

На правах рукописи



УШАКОВ Дмитрий Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С OFDM**

Специальность 05.13.01 – системный анализ,
управление и обработка информации (в науке и технике)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») на кафедре информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Научный руководитель: **Белов Сергей Павлович**,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Пашинцев Владимир Петрович**, доктор
технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ,
Северо-Кавказский федеральный университет,
профессор кафедры инфокоммуникаций,
г. Ставрополь

Гахова Нина Николаевна, кандидат
технических наук, доцент, почетный работник
высшего профессионального образования РФ,
доцент кафедры прикладной информатики,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет г. Белгород

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное
бюджетное учреждение высшего
профессионального образования «Поволжский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики» (ФГОБУ
ВПО «ПГУТИ»), г. Самара

Защита состоится 22 мая 2013 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.015.10 на базе ФГАОУ ВПО «Белгородский
государственный национальный исследовательский университет»
(НИУ «БелГУ»), по адресу: 308015 г. Белгород, ул. Победы, д. 85, ауд. 3-8, к. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
(НИУ «БелГУ») по адресу: 308015 г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Автореферат разослан « » апреля 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.015.10
кандидат технических наук



С.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития общества характеризуется непрерывным увеличением удаленного взаимодействия между абонентами и запросов пользователей о предоставлении различного вида мультисервисных услуг с требуемым качеством независимо от места их нахождения. Это приводит к необходимости разработки и созданию беспроводных систем высокоскоростной передачи информации с обеспечением требуемых характеристик по скорости ее доведения и качеству сервиса (QoS).

Большой вклад в решение этой проблемы внесли и вносят многие ученые и инженеры, среди которых можно отметить Дж. Возенкрафта, В.И. Долгова, Е.Г. Жилякова, А.Г. Зюко, В.А. Котельникова, Д.Д. Кловского, В.Ф. Кравченко, Б.Р. Левина, Н.Т. Петровича, А.А. Харкевича, А.Я. Хинчина, Л.М. Финка, К. Шеннона, В.П. Яковлева и других российских и зарубежных ученых.

При этом основным обобщенным критерием, который используется при оценке эффективности той или иной разрабатываемой системы является ее пропускная способность:

$$C_c = \varphi(\beta, \gamma, \eta_c, p_{\text{ош}}, C) \quad (1)$$

где: $\gamma = R/\Delta F$ – спектральная эффективность; $\beta = I/\rho_0$ – энергетическая эффективность; ρ_0 – отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума в полосе которой передаётся сигнал ΔF ; $\eta_c = T_c/T_p$ – временная эффективность сети (отношение длительности полезной части сигнала к общей длительности на выходе канала); $p_{\text{ош}}$ – вероятность ошибочного приема; C – пропускная способность канала; φ – функционал.

Такой критерий удобен тем, что он учитывает основные факторы, влияющие на эффективность систем передачи информации и подчеркивает системность решаемой проблемы, так как с одной стороны она связана с повышением спектральной эффективности систем передачи информации (СПИ), при условии, что частотно-временные ресурсы канала связи не изменяются, а с другой – с обеспечением заданного уровня достоверности передаваемой информации, определяемой режимами работы систем и характеристиками используемых сигналов.

Поэтому известно несколько вариантов оптимизации систем передачи информации и на сегодняшний день самым перспективным из них считается разработка спектрально-эффективных сигнально-кодовых конструкций (СКК) с высокой помехоустойчивостью. Одним из таких подходов, получившим широкое распространение в последнем поколении беспроводных систем передачи информации, является метод с Orthogonal frequency division multiplex (OFDM), который сегодня реализуется на основе совместного использования многопозиционных систем модуляции и гармонического базиса Фурье (БФ). Его используют такие системы как Wi-Fi, WiMAX, LTE, DVB-x, которые являются бесспорным лидером в предоставлении мультисервисных услуг с заданным качеством доведения информации, по каналам с ограниченными частотно-временными ресурсами.

Однако, применяемые в OFDM сигнально-кодовые конструкции в виде ортогональных базисов с прямоугольной формой модулирующего импульса, не позволяют обеспечить малые уровни межканальной и межсимвольной интерференции при прохождении через такие каналы. Для компенсации этого недостатка, в частотном диапазоне, где происходит передача информации, вводятся защитные интервалы, в которых информация не передается, при этом такой подход снижает на 25% эффективность использования выделенного частотного ресурса. В результате такой показатель как пропускная способность системы существенно уменьшается по сравнению с потенциально возможной, что не всегда оправдано и допустимо.

Попытка использовать специальные сглаживающие функции не нашла применения, так как в таком случае либо теряется ортогональность между базисными функциями сигнально-кодовой конструкции, либо увеличивается уровень межсимвольной интерференции.

Указанные недостатки не позволяют говорить об удовлетворенности решения проблемы оптимизации систем передачи информации с OFDM.

Таким образом, разработка новых методов и алгоритмов формирования сигнально-кодовых конструкций, позволяющих повысить пропускную способность систем передачи информации с OFDM при обеспечении заданного уровня достоверности передаваемых данных, является **актуальной задачей**.

Объект диссертационного исследования – сложные целостные системы, имеющие иерархическую структуру и предназначенные для передачи информации.

Предмет диссертационного исследования – подсистемы, предназначенные для формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций, повышающие спектральную и временную эффективность в системах передачи информации с OFDM.

Целью работы является: совершенствование методов формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций в системах с OFDM обеспечивающих повышение их спектральной и временной эффективности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

- 1) проведение анализа существующих методов передачи информации с OFDM;
- 2) разработка теоретических основ формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций, позволяющих повысить спектральную и временную эффективность систем передачи информации с OFDM;
- 3) разработка алгоритмов формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций обеспечивающих повышение эффективности систем передачи информации с OFDM;
- 4) сравнительная оценка эффективности разработанных сигнально-кодовых конструкций при передаче и обработке информации в системах с OFDM;
- 5) разработка предложений по технической реализации созданных алгоритмов формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций, на

основе использования современных элементов цифровой вычислительной техники.

Методы и средства исследований. При решении указанных задач использовались методы теории преобразования Фурье, оптимизации, линейной алгебры и теории матриц, теории информации, теории вероятности и математической статистики, теории сигналов, включая цифровые методы их формирования и обработки, вычислительный эксперимент.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается корректностью проведенных математических преобразований, непротиворечивостью сформулированных положений и выводов исследования, установленным ранее фактам теории и практики построения ИТС и повышения их эффективности, а также сходимостью выводов теоретического исследования с результатами имитационного моделирования.

Научную новизну составляют следующие результаты.

1. Сигнально-кодовые конструкции на основе нового базиса ортогональных функций, позволяющие повысить спектральную и временную эффективность систем с OFDM.

2. Алгоритмы формирования и декодирования, предлагаемых сигнально-кодовых конструкций обеспечивающие повышение спектральной и временной эффективности при сохранении заданного уровня помехоустойчивости в условиях воздействия флуктуационных, узкополосных и импульсных помех.

3. Технические решения, реализующее на основе использования элементов современной цифровой вычислительной техники, разработанные алгоритмы.

Практическая значимость работы определяется тем, что использование разработанных алгоритмов и технических реализаций позволяет обеспечить повышение спектральной и временной эффективности наиболее перспективных систем передачи информации с OFDM.

Использование результатов диссертации осуществлено: в НПП «СпецРадио», малом инновационном предприятии (МИП) «Сигнал-БелГУ», учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» НИУ «БелГУ».

Связь с научными и инновационными программами.

Результаты диссертационных исследований были использованы при выполнении следующих программ фундаментальных, поисковых и инновационных исследований:

- Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России, 2007 – 2012 гг.», поисковые исследования в рамках Госконтракта от 26 февраля 2007 года № 02514114010;

- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, Государственный контракт № П964 от 27 мая 2010 г., проект «Разработка методов и алгоритмов передачи речевой информации с минимизацией требуемых ресурсов каналов радиосвязи» (исполнитель).

- Программа Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К»: проект: «Разработка информационной технологии формирования и приема канальных сигналов с минимальным просачиванием энергии за выделенный частотный диапазон» 2010-2011г. (исполнитель).

- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, Государственный контракт № 14.740.11.1260 от 17 июня 2011 г., проект «Разработка методов и алгоритмов формирования и обработки канальных сигналов на основе применения нового ортогонального сигнального базиса» (руководитель).

- Грант РФФИ, проект № 12-07-00514-а «Минимизация затрат ресурсов информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) при хранении и передаче речевых данных на основе применения оптимальных методов и алгоритмов их обработки» 2012 – 2014 гг.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методы и алгоритмы формирования и обработки канальных сигналов на основе разработанных СКК позволяющие повысить эффективность систем передачи информации с OFDM:

1.1) метод и алгоритм формирования сигнально-кодовых конструкций на основе нового ортогонального базиса, позволяющие повысить спектральную и временную эффективность СПИ с OFDM;

1.2) процедура принятия решений при декодировании информации передаваемой с помощью сигнально-кодовых конструкций сформированных на основе нового ортогонального базиса;

2. Результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие эффективность разработанных подходов формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций по сравнению с системами OFDM.

3. Технические решения, позволяющие реализовать созданные алгоритмы формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций в режиме реального времени на основе элементов современной цифровой вычислительной техники.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (технические науки) по следующим областям исследования:

- п.2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

- п.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решения и обработки информации.

Апробация результатов диссертационных исследований.

Результаты диссертационных исследований обсуждались на 9 научно-технических конференциях:

Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и компьютерная инженерия» (г. Винница, Украина, 2010 г.); 10-й и 11-й Международных научно-практических конференциях «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2010, 2011 гг.); 2-й Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и компьютерная инженерия» (г. Харьков, Украина, 2011 г.); XII Международной научно-практической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (г. Воронеж, 2011 г.); 13-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2011», Международный научно-технический семинар «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях-СИНХРОИНФО-2011» (г. Одесса, Украина, 2011 г.); III-й Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи — путь к обществу, основанному на знаниях» (г. Москва, 2011 г.); 2-й Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии» (г. Белгород, 2011 г.).

По результатам исследований опубликована 14 работ, из них 6 работ в изданиях из списка ВАК РФ, получен 1 патент РФ и 4 свидетельства Роспатента РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, в которых приведены ряд результатов экспериментальных исследований, блок-схемы разработанных алгоритмов и документы, подтверждающие новизну результатов, полученных в работе.

Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включающего 57 рисунков, 39 таблиц и список литературных источников из 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель, научная новизна, практическая значимость результатов исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации «Эффективность систем передачи информации. Современное состояние вопроса» рассматриваются общие вопросы оптимизации систем передачи информации и критерии их эффективности, согласно которым целесообразно оптимизировать телекоммуникационные системы. Анализируется эффективность используемых в настоящее время сигнально-кодовых конструкций, а также методов оптимизации систем передачи информации с OFDM и их недостатки. Формулируется, задача оптимизации СПИ, которая состоит в том, чтобы найти такую сигнально-кодую конструкцию, которая обеспечивает максимизацию спектральной γ и временной η_c эффективности.

На основе проведенного анализа формулируются конкретные задачи диссертационного исследования, решение которых позволяет достичь основной цели работы.

Во второй главе «Разработка метода формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций» в разделе 2.1 «Математические основы метода формирования оптимальных СКК» формулируются требования, которым должна отвечать каждая компонента ССК.

Пусть $s(t)$ передаваемый сигнал, в параметрах которого закодированы передаваемые символы из многоосновной системы модуляции d_k , а $u(t)$ сигнал на выходе канала связи.

В предположении линейности и инвариантности параметров канала во времени эти сигналы связаны следующим соотношением:

$$u(t) = \int_0^{T_c} s(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau \quad t \in [0, T_p] \quad (2)$$

где: $h(t-\tau)$ – импульсная характеристика канала связи;

$s(t)$ – передаваемый сигнал;

$u(t)$ – выходной сигнал;

T_c – длительность сигнала $s(t)$;

T_p – длительность сигнала на выходе канала $u(t)$;

$[T_c, T_p]$ – интервал времени рассеивания, когда сигнал на выходе канала имеет энергию достаточную для возникновения межсимвольной интерференции.

Формулируются требования к разрабатываемым СКК в виде:

1. Неизменность формы передаваемого сигнала при передаче через ограниченный частотно-временными ресурсами канал:

$$u(t) \approx k \cdot s(t), \quad t \in [0, T_c] \quad (3)$$

2. Минимальный уровень временного рассеивания ($T_c \approx T_p$) т.е. должно выполняться:

$$\int_{T_c}^{\infty} u^2(t) dt / \left[\int_0^{T_c} u^2(t) dt \right] \ll 1, \quad (4)$$

Для выполнения требования (2) сигнал $s(t)$ должен быть согласован с импульсной характеристикой $h(t-\tau)$ и передаточной характеристикой $H(\omega)$ канала.

В работе предполагается, что информация передаётся по каналу связи частотный интервал, которого ограничен и определяется соотношением:

$$\Omega = [\Omega_1, \Omega_2]; \quad \Omega_k = 2\pi\nu_k, \quad k = 1, 2; \quad \Delta F = \nu_2 - \nu_1. \quad (5)$$

В этой области выполняется условие для $H(\omega)$

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in \Omega \\ 0, & \omega \notin \Omega \end{cases}; \quad (6)$$

Тогда импульсная характеристика определяется следующим образом:

$$h(t-\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} e^{i\omega(t-\tau)} d\omega = \frac{e^{i\Omega_2(t-\tau)} - e^{i\Omega_1(t-\tau)}}{j2\pi(t-\tau)}; \quad (7)$$

В соответствии с требованием (3) выражение (2) принимает вид:

$$k \cdot s(t) = \int_0^{T_c} s(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau, \quad (8)$$

то есть сигнал $s(\tau)$ должен быть собственной функцией линейной системы с импульсной характеристикой $h(t-\tau)$.

Выражение (8) представляет собой интегральное уравнение с ядром вида (7). Как известно, решение данного уравнения может существовать в виде собственных функций $g_i(t)$ и соответствующих им собственных чисел λ_i ядра данного уравнения $h(t-\tau)$. Ядро данного уравнения является эрмитовым, поэтому его собственные числа вещественные. Собственные функции ядра вида (7) обладают следующими свойствами:

1. Они образуют комплексно-сопряженные пары:

$$\begin{aligned} g_{2k+1}(t) &= a_{2k+1}(t) + jb_{2k+1}(t); \\ g_{2k}(t) &= a_{2k}(t) - jb_{2k}(t); \quad k = 1, 2, \dots, \infty \end{aligned}$$

где $j = (-1)^{1/2}$;

2. Для них выполняется равенство:

$$(g_k, g_i) = \int_0^T g_i(t) g_k^*(t) dt = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}; \quad (9)$$

* - комплексное сопряжение.

Заметим, что все собственные функции ядра (7) удовлетворяют условию (3). Однако, так как предполагается передача J символов, то одной собственной функции для этого недостаточно поэтому сигнал целесообразно представить в виде линейной комбинации:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N d_k g_k(t). \quad (10)$$

где: d_k – передаваемые символы в общем случае комплексные;

Если подставить эту линейную комбинацию в соотношение (8) то можно получить:

$$\int_0^T h(t-\tau) s(\tau) d\tau = \sum_{k=1}^J \lambda_k \alpha_k g_k(t); \quad (11)$$

Таким образом, для выполнения условия (3) необходимо и достаточно выбирать собственные функции с одинаковыми собственными числами $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda$. Тогда $u(t)$ будет иметь вид

$$u(t) = \lambda \sum_{k=1}^J d_k g_k(t) = \lambda \cdot s(t); \quad (12)$$

В силу (9) для линейной комбинации (10) выполняется:

$$\|s\|^2 = \int_0^T |s(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^J |d_k|^2; \quad (13)$$

Пусть:

$$G(\omega) = \int_0^T g_i(t) e^{-j\omega t} dt; \quad (14)$$

В работе доказано соотношение:

$$\lambda_i = \int_{\omega \in \Omega_K} |G_i(\omega)|^2 d\omega / 2\pi \leq \int_{-\infty}^{\infty} |G_i(\omega)|^2 d\omega / 2\pi = 1 \quad (15)$$

Получено соотношение для части энергии сигнала (10) попадающей в заданный частотный интервал:

$$P_{\Omega}(s) = \int_{\omega \in \Omega} |G(\omega)|^2 d\omega / 2\pi = \int_0^T \int_0^T s(t_1)s(t_2)h(t_1 - t_2)dt_1dt_2 = \sum_{i=1}^J \lambda_i |d_k|^2; \quad (16)$$

Таким образом, уровень просачивания энергии сигнала (ε) в частотной области определяется равенством:

$$\varepsilon = 1 - P_{\Omega}(s) / \|s\|^2 = \sum_{k=1}^J (1 - \lambda_i) |d_k|^2 / \sum_{k=1}^J |d_k|^2; \quad (17)$$

Отсюда следует, что необходимо использовать собственные функции с максимальными значениями собственных чисел. При условии что, если все $\lambda_i \approx 1$ и $i=1 \dots J$, то достигается следующее $\varepsilon \approx 0$.

Таким образом, базисные функции рассмотренного сигнального базиса не только удовлетворяют условиям (3) и (4), но и имеют максимальную концентрацию энергии в заданном частотном диапазоне, при условии $\lambda_i = 1$, $i=1 \dots J$.

В разделе 2.2 «Аппроксимация базисных функций ядра интегрального уравнения» рассматривается способ вычисления дискретных значений базисных функций, с помощью квадратурной формулы прямоугольников. Уравнения, определяющие собственные функции и собственные числа ядер, вида (11) на основе квадратурного правила прямоугольников имеет вид:

$$\int_0^T A(t_i - \tau)g(\tau)d\tau \approx \Delta t \sum_{j=0}^N A(i\Delta t - j\Delta t)\hat{g}(j\Delta t); \quad (18)$$

$$t_i = x_j = i\Delta t; \quad i, j = 0, \dots, N.$$

Матрица $A = \{a_{i,j}\}$ в соотношении (18) с элементами вида

$$a_{i,j} = \begin{cases} \frac{e^{jV_2(i-j)} - e^{jV_1(i-j)}}{j2\pi(i-j)} \text{ при } i \neq j; \\ V_2 - V_1 \text{ при } i = j \end{cases} \quad (19)$$

$$v_1 = f_1\Delta t; \quad V_1 = 2\pi v_1; \quad v_2 = f_2\Delta t; \quad V_2 = 2\pi v_2;$$

получена в результате дискретизации ядра вида (7).

Таким образом, задача вычисления базисных функций может быть сведена к вычислению собственных векторов и собственных чисел матриц вида (17). В таблице 1 представлены значения собственных чисел некоторых собственных векторов индекс, которых (i) представлен в первой строке таблицы 1. Данные значения вычислялись для СКК с параметрами $\Delta F = 20$ МГц., $T_c = 12.8$ мкс.

Таблица 1 – Значения собственных чисел собственных векторов

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	241	242	243	244
λ_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	0,99	0,98	0,95	0,92

Количество собственных векторов с $\lambda=1$ определяется соотношением, которое было получено эмпирически:

$$J = [\Delta F \cdot T_c] - 16.$$

В работе представлены результаты вычислений собственных чисел ядра для различных значений шага дискретизации и показана близость их значений. Тот же вывод справедлив и относительно близости результатов вычислений дискретизованных базисных функций. Также экспериментально установлено, что аппроксимация может быть выполнена корректно при условии, если для частоты дискретизации собственной функции F_d выполняется соотношение $F_d \geq 3\nu_2$;

В разделе 2.3 «Разработка метода формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций» рассматривается последовательность операций, необходимых для формирования предлагаемых сигнально-кодовых конструкций и их обработки при декодировании передаваемой информации.

Предварительный этап формирования и обработки СКК:

1. Задается ширина предоставляемого канала связи ΔF и длительность временного интервала для передачи сигнала T_c .

2. Формируется матрица вида (19) размерностью $N \times N$ причем $N = 4T_c \cdot (\Delta F)$; и вычисляется набор из J собственных векторов (\vec{q}_k) соответствующие близким к 1 собственным числам. Вычисленный набор собственных векторов хранится на передающей и приемной стороне.

Алгоритм формирования:

Для заданной последовательности передаваемых модуляционных символов d_k , выполняется:

1. Формируется вектор:

$$\vec{s} = \sum_{k=1}^J d_k \vec{q}_k = (\text{Re}(s_1) \dots \text{Re}(s_N)) + j(\text{Im}(s_1) \dots \text{Im}(s_N)). \quad (20)$$

2. С помощью соответствующих цифро-аналоговых преобразователей формируется компоненты непрерывного сигнала:

$$z_{\text{Re}}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \text{Re}(\vec{s}_i) \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)}{\pi \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)} \right], \quad z_{\text{Im}}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \text{Im}(\vec{s}_i) \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)}{\pi \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)} \right], \quad (21)$$

где: Δt – временной интервал дискретизации собственных функций;

\vec{s}_i – компоненты вектора (20);

3. Формируется канальный сигнал в соответствии с выделенной центральной частотой (ω_n) согласно следующему выражению:

$$s_{KC}(t) = \sum z_{RE}(t) \cdot \cos(\omega_n t) + z_{IM}(t) \cdot \sin(\omega_n t); \quad (22)$$

Полученный сигнал $s_{KC}(t)$ поступает в канал связи.

Алгоритм обработки при декодировании информации:

1. На выходе канала принимается сигнал $u(t) = s_{KC}(t) + n(t)$, где $n(t)$ – шум в канале связи;

2. Выполняется распараллеливание на два подканала, в каждом из которых $u(t)$ умножается на гармоническое колебание несущей частоты и подвергается низкочастотной фильтрации согласно выражению:

$$\hat{z}_{\text{Re}}(t) = \int_0^{T_c} G_1(t - \tau) u(t) \cdot \cos(\omega_n t), \quad t \in [0, T]; \quad \hat{z}_{\text{Im}}(t) = \int_0^{T_c} G_2(t - \tau) u(t) \cdot \sin(\omega_n t), \quad t \in [0, T]; \quad (23)$$

3. Производится аналогово-цифровое преобразование полученных сигналов $\hat{z}_{\text{Im}}(t)$ и $\hat{z}_{\text{Re}}(t)$ с шагом Δt и образуются векторы $\hat{z}_{\text{Re}} = (\hat{z}_{\text{Re}}(1), \hat{z}_{\text{Re}}(2) \dots)$ и $\hat{z}_{\text{Im}} = (\hat{z}_{\text{Im}}(1), \hat{z}_{\text{Im}}(2) \dots)$;

4. Из полученных компонент \hat{z}_{Re} и \hat{z}_{Im} формируется дискретный комплексный сигнал:

$$\hat{s} = \hat{z}_{\text{Re}} + j \cdot \hat{z}_{\text{Im}}; \quad (24)$$

5. Выполняется вычисление оценок модуляционных символов в виде скалярных произведений:

$$\hat{d}_k = \sum_{n=1}^N \hat{s}_n \cdot \bar{q}_k \quad k = 1, 2, \dots, J; \quad (25)$$

где: \hat{d}_k - восстановленная последовательность модуляционных символов.

6. Полученные значения \hat{d}_k обрабатываются решающим устройством, при этом принятие решений заключается в поиске такого d_i , для которого выполняется:

$$|\text{Re } d_i - \text{Re } \hat{d}_k| + |\text{Im } d_i - \text{Im } \hat{d}_k| = \min |\text{Re } d_m - \text{Re } \hat{d}_k| + |\text{Im } d_m - \text{Im } \hat{d}_k| \quad 1 \leq m \leq J, k = 1 \dots J, \quad (26)$$

где: \hat{d}_k - принятый символ; d_i - искомый эталонный символ; d_m - символы модуляционного алфавита. Такое решающее правило является оптимальным для гауссовой флуктуационной помехи.

В разделе 2.4 «Оценка временной эффективности» проведены эксперименты по сравнительной оценке временной эффективности (η_c) СКК, сформированных на основе двух базисов: БФ и собственных векторов матриц (СВМ) вида (19).

В эксперименте вычислялись свертки вида (2) при параметрах сигналов ($\Delta F = 20$ МГц., $T_c = 12.8$ мкс.). Импульсная характеристика рассчитывалась для полосового КИХ-фильтра с полосой пропускания (16, 20 и 24 МГц), имитирующий ограниченный частотно-временными ресурсами канал связи.

Далее в результирующих сигналах вычислялась доля энергии $E_{\text{пр}}$ находящаяся за временным интервалом $[0, T_c]$, описываемая следующим выражением:

$$E_{\text{пр}} = \Delta t \sum_{i=M}^{M+N_L} u_i^2 / \left[\Delta t \sum_{i=1}^{M+N_L} u_i^2 \right] \approx \int_0^{T_c} u^2(t) dt / \|u\|^2; \quad (27)$$

где: N_L - количество отсчетов вне интервала $[0, T_c]$, M - количество отсчетов в интервале $[0, T_c]$.

Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Оценка прохождения сигналов через ограниченный канал связи

полоса канала	Доля $E_{\text{пр}}$ сигнала БФ	Доля $E_{\text{пр}}$ сигнала СВМ
$F_{\text{н}}=132$ и $F_{\text{в}}=148$ МГц	0,1364	0,0148
$F_{\text{н}}=130$ и $F_{\text{в}}=150$ МГц.	0,0741	0,0046
$F_{\text{н}}=128$ и $F_{\text{в}}=152$ МГц.	0,0610	0,0041

Представленные в таблице 2 результаты вычислительных экспериментов иллюстрируют вывод о том, что сигнально-кодовые конструкции,

сформированные на основе СВМ, имеют меньшую долю энергии находящуюся за временным интервалом $[0, T_c]$, чем СКК на основе БФ при этом выполняется условие (4).

На основе компьютерного моделирования были проведены исследования по сравнительной оценке влияния временного рассеивания в канале на помехоустойчивость СКК. В эксперименте вычислялись свертки вида (2), причем сигналы, сформированные на основе БФ и СВМ, поступали на фильтр без временных защитных интервалов в условиях отсутствия шума. Далее результаты свертки подвергались обработке и вычислялось значение $P_{\text{ош}}$ согласно следующему выражению:

$$P_{\text{ош}} = L_{\text{ош}}/L; \quad (28)$$

где: L – количество всего переданных информационных бит; $L_{\text{ош}}$ – количество ошибочно принятых бит;

Параметр η_c оценивался в соответствии с определением соотношения (1). Для обеспечения точности значений $P_{\text{ош}}$ выполнялось соотношение: $L \geq 10^6$ и результаты усреднялись по серии из 5 экспериментов. Результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Помехоустойчивость и временна эффективность СКК при МСИ

$P_{\text{ош}}$ (БФ)	$P_{\text{ош}}$ (СВМ)	η_c (БФ)	η_c (СВМ)
$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	0,712	0,837

Полученные результаты говорят о преимуществах предлагаемых СКК на основе базиса СВМ с точки зрения временной эффективности и вероятности правильного декодирования.

В разделе 2.5 «Частотно-временные характеристики базисных функций» на основе вычислительных экспериментов проводится оценка частотно-временных характеристик базисных функций, а также определяется соответствие формируемых сигнально-кодовых конструкций степени концентрации энергии в заданной частотной области.

Базисные функции формировались со следующими параметрами ΔF – 20 МГц, T_c – 12.8 мкс. Сигналы с такими параметрами используются в современных системах передачи информации (Fixed WiMAX). Для вычисления частотного спектра использовалась стандартная процедура в среде Matlab.

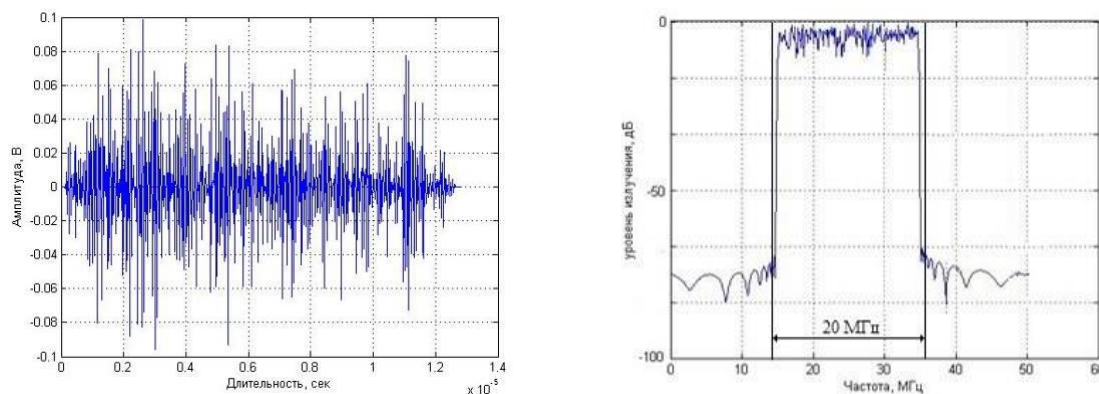


Рисунок 1 – Характеристики одной из базисных функций с $\lambda=1$

Из рисунка 1 видно, что собственные векторы матриц (19) равномерно заполняют выделенный частотный интервал в заданной частотной области, при условии, если соответствующее им собственное число $\lambda \approx 1$, что может быть полезно когда передача информации осуществляется в условиях воздействия узкополосных помех.

В третьей главе диссертации «Оценка характеристик формируемых сигнально-кодовых конструкций и сравнение их эффективности» проводятся экспериментальные исследования по оценке спектральной и энергетической эффективности разработанных СКК при воздействии различного рода помех и искажений (аддитивный шум, узкополосная, импульсная помеха, нестабильность генераторов гетеродинов).

В разделе 3.1 «Оценка спектральной эффективности СКК» проводятся вычислительные эксперименты для сравнительной оценки спектральной эффективности предлагаемых, в работе СКК.

Моделирование осуществлялось следующим образом:

Генерировалась бинарная случайная последовательность, которая модулирует передаваемые данные. Из полученной бинарной последовательности формировались модуляционные символы d_k . Далее формировались сигнально-кодовые конструкции для двух смежных каналов в полосе 20 МГц каждый, на основе БФ и СВМ. Значения несущих частот были следующими: канал 1 – 2,48 ГГц; канал 2 – 2,5 ГГц.

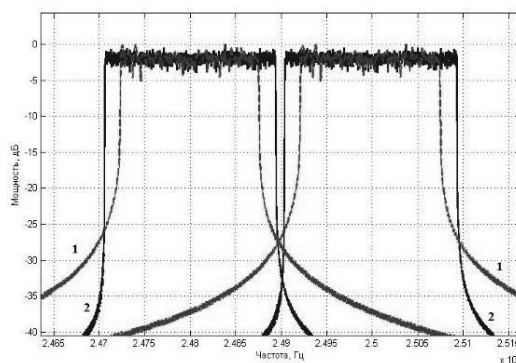


Рисунок 2 – Спектральные плотности сигналов
1) Базис Фурье; 2) Базис собственных векторов матриц (19)

На рисунке 2 показаны усредненные значения спектральной плотности СКК БФ (№1) и спектральной плотности СКК СВМ (№2) полученных в результате моделирования.

Величина спада частотного спектра сигнала за выделенным частотным диапазоном определяет уровень межканальной интерференции. Так как, величина спада спектральной плотности СКК СВМ гораздо выше, чем в OFDM, а также, что ширина окна канала фиксирована (в данном случае 20 МГц), то появляется возможность уменьшить величину вводимых защитных интервалов между смежными каналами связи и увеличить за счет этого спектральную эффективность γ (рис.2), при этом уровень МКИ остаётся меньше чем в СКК с БФ.

В таблице 4 приводятся результаты экспериментов по сравнительной оценке количества формируемых базисных функций в заданных частотно-временных ресурсах канала связи. В полях таблицы представлены отношения количества допустимых к использованию базисных функций при использовании СКК СВМ к количеству базисных функций в БФ.

Таблица 4 – Относительные количества формируемых базисных функций

T_c , мкс	Ширина частотного диапазона, МГц				
	1,25	2,5	5	10	20
25,6	1,24	1,24	1,24	1,23	1,23
12,8	1,25	1,24	1,24	1,24	1,23
6,4	1,16	1,25	1,24	1,24	1,24
3,2	1	1,16	1,25	1,24	1,24
1,6	1	1	1,16	1,25	1,24

Спектральная эффективность γ вычислялась следующим образом:

$$\gamma = R/\Delta F, \quad (29)$$

где: R - скорость передачи информации ($R=J/T_c$); ΔF – ширина полосы частот, занимаемая сигналом.

Результаты оценки спектральной эффективности γ исследуемых сигнально-кодовых конструкций, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Спектральная эффективность сигнально-кодовых конструкций

Вид модуляции \ Вид базиса	Базис Фурье	Базис СВМ
QPSK	1,57	1,96
QAM-16	3,14	3,9
QAM-64	6,28	7,78

Данные значения были рассчитаны исходя из предположения, что полоса, занимаемая сигналом, составляет 20 МГц, длительность сигнала – 12,8 мкс.

Таким образом, проведенный эксперимент доказывает, что предлагаемый класс сигнально-кодовых конструкций обладает спектральной эффективностью на 20% большей, чем сигналы, сформированные с использованием базиса Фурье, при одинаковых выделенных частотно-временных ресурсах канала связи.

В разделе 3.2 «Оценка энергетической эффективности СКК» проводятся вычислительные эксперименты по сравнительной оценке энергетической эффективности предлагаемых в работе СКК.

Для вычисления энергетической эффективности используется выражение вида:

$$\beta = 10 \cdot \log_{10} (R/\rho_0); \quad (30)$$

где: R – скорость передачи информации за T_c ; ρ_0 – отношение энергии сигнала E_s к спектральной плотности N_0 шума в полосе ΔF .

Для оценки энергетической эффективности β проводились вычислительные эксперименты с использованием компьютерного

моделирования по оценке вероятности ошибочного приема при заданной интенсивности шума в канале связи. При этом в качестве модели шума используется белый гауссовый шум, энергия которого равномерно распределена в частотной области с нулевым математическим ожиданием. Значение $P_{\text{ош}}$ вычислялась согласно (28), при этом выполнялось соотношение: $L \geq 10^6$ и результаты усреднялись по серии из 5 экспериментов.

Результаты представлены на рисунке 3.

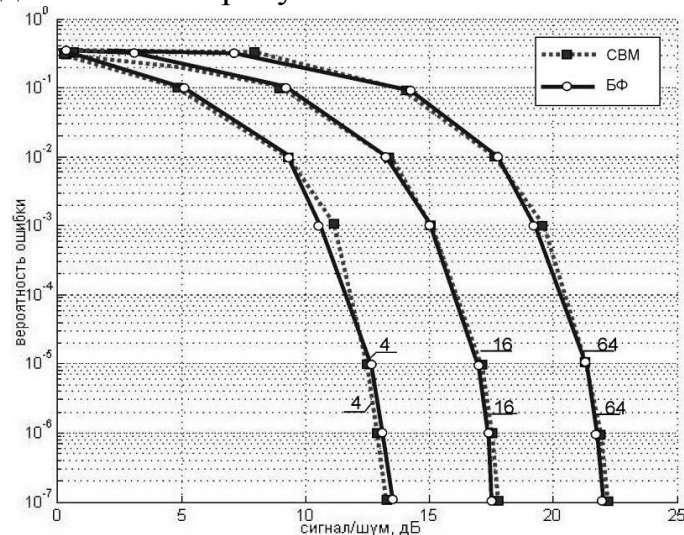


Рисунок 3 – Вероятность ошибки на бит (BER) СКК БФ и СВМ

Результаты оценки энергетической эффективности исследуемых сигналов, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Энергетическая эффективность сигнально-кодовых конструкций

Вид модуляции \ Вид базиса	Базис Фурье, дБ	Базис СВМ, дБ
QPSK	13,11	13,92
QAM-16	10,05	10,85
QAM-64	8,12	8,93

В результате вычислительных экспериментов удалось установить, что предлагаемый класс сигналов обладает энергетической эффективностью на 0,8 дБ большей, чем сигналы, сформированные с использованием базиса Фурье, при одинаковых выделенных частотно-временных ресурсах канала.

В разделе 3.3 «Оценка влияния узкополосной помехи» проводятся эксперименты для исследования устойчивости разработанных СКК к влиянию узкополосных помех.

Эффективность работы современных систем связи в значительной мере определяется не только замираниями и помехами типа флуктуационного шума, но и взаимными помехами, создаваемые одновременно работающими радиосредствами, среди которых заметную долю составляют сосредоточенные по спектру помехи.

Рассматриваемый узкополосный случайный процесс описывается выражением следующего вида:

$$S_k = B_k \sin(\omega_0 k + \varphi) \quad t \in [0, T_p]; \quad (31)$$

где: B_k – дискретный случайный процесс, распределенный по закону Релея; φ_k – случайная фаза, имеющая равномерное распределение на интервале $[0, 2\pi]$.

Оценка влияния помех проводилась с использованием компьютерного моделирования в среде MatLAB. Исследуемые СКК складывались с сигналом вида (31) и обрабатывались. Значение $P_{\text{ош}}$ вычислялась согласно (28), при этом выполнялось соотношение: $L \geq 10^6$ и результаты усреднялись по серии из 5 экспериментов. Полученные в результате моделирования значения вероятности ошибки на бит представлены на рисунке 4.

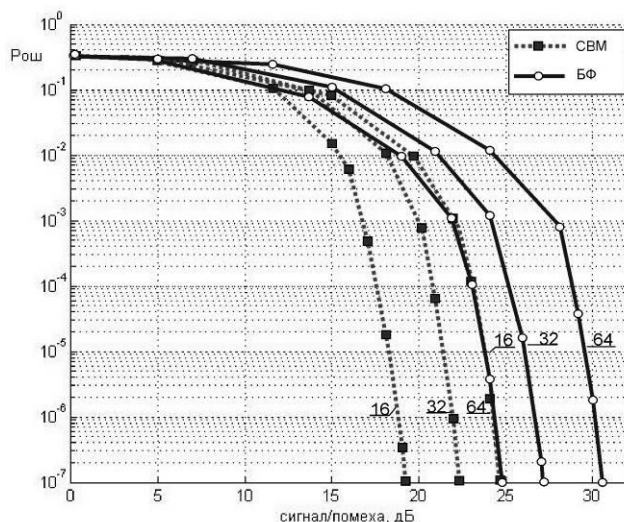


Рисунок 4 – Вероятность ошибки на бит (BER) СКК БФ и СВМ

Результаты энергетической эффективности для условий воздействия узкополосной помехи представлены в таблице 7 для трех видов модуляции.

Таблица 7 – Показатели энергетической эффективности сигналов

Вид модуляции \ Вид базиса	Базис Фурье, дБ	Базис СВМ, дБ
QPSK	8,6	13,4
QAM-16	6,7	11,6
QAM-64	4,5	9,3

Результаты показывают, что сигнално-кодовые конструкции, сформированные на основе СВМ, имеют на 6 дБ большую энергетическую эффективность, чем системы с БФ при воздействии узкополосных помех. Такой эффект достигается за счет того, что энергия собственного вектора распределена по всему выделенному частотному интервалу и под действие данной помехи попадает только часть области частот вектора (см. рис.1).

В разделе 3.4 «Оценка влияния импульсных помех» проводятся эксперименты по исследованию устойчивости к влиянию импульсных помех на предлагаемые СКК.

Для описания импульсных помех промышленного характера используется распределение Вейбула:

$$f(x) = kmx^{m-1} \exp(-kx^m), \quad x \geq 0, \quad (32)$$

где m - параметр наклона и k - параметр масштаба.

Оценка влияния помех проводилась с использованием компьютерного моделирования в среде MatLAB. Исследуемые СКК складывались с сигналом вида (32) и демодулировались. Значение $P_{\text{ош}}$ вычислялась согласно (28), при этом выполнялось соотношение: $L \geq 10^6$ и результаты усреднялись по серии из 5 экспериментов. Полученные в результате моделирования значения вероятности ошибки на бит, представлены на рисунке 5.

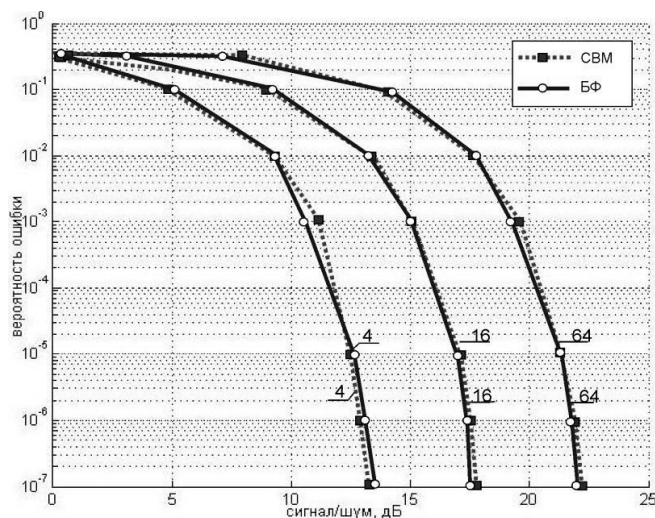


Рисунок 5 – Вероятность ошибки на бит (BER) СКК БФ и СВМ

Результаты энергетической эффективности для условий воздействия импульсной помехи представлены в таблице 8 для трех видов модуляции.

Таблица 8 – Показатели энергетической эффективности сигналов

Вид модуляции \ Вид базиса	Базис Фурье, дБ	Базис СВМ, дБ
QPSK	13,2	14,1
QAM-16	10,3	10,9
QAM-64	8,2	8,9

Результаты показывают, что СКК сформированные на основе СВМ, имеют энергетическую эффективность на 0,8 дБ большую в среднем, чем СКК с БФ при воздействии импульсных помех.

В разделе 3.5 «Оценка влияние нестабильностей приемо-передающей аппаратуры» проводятся эксперименты по исследованию устойчивости к влиянию рассогласования генераторов несущих частот.

Известно, что частоты гетеродинов на передающей и приёмной сторонах любой радиосистемы отличаются друг от друга на некоторую случайную величину df . Данное явление в некоторой степени компенсируется системами автоматической подстройки частоты, однако остаточная ошибка все равно остается. Данный факт вызывает пропорциональное смещение спектра принимаемого сигнала OFDM и нарушению ортогональности между базисными функциями, что приводит к высокому уровню внутрисимвольной интерференции и снижению эффективности СПИ. В данном эксперименте

задавалась величина рассогласования в герцах и выполнялась демодуляция передаваемой информации СКК на основе БФ и СВМ. При этом оценивалась необходимая величина отношения ρ_0 для обеспечения заданной $P_{\text{ош}}$. Результаты необходимого отношения E_s/N_0 для обеспечения заданной $P_{\text{ош}}$ представлены в таблицах 9-11.

Таблица 9 – Помехоустойчивость при джиттере несущей (QAM-4)

	Вероятность ошибки											
	10^{-6}		10^{-5}		10^{-4}		10^{-3}		10^{-2}		10^{-1}	
Джиттер, Гц	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ
500	15	15	14,6	14,4	14,1	14,1	13,2	13,2	11,3	11,3	10,1	10,1
1000	15,5	15,2	15,1	14,6	14,6	14,3	13,9	13,8	12,4	12,1	11,2	10,4
1500	16	15,4	15,6	14,8	15	14,4	14,1	14	13	12,5	11,9	10,5
2000	16,4	15,6	16	15	15,4	14,6	14,9	14,2	14,2	12,7	13	11,6
2500	17	15,8	16,5	15,2	16	14,7	15,5	14,3	14,9	13	13,8	12
3000	17,6	16	17,1	15,4	16,6	14,8	16,1	14,6	15,5	13,3	14,9	12,5
3500	18,1	16,2	17,5	15,6	17	15,1	16,5	14,7	15,9	13,6	15	12,8
4000	18,6	16,4	18	15,8	17,4	15,3	16,8	15,2	16,1	14	15,4	13

Таблица 10 – Помехоустойчивость при джиттере несущей (QAM-16)

	Вероятность ошибки											
	10^{-6}		10^{-5}		10^{-4}		10^{-3}		10^{-2}		10^{-1}	
Джиттер, Гц	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ
500	20	19,8	19,6	19,5	18,6	18,4	17,6	17,4	16	16	14	11,8
1000	20,5	20,3	20	19,8	19,2	19	17,8	18	16,4	16,3	14,6	12,1
1500	21,4	21	21,1	20,3	20,1	19,5	18	18,4	17,5	17	15,9	12,9
2000	23	21,4	22,5	21	21,5	20	20,5	19,1	19	17,9	16,8	14,1
2500	26	23,8	25	22,6	23,1	20,7	21,4	19,6	19,9	27,5	18	14,9
3000	30	27,6	28	25,7	25	22,5	23	20,6	21	18,4	19	16,1
3500	-	30	30	27,8	28	25,4	25	24,8	23	20,6	20,9	17,2
4000	-	34	-	30	30	27,8	28	25,5	25	22,4	22	19,5

Таблица 11 – Помехоустойчивость при джиттере несущей (QAM-64)

	Вероятность ошибки											
	10^{-6}		10^{-5}		10^{-4}		10^{-3}		10^{-2}		10^{-1}	
Джиттер, Гц	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ	БФ	СВМ
500	33,2	33	30,7	28,4	27,6	25,5	23,2	21,4	20	18,2	17,1	15
1000	36	35,5	34,2	33,7	30,1	28,4	26,4	25	20,8	18	18,2	14,5
1500	40	37,6	35	34,2	31,7	28,9	28,2	26	22,6	20	20	17,6
2000	-	40	40	37	37	31,2	32	27,3	27	23,2	21	18,1
2500	-	-	-	40	40	37,2	37	32,3	30	28,7	22	25,8
3000	-	-	-	-	-	40	40	37	35	34,3	30	31,8
3500	-	-	-	-	-	-	-	40	40	37,6	34	35
4000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,8	-	35,9

Экспериментально установлено, что сигнально-кодовые конструкции, формируемые на основе СВМ, обладают на 2.5 дБ большей устойчивостью к влиянию частотного рассогласования генераторов в отличие от СКК на основе БФ.

В четвертой главе «Предложения по технической реализации разработанных методов формирования СКК» в разделе 4.1 «Разработка алгоритмов формирования и обработки СКК» рассматриваются алгоритмы формирования и обработки СКК обеспечивающие повышение эффективности систем передачи информации с OFDM.

В разделе 4.2 «Устройство формирования и устройство обработки СКК» рассмотрено устройство формирования (рисунок 6) и устройство обработки (рисунок 7) разработанных СКК обеспечивающие повышение спектральной и временной эффективности СПИ с OFDM.

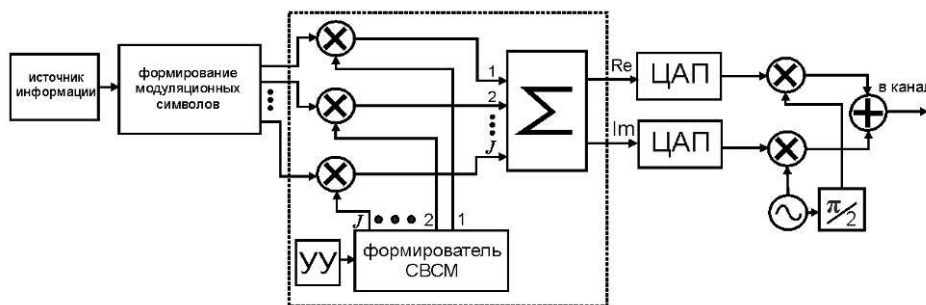


Рисунок 6 – Схема устройства формирования СКК

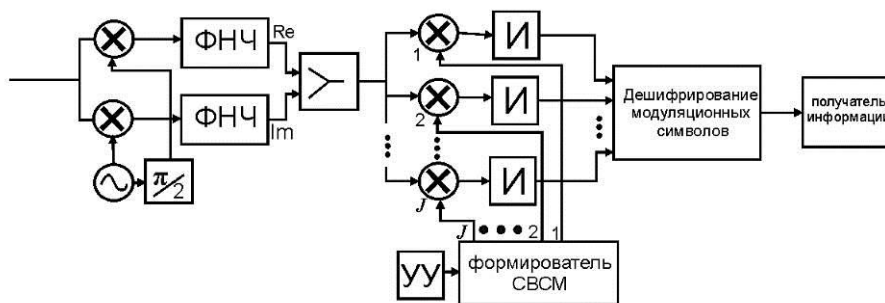


Рисунок 7 – Схема устройства обработки СКК

В разделе 4.3 «Компьютерная модель приемо-передающего оборудования» разработана имитационная модель устройства в среде LabView и показана работоспособность данной модели с помощью компьютерного моделирования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложениях приведены: документы, подтверждающие научную новизну представленных в диссертации методов и алгоритмов формирования СКК; часть результатов экспериментальных исследований; интерфейсы и демонстрация работы программных реализаций разработанных методов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций, для систем с OFDM, обеспечивающий повышение их спектральной и временной эффективности:

1.1) метод формирования сигнально-кодовых конструкций на основе нового ортогонального базиса, в виде собственных векторов эрмитовых матриц;

1.2) процедура принятия решений при декодировании информации передаваемой с помощью сигнально-кодовых конструкций сформированных на основе нового ортогонального базиса;

1.3) разработаны алгоритмы формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций, при использовании которых обеспечивается повышение эффективности систем передачи информации с OFDM;

2. Разработаны технические решения, позволяющие реализовать созданные алгоритмы формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций на основе элементов современной цифровой вычислительной техники.

3. Проведены вычислительные эксперименты показали, что сравнительные оценки спектральной и временной эффективности разработанных сигнально-кодовых конструкций, которые показали эффективность разработанных методов перед используемыми в настоящее время, что при одинаковых частотно-временных ресурсах канала связи предлагаемый метод формирования СКК обеспечивает повышение на 20% спектральной и на 18% временной эффективности систем передачи информации с OFDM;

5. Получены результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности разработанных подходов при влиянии узкополосных и импульсных помех, а также нестабильности опорных генераторов приемного оборудования;

6. Разработаны предложения по технической реализации созданных алгоритмов формирования и обработки канальных сигналов на основе средств цифровой вычислительной техники.

7. Применение разработанных методов обеспечивает повышение спектральной и временной эффективности систем передачи информации с OFDM.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Ушаков, Д.И. Исследование особенностей комбинированной обработки сложных сигналов с линейной частотной модуляцией [Текст] / С.П. Белов, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт // Научные ведомости БелГУ Сер.: Информатика. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2009. – № 7(62), Вып. 10/1. – С 194-201.

2. Ушаков, Д.И. Компьютерное моделирование формирования канальных сигналов на основе собственных векторов субполосных матриц [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Электронная вычислительная техника (ЭВТ)». – М., 2011. – Вып. 1. – С. 131-141.

3. Ушаков, Д.И. О возможности повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Е.М. Маматов, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт //

Информационные системы и технологии. – Орел: Изд-во ОГТУ, 2011. – № 1 (63). – С. 39-46.

4. Жилияков, Е.Г. К вопросу повышения помехоустойчивости систем связи на основе применения канальных сигналов с изменяющимися частотными характеристиками [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков // Инфокоммуникационные технологии. – Самара, 2011. – № 3. – С. 4.

5. Ушаков, Д.И. О возможности повышения помехоустойчивости сигналов с OFDM [Текст] / С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Информационные системы и технологии. – Орел: Изд-во ОГТУ, 2012. – № 1 (64). – С. 85-90.

6. Ушаков, Д.И. Сравнение алгоритмов формирования канальных сигналов в системах с OFDM [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Электронная вычислительная техника (ЭВТ)». – М., 2012. – Вып. 1. – с. 131-141.

Публикации в сборниках научных трудов

1. Ушаков, Д.И. Ортогональный базис для формирования канальных сигналов [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.В. Урсол, Д.И. Ушаков // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания : сб. тр. всерос. науч.-техн. сем. – Нижний Новгород, 2010. – С.152-154.

2. Ушаков, Д.И. Об одном методе оценки уровня внеполосных излучений моделированных канальных сигналов [Текст] / Д.И. Ушаков // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности : труды X междунар. конф. – СПб., 2010. – Т. 1, секция 2. – С. 196-199.

3. Ушаков, Д.И. Об одном методе повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Труды Рос. науч.-техн. общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2011. – Вып. XIII-1. – С. 188-191.

4. Ушаков, Д.И. Оценка влияния узкополосной помехи на канальные сигналы с OFDM [Текст] / Жилияков Е.Г., Белов С.П., Ушаков Д.И. // СИНХРОИНФО-2011 : труды междунар. науч.-техн. сем. – Одесса, 2011. – С. 18-20.

5. Ушаков, Д.И. О методе формирования канальных сигналов на основе применения собственных векторов субполосных матриц / И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков, А.И. Брус // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2011. Вып. XIII-1 – С. 76-78.

6. Ушаков, Д.И. Оценка влияния импульсной помехи на канальные сигналы OFDM / С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Компьютерные науки и технологии КНиТ–2011 : труды II Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород, 2011. – С. 391-395.

7. Ушаков, Д.И. О влиянии аддитивной помехи на канальные сигналы с OFDM / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Информационные

технологии и компьютерная инженерия : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Харьков, 2011. – С. 27-29.

8. Ушаков, Д.И. Об особенностях формирования одного класса канальных сигналов в системах с OFDM / Е.Г. Жиляков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков // Компьютерные науки и технологии КНиТ-2011 : сб. тр II Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород, 2011. – С.430-434.

Патенты на изобретение

1. Патент России № 2459359 от 20 августа 2012 года «Способ формирования канальных сигналов и устройство его реализующее» Е.Г. Жиляков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков, Д.В. Урсол.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. «Программная реализация информационной технологии формирования канальных сигналов с минимальным уровнем внеполосных излучений» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615973 от 01 августа 2011 г. С.П. Белов, Е.Г. Жиляков, Д.И. Ушаков.

2. «Программа моделирования влияния аддитивных помех на сигналы с OFDM» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615993 от 03 августа 2011 г. Е.Г. Жиляков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков.

3. «Программа имитации воздействия среды распространения сигнала на достоверность передаваемой информации сигналами OFDM» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615434 от 18 июня 2012г. С.П. Белов, Е.Г. Жиляков, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт, В.В. Трофимов.

4. «Программа имитации воздействия среды распространения сигнала на достоверность передаваемой информации сигналами сформированные на основе собственных векторов субполосных матриц» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615433 от 18 июня 2012 г. С.П. Белов, Е.Г. Жиляков, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт, В.В. Трофимов.

Подписано в печать 17.04.2013. Гарнитура Times New Roman.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»

308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

