

На правах рукописи



СТАРОВОЙТ Иван Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ
КОММУНИКАЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПО СПЕКТРУ ПОМЕХ**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГАОУ ВПО) «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: **Калмыков Игорь Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе института Информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Гахов Роман Павеласович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Прикладной информатики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

Ведущая организация ФГОБУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Защита состоится 19 июня 2013 г. в 16.30 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 «___» мая 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.015.10
к.т.н., с.н.с.



С.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возрастающая потребность людей в информационном обмене с высоким качеством на различные расстояния независимо от места их нахождения привела к необходимости активного применения для этих целей различного типа информационных коммуникаций. Известно, что в процессе информационного обмена передаваемые данные претерпевают искажения, которые связаны с воздействием помех различного рода. В техногенных условиях современных промышленных городов основным видом помех, влияющих на помехоустойчивость информационного обмена, являются сосредоточенные по спектру помехи, которые возникают в результате работы различного технического оборудования. В частности, промышленных генераторов, медицинского диагностического оборудования, микроволновых передатчиков и т.д. Совокупное воздействие помех серьезно ухудшает помехоустойчивость информационных коммуникаций и повышает вероятность ошибочного декодирования передаваемых данных.

В связи с этим очень важным является выбор методов кодирования и декодирования данных, в которых в качестве переносчиков закодированной информации используются сигнально-кодовые конструкции (СКК). Одним из подходов, достаточно часто используемым в информационных коммуникациях для повышения их помехоустойчивости в условиях сосредоточенных по спектру помех, является метод кодирования данных с применением СКК, обладающих расширенным энергетическим спектром по сравнению с узкополосными СКК.

Однако распределение энергетических составляющих в частотной области у существующих сигналов указанного класса, которые достаточно часто называют широкополосными шумоподобными сигналами (ШШС), почти равномерное, что не позволяет на основе применения имеющихся методов их обработки, значительно повысить помехоустойчивость информационных коммуникаций при воздействии сосредоточенных по спектру помех за счет простого расширения спектра СКК.

Таким образом, разработка новых методов кодирования и декодирования информации, на основе применения в качестве переносчиков закодированной информации СКК, инвариантных к воздействию сосредоточенных по спектру помех, позволяющих повысить помехоустойчивость информационных коммуникаций, является **актуальной задачей**.

Объект диссертационного исследования – информационные коммуникации.

Предмет диссертационного исследования – методы кодирования и декодирования информации, обеспечивающие повышенную помехоустойчивость информационных коммуникаций.

Целью работы является: Повышение помехоустойчивости информационных коммуникаций при воздействии сосредоточенных по спектру помех на основе применения методов кодирования и декодирования информации, использующих новый класс сигнально-кодовых конструкций.

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

1. Проведение анализа существующих методов передачи информации в информационных коммуникациях с позиции их помехоустойчивости.

2. Разработка методов кодирования и декодирования информации, основанных на применении нового класса сигнально-кодовых конструкций, устойчивых к воздействию сосредоточенных по спектру помех.

3. Разработка алгоритмов кодирования и декодирования информации, основанных на применении нового класса сигнально-кодовых конструкций, устойчивых к воздействию сосредоточенных по спектру помех.

4. Разработка предложений по технической реализации алгоритмов кодирования и декодирования информации в информационных коммуникациях при использовании сигнально-кодовых конструкций, устойчивых к воздействию сосредоточенных по спектру помех.

Методы и средства исследований. При решении указанных задач использовались методы Фурье-анализа и синтеза, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, а также вычислительные эксперименты.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается корректностью проведенных математических преобразований, непротиворечивостью сформулированных положений и выводов исследования с установленными ранее фактами теории и практики обеспечения информационного обмена, на основе применения различного вида сигнально-кодовых конструкций, а также сходимостью выводов теоретического исследования с результатами моделирования.

Научную новизну составляют следующие результаты.

- Сигнально-кодовые конструкции на основе нового базиса ортогональных функций, обеспечивающие высокую устойчивость к воздействию сосредоточенных по спектру помех, при заданной скорости передачи информации в информационных коммуникациях;

- Алгоритмы кодирования и декодирования информации на основе предлагаемых сигнально-кодовых конструкций;

- Технические решения, реализующие на основе использования элементов современной цифровой вычислительной техники разработанные алгоритмы.

Практическая значимость работы определяется тем, что использование полученных методов и алгоритмов позволит обеспечить более высокую помехоустойчивость информационных коммуникаций при воздействии на передаваемую информацию сосредоточенных по спектру помех.

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

Внедрения подтверждаются соответствующими документами.

Связь с научными и инновационными программами.

Результаты диссертационных исследований были использованы при выполнении ряда проектов в рамках следующих фундаментальных, поисковых и инновационных исследований и программ:

- 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;

- Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, Государственный контракт № П964 от 27 мая 2010 г.;

- 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» 2012-2014гг.;

- Программа Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К»: проект: «Разработка информационной технологии формирования канальных сигналов, устойчивых к воздействию сосредоточенных по спектру помех» 2011-2012г.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод повышения помехоустойчивости информационных коммуникаций на основе применения нового класса сигнально-кодовых конструкций в виде собственных векторов субполосных матриц с малыми значениями собственных чисел:

1.1 обеспечивающий наименьшее влияние на энергетические характеристики канальных сигналов в условиях воздействия сосредоточенных по спектру помех;

1.2 обеспечивающий большее количество одновременно работающих абонентов по сравнению с существующими методами кодирования и декодирования информации в режиме кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций;

2. Алгоритмы, реализующие разработанные методы кодирования и декодирования информации на основе применения нового класса сигнально-кодовых конструкций;

3. Результаты вычислительных экспериментов по исследованию разработанных алгоритмов кодирования и декодирования информации на основе применения нового класса сигнально-кодовых конструкций, которые иллюстрируют преимущества предложенного метода в сравнении с существующими методами кодирования и декодирования информации в режиме кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций;

4. Предложения по технической реализации разработанных алгоритмов кодирования и декодирования информации на основе средств цифровой вычислительной техники.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» (в науке и технике) по следующим областям исследований:

п. 11. Разработка методов обеспечения высоконадежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации; разработка основ теории надежности и безопасности использования информационных технологий;

п. 16. Общие принципы организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности. Разработка научных принципов организации информационных служб по отраслям народного хозяйства. Изучение социально-экономических аспектов информатизации и компьютеризации общества.

Личный вклад соискателя. Все изложенные в диссертационной работе результаты исследований получены либо соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов диссертационных исследований.

Результаты диссертационных исследований обсуждались на 10 научно-технических конференциях:

Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, второй международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии» Белгород, 2011 г., 13-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» г. Москва, 2011 г., 11-ой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 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., международной конференции «Прикладная математика, управление и информатика» г. Белгород, 2012 г., международной конференции «Информационные технологии и защита информации» Харьков-2012., всероссийской конференции «Системы управления и связи», Ростов на дону, 2012 г., всероссийской молодежной конференции «Теория и практика системного анализа», 3 – 5 октября 2012 г., Белгород.

По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, из них 5 в изданиях из списка ВАК РФ, получено 7 свидетельств Роспатента РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, в которых приведены документы, подтверждающие новизну результатов, полученных в работе.

Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, включающего 37 рисунков, 6 таблиц и список литературных источников из 107 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Информационные коммуникации. Принципы обмена информацией. Постановка задач исследования» рассмотрены основные принципы информационного обмена, современные методы кодирования информации, а также их помехоустойчивость при воздействии флуктуационных и сосредоточенных по спектру помех. На основе представленного анализа сформулированы конкретные задачи диссертационного исследования, решение которых позволяет достичь основной цели работы.

Во второй главе «Метод кодирования и декодирования информации на основе собственных векторов субполосной матрицы» в параграфе 2.1 «Математические основы построения сигнально-кодовых конструкций с требуемыми частотно-временными характеристиками» рассматриваются требования к сигнально-кодовым конструкциям, которые необходимо использовать при кодировании информации для обеспечения помехоустойчивого информационного обмена в режиме кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций при наличии сосредоточенных по спектру помех.

Отмечается, что сигнально-кодовые конструкции должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Элементы СКК, применяемые для кодирования информации, передаваемой в режиме кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций должны быть ортогональны, то есть нормированный коэффициент их корреляции представим в виде:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{E_{эл}} \int_0^{T_{эл}} s_i(t) s_j(t) dt = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq j \\ 1, & \text{при } i = j \end{cases}, i, j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где $s_i(t), s_j(t)$ – элементы СКК для передачи информации i -ым и j -ым абонентами, длительностью $T_{эл}$, то есть $t \in [0, T_{эл}]$, а энергетический спектр каждого из них $|S_i(\omega)|^2$ распределен в полосе частот, ограниченной пределами $D = [-\Omega_2, -\Omega_1) \cup [\Omega_1, \Omega_2)$, $E_{эл}$ – энергия элемента СКК, одинаковая для всех элементов, определяемая выражением:

$$E_{эл} = \int_0^{T_{эл}} s_i^2(t) dt = const, \forall i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

2. База каждого элемента СКК:

$$B_{эл} = \Delta F_{эл} T_{эл}, \quad (3)$$

где $\Delta F_{эл}$ – ширина спектра элемента СКК, при использовании кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций должна значительно превышать единицу.

3. Концентрация энергии элемента СКК в полосе частот, в которой находится сосредоточенная по спектру помеха, должна быть близка к нулю:

$$K_{\mathcal{D}} = \frac{\hat{E}_{эл}}{E_{эл}} \rightarrow 0, \quad (4)$$

где $\hat{E}_{\text{эл}}$ – энергия элемента СКК в полосе частот, в которой находится сосредоточенная по спектру помеха:

$$\hat{E}_{\text{эл}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega \in D_p} |S(\omega)|^2 d\omega, \quad (6)$$

D_p – диапазон частот сосредоточенной по спектру помехи:

$$D_p = [-V_2, -V_1] \cup [V_1, V_2], \quad D_p \subset D. \quad (7)$$

В этом параграфе было установлено, что корреляционная функция элемента СКК, искаженного и неискаженного сосредоточенной по спектру помехой зависит от концентрации энергии элемента СКК в полосе частот помехи указанного вида.

Действительно, если в диапазоне D_p присутствует сосредоточенная по спектру помеха, тогда искаженный ею элемент СКК имеет вид: $\tilde{s}_i(t) = s_i(t) + p(t)$, а его спектр представим в виде:

$$\tilde{S}_i(\omega) = \int_0^{T_{\text{эл}}} \tilde{s}_i(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{T_{\text{эл}}} (s_i(t) + p(t)) e^{-i\omega t} dt = S_i(\omega) + P(\omega), \quad (8)$$

где $p(t)$ – сосредоточенная по спектру помеха, а $P(\omega)$ – спектр этого вида помехи, $\tilde{s}_i(t)$ – элемент СКК, искаженный узкополосной помехой, а $\tilde{S}_i(\omega)$ его спектр.

Тогда корреляционная функция:

$$\hat{\rho}(\tau) = \int_0^{T_{\text{эл}}} \tilde{s}_i(t) s_i(t - \tau) dt, \quad (9)$$

где $\tau \in [0, T_{\text{эл}}]$ – временной сдвиг, в соответствии с обобщенной формулой Рэлея примет следующий вид:

$$\hat{\rho}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_i(\omega) S_i^*(\omega) e^{-i\omega \tau} d\omega / 2\pi, \quad (10)$$

где $S_i^*(\omega)$ – комплексно-сопряженный спектр неискаженного элемента СКК.

С учетом (8) после ряда преобразований получим

$$\hat{\rho}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\omega) S_i^*(\omega) e^{-i\omega \tau} d\omega / 2\pi + \int_{\omega \in D_p} P(\omega) S_i^*(\omega) e^{-i\omega \tau} d\omega / 2\pi. \quad (11)$$

Отсюда видно, что корреляционная функция будет стремиться по своей величине к максимальному значению автокорреляционной функции (первое слагаемое в правой части выражения (11)) при $\tau = 0$, если второе слагаемое в правой части близко к нулю, а это возможно, если энергия частотных компонент элемента СКК в полосе частот сосредоточенной по спектру помехи удовлетворяет условию (12):

$$|S_i(\omega)|^2 \rightarrow 0 \quad \text{при } \omega \in D_p, \quad (12)$$

и выполняется третье требование к элементам СКК (4).

Кроме этого, было обосновано следующее утверждение. Если концентрация энергии элемента СКК $s(t)$ в полосе частот сосредоточенной по спектру помехи должна быть равна некоторой величине k , т.е. $K_{\text{э}} = k$, то достаточно, что бы элементы СКК удовлетворяли следующему выражению:

$$ks(t) = \int_0^T s(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (13)$$

где $h(t-\tau)$ ядро интегрального уравнения вида:

$$h(t-\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega \in D_p} e^{i\omega(t-\tau)} d\omega. \quad (14)$$

Выражение вида (13) является известным интегральным уравнением, а ядро (14) принято называть субполосным ядром¹, для которого выполняются уравнения:

$$\lambda_k g_k(t) = \int_0^T A(t-t_1)g_k(t_1)dt_1, \quad 0 \leq t \leq T, \quad k=1,2,\dots, \quad (15)$$

где λ_k - неотрицательные собственные числа;

$A(t-t_1) = (\sin(V_2(t-t_1)) - \sin(V_1(t-t_1))) / \pi(t-t_1)$, $0 \leq t, t_1 \leq T$ - субполосное ядро;

$V_1 = 2\pi f_1$; $V_2 = 2\pi f_2$; $[f_1, f_2]$ - частотный интервал, в котором сосредоточена помеха рассматриваемого вида.

Согласно выбранным требованиям, обоснован выбор математического аппарата собственных функций субполосного ядра в качестве основы для разработки метода кодирования информации, обеспечивающего помехоустойчивость информационных коммуникаций к воздействию сосредоточенных по спектру помех.

Это связано с тем, что собственные функции субполосного ядра имеют следующие свойства:

Во-первых, они ортонормированны, то есть выполняются равенства

$$(g_j, g_i) = \int_0^T g_i(t_1)g_j(t_1)dt_1 = 0, \quad \text{при } j \neq i,$$

$$(g_j, g_i) = \int_0^T g_i(t_1)g_j(t_1)dt_1 = 1, \quad \text{при } j = i.$$

Во-вторых, имеет место равенство

$$\int_{-V_2}^{-V_1} |G_k(\omega)|^2 d\omega + \int_{V_1}^{V_2} |G_k(\omega)|^2 d\omega = 2\pi\lambda_k, \quad (16)$$

где $G_k(\omega)$ – спектр собственной функции субполосного ядра, который представим в виде (17):

$$G_k(\omega) = \int_0^T g_k(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (17)$$

Таким образом, из (16) следует, что собственное число λ_k численно равно доле энергии собственной функции $g_k(t)$ в указанном частотном интервале.

Из всего вышесказанного следует, что в качестве элементов СКК для кодирования информации и обеспечения помехоустойчивого информационного

¹ Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным: моногр. / Е.Г. Жилияков. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.

обмена необходимо использовать собственные функции субполосного ядра с малыми собственными числами.

Аналитические выражения для собственных функций субполосного ядра не существуют, поэтому принято находить дискретные аппроксимации собственных функций в виде собственных векторов, из следующего выражения²:

$$\lambda \vec{g} = A \vec{g}, \quad (18)$$

где λ – собственное число, $\vec{g} = [g_1, g_2, \dots, g_N]^T$ – собственный вектор, A – субполосная матрица, элементы которой имеют следующий вид:

$$a_{ik} = \begin{cases} \frac{\sin[v_2(i-k)] - \sin[v_1(i-k)]}{\pi(i-k)}, & i \neq k \\ \frac{v_2 - v_1}{\pi}, & i = k \end{cases}, \quad (19)$$

где $0 \leq i, k \leq N$, $v_1 = \Delta t V_1$, $v_2 = \Delta t V_2$, Δt – интервал дискретизации, $R = \pi / (v_2 - v_1)$ – количество частотных интервалов с шириной $\Delta v = v_2 - v_1$, которые расположены в диапазоне от 0 до π , N – количество отсчетов собственного вектора.

Таким образом, при кодировании информации вместо собственных функций предложено использовать собственные вектора субполосной матрицы с малыми собственными числами.

В пункте 2.2 «Анализ свойств собственных векторов и собственных чисел субполосной матрицы» рассматриваются основные характеристики собственных векторов и собственных чисел, приводится выражение для определения количества отсчетов собственного вектора в зависимости от длительности и ширины спектра элемента СКК.

Показано, что для определения минимального количества отсчетов собственного вектора, которое необходимо для корректного его формирования при заданной длительности элемента СКК и ширине спектра, в которой распределена подавляющая доля (95%) его энергии, необходимо использовать выражение вида ($[]$ – целая часть):

$$N = 2[T_{эл} \Delta F_{эл}], \quad (20)$$

$$2\Delta F_{эл} = 1 / \Delta t.$$

В частности, при значениях $T_{эл} = 52,2$ мкс и $\Delta F_{эл} = 1,23$ МГц, которые используются при формировании канального сигнала в широко используемой системе с кодовым разделением ресурсов информационных коммуникаций типа CDMA (code division multiple access), минимальное количество отсчетов в собственном векторе составит 128.

В работе также приведены результаты вычислительных экспериментов (Таблица 1) по оценке количества собственных векторов в зависимости от концентрации их энергии в частотных интервалах с различной шириной полосы, что позволило определить количество собственных векторов в зависимости от уровня энергии в пределах выбранных частотных интервалов.

² Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным: моногр. / Е.Г. Жилияков. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.

Так как согласно выражению (16) концентрация энергии собственного вектора в интервале частот D_p численно равна значению собственного числа, то отбор собственных векторов проводился по значению собственных чисел.

Таблица 1 – Количество собственных векторов в зависимости от концентрации энергии K_3 в частотных интервалах с различной шириной полосы $\Delta F_{3i} / R$.

	N										
	128		256			384			512		
$\Delta F_{3i} / R$ (кГц) K_3	76,9	38,5	76,9	38,5	19,3	76,9	38,5	19,3	76,9	38,5	19,3
0,01	118	121	238	241	243	358	362	364	478	482	483
0,0001	116	118	236	239	240	354	358	359	474	478	480
10^{-6}	114	116	234	236	238	352	355	357	472	475	477
10^{-8}	112	113	232	233	235	350	352	353	470	472	473

Для обеспечения высоконадежной передачи информации, закодированной с применением собственных векторов субполосной матрицы, (за счет обеспечения энергетической скрытности и устойчивости к искажениям, возникающим в результате многолучевого распространения сигналов) энергетический спектр собственного вектора должен быть распределен равномерно во всей полосе частот, кроме частотного интервала с минимальной концентрацией энергии. Для этого среднеквадратическое отклонение от среднего значения энергии собственного вектора в каждом из частотных интервалов должно удовлетворять следующему выражению:

$$\Delta E_i \leq 0.2, \quad (21)$$

где среднеквадратическое отклонение энергии ΔE_i собственного вектора от среднего значения для $R-1$ частотных интервалов имеет следующий вид:

$$\Delta E_i = \sqrt{\frac{\sum (E_{ri} - E_{cpi})^2}{R-1}}. \quad (22)$$

Средняя энергия собственного вектора E_{cpi} для $R-1$ частотных интервалов определялась следующим образом:

$$E_{cpi} = \frac{\sum_{r=1}^{R-1} E_{ri}}{R-1} \approx \frac{1}{R-1}. \quad (23)$$

Энергия собственного вектора в каждом частотном интервала E_{ri} рассчитывалась согласно следующему выражению:

$$E_{ri} = g_i^T A_r g_i, \quad (24)$$

где A_r – субполосная матрица с элементами вида (19) для r -го частотного интервала с шириной $\Delta \nu$, g_i – собственный вектор.

Опираясь на вышеизложенные выражения, были проведены вычислительные эксперименты по определению количества собственных векторов (Таблица 2) с равномерным распределением энергетического спектра, собственные числа которых меньше 0.0001, для частотных интервалов с различной шириной полосы.

Таблица 2 – Количество собственных векторов с равномерно распределенным энергетическим спектром при различных значениях D_p

R	$\Delta F_{3\sigma} / R$ (кГц)	N				
		128	256	384	512	640
16	76,9	75	151	336	451	573
32	38,5	59	124	303	415	530
64	19,3	-	118	232	349	465

Согласно результатам исследования для кодирования информации необходимо использовать собственные вектора, собственные числа которых меньше 0.0001, при этом среднеквадратическое отклонение энергии собственного вектора для каждого из $R-1$ частотных интервалов, за исключением интервала с минимальной концентрацией энергии, должно удовлетворять условию (21). Сравнивая результаты, представленные в таблице 2 при $R=16$, с объемами ансамблей СКК существующих методов кодирования информации, которые используются при формировании канальных сигналов в системах с кодовым разделением ресурсов информационных коммуникаций типа CDMA³, видно, что количество собственных векторов с равномерно распределенным спектром, необходимых для кодирования данных, оказывается на 10% больше объема ансамблей современных СКК.

В параграфе 2.3 «Разработка методов кодирования и декодирования информации» обосновывается необходимость преобразования дискретного сигнала в комплексную форму для уменьшения ширины спектра, приводится описание всех этапов методов кодирования и декодирования информации с применением собственных векторов субполосной матрицы.

Рассмотрим основные математические выражения для представления действительного дискретного сигнала в виде последовательности комплексных отсчетов. Любой периодический сигнал, как известно, представим в виде следующей суммы:

$$x(k\Delta t) = a_0 + \sum_{i=1}^{N/2} [a_i \cos(\omega_i k\Delta t) + b_i \sin(\omega_i k\Delta t)], \quad (25)$$

где $\Delta t = T/N$ – период дискретизации, N – количество отсчетов; $\omega_i = 2\pi i / \Delta t$ – круговая частота, $i=0,1, \dots, N-1$, T – период, $k=0,1, \dots, N-1$, a_i и b_i коэффициенты, определяемые следующим образом:

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_i t) dt \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) \cos\left(\frac{2\pi i k}{N}\right), \quad (26)$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_i t) dt \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) \sin\left(\frac{2\pi i k}{N}\right). \quad (27)$$

Если рассмотреть дискретное преобразование Фурье от сигнала (25) и сравнить с выражением (26) и (27) то получим:

$$X_i = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) e^{-j\frac{2\pi i k}{N}} = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) \cos\left(\frac{2\pi i k}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) \sin\left(\frac{2\pi i k}{N}\right) = a_i N/2 - j b_i N/2. \quad (28)$$

³ Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С., Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.: ил.

Известно, что симметричные относительно центральной частоты отсчеты спектра сигнала комплексно сопряжены. Получается фактически можно отбросить половину спектра, умножив при этом его первую половину на соответствующий коэффициент:

$$\hat{X}_i = \begin{cases} X_i, & \text{при } i = 1; \\ 2 * X_i, & \text{при } 1 < i \leq N/2; \\ 0, & \text{при } i > N/2. \end{cases} \quad (29)$$

Теперь если полученный дискретный спектр подставим в выражение для обратного преобразования Фурье, то получим следующее выражение:

$$s_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{X}_i e^{j \frac{2\pi i k}{N}} = \sum_{i=0}^{N/2} (a_i - j b_i) e^{j \frac{2\pi i k}{N}}, \quad (30)$$

$$\text{Re}(s_k) = a_0 + \sum_{i=1}^{N/2} \left[a_i \cos\left(\frac{2\pi i k}{N}\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi i k}{N}\right) \right]. \quad (31)$$

Исходя из выражения (30), реальная часть функции (31) полностью совпадает с выражением (25), а спектр самого сигнала будет иметь вид (29). Таким образом, при декодировании информации достаточно воспользоваться реальной составляющей сигнала s_k , а сам передаваемый сигнал будет иметь спектр в два раза уже, чем исходный.

Далее в параграфе описаны основные этапы кодирования и декодирования информации.

I. Предварительный этап. Формирование необходимого набора собственных векторов.

1. Формируется субполосная матрица A с элементами вида (19) размерностью $N \times N$, для заранее определенного частотного интервала D_p , в котором сосредоточена помеха, где $N = 2T_{эл} \Delta F_{эл}$, $\Delta F_{эл}$ – ширина спектра элемента СКК.

2. Производится вычисление собственных векторов \vec{g}_i матрицы A , и осуществляется выборка L собственных векторов, удовлетворяющих условию (21), собственные числа которых $\lambda_i \leq 0.0001$. Далее для кодирования и декодирования информации будет использоваться именно этот набор собственных векторов.

II. Кодирование информации осуществляется следующим образом:

1. Производится умножение каждого информационного символа e_i на отобранный собственный вектор \vec{g}_i , полученные произведения суммируются

для формирования вектора \vec{x} : $\vec{x} = \sum_{i=1}^L e_i \vec{g}_i$, $i = 1, 2, \dots, L$.

2. Из вектора \vec{x} формируются комплексный вектор \vec{s} следующим образом:

– производится преобразование Фурье вектора \vec{x} $X_i = \sum_{k=1}^N x_k e^{-j \frac{2\pi}{N}(i-1)(k-1)}$;

– отсчеты спектра вектора \vec{x} преобразуются согласно (29);

– производится обратное преобразование Фурье модифицированного спектра \hat{X} для получения комплексного вектора \vec{s} : $\vec{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N/2} \hat{X}_i e^{i \frac{2\pi}{N}(i-1)(k-1)}$.

При этом реальная часть вектора \vec{s} полностью совпадает с вектором \vec{x} , а энергетический спектр вектора \vec{s} не имеет инверсной составляющей, что уменьшает ширину спектра вдвое.

3. Реальная и мнимая компоненты вектора \vec{s} отдельно интерполируются:

$$Z_{RE}(t) = \sum_{i=1}^N \operatorname{Re}(s_i) \sin \left[\frac{\pi \Delta F_{\text{эл}} \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)}{\pi \Delta F_{\text{эл}} \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)} \right], \quad Z_{IM}(t) = \sum_{i=1}^N \operatorname{Im}(s_i) \sin \left[\frac{\pi \Delta F_{\text{эл}} \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)}{\pi \Delta F_{\text{эл}} \left(\frac{t}{\Delta t} - i \right)} \right], \quad (32)$$

где: Δt – временной интервал между отсчетами исходного сигнала; $t \in [0, T_{\text{эл}}]$; s_i – комплексные отсчеты вектора \vec{s} .

4. В информационный канал подается сигнал следующего вида:

$$Z(t) = Z_{RE}(t) \cdot \cos(\omega_n t) + Z_{IM}(t) \cdot \sin(\omega_n t), \quad (33)$$

где ω_n – частота несущего колебания.

III. Декодирование информации состоит из следующих этапов:

1. Принимаемый сигнал $\tilde{Z}(t)$ из информационного канала умножается на гармоническое колебание несущей частоты и фильтруется:

$$\tilde{s}(t) = \tilde{Z}(t) \cdot \cos(\omega_n t), \quad t \in [0, T], \quad (34)$$

$$\tilde{x}(t) = \int_0^T \tilde{s}(\tau) h_{\text{ФЧ}}(t - \tau) d\tau, \quad (35)$$

где $h_{\text{ФЧ}}(t - \tau)$ – импульсная характеристика фильтра с полосой пропускания от 0 до $\Delta F_{\text{эл}}$.

2. Производится дискретизация полученного сигнала $\tilde{x}(t)$ с шагом Δt для формирования вектора \vec{x}_n .

3. Вычисляется скалярное произведение векторов \vec{x}_n и \vec{g}_i для определения принятого информационного символа \tilde{e}_i :

$$\tilde{e}_i = \sum_{k=1}^N x_{nk} g_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (36)$$

4. Информационные символы \tilde{e}_i сравниваются с эталонными e_k , которые использовались при кодировании информации, решение о том, какой именно символ был декодирован, осуществляется по следующему правилу: передан символ e_j , если выполняется условие (37).

$$|e_j - \tilde{e}_i| = \min |e_k - \tilde{e}_i|, \quad \forall k = 1, 2, \dots, L. \quad (37)$$

В третьей главе «Оценка помехоустойчивости методов кодирования информации при воздействии помех различного рода» представлены результаты сравнительной оценки вероятности ошибки предлагаемого метода и существующих методов, основанных на применении ряда широко используемых ШШС, при воздействии флуктуационных и сосредоточенных по спектру помех.

В параграфе 3.1 «Оценка помехоустойчивости передачи информации на основе применения различных СКК при воздействии флуктуационных помех» приводится сравнение помехоустойчивости метода кодирования информации с применением собственных векторов субполосной матрицы, и методов, основанных на СКК, использующих в качестве элементов псевдослучайные фазоманипулированные сигналы (ПСФМ), псевдослучайные сигналы с линейно-частотной модуляцией (ПСЛЧМ) и сложные фазоманипулированные сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМФМ), при воздействии флуктуационных помех. Критерием оценки является вероятность ошибочного декодирования информации при различных отношениях энергии информационного сигнала к односторонней спектральной плотности гауссова шума. Величина, выбранная в качестве критерия, определяется следующим образом:

$$P_{ош} = n_{ош} / n_{об}, \quad (38)$$

где $n_{ош}$ – количество бит информации, декодированных с ошибкой;
 $n_{об}$ – общее количество переданных бит информации. При этом погрешность определения вероятности ошибки имеет следующий вид:

$$\Delta p \sim 1 / \sqrt{n_{об}}. \quad (39)$$

Для достижения величины Δp меньше чем 10^{-5} величина $n_{об}$ выбиралась больше 10^{10} .

Определение вероятности ошибки для каждого метода кодирования и декодирования информации производилось с применением компьютерных моделей, разработанных в среде MATLAB. Каждый процесс моделирования состоял из нескольких этапов: предварительного этапа, заключающегося в формировании набора канальных сигналов, этапа кодирования случайного набора данных, имитации воздействия флуктуационной помехи, декодирования информационного сигнала и сравнения декодированного набора данных с исходным. Исходными параметрами для моделирования информационного обмена с применением рассмотренных выше методов кодирования информации были следующие величины: скорость передачи информации (19.2 кБит/с), ширина энергетического спектра информационного сигнала (1.23 МГц), величина отношения энергии информационного сигнала к односторонней спектральной плотности мощности (q менялся в диапазоне от 0,01 до 10).

Формирование флуктуационной помехи происходило следующим образом. Прежде всего, стандартными средствами MATLAB генерировалась случайная последовательность с нормальным распределением и количеством отсчетов равным количеству отсчетов моделируемого информационного сигнала. Далее случайная последовательность нормировалась:

$$\hat{n}(i) = \frac{n(i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N n^2(k)}}, \quad (40)$$

где N – количество отсчетов в информационном сигнале.

Затем полученная нормированная последовательность умножалась на коэффициент следующего вида:

$$K_{ин} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s^2(i)}{q}} B_{эл}, \quad (41)$$

где $q = E_c / N_{ин}$ – отношение энергии сигнала к односторонней спектральной плотности гауссова шума; $s(i)$ – отсчеты информационного сигнала.

После рассмотренных выше преобразований, отношение энергии моделированного сигнала к односторонней спектральной плотности сформированной случайной последовательности полностью совпадало с заранее заданной величиной q .

Результаты моделирования представлены в Таблице 3, а также в виде кривых помехоустойчивости на рисунке 1.

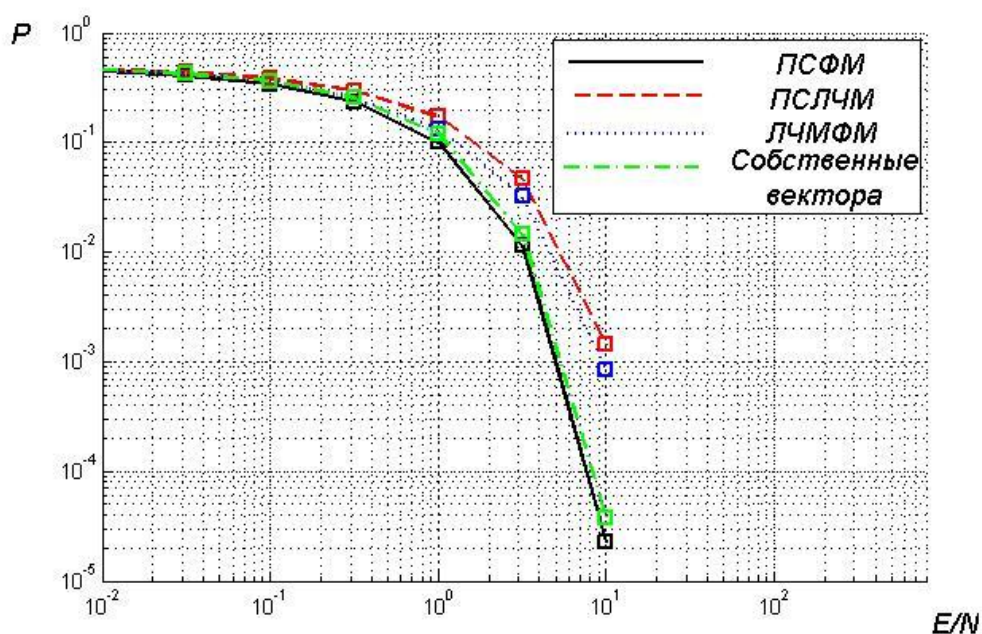


Рисунок 1 – График зависимости значений вероятности ошибки для различных методов кодирования

Таблица 3 – Значения вероятностей возникновения ошибки при использовании различных методов кодирования информации.

Вид СКК	q							
	0,01	0,0316	0,1	0,3162	1	3,1623	10	31,623
ПСФМ	0,4495	0,411	0,3423	0,2356	0,101	0,0113	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
ПСЛЧМ	0,4618	0,4344	0,3823	0,297	0,1723	0,0462	0,00144	$< 10^{-5}$
ЛЧМФМ	0,4508	0,4234	0,3623	0,256	0,1323	0,0322	0,00084	$< 10^{-5}$
Собственные вектора	0,4575	0,421	0,3623	0,2556	0,121	0,0143	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-5}$

Результаты компьютерного моделирования процессов кодирования и декодирования информации показали, что разработанный метод, основанный на применении собственных векторов субполосной матрицы, имеет

практически такую же помехоустойчивость, как и метод с применением ПСФМ сигналов. Следует отметить, что помехоустойчивость метода кодирования информации с применением собственных векторов, выше, чем у методов, основанных на линейно-частотной модуляции.

В параграфе 3.2 «Оценка помехоустойчивости обмена информацией с применением различных методов кодирования данных при воздействии сосредоточенных по спектру помех» рассматривается влияние сосредоточенных по спектру помех на информационные коммуникации с различными методами кодирования информации. Сравнивается помехоустойчивость разработанного метода кодирования информации и методов, основанных на сигнально-кодовых конструкциях с применением ПСФМ сигналов и двух разновидностей ЛЧМ сигналов. В качестве критерия оценки эффективности методов кодирования информации выступает вероятность ошибки, которая вычисляется исходя из выражения (38). Для определения вероятности ошибки были разработаны компьютерные модели в среде MATLAB. В процессе работы компьютерных моделей, сформированные информационные сигналы подвергались воздействию сосредоточенных по спектру помех с различной энергией. Исходные параметры для моделирования информационного обмена с применением рассмотренных выше методов кодирования информации были такие же, как при моделировании влияния флуктуационных помех. Величина отношения энергии сигнала к энергии помехи (q_p) задавалась заранее и в процессе исследования изменялась в диапазоне от 0,01 до 10.

В процессе компьютерного моделирования, сосредоточенная по спектру помеха формировалась следующим образом:

$$s_p(i) = \begin{cases} \sin(2\pi f_p \Delta t i) & \text{при } \frac{N-b}{2} \leq i \leq \frac{N+b}{2} \\ 0 & \text{при } i > \frac{N+b}{2} \text{ или } i < \frac{N-b}{2} \end{cases}, \quad (42)$$

где N – количество отсчетов сосредоточенной по спектру помехи;

b – нормированная величина, определяющая длительность помехи;

Δt – период дискретизации равный $2.5 \cdot 10^{-6}$.

Величина b определялась следующим образом:

$$b = \frac{T_p}{\Delta t}, \quad (43)$$

где T_p – длительность помехи.

При этом длительность помехи рассчитывалась исходя из ширины спектра помехи ΔF_p :

$$T_p = \frac{2}{\Delta F_p}, \quad (44)$$

Результаты компьютерного моделирования представлены в Таблице 4 и в виде кривых помехоустойчивости на рисунке 2.

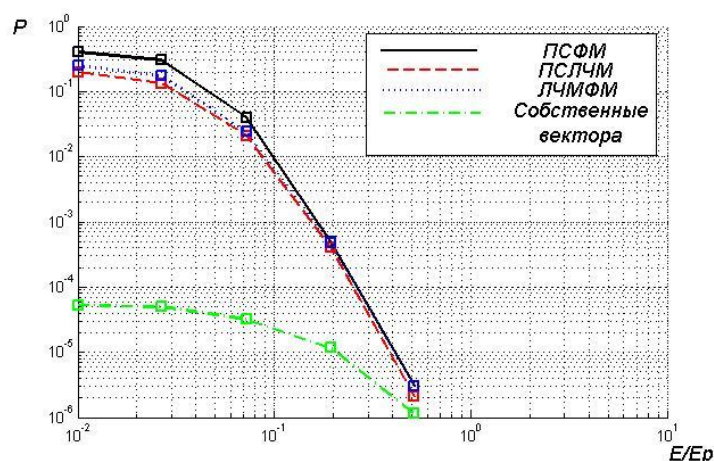


Рисунок 2 – График зависимости значений вероятности ошибки для различных методов кодирования в условиях воздействия сосредоточенных по спектру помех

Таблица 4 – Значения вероятности ошибки при использовании для кодирования различных методов в зависимости от величины q_p .

Вид СКК	q_p					
	0,01	0,0268	0,0719	0,193	0,5179	1,3894
ПСФМ	0,4005	0,3	0,0412	0,0005	$3,06 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$
ПСЛЧМ	0,2001	0,132	0,021	0,00041	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$
ЛЧМФМ	0,2501	0,172	0,024	0,000482	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$
Собственные вектора	$5,31 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Анализ результатов моделирования процессов кодирования и декодирования информации различными методами показал, что наиболее помехоустойчивым является метод кодирования информации, основанный на применении собственных векторов субполосных матриц. Вероятность ошибки декодирования информации в этом случае изменяется при увеличении энергии сосредоточенной по спектру помехи незначительно (около 10 раз), тогда как для других методов величина вероятности ошибки при увеличении энергии помехи возрастает многократно до 10^5 раз. Это полностью подтверждает тот факт, что предложенный метод кодирования информации позволяет обеспечить высокую достоверность декодирования данных в информационных коммуникациях при воздействии сосредоточенных по спектру помех, многократно превышающих энергию информационного сигнала.

В параграфе 3.3 «Оценка влияния сосредоточенных по спектру помех с различной шириной спектра на помехоустойчивость разработанного метода кодирования информации» производилась оценка влияния сосредоточенных по спектру помех с различной шириной спектра на помехоустойчивость информационных коммуникаций, использующих метод кодирования данных, основанный на собственных векторах субполосной матрицы. Для моделирования влияния сосредоточенных по спектру помех с различной шириной спектра,

использовалась аналогичная компьютерная модель, примененная в предыдущем пункте при исследовании вероятности ошибки в зависимости от отношения энергии сигнала к энергии помехи. Процесс моделирования информационного обмена с применением разработанного метода кодирования имел отличие на этапе имитации воздействия сосредоточенной по спектру помехи. Моделируемые помехи имели различную ширину спектра, а именно в диапазоне от 15 кГц до 250 кГц. Для каждой помехи была определена концентрация энергии K_p в полосе частот D_p :

$$K_p = \frac{\hat{E}_p}{E_p}, \quad (45)$$

где E_p – энергия помехи, $\hat{E}_p = \bar{s}_p^T A \bar{s}_p$ – энергия сосредоточенной по спектру помехи в полосе частот D_p .

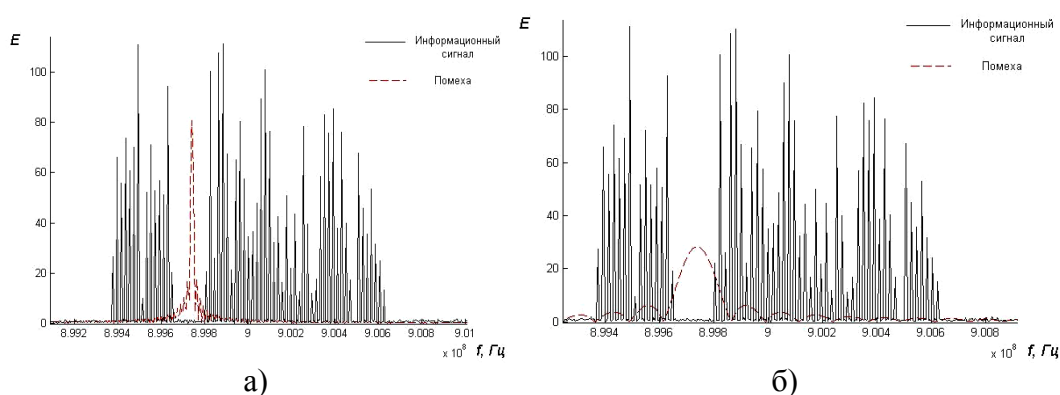


Рисунок 3 – Сравнение формы спектров узкополосной помехи и информационного сигнала (а – ширина узкополосной помехи 30 кГц, б – 120 кГц)

Результаты моделирования представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Зависимость вероятности ошибки p_{ou} при воздействии на сигнал помех с концентрацией энергии K_p в полосе частот D_p , шириной спектра ΔF_p и отношением энергии сигнала к энергии помехи q_p .

q_p	K_p	ΔF_p	p_{ou}
1	2	3	4
1	0.9822	15 кГц	$1 \cdot 10^{-6}$
	0.9437	30 кГц	$2 \cdot 10^{-6}$
	0.9046	60 кГц	$4 \cdot 10^{-6}$
	0.7442	120 кГц	$5 \cdot 10^{-6}$
	0.545	250 кГц	$8 \cdot 10^{-6}$
0,1	0.9822	15 кГц	$1.2 \cdot 10^{-5}$
	0.9437	30 кГц	$2.7 \cdot 10^{-5}$
	0.9046	60 кГц	$3.2 \cdot 10^{-5}$
	0.7442	120 кГц	$5.2 \cdot 10^{-5}$
	0.545	250 кГц	$8.3 \cdot 10^{-5}$

1	2	3	4
0,01	0.9822	15 кГц	$2.1 \cdot 10^{-5}$
	0.9437	30 кГц	$3.1 \cdot 10^{-5}$
	0.9046	60 кГц	$6.7 \cdot 10^{-5}$
	0.7442	120 кГц	0.016331
	0.545	250 кГц	0.051221

Как видно из результатов исследования при воздействии сосредоточенных по спектру помех с различной шириной спектра (шириной основного лепестка спектра помехи) на информационный сигнал, вероятность ошибки меняется незначительно при воздействии помех с шириной меньшей, чем ширина интервала с минимальной концентрацией энергии сигнала ($\Delta F_{эл}/R$). Однако в случае, если ширина спектра помехи превышает величину $\Delta F_{эл}/R$ на 80% и более, вероятность ошибки при декодировании информации возрастает многократно (до 10^5 раз) при $q_p = 0,01$. Это связано с тем, что увеличивается её воздействия на спектральные составляющие информационного сигнала, а, следовательно, на закодированный набор данных, что и приводит к увеличению вероятности ошибки.

В четвертой главе «Программно-аппаратная реализация разработанных алгоритмов кодирования и декодирования информации» представлены алгоритмы кодирования и декодирования информации, основанные на разработанном методе. На основе разработанных алгоритмов предложена техническая реализация метода кодирования информации с применением собственных векторов субполосной матрицы.

На рисунке 4 представлена схема устройства кодирования информации, обеспечивающего помехоустойчивость информационного обмена при воздействии сосредоточенных по спектру помех.

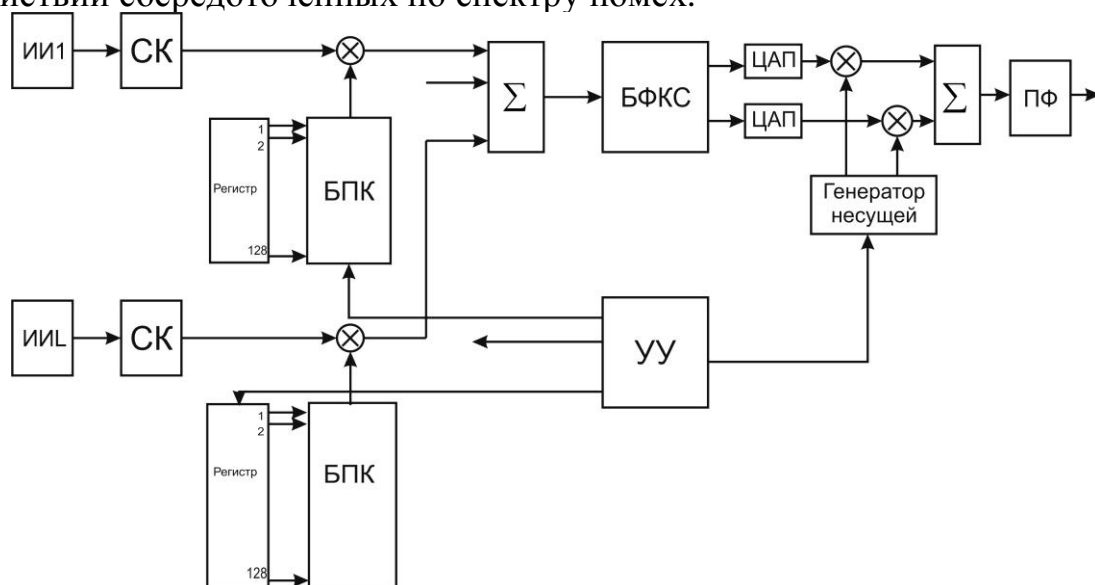


Рисунок 4 – Схема устройства кодирования информации

Схема устройства декодирования информации представлена на рисунке 5.

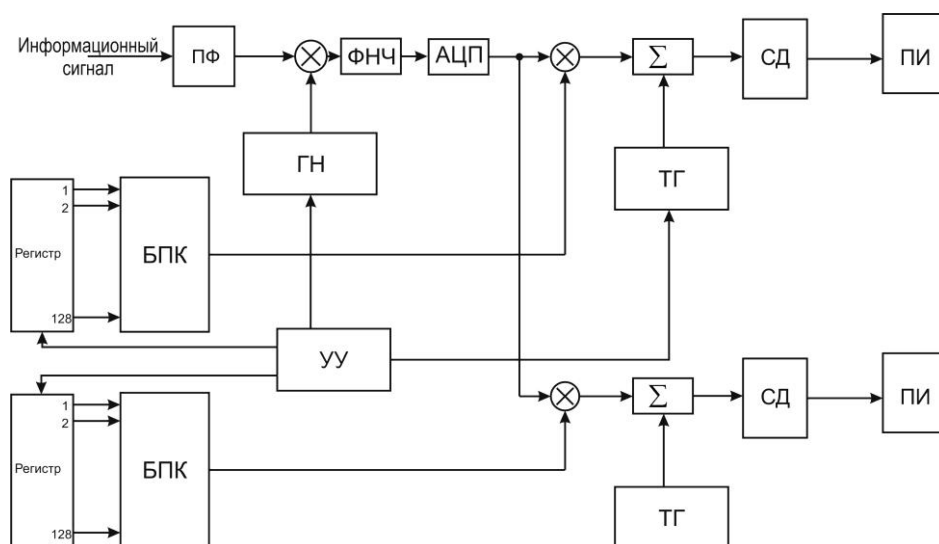


Рисунок 5 – Схема устройства декодирования информации

В рассмотренных выше схемах использовались следующие условные обозначения ПФ – полосовой фильтр, СД – символьный декодер, БПК – блок преобразования кода, ФНЧ – фильтр нижних частот, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ТГ – тактовый генератор, БФСК – блок формирования квадратурных составляющих, УУ – устройство управления.

Представленные на рисунках 4 – 5 технические решения в полной мере позволяют реализовать предлагаемые методы кодирования и декодирования информации, а также обеспечить повышенную помехоустойчивость многоканальных информационных коммуникаций к воздействию сосредоточенных по спектру помех.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены результаты интеллектуальной деятельности и документы, подтверждающие практическую значимость полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод кодирования и декодирования информации, обеспечивающий высокую помехоустойчивость информационных коммуникаций при воздействии сосредоточенных по спектру помех.

1.1 Предложен новый класс сигнально-кодовых конструкций на основе нового ортогонального базиса, позволяющего обеспечить заданную скорость передачи информации в информационных коммуникациях.

1.2 Предложена процедура принятия решений при декодировании информации передаваемой с помощью нового класса сигнально-кодовых конструкций.

2. Разработаны алгоритмы кодирования и декодирования информации, основанные на предложенном новом классе сигнально-кодовых конструкций с

применением собственных векторов субполосной матрицы с малыми собственными числами.

3. Проведены вычислительные эксперименты по сравнению помехоустойчивости современных методов кодирования информации с разработанным методом, основанным на применении собственных векторов субполосной матрицы, которые показали что:

3.1 вероятность ошибки при использовании для передачи данных разработанного метода кодирования дискретной информации в условиях воздействия флуктуационных помех отличается не более, чем на 10% от значений вероятности ошибки, в случае применения существующих методов кодирования;

3.2 вероятность ошибки с увеличением энергии сосредоточенной по спектру помехи в 100 раз возрастает не более чем в 10 раз при использовании для передачи данных разработанного метода кодирования информации, в то время как вероятность ошибки в информационных коммуникациях, основанных на существующих методах кодирования увеличивается гораздо значительно и может достигать величин в 10^5 раз больших, чем при отсутствии помехи.

4. Разработаны технические решения по реализации алгоритмов кодирования и декодирования информации с применением разработанного класса сигнально-кодовых конструкций на основе средств цифровой вычислительной техники.

5. Исследования по оценке объема ансамблей предложенного класса сигнально-кодовых конструкций показали, что при одинаковых выделенных частотных ресурсах и скоростях информационного обмена разработанный метод кодирования и декодирования дискретной информации позволяет увеличить на 10% количество одновременно работающих абонентов по сравнению с существующими методами в режиме кодового разделения ресурсов информационных коммуникаций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Старовойт, И.А. 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. Старовойт, И.А. 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. Старовойт, И.А. 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. Старовойт, И.А. 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. 43-46.

5. Старовойт, И.А. Об одном способе формирования широкополосных сигналов на основе использования собственных векторов субполосной матрицы [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков // Вопросы радиоэлектроники. – М., 2013. – № 1. – С. 175-180.

Публикации в сборниках научных трудов

1. Старовойт, И.А. О методе формирования канальных сигналов на основе применения собственных векторов субполосных матриц [Текст] / И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков, А.И. Брус // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. – М., 2011. № XIII-1 – С. 76-78.

2. Старовойт, И.А. О влиянии сосредоточенных по спектру помех на помехоустойчивость одного класса сигналов с изменяющимися частотными характеристиками [Текст]/ С.П. Белов, И.А. Старовойт //Сборник трудов второй международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и телекоммуникации». – Белгород, 2011. – №3. – С. 388-391.

3. Старовойт, И.А. О возможности применения канальных сигналов на основе собственных векторов субполосных матриц в системах связи с кодовым разделением адресов [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт //Сборник трудов второй международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и телекоммуникации». – Белгород, 2011. – №3. – С. 425-429.

4. Старовойт, И.А. О применении квадратурной модуляции в задачах формирования одного класса широкополосных сигналов [Текст] / С.П. Белов, И.А. Старовойт, В.В. Трофимов // Системы обработки информации. – Харьков, 2012. – №4(102). – С. 181.

5. Старовойт, И.А. Компьютерное моделирование влияния сосредоточенных по спектру помех на помехоустойчивость широкополосных сигналов с применением собственных векторов субполосной матрицы [Текст]/ Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт //Сборник трудов международной молодежной конференции «Прикладная математика, управление и информатика». – Белгород, 2012 г. – №1. – С. 129-132.

6. Старовойт, И.А. Применение адаптивной квадратурной модуляции в задачах формирования широкополосных сигналов, основанных на собственных векторах субполосных матриц [Текст] / С.П. Белов, И.А. Старовойт, С.А. Забнин //Научно-технический сборник «Системы управления и связи». – Ростов-на-Дону, 2012. – № 1(17). – С. 26-28.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. «Программа для вычисления вероятности ошибки в канале связи с белым шумом при передаче информации фазоманипулированным сигналом с линейно-частотной модуляцией» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616596 от 4 октября 2010 года. Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Е.М., И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков.

2. «Программа для вычисления вероятности ошибки при передаче информации сложным сигналом с линейно-частотной модуляцией в канале связи с сосредоточенной по спектру помехой» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610523 от 10 января 2012 года. Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Е.М., И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков.

3. «Программа формирования и обработки канального сигнала, устойчивого к воздействию сосредоточенных по спектру помех» Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, № 2012660155 от 12 ноября 2012 года. Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт.

4. «Программа моделирования приемо-передающего устройства системы связи с квадратурно-амплитудной модуляцией» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617226. Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, И.А. Старовойт, Д.И. Ушаков.

