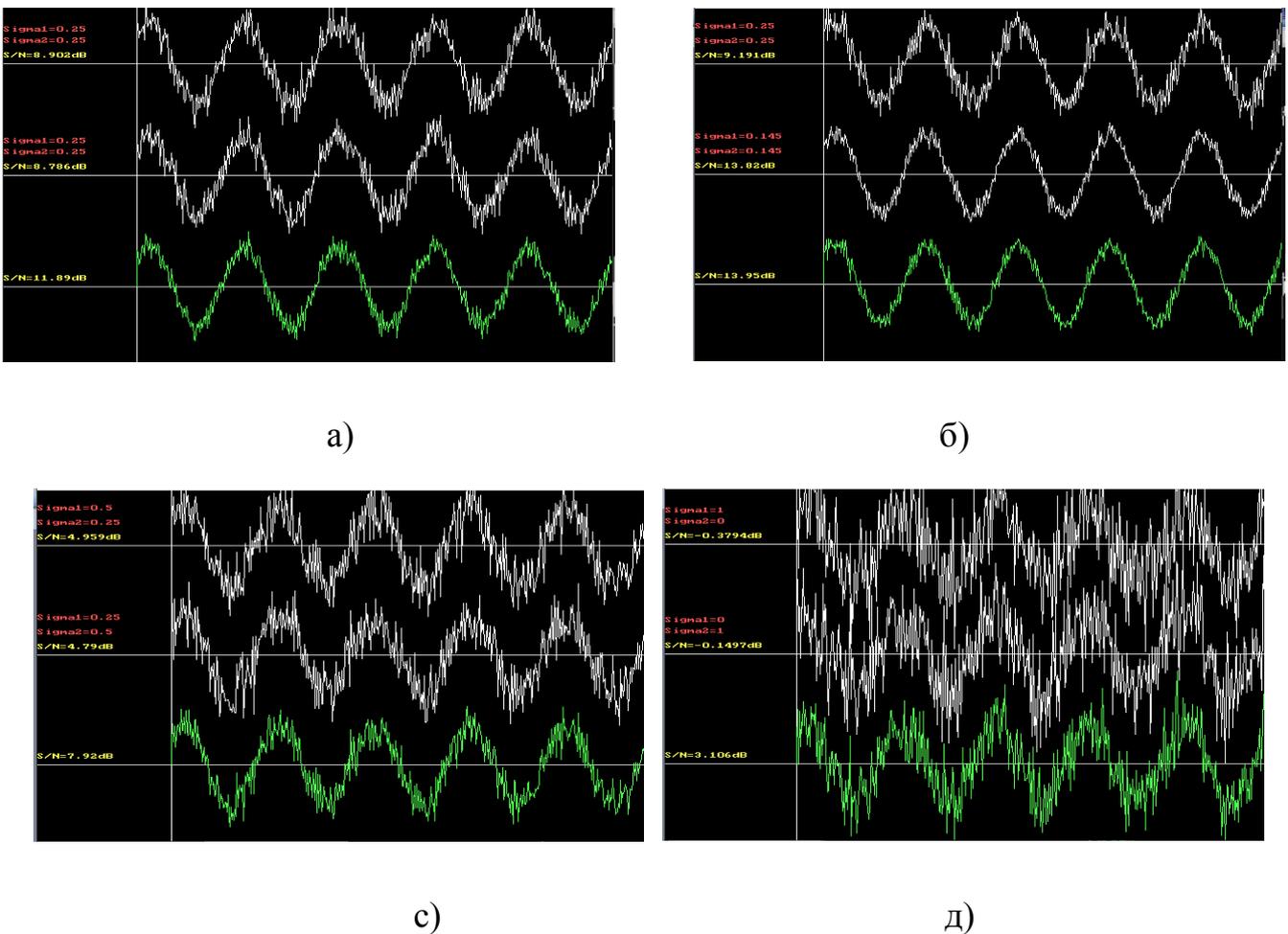


Рисунок 8. Выигрыш при отношении сигнал/шум для двух каналов (белый цвет) по методу линейного сложения (зеленый цвет)

Анализ полученных результатов показывает, что при двухканальном ММО максимальный выигрыш при методе линейного сложения по соотношению сигнал/шум доходит до 3дБ, что согласуется с известными данными. Но следует отметить, что выигрыш при линейном сложении максимален при примерно одинаковых соотношениях сигнал/шум в каналах разнесения. При значительной

разнице соотношений сигнал/шум в каналах разнесения, выигрыш от метода линейного сложения снижается, как показано в последней строке таблицы 3, что требует разработки новых алгоритмов обработки разнесенных сигналов в системах ММО.

Таблица 3. Результаты линейного сложения сигналов ММО.

Отношение сигнал/шум, дБ в двух каналах		Выигрыш в отношении сигнал/шум, дБ
S/N1	S/N2	S/N
8.902	8.786	11.89
-0.3794	-0.1497	3.106
4.959	4.79	7.92
9.191	13.82	13.95

В работе предложен и исследован новый метод сложения разнесенных сигналов, назовем его субоптимальным. Моделирование системы сложения разнесенных сигналов заключалось в анализе двух каналов разнесения и расчета соотношения сигнал/шум при обработке разнесенных сигналов разными методами: автовыбора, линейного сложения и предложенного метода субоптимального сложения.

Субоптимальный метод основывается на анализе соотношений сигнал/шум в каналах разнесения и вычислении коэффициентов суммирования соответствующих сигналов. При двух каналах разнесения сигналов ММО, субоптимальный метод можно описать следующим образом.

$$U_{\text{вых}}(t) = S_1(t) * K + S_2(t) * (1 - K), \quad (38)$$

где $S_1(t)$, $S_2(t)$ – сигналы первого и второго канала системы ММО соответственно, K – коэффициент отношения уровней принятых сигналов от 0 до 1, зависящий от разницы отношений сигнала/шум в каналах. Коэффициент K , можно вычислить следующим образом.

$$\begin{aligned} K &= 1.0 - 0.5 * S_{n1} / S_{n2}, & \text{если } S_{n1} \leq S_{n2} \\ K &= 0.5 * S_{n2} / S_{n1}, & \text{если } S_{n2} < S_{n1} \end{aligned} \quad (39)$$

где S_{n1} , S_{n2} – это длины векторов между принятым значением на сигнальном созвездии и центром квадранта.

Для сравнения методов сложения разнесенных сигналов моделировался информационный сигнал с модуляцией QPSK при двух лучах разнесения в

системе MIMO. Результаты экспериментов представлены на сигнальных созвездиях, показанных на рис. 9. Каждая точка на диаграмме соответствует принятому дибиту QPSK. Центр соответствующих квадрантов соответствует точному положению определенного дибита и нахождение точки в квадранте это верный прием дибита, а уход точки дибита в соседний квадрант это ошибка. Чем ближе точки к центру квадрантов – тем меньше неопределенность при приеме информации.

Анализ результатов модельных экспериментов показывает, что при субоптимальном методе, созвездие группируется ближе к центру квадрантов и как минимум не хуже, чем любое из других созвездий, а в некоторых случаях и лучше.

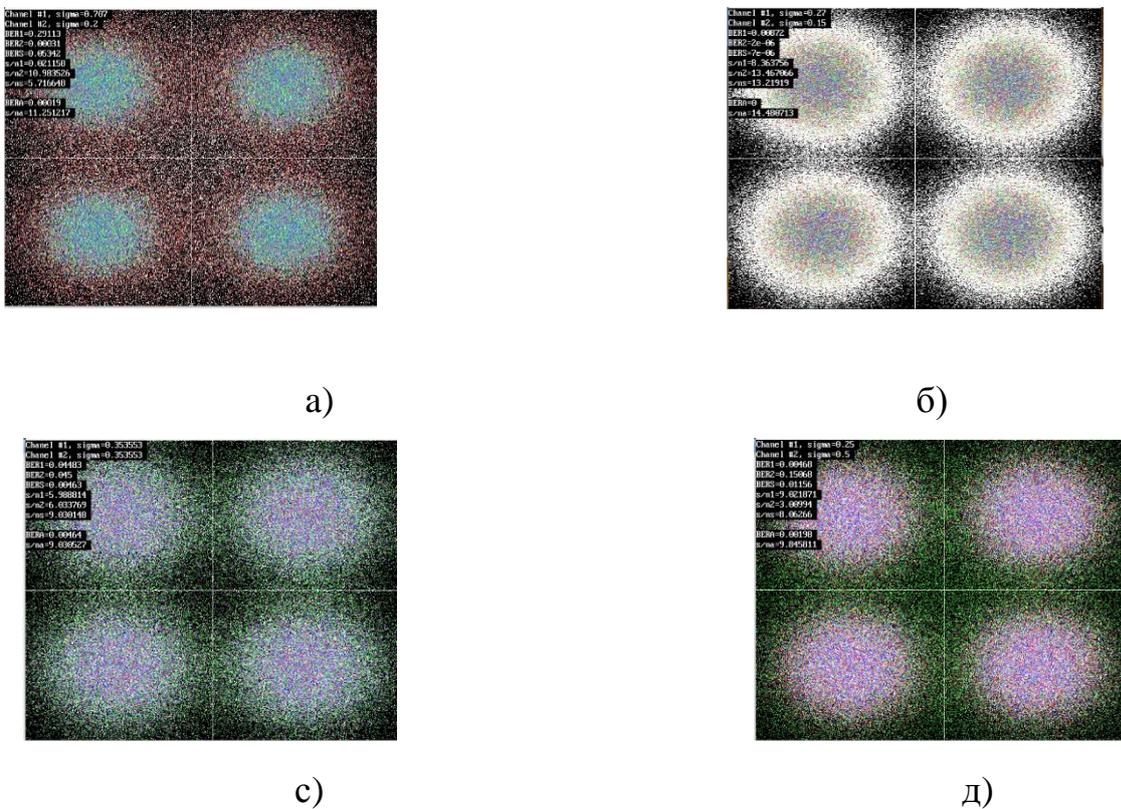


Рисунок 9. Сигнальное созвездие с релеевским распределением замираний при модуляции QPSK.

На рисунке 9 белым и зеленым цветом показаны сигналы разных каналов разнесения, красным цветом результаты метода линейного сложения, синим цветом результаты субоптимального метода. BER1, BER2 – вероятности ошибок в каналах, BERS – вероятность ошибки при линейном сложении, s/n1, s/n2 – отношение сигнал/шум в каналах, s/ns – отношение сигнал/шум при линейном сложении, BERA, s/na – вероятность ошибки и отношение сигнал/шум при субоптимальном методе соответственно. Выигрыш при субоптимальном методе по соотношению сигнал/шум по сравнению с другими методами составляет до

1дБ. Таким образом, применение субоптимального метода обработки разнесенных сигналов ММО является более эффективным, чем методы автовыбора или линейного сложения.

Был разработан алгоритм моделирования для обработки сигналов двух каналов разнесения при модуляции QPSK с релеевским и четырехпараметрическим законами распределения замираний. Такой алгоритм позволил моделировать с помощью ЭВМ отношения сигнал/шум при различных распределениях замираний. На рисунке 10, приведены результаты обработки двух разнесенных сигналов для релеевского и усеченно-нормального распределений замираний при разнице соотношений сигнал/шум между каналами от -10 до 10дБ. Соотношения сигнал/шум в первом канале при этом принималось равным 9дБ. Анализ полученных данных показывает, что субоптимальный метод обработки разнесенных сигналов дает выигрыш от 0,2 до 1дБ по отношению сигнал/шум по сравнению с линейными методами сложения и автовыбором.

На рисунке 10а, показана вероятности ошибки в принятом символе при релеевском распределении, а на рисунке 10б, при усеченно-нормальном распределении замираний, которое тоже наблюдается на линиях связи.

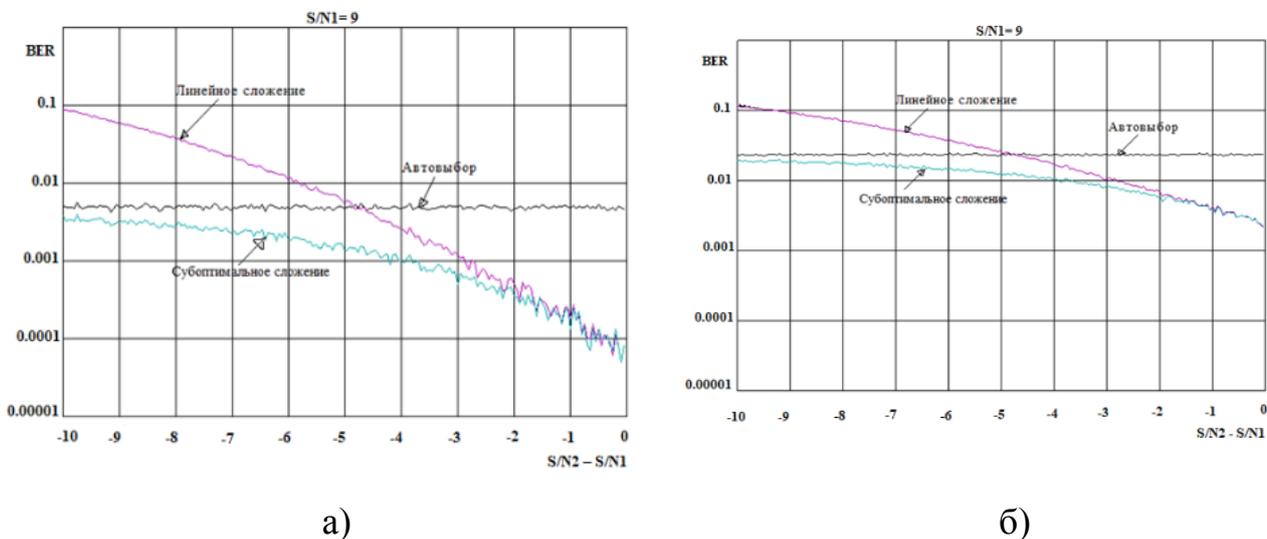


Рисунок.10. Вероятность ошибки для разных распределений замираний.

Это доказывает необходимость дополнительного запаса на замирания от 1 до 2 дБ в зависимости от линии связи.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [2, 12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрены методы обработки принимаемых сигналов в системах связи с пространственно-временным разнесением. Можно сформулировать основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, следующим образом.

1. На основании проведенного аналитического обзора систем, использующих многолучевые радиоканалы, обоснована необходимость применения многопараметрических законов распределения вероятностей при описании интерференционных замираний, возникающих при приеме сигналов в системах ММО.

2. Проведен анализ алгоритмов разнесенного приема на основании которого разработаны модель и реализующая ее программа для сравнения методов сложения разнесенных сигналов ММО

3. Предложена методика оценки вероятности срывов связи в радиоканале одного приемного устройства при достаточно общей четырехпараметрической модели замираний.

4. Предложен новый метод субоптимального сложения разнесенных сигналов, отличающийся правилами формирования весовых коэффициентов при сложении.

5. Разработан и исследован алгоритм субоптимального сложения разнесенных сигналов, обеспечивающий при двух каналах разнесения снижение вероятности ошибки до 10 раз по сравнению с линейными методами сложения и автовыбором.

6. Предложены рекомендации для разработчиков линий связи с многолучевыми радиоканалами по необходимости добавления запаса энергопотенциала для противодействия глубоким многопараметрическим интерференционным замираниям.

В Приложениях представлены результаты экспериментов, акты внедрения, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Самойлов, А.Г. Радиолинии с низкоорбитальных спутников / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, **I. A. Al Tahar** //, S.A. Nasir // Проектирование и технология электронных средств. - 2020, № 2. - С. 8-11.

2. **Аль Тахар И.А.** Алгоритм моделирования быстрых интерференционных замираний/И.А. Аль Тахар, С.А. Насир // Проектирование и технология электронных средств. - 2021, № 2. - С. 52-54.

3. **Аль Тахар И.А.** Согласование высокочастотных генераторов с газоразрядными нагрузками / И.А. Аль Тахар, С.А. Самойлов, В.С. Самойлов, Е.А. Цветкова // Проектирование и технология электронных средств. - 2022, № 1. - С.40-43.

4. **Аль Тахар И.А.** Моделирование методов обработки разнесенных сигналов / И.А. Аль Тахар, С.А. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. - 2022, № 1. - С.44-47.

Публикации в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus

5. Samoylov, A.G. Protection of high frequency generators with unstable load / A G Samoylov, VS Samoylov, SA Samoylov, **I. A. Al Tahar** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering MIST_10046 MIST: Aerospace 2019. Vol.734. (2020) 012004 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/734/1/012004.

6. Samoylov, A.G. Radio links from low-orbit satellites / AG Samoylov, SA Samoylov, **I. A. Al Tahar**, S A Nasir // II International Scientific Conference "MIP: Engineering, Modernization, Innovations, Progress: IOP Conference Series: MSE April 16-18, 2020, Krasnoyarsk, V.862. doi: 10.1088/1757-899X/862/2/022030

7. Samoylov, A.G. An Analysis of the Probbability of One Type of Errors in Digital Communication / AG Samoylov, SA Samoylov, **I. A. Al Tahar**, S A Nasir // 2020 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. 19 to 20 March 2020, Moscow, IEEE Conference Record pp.1-6 #48371 INSPEC Accession Number: 19573022. doi: 10.1109 / IEEECONF48371.2020.9078630.

8. Samoylov, A.G. Adaptive Interference Compensation Method / AG Samoylov, SA Samoylov, **I. A. Al Tahar**, S A Nasir // III International Conference MIST: Aerospace-III 2020: Advanced Technologies in Aerospace, Engineering and Automation. IOP Conference Series: MSE, 20-21 November 2020, Krasnoyarsk, V.1047. doi:10.1088/1757-899X/1047/1/012070

9. Samoylov, A.G. Interference Compensator for Communication Systems with Space-Time Coding / AG Samoylov, SA Samoylov, **I. A. Al Tahar**, S A Nasir //2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, IEEE № 51389 Moscow.16-18 March 2021. doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416019.

10. Samoylov, A.G. Methodology for Evaluating the Probability of Communication Disconnection in Radio Channels of the Systems with Space-Time Coding of Signal / AG Samoylov, **I. A. Al Tahar** // *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2021, Moscow, IEEE Conference Record #51389 pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416066/

11. Samoylov, S.A. Matching of generators and gas-discharge loads with radio frequency pumping / SA Samoylov, VS Samoylov, **I. A. Al Tahar**, EA Tsvetkova // *Journal of Physics: Conference Series* 2094 (2021) 022046. doi:10.1088/1742-6596/2094/2/022046

Публикации в других изданиях

12. А.Г. Самойлов А.Г. Блочная синхронизация цифровых информационных потоков с помехоустойчивым кодированием / А.Г. Самойлов, В.С. Самойлов, **I. A. Al Tahar**, SA Samah // *Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020* [текст]: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: Т.3./ Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. – С. 5-8.

13. **Аль Тахар И.А.** Модель системы ММО / И.А. Аль Тахар // Под ред.: С.П. Зимина, А.С. Гвоздарева. [текст]: Ярослав. гос. ун-т им. П.Г. Демидова. - Ярославль, ЯрГУ, 2020. – С. 184-185.

14. Самойлов, В.С. Оценка плотности потока энергии от мобильных телефонов / В.С. Самойлов, С.А. Насир, **И. А. Аль Тахар** // *Материалы 14-й Международной научной конференции "Физика и Радиоэлектроника в Медицине и Экологии"*[текст]: 1-3 июля, 2020, Владимир. - Т.1. - С. 347-348.

15. **Аль Тахар И.А.** Анализ алгоритмов разнесенного приема в системах с ММО / И.А. Аль Тахар // XL - Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем [текст]: 24-25 июня 2021, г. Серпухов. - т.2. - С. 210-213.

16. **Аль Тахар И.А.** Algorithm of MIMO system for different types of digital modulation / И.А. Аль Тахар // *Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации»* [текст]: Владимир, 2021. – С. 68-70.

17. **Аль Тахар И.А.** Algorithm of the MIMO system for different doppler frequencies / И.А. Аль Тахар // *Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации»* [текст]: Владимир, 2021. – С. 60-63.

18. **Аль Тахар И.А.** Analysis of two-ray model using MIMO technology / И.А. Аль Тахар // Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» [текст]: Владимир, 2021. – С. 64-67.

Охранные документы (патенты, свидетельства)

19. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ / Самойлов С.А., **Аль Тахар И.А** // № 2022612962 Заявка № 2022611915 от 15.02.2022 г.

Аль Тахар Инас Ануар

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ _____
Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.