

АНДРИАНОВ Иван Михайлович

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ И
ПРЕРЫВИСТОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ

Специальности:

- 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах),
05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
Лауреат Государственной премии СССР
Шахтарин Борис Ильич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РФ
Козлов Анатолий Иванович;

доктор технических наук, профессор
Неусыпин Константин Авенирович.

Ведущая организация: ОАО «Концерн «Созвездие».

Защита состоится «5» июня 2012 г. в 14:30 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997111

Анрианов И.М. Разработка а

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доц. Муратов И.В.

-112

2481

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Для систем беспроводной передачи данных, функционирующих в условиях мультипликативных помех, актуальным является повышение их эффективности. Повышение помехоустойчивости систем передачи и обработки информации, как одного из показателей эффективности, вступает в противоречие с задачами по увеличению другого показателя эффективности, а именно спектральной эффективности. Проблема увеличения помехоустойчивости может быть решена методами системного анализа, при минимизации потерь спектральной эффективности.

В современных каналах передачи данных с замираниями значительное ослабление сигналов вызывает уменьшение отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника. Это приводит к резкому снижению точности синхронизации и помехоустойчивости. Для борьбы с замираниями применяются алгоритмы разнесенного приема/передачи сигналов, символьное перемежение с помехоустойчивым кодированием.

При прохождении сигналов по каналам передачи данных, возникает межсимвольная интерференция (МСИ), значительно искажающая форму сигнала. Одним из эффективных способов борьбы с МСИ является применение систем с ортогональным частотным уплотнением сигналов (далее ОЧУС; англ. OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Подканалы в системах с ОЧУС практически не испытывают влияние МСИ, однако, могут иметь значительные локальные затухания, возникающие вследствие многолучевости (70 дБ и более).

Алгоритмы ОЧУС широко используются в:

1. Системах беспроводной передачи данных стандарта WiFi (IEEE 802.11), работающих в диапазоне 2.4 - 5 ГГц.
2. Системах беспроводной передачи данных стандарта WiMAX (IEEE 802.16), работающих в диапазоне от 2 до 6 ГГц.
3. Системах цифрового телевидения стандартов DVB-T и DVB-T2 (47 — 862 МГц).

Алгоритмы разнесенного приема/передачи помимо стандартов WiFi и WiMAX используются в базовых станциях систем сотовой связи стандарта GSM, работающих в диапазоне 800 — 900 МГц.

Для борьбы с локальными затуханиями сигналов целесообразно применять алгоритмы прерывистой передачи данных, разработке которых посвящена данная диссертация.

Применение алгоритмов прерывистой передачи накладывает на беспроводные системы передачи данных следующие ограничения:

1. по несущей частоте ($f_{\text{нес}}$ от 30 МГц до 30 ГГц);

ИМ.Н.Э БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА
1

2. по полосе сигнала $f_{\text{нес}}/\Delta f > 80 - 100$, где Δf - ширина полосы;
3. по среднему значению ОСШ на входе приемника (больше 8 - 10 дБ);
4. функционирование в каналах с медленными неселективными по частоте замираниями.

Исследованиям повышения помехоустойчивости передачи данных использованием прерывистой передачи в беспроводных каналах посвящено ограниченное число работ. Одним из первых прерывистую передачу данных в каналах с замираниями предложил использовать А.Г. Зюко. В.С. Мельников и др. разработали алгоритмы прерывистой передачи данных для систем с обратной связью. Л. Ханзо, С. Вонг предложили использовать многопороговые системы прерывистой передачи данных. Однако, в литературе не были описаны алгоритмы прерывистой передачи в каналах, отличных от рэлеевских и метеорных.

Большой вклад в исследования систем передачи данных с разнесенным приемом/передачей внесли Л.М. Финк, И.С. Андронов и У.К. Ли, классифицировав виды разнесения и разработав различные алгоритмы объединения ветвей разнесения. Однако, в литературе отсутствуют исследования по комплексированию прерывистой передачи данных и разнесенного приема.

Принцип ОЧУС впервые предложили С.Б. Вайнштейн и П.М. Эберт. Практическая реализация современного алгоритма ОЧУС была предложена П.Х.Мусом. Ж.Ж. Ван де Бик, Т.М. Шмидл, Р.А. Пачеко разработали алгоритмы оценки параметров сигналов в системах с ОЧУС. А.И. Фалько, В.И. Носов предложили алгоритмы комплексирования разнесенного приема сигналов с ОЧУС. В.М. Вишневский, И.В. Шахнович, С.Л. Портной в своих работах классифицировали и исследовали системы беспроводной передачи данных на основе ОЧУС. Однако, в литературе отсутствуют исследования по применению алгоритма прерывистой передачи данных в системах с ОЧУС.

Таким образом, данная диссертационная работа является актуальной с научной и инженерной точек зрения.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является синтез эффективных алгоритмов передачи и обработки информации по критерию минимума вероятности ошибочного приема.

В соответствии с целью диссертационной работы были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка алгоритма прерывистой передачи для систем передачи информации в каналах с замираниями, эффективного по критерию минимума вероятности ошибочного приема;
2. Разработка алгоритма прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС, эффективного по критерию минимума вероятности ошибочного приема;
3. Комплексирование алгоритмов прерывистой передачи данных и разне-

сенного приема/передачи сигналов в каналах с замираниями;

4. Разработка алгоритма оценки параметров сигнала с ортогональным частотным уплотнением (ОЧУ), оптимального по критерию максимума правдоподобия.

Методы исследования базируются на общих методах системного анализа, в частности на использовании теории вероятностей, математической статистики, случайных процессов, оптимального приема, численного и имитационного моделирования.

Научная новизна диссертации:

1. Разработан алгоритм прерывистой передачи данных для систем передачи и обработки информации в каналах с замираниями, эффективный по критерию минимума вероятности ошибочного приема.
2. Предложен алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС, эффективный по критерию минимума вероятности ошибочного приема.
3. На основе системного анализа показано преимущество в помехоустойчивости для систем комплексирования прерывистой передачи данных с разнесенным приемом перед системами одной прерывистой передачи.
4. Показано преимущество в помехоустойчивости и спектральной эффективности при комплексировании прерывистой передачи данных с разнесенным приемом при объединении ветвей разнесения по алгоритму оптимального сложения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эффективный алгоритм прерывистой передачи данных для систем передачи и обработки информации в каналах с замираниями;
2. Алгоритм оценки параметров сигнала с ОЧУ, оптимальный по критерию максимума правдоподобия;
3. Результаты анализа рабочих характеристик когерентного приема при прерывистой передаче данных;
4. Эффективный алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС;
5. Результаты вероятностного анализа когерентного приема при комплексировании прерывистой передачи данных с разнесенным приемом;
6. Сравнительные характеристики помехоустойчивости и спектральной эффективности при комплексировании прерывистой передачи данных с разнесенным приемом.

Личный вклад автора

Основные результаты, выводы и рекомендации, приведенные в диссертации, получены автором лично.

Практическая значимость работы:

1. В диссертации разработан алгоритм прерывистой передачи данных. Алгоритм позволяет повысить помехоустойчивость и дальность связи, либо при сохранении указанных параметров снизить мощность излучения передатчика. Например, в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами, с параметром замираний $m = 0,7$, при прерывистой передаче вероятность ошибки достигает 10^{-3} при среднем значении ОСШ 8 дБ, в то время как без применения прерывистой передачи только при 37 дБ.
2. Разработан алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС. Алгоритм применим в существующих и перспективных системах передачи данных с ОЧУС (например, стандартов IEEE 802.16 и 802.11).
3. Комплексирование прерывистой передачи данных с разнесенным приемом позволяет помимо увеличения помехоустойчивости повысить спектральную эффективность передаваемых данных. Например, при четырехкратном разнесенном приеме выигрыш в спектральной эффективности достигает 2,3 раза в сравнении с одиночным приемом.
4. Разработаны имитационные модели, позволяющие рассчитать выигрыш от использования прерывистой передачи данных, комплексирования прерывистой передачи с ОЧУС, с разнесенным приемом/передачей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. LXIV Научная сессия, посвящённая Дню радио. – М., 2009.
2. 12-я Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2010.
3. 53-я Всероссийская научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». – М., 2010.
4. 63-я Международная студенческая научная конференция в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения. – С-Пб., 2010.
5. 13-я Международная научно-техническая конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2011.
6. LXVI Научная сессия, посвящённая Дню радио. – М., 2011.
7. IX Международная научная конференция ПТСПИ-2011. – Владимир-Суздаль, 2011.
8. 64-я Международная студенческая научная конференция в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения. – С-Пб., 2011.

Внедрение результатов диссертации:

1. Результаты диссертации использованы в НИР [4], что подтверждено актом о внедрении.

2. Результаты диссертации использованы в НИР в рамках проекта РФФИ 11-07-00697а, что подтверждено актом о внедрении.
3. Результаты диссертации использованы в НИР в ОАО «Концерн «Созвездие», что подтверждено актом о внедрении.
4. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актом о внедрении.
5. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения, что подтверждено актом о внедрении.
6. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс в Институте криптографии, связи и информатики (ИКСИ) Академии ФСБ РФ.
7. Результаты диссертации опубликованы в учебных пособиях [5], [6] и [7], что подтверждено актом о внедрении.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 3 статьях по перечню ВАК, 3 учебных пособиях, представлены в 5 тезисах докладов на международных конференциях, 3 тезисах докладов на всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (63 наименования), трех приложений и изложена на 139 листах машинописного текста, включая 51 рисунок.

Содержание работы

Во Введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, кратко изложено содержание работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ предметной области исследований. С этой целью проанализированы принципы построения, особенности функционирования, преимущества и недостатки систем с ОЧУС. Проведена классификация факторов, снижающих помехоустойчивость систем с ОЧУС.

Получен алгоритм оценки параметров

$$1) \varepsilon; 2) \theta = [\theta_0, \dots, \theta_{N-1}]^T; 3) g = [g_0, \dots, g_{L-1}]^T, \quad (1)$$

оптимальный по критерию максимума правдоподобия. В (1) $\varepsilon = \Delta f T_n$ - относительный частотный сдвиг; Δf - частотный сдвиг; θ_n - отчеты фазового шума; g_k - значение частотной характеристики канала для k -ой поднесущей.

Сформулирована функция правдоподобия

$$p(r, \varepsilon, \theta, g) = p(r|\varepsilon, \theta, g) p(\varepsilon) p(\theta) p(g), \quad (2)$$

где

$$r = EPF^H DWg + v,$$

r - принятый символ сигнала с ОЧУС; $E = \text{diag} \left(\left[1, e^{i\frac{2\pi\varepsilon}{N}}, \dots, e^{i\frac{2\pi(N-1)\varepsilon}{N}} \right]^T \right)$ - матрица частотного сдвига, вызванного смещением несущей частоты; $P = \text{diag} \left(\left[1, e^{i\theta_0}, \dots, e^{i\theta_{N-1}} \right]^T \right)$ - матрица фазового шума; F - матрица прямого преобразования Фурье; $D = \text{diag}(d)$; d - вектор передаваемых данных; $W \in \mathbb{C}^{N \times L}$ - ортогональная унитарная матрица, удовлетворяющая условиям: $F = [W|V]$ ($V \in \mathbb{C}^{N \times (N-L)}$), $W^H V = 0$, $WW^H + VV^H = I$; v - вектор аддитивного шума.

Найдены оценки параметров (1), оптимальные по критерию максимума правдоподобия, при выполнении условия

$$(\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}, \tilde{g}) = \arg \min_{\varepsilon, \theta, g} L(\varepsilon, \theta, g),$$

где $L(\varepsilon, \theta, g)$ - отрицательный логарифм от (2).

Проведена классификация алгоритмов оценивания параметров канала связи. Показано, что алгоритмы, использующие пилот-сигналы, применимы только для больших средних значений ОСШ и при неглубоких замираниях (менее 30 дБ).

Во второй главе разработаны принципы прерывистой передачи данных (ППД).

Разработан алгоритм ППД (рис. 1) для узкополосных каналов с замираниями.

Алгоритм (рис. 1) представляет собой два тракта приема-передачи сигналов (на линии «вверх» и «вниз»), через которые проходит контур с обратной связью.

Установлено, что алгоритм ППД является эффективным по критерию минимума вероятности ошибки при постоянной скорости передачи данных.

Показано, что для обеспечения работы алгоритма (рис. 1) необходимо выполнение следующих условий:

1. работа системы во временном дуплексном режиме передачи данных (TDD);

2. $2T \ll \tau$, где T - время распространения сигнала по линии связи, τ интервал корреляции огибающей сигнала во времени.

Показано, что основными недостатками способа ППД являются: необходимость значительных задержек сигналов; необходимость передачи данных

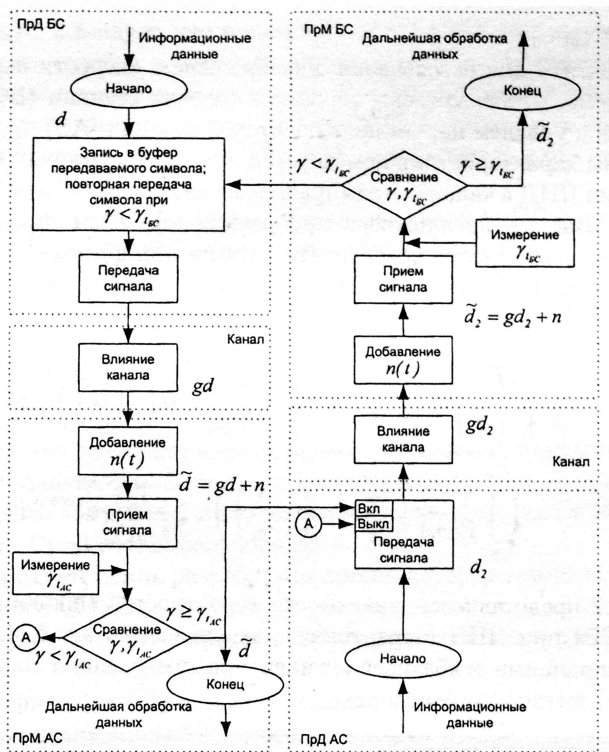


Рис. 1. Алгоритм прерывистой передачи данных: γ - текущее значение ОСШ; $\gamma_{\text{тс}}$ - уровень порога на абонентской станции (АС); $\gamma_{\text{тбс}}$ - уровень порога на базовой станции (БС); d, d_2 - передаваемые символы; $\tilde{d}, \tilde{d}_2$ - оценки значений принятых символов; ПрД БС - передатчик базовой станции, ПрМ АС - приемник абонентской станции

с более высокой скоростью и, как следствие этого, расширение спектра сигнала на величину, обратно пропорциональную коэффициенту использования радиолинии η .

Определено два варианта использования порога γ_t для алгоритма (рис. 1):

1. фиксированный порог;
2. плавающий порог, кратный среднему значению ОСШ $\gamma_t = k\gamma_0$.

Доказано, что применение фиксированного порога γ_t приводит к изменению коэффициента использования радиолинии η , а применение порога $\gamma_t = k\gamma_0$ обеспечивает фиксированное значение η при произвольных средних

значениях ОСШ γ_0 .

Показано, что для обеспечения фиксированной скорости передачи данных необходимо, чтобы уровень порога на базовой станции (БС) $\gamma_{тБС}$ был коррелирован с уровнем порога на абонентской станции (АС) $\gamma_{тАС}$.

Получены характеристики помехоустойчивости приемника с ОФМ-2 при использовании ППД в каналах с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами, при идеальной синхронизации и фазовом рассогласовании.

Получены зависимости вероятности ошибки при фазовом рассогласовании в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами при наличии ППД

$$P_{nak_p}(\gamma_0) = \frac{1}{\eta^2} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{1}{2} \int_{\gamma_0}^{\infty} \operatorname{erfcf}(\sqrt{\alpha\gamma}) \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \right)^m d\gamma \right) \times \\ \times \left(\int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \right)^m \frac{1}{2\pi I_0(\gamma)} e^{\gamma \cos \varphi} d\gamma \right) d\varphi \quad (3)$$

На рис. 2 представлены зависимости вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ при ППД в сравнении с вероятностью ошибки без ППД в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами.

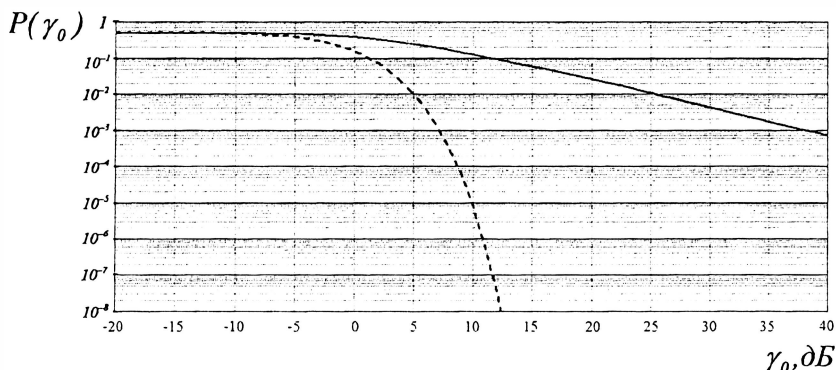


Рис. 2. Зависимости вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ при ППД при наличии фазового рассогласования (пунктирная кривая) в сравнении с вероятностью ошибки при неидеальной синхронизации без ППД (сплошная кривая) в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами, $m = 0,7$

Из рис. 2 следует, что применение ППД позволяет значительно снизить вероятность ошибки в системах передачи данных. В диссертации показано, что в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами, с параметром замираний $m = 0,7$, при ППД вероятность ошибки достигает 10^{-3} при среднем значении ОСШ 8 дБ, в то время как без применения ППД только при 37 дБ.

Найдена дисперсия разности фаз при наличии ППД в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами

$$D(\gamma_0) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\varphi^2}{\eta} \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \right)^m \frac{1}{2\pi I_0(\gamma)} e^{\gamma \cos \varphi} d\gamma d\varphi \quad (4)$$

Показано, что применение прерывистой передачи данных уменьшает дисперсию разности фаз. В канале с замираниями ($m = 0,7$) при некогерентном приеме сигналов ОФМ-2 в диапазоне значений среднего ОСШ от 10 до 15 дБ снижение $D(\gamma_0)$ составляет порядка 10 дБ.

В третьей главе разработаны принципы прерывистой передачи данных в системах с ОЧУС.

Получен алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС (рис. 3).

Алгоритм (рис. 3) является модификацией алгоритма (рис. 1) с учетом многоканального приема-передачи.

Показано, что при функционировании алгоритма (рис. 3) для каждой из поднесущих, рассматриваемой в отдельности, замирания являются неселективными по частоте, а для сигнала с ОЧУ в целом - частотно-селективными.

Установлено, что алгоритм ППД для систем с ОЧУС является эффективным по критерию минимума вероятности ошибки при постоянной скорости передачи данных.

Построена имитационная модель системы передачи данных, функционирующей по алгоритму ППД для систем с ОЧУС (рис. 3). Параметры модели: вид модуляции QPSK (квадратурная фазовая манипуляция), число поднесущих 512, длительность символа ОЧУС $t_c = 20,48$ мкс, временной дуплекс (TDD), канал с замираниями огибающей сигнала с распределением Рэлея. Задержка сигнала T от 116 мкс до 300 мкс. Длительность замираний $\tau = 10-20$ мс, то есть выполнено условие $T + t_c \ll \tau$ и огибающая сигнала практически не подвергалась изменениям за время передачи символа.

Произведено сравнение вероятностей ошибки от среднего ОСШ (рис. 4) для случая комплексирования ППД с ОЧУС и случая использования ОЧУС без ППД. Сравнение показало, что предложенный алгоритм обеспечил существенный выигрыш в помехоустойчивости, а именно, при среднем значении

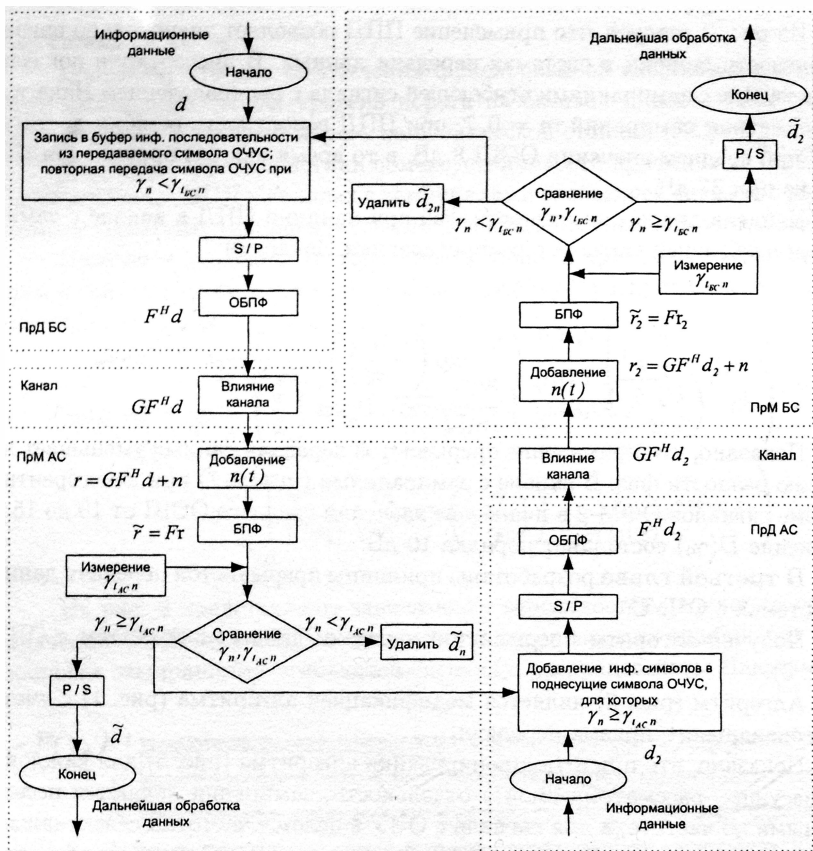


Рис. 3. Алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС: γ - текущее значение ОСШ; $\gamma_{\text{исп}n}$ - уровень порога для n -ой поднесущей в приемнике АС; $\gamma_{\text{всп}n}$ - уровень порога для n -ой поднесущей в приемнике БС; d, d_2 - передаваемые символы с ОЧУС; $\tilde{d}_n, \tilde{d}_{2n} = \tilde{a}_n + i\tilde{b}_n$ - оценки значений принятых символов с ОЧУС для n -ой поднесущей; ПрД БС - передатчик базовой станции, ПрМ АС - приемник абонентской станции

ОСШ 10 дБ вероятность ошибки уменьшается более, чем в 10 раз.

Показано, что при применении ППД в системах с ОЧУС снижается отношение пиковой мощности сигнала к средней.

В четвертой главе обоснована целесообразность применения алгоритмов разнесенного приема/передачи сигналов, проведена классификация algo-

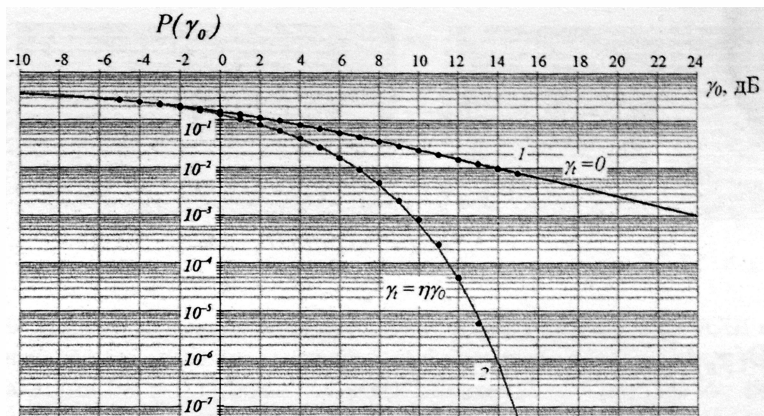


Рис. 4. Зависимости вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ для алгоритма передачи данных при ППД в системах с ОЧУС (кривая 2) и в системах ОЧУС без ППД (кривая 1). Теоретические зависимости - сплошные линии; результат имитационного моделирования - точки

ритмов разнесенного приема (РП). Проведен анализ влияния алгоритмов РП на помехоустойчивость систем передачи данных в каналах с замираниями.

Обоснована целесообразность комплексирования ППД с разнесенным приемом/передачей сигналов.

Для случая замираний огибающей сигнала с распределением Накагами, при идеальной синхронизации и фазовом рассогласовании получены: аналитические выражения вероятностей ошибок от среднего значения ОСШ, зависимости дисперсий разности фаз от среднего значения ОСШ, при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения; аналитические значения плотностей вероятности ОСШ при разнесенном приеме, при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения. Проведено сравнение помехоустойчивости системы передачи данных с ФМ-2 для случая комплексирования ППД и РП с помехоустойчивостью системы передачи данных для случая РП.

Получена дисперсия разности фаз для случая РП при объединении ветвей разнесения по алгоритму автовыбора с некоррелированными замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами в каждом канале при ППД

$$D(\gamma_0) = \frac{M}{\eta_M} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi^2 \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_0} \exp \left(-\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \right)^m \times \\ \times \left(1 - \frac{\Gamma(m, \frac{\gamma}{\gamma_0})}{\Gamma(m)} \right)^{M-1} \frac{1}{2\pi I_0(\gamma)} e^{\gamma \cos \varphi} d\gamma d\varphi \quad (5)$$

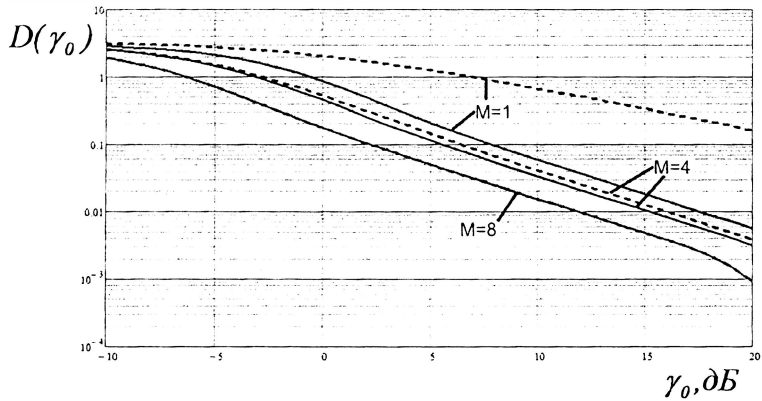


Рис. 5. Сравнение дисперсий разности фаз для случаев: а) 4х, 8ми- кратного (соответственно $M = 4$ и $M = 8$) РП при объединении ветвей разнесения по алгоритму оптимального сложения (пунктир); б) комплексирования ППД и РП (сплошная линия); и в) без разнесения ($M = 1$) в канале с некоррелированными замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами

На рис. 5 изображены дисперсии разности фаз для случаев РП, комплексирования ППД и РП и одиночного приема.

Установлено (рис. 5), что: применение ППД снижает дисперсию разности фаз; с увеличением числа ветвей разнесения выигрыш от комплексирования ППД и РП уменьшается, и уже при 8-ми ветвях разнесения влияние ППД на дисперсию разности фаз практически отсутствует.

На рис. 6 изображены зависимости вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ для случая РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения, и для случая комплексирования ППД с РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения.

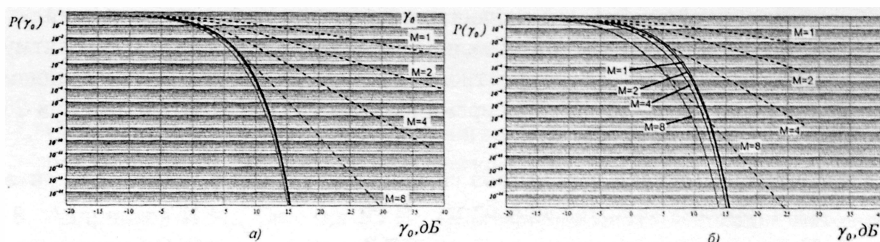


Рис. 6. Зависимости вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ в канале с некоррелированными замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами ($m = 0.7$) в каждой ветви разнесения для случаев 2х, 4х, 8м-кратного (соответственно $M = 2$, $M = 4$ и $M = 8$) РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора (а) и оптимального сложения (б) (пунктирные кривые) и для случая комплексирования ППД с РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора (а) и оптимального сложения (б) (сплошные кривые) при неидеальной синхронизации

Проведено сравнение вероятностей ошибки от среднего значения ОСШ для случая РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения, и для случая комплексирования ППД с РП при объединении ветвей разнесения по алгоритмам автовыбора и оптимального сложения (рис. 6). Установлено, что алгоритмы комплексирования ППД с РП целесообразно применять при объединении ветвей разнесения по алгоритму оптимального сложения, так как в этом случае достигается наибольший выигрыш в помехоустойчивости (см. рис. 6)

Основные результаты и выводы

1. Разработан алгоритм прерывистой передачи для систем передачи информации в каналах с замираниями, эффективный по критерию минимума вероятности ошибочного приема. Например, в канале с замираниями огибающей сигнала с распределением Накагами, с параметром замираний $m = 0,7$, при среднем значении ОСШ, равном 10 дБ, применение ППД обеспечивает уровень вероятности ошибки 10^{-5} , но без ППД только 10^{-1} .
2. Разработан алгоритм прерывистой передачи данных для систем с ОЧУС, эффективный по критерию минимума вероятности ошибочного приема.
3. Предложено и исследовано комплексирование алгоритмов ППД с РП при различном объединении ветвей разнесения на предмет влияния на

помехоустойчивость, в каналах с замираниями. Например, при комплексировании ППД с РП при объединении ветвей разнесения по алгоритму автовыбора при $M = 4$ вероятность ошибки достигает 10^{-7} при среднем значении ОСШ 13 дБ, в то время как при РП без ППД только при 25 дБ.

4. Получены оценки параметров сигнала с ОЧУ, оптимальные по критерию максимума правдоподобия.
5. Установлено, что при применении ППД в системах с ОЧУС снижается отношение пиковой мощности сигнала к средней. Например, для канала с замираниями огибающей сигнала с распределением Рэлея при $\gamma_t = \gamma_0$ указанное отношение уменьшается на 4,3 дБ.

Список публикаций

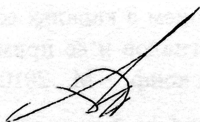
1. Андрианов И.М. Повышение спектральной эффективности систем связи с ортогональным частотным уплотнением в каналах со случайными параметрами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 70–77.
2. Шахтарин Б.И., Андрианов М.Н., Андрианов И.М. Применение прерывистой связи в каналах со случайными параметрами для передачи узкополосных сигналов и сигналов с ортогональным частотным разделением // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т.54, № 10. – С. 1237–1244.
3. Андрианов М.Н., Киселев И.Г., Андрианов И.М. Помехоустойчивость линий связи с коррелированными рэлеевскими замираниями уровней сигналов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 3. – С. 38–43.
4. Исследование алгоритмов синхронизации в системах связи. Раздел 2.4 // Научно-технический отчет о НИР «Фундаментальные проблемы создания АУИС». Шифр «КЕДР-5». / НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рук. Темы Борзов А.Б., Исп. Андрианов И.М. [и др.]: ГРН: 012-009-648-25. – М., 2010. – 246 с.
5. Системы с ортогональным частотным уплотнением сигналов. Приложение 10 // Случайные процессы. Примеры и задачи. Учеб. Пособие для вузов / В.И. Тихонов [и др.] – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – Т.5. Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации. – 400 с.

6. Основы моделирования случайных процессов. Лабораторный практикум / И.М. Андрианов [и др.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – Ч.1. – 77 с.
7. Синхронизация в радиосвязи и навигации: Учеб. пособие / Б.И. Шахтарин [и др.] – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. – 278 стр.
8. Андрианов И.М., Себекин Ю.Н., Шахтарин Б.И. Исследование методов повышения помехоустойчивости в системах с ортогональным частотным разделением сигналов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова (М.). – 2009. – Вып. № 64. – С. 274–275.
9. Андрианов И.М. Анализ эффективности систем связи с ортогональным частотным уплотнением в каналах со случайными параметрами // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Тез. докл. 12-й Междунар. научно-технической конф. – М., 2010. – С. 63–64.
10. Андрианов И.М. Анализ точности синхронизации систем связи в каналах с замираниями // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Тез. докл. 13-й Междунар. научно-технической конф. – М., 2011. – С.17–19.
11. Андрианов И.М. Синхронизация сигналов в системах связи в каналах с замираниями по закону Накагами // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова (М.). – 2011. – Вып. № 66. – С. 162–164.
12. Андрианов М.Н., Киселев И.Г., Андрианов И.М. Помехоустойчивость линий связи с коррелированными рэлеевскими замираниями уровней сигналов // ПТСПИ-2011: Тез. докл. IX Международной научной конф. – Владимир-Суздаль, 2011. – С. 125–129.
13. Андрианов И.М. Влияние алгоритмов синхронизации на эффективность систем связи с ортогональным частотным уплотнением в каналах со случайными параметрами // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: Труды 53-й Всерос. научной конф. МФТИ. – Долгопрудный, 2010. – Ч.1, Т.2 – С. 66–67.
14. Андрианов И.М., Мымриков С.А. Исследование помехоустойчивости системы передачи цифровой информации с ортогональным частотным уплотнением с канале с дискретной многолучевостью и нелинейными искажениями // 14-я Междунар. научно-техническая конф. студентов и аспирантов МЭИ: Тез. Докл. – М., 2008. – Т.1. – С. 33–34.
15. Андрианов И.М., Андрианов М.Н. Методика анализа интегрального энергопотребления мобильных терминалов систем подвижной радиосвязи

// Будущее технической науки: Тез. докл. VIII Междунар. молодежн. научно-технической конф. – Н.Новг., 2009.

16. Андрианов И.М. Исследование методов повышения помехоустойчивости в системах с ортогональным частотным разделением сигналов // Студенческая научная весна-2009: Тез. докл. общеуниверситетской научно-технической конф. – М., 2009. – Т.VIII, Ч.1. – С. 7–9.
17. Андрианов И.М. Повышение эффективности систем связи с ортогональным частотным уплотнением в каналах со случайными параметрами // Студенческая научная весна-2010: Тез. докл. общеуниверситетской научно-технической конф. – М., 2010. – Т.X, Ч.2. – с. 252.

Соискатель



Андрианов И.М.