

На правах рукописи

Зевиг Владимир Георгиевич

**МЕТОДЫ ВТОРИЧНОГО УПЛОТНЕНИЯ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

УФА – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»
на кафедре “Телекоммуникационные системы”

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент
Кузнецов Игорь Васильевич

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.
Тяжев Анатолий Иванович

канд. техн. наук, доцент
Тимофеев Александр Леонидович

Ведущая организация: ФГУП «Самарский отраслевой научно-
исследовательский институт
радио»

Защита диссертации состоится 3 июля 2009 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07 при Уфимском
государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000,
г. Уфа, ул. К.Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского
государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан “ 2 ” июня 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

С.С. Валеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных направлений современного развития телекоммуникационных систем и сетей (ТС) является совершенствование методов и алгоритмов обработки сигналов, позволяющих повысить пропускную способность ТС. В настоящее время ведется развитие альтернативных методов, дополнительно увеличивающих пропускную способность ТС за счет уменьшения избыточности передаваемых сигналов. Одним из таких направлений является вторичное использование каналов ТС, идея которого не нова и реализована в таких системах как ТВ-информ, NISAM-728, Teletext. Анализ данной области показал, что основные исследования и разработки по вторичному использованию каналов проводились в 70 – 80 – е годы и ориентированы на аналоговые системы передачи, что ограничивает их применение в современных ТС. Существенным недостатком подобных систем является их узкая направленность на реализацию в конкретном стандарте вещания.

Наиболее современными и совершенными, с точки зрения увеличения пропускной способности ТС, являются методы вторичного уплотнения сигналов ТС, разработанные на кафедре телекоммуникационных систем УГАТУ под руководством д.т.н., профессора Султанова А.Х. Данные методы позволяют организовать передачу дополнительных сообщений небольшого объема, по существующим каналам ТС, без нарушения их нормального функционирования. Основная идея методов заключается в наложении друг на друга эргодических, неортогональных в гильбертовом пространстве сигналов основного и вторичного каналов с пересекающимися частотно – временными характеристиками, при условии ограничения их взаимного шумового влияния.

Основными недостатками данного метода является то, что в нем не учитывается ряд особенностей функционирования современных систем связи:

- 1) нестационарность уплотняемых сигналов;
- 2) нестационарность трактов передачи, обусловленная изменением параметров звеньев уплотняемой ТС в ходе эксплуатации, а также возникновение переходных процессов при вторичном уплотнении;
- 3) критичность к задержкам в процессе передачи сообщений;
- 4) переход к цифровым системам передачи информации.

Следовательно, актуальной является задача разработки методов вторичного уплотнения с учетом нестационарности процессов, протекающих в ТС, позволяющих увеличить скорость передачи вторичных сообщений, сократить временные задержки в основном и вторичном канале, а также обеспечить вторичное уплотнение ТС с учетом новых (в том числе цифровых) технологий связи.

Объект исследования. Цифровые телекоммуникационные системы и сети передачи мультимедийной информации.

Предмет исследования. Методы вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов в классе нестационарных систем.

Цель работы. Развитие методов вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов в классе нестационарных систем, позволяющих увеличить пропускную способность ТС, а также сократить временные задержки в процессе информационного обмена и обеспечить инвариантность по отношению к типу уплотняемой ТС.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка модели вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов, учитывающей нестационарный характер процессов информационного обмена в ТС.

2. Разработка аналитического метода синтеза спектральных характеристик вторичного сигнала для класса нестационарных гауссовских процессов, обеспечивающего наилучшее выделение сигнала вторичного канала, при ограничении искажения сигнала основного канала.

3. Разработка параметрического метода синтеза нестационарных спектральных характеристик вторичного сигнала, позволяющего производить поиск параметров вторичного сигнала в заданном функциональном классе.

4. Разработка алгоритмов приема сигналов нестационарного вторичного канала в условиях частичной априорной неопределенности и малого соотношения сигнал/шум.

5. Разработка алгоритмического и программного комплекса моделирования вторичного уплотнения цифровых каналов передачи мультимедийных сигналов без сжатия и со сжатием по стандарту MPEG-2.

Методы исследований. В работе использованы основные положения теории электрической связи и теории автоматического управления, теории проектирования нестационарных оптимальных линейных систем, обнаружения и фильтрации сигналов, а также теории матричной алгебры, применены методы математического моделирования, в том числе компьютерного.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Модель вторичного уплотнения каналов ТС на основе технологии нестационарного спектрального анализа Солодовникова В.В.

2. Оптимизационный метод нестационарного вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов.

3. Параметрический метод нестационарного вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов.

4. Алгоритмы приема сообщений нестационарного вторичного канала в условиях частичной априорной неопределенности.

5. Результаты имитационного моделирования, на основе разработанного программного комплекса, показавшие возможность использования предложенных методов вторичного уплотнения сигналов для повышения пропускной способности цифровых систем передачи мультимедийной информации.

Научная новизна работы:

1. Разработана модифицированная модель вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов, основанная на технологии нестационарного спектрального анализа процессов информационного обмена, которая *в отличие* от известных моделей, позволяет более качественно описывать процессы в каналах ТС, сократить временные задержки и расширить применимость метода вторичного уплотнения на современные (в том числе цифровые) ТС.

2. Разработан оптимизационный метод вторичного уплотнения каналов, который *в отличие* от известных методов, учитывает нестационарность процессов информационного обмена в ТС, позволяющий получить оптимальный вид спектральных характеристики вторичного сигнала.

3. Разработан метод параметрического синтеза нестационарной спектральной характеристики сигнала вторичного канала, который *в отличие* от известных методов, учитывает нестационарность сигналов и трактов ТС, позволяющий определять параметры вторичного сигнала в удобном классе функциональных характеристик и упростить его реализацию.

4. Предложены алгоритмы выделения сигналов нестационарного вторичного канала в условиях частичной априорной неопределенности, которые *в отличие* от известных алгоритмов, позволяют определять оценки неизвестных спектральных характеристик сигналов основного и вторичного каналов на приемной стороне без передачи параметров сигналов по основным каналам, что дополнительно увеличивает пропускную способность уплотняемой ТС.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, базируется на использовании апробированных научных концепций и методов исследования, согласовании результатов с известными теоретическими положениями. Достоверность полученных теоретических положений и выводов подтверждается результатами имитационного моделирования, апробации и внедрения предложенных методик и алгоритмов.

Практическая ценность. Практическая значимость полученных результатов заключается в повышении пропускной способности цифровых ТС, а также сокращении временных задержек в процессе информационного обмена. Как показало имитационное моделирование, разработанные методы и алгоритмы позволяют увеличить пропускную способность ТС до 20% и уменьшить временную задержку в процессе информационного обмена более чем в 10^3 раз относительно известного метода вторичного уплотнения.

Основные результаты диссертационной работы внедрены на участке сети цифрового кабельного телевидения компании ОАО «Уфанет» для организации служебных каналов аутентификации абонентов и в учебном процессе в Уфимском государственном авиационном техническом университете при проведении лабораторных и расчетно-графических работ по дисциплине «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей».

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на 8–й и 9–й Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, Самара, 2007, 2008; 4–й Всероссийской школе семинаре аспирантов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа, 2009, а также на семинарах кафедры «Телекоммуникационные системы» УГАТУ.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 8 публикациях, в том числе в 2 научных статьях в периодических изданиях из списка ВАК, в 6 материалах международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка и изложена на 161 страницах машинописного текста. Библиографический список включает 72 наименования литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и решаемые в ней задачи, научная новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов.

В первой главе выполнен анализ существующих методов сигнального и информационного уплотнения. Рассмотрена известная модель вторичного уплотнения каналов, основанная на непрерывном Фурье-преобразовании. Показано, что существенным недостатком известного метода вторичного уплотнения является то, что в нем не учитывается ряд особенностей современных ТС:

- 1) нестационарность уплотняемых сигналов;
- 2) нестационарность трактов передачи;
- 3) критичность к задержкам в процессе передачи сообщений;
- 4) использование цифровых технологий связи.

Для устранения выявленных недостатков, предложен метод на основе перехода к анализу коротких интервалов основного сигнала, на которых он носит нестационарный характер, с использованием математического аппарата анализа нестационарных систем. Рассмотрены методы анализа нестационарных сигналов и систем, такие как оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование и метод спектрального анализа Солодовникова В.В. В результате, как наиболее удобный для реализации на ЭВМ и полностью отвечающий требованиям анализа как нестационарных сигналов, так и нестационарных систем, для решения задач синтеза нестационарного вторичного канала был выбран спектральный метод Солодовникова В.В., основная идея которого заключается в разложении нестационарных сигналов по нестационарному ортонормированному базису, определенному в общем случае на нестационарном отрезке. При этом характеристики сигналов и звеньев представляются в виде матриц, а преобразование сигналов выполняется на основе операций над этими матри-

цами. Примерами нестационарных ортонормированных базисов могут служить ортонормированные нестационарные полиномы Лежандра $P(t, \tau)$ и нестационарные тригонометрические функции C_i , определяемые по формулам:

$$P_i(t, \tau) = \sqrt{\frac{2i+1}{t}} \sum_k^i l_{ik} \frac{\tau^k}{t^k}, \quad (i = 0, 1, \dots, n), (0 \leq \tau \leq t), \quad (1)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{1}{t}}, \quad C_i = \sqrt{\frac{2}{t}} \cos\left(\frac{i\pi}{t} \tau\right), \quad (i = 1, 2, \dots),$$

где $l_{ik} = (-1)^{i-k} C_{i+k}^i C_i^{i-k}$, n - количество базисных функций.

Основными характеристиками нестационарных сигналов и звеньев, используемыми в спектральном методе Солодовникова В.В. являются: нестационарная спектральная характеристика (НСХ) сигналов и двумерная нестационарная передаточная функции (ДНПФ) звена, определяемые по формулам:

$$X(i, t) = \int_{t-T(t)}^t \psi^*(i, t, \tau) x(\tau) d\tau, \quad (2)$$

$$W(i, h, t, t) = \int_{t-T(t)}^t d\theta \int_{t-T(t)}^t \psi^*(h, t, \theta) \psi(i, t, \tau) k(\theta, \tau) d\tau,$$

где $x(\tau)$ - анализируемая функция времени, $k(\theta, \tau)$ - импульсная переходная функция звена, $\psi^*(h, t, \theta)$ - комплексно-сопряженная базисная функция.

Выполнено сравнение эффективности анализа дискретных нестационарных сигналов (звуковой сигнал малой длительности, сигнал изображения малой длительности и синтезированный нестационарный сигнал) с помощью разложения в усеченный ряд Фурье и спектрального анализа Солодовникова В.В. При этом в качестве критерия эффективности использовалась оценка СКО сигнала после его прямого и обратного преобразования на интервале, содержащем N отсчетов:

$$\varepsilon_\phi(N) = \sqrt{\sum_{k=0}^N (s(kT_d) - \tilde{s}_\phi(kT_d))^2}, \quad \varepsilon_\Delta(N) = \sqrt{\sum_{k=0}^N (s(kT_d) - \tilde{s}_\Delta(kT_d))^2}, \quad \varepsilon_T(N) = \sqrt{\sum_{k=0}^N (s(kT_d) - \tilde{s}_T(kT_d))^2},$$

где $\varepsilon_\phi(T)$, $\varepsilon_\Delta(T)$, $\varepsilon_T(T)$ - СКО сигналов при разложении в усеченный ряд Фурье, по нестационарным полиномам Лежандра и тригонометрическим функциям, соответственно; $s(kT_d)$ - исходный сигнал; $\tilde{s}_\phi(kT_d)$ - восстановленный сигнал; T_d - интервал дискретизации; N - количество отсчетов сигнала на текущем интервале. Результаты для N , варьируемого в пределах от 1 до 100 отсчетов, представлены на рис.1. Видно, что на интервалах до 33 отсчетов анализ нестационарных сигналов с помощью спектрального метода Солодовникова В.В. дает меньшую ошибку относительно разложения в ряд Фурье, что говорит о предпочтительности его использования для анализа на данных интервалах.

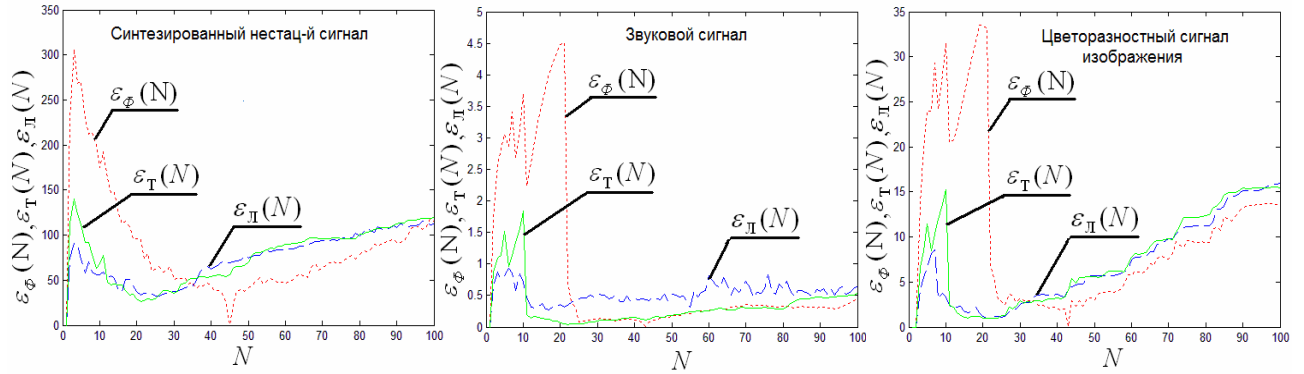


Рисунок 1 – Зависимости $\varepsilon_\phi(N)$, $\varepsilon_\Pi(N)$, $\varepsilon_T(N)$ для синтезированного, звукового и цветоразностного сигналов

На рис. 2 представлена разработанная модель нестационарного вторичного уплотнения каналов, позволяющая преодолеть вышеуказанные недостатки.

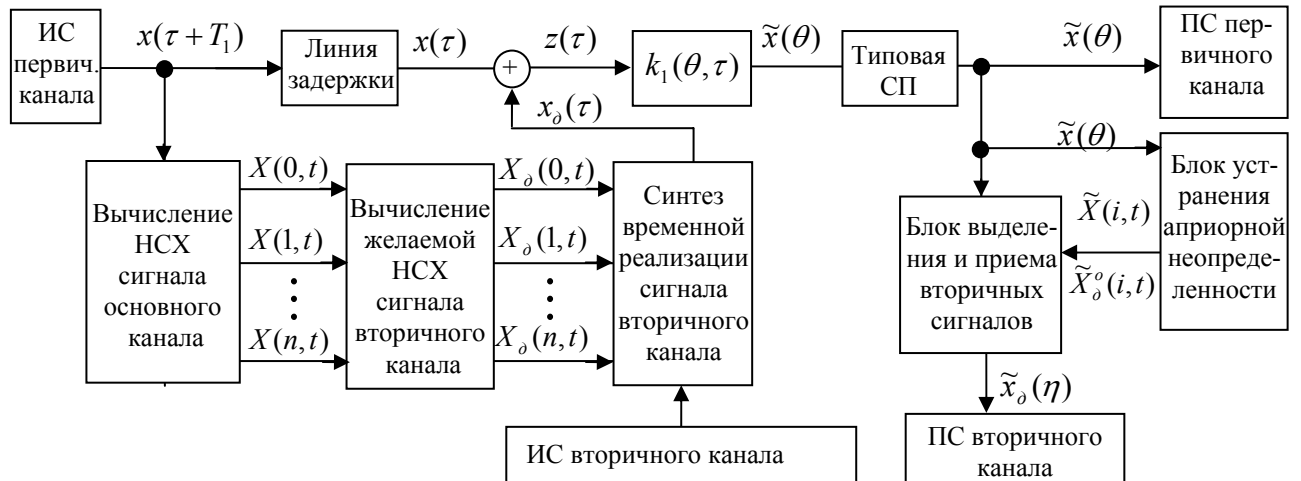


Рисунок 2 – Разработанная модель нестационарного вторичного уплотнения каналов ТС

Во второй главе ставится и решается оптимизационная задача нестационарного вторичного уплотнения каналов ТС в виде решения двух подзадач: синтеза и выделения сигнала вторичного канала. Модель нестационарного вторичного уплотнения для первой подзадачи приведена на рис. 3.

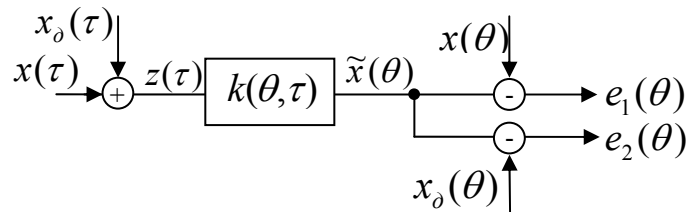


Рисунок 3 – Модель нестационарного вторичного уплотнения для оптимизационного метода

На рис. 3 $x(\tau)$ - нестационарный гауссовский сигнал основного канала с известной НСХ $X(i, t)$; $x_0(\tau)$ - нестационарный гауссовский сигнал вторичного канала, НСХ $X_0(i, t)$ которого подлежит определению; $\tilde{x}(\theta)$ - сигнал оценки основного канала; $z(\tau)$ - групповой сигнал; $e_1(\theta)$ - ошибка воспроизведения ос-

новного сигнала; $e_2(\theta)$ - сигнал на выходе второго элемента сравнения.

Сумма сигналов $z(\tau) = x(\tau) + x_o(\tau)$ поступает на вход нестационарного взвешивающего фильтра с известной импульсной передаточной функцией $k(\theta, \tau)$. Взвешивающий фильтр должен быть физически реализуемым и асимптотически устойчивым и определяет допустимую меру потери информации при воспроизведении основного сигнала. Вторичный сигнал $x_o(\tau)$ вносит искажения в основной сигнал $x(\tau)$, т.е. выступает в качестве помехи. Для ограничения искажения основного сигнала необходимо обеспечить выполнение функционального равенства вида:

$$J_1(e_1, t) = \int_{t-T(t)}^t e_1^2(\tau) d\tau = c(t), \quad (3)$$

где $e_1(\tau) = \tilde{x}(\tau) - x(\tau)$ - ошибка воспроизведения основного сигнала, $c(t)$ - функция времени, ограниченная сверху значением $\sup(c(t)) \leq c$. С другой стороны, $x(\tau)$ также искажает вторичный сигнал $x_o(\tau)$. Для обеспечения выделения вторичного сигнала на приемной стороне, необходимо обеспечить минимум функционала вида:

$$J_2(e_2, t) = \int_{t-T(t)}^t e_2^2(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $e_2(\tau) = \tilde{x}(\tau) - x_o(\tau)$ - сигнал на выходе второго элемента сравнения. Таким образом, задача формулируется следующим образом: необходимо определить НСХ сигнала вторичного канала $X_o(i, t)$, исходя из условия ограничения дисперсии ошибки воспроизведения сигнала основного канала и минимизации дисперсии сигнала с выхода второго элемента сравнения. Для решения задачи необходимо найти минимум функционала:

$$J(t, \alpha) = J_1(t) + \alpha(t)J_2(t) = \sum_{i=0}^n (E_1(i, t)E_1^*(i, t) + \alpha(t)E_2(i, t)E_2^*(i, t)), \quad (5)$$

где $E_1(i, t)$ - НСХ сигнала первого элемента сравнения; $E_2(i, t)$ - НСХ сигнала второго элемента сравнения; $E_1^*(i, t)$, $E_2^*(i, t)$ - комплексно-сопряженные НСХ; $\alpha(t)$ - множитель Лагранжа.

Искомые значения НСХ вторичного сигнала $X_o(i, t)$ являются результатом решения системы n линейных уравнений методом Гаусса.

$$AX_o = B, \quad (6)$$

$$A(v, h) = \begin{bmatrix} (1 + \alpha) \sum_i [W(i, 0)W^*(i, 0)] - \alpha(W^*(0, 0) + W(0, 0) - 1) & \dots & (1 + \alpha) \sum_i [W(i, n)W^*(i, 0)] - \alpha(W^*(n, 0) + W(0, n)) \\ \dots & \dots & \dots \\ (1 + \alpha) \sum_i [W(i, 0)W^*(i, n)] - \alpha(W^*(0, n) + W(n, 0)) & \dots & (1 + \alpha) \sum_i [W(i, n)W^*(i, n)] - \alpha(W^*(n, n) + W(n, n) - 1) \end{bmatrix},$$

$$B(v) = \begin{bmatrix} -(1 + \alpha) \sum_h \sum_i X(i)[W(h, i)W^*(h, 0)] + \sum_h X(h)[W^*(h, 0) + \alpha W(0, h)] \\ \dots \\ -(1 + \alpha) \sum_h \sum_i X(i)[W(h, i)W^*(h, N)] + \sum_h X(h)[W^*(h, N) + \alpha W(N, h)] \end{bmatrix}.$$

На основе оптимизационного метода синтеза вторичного сигнала разработана модель нестационарного вторичного уплотнения, представленная на рис. 4.

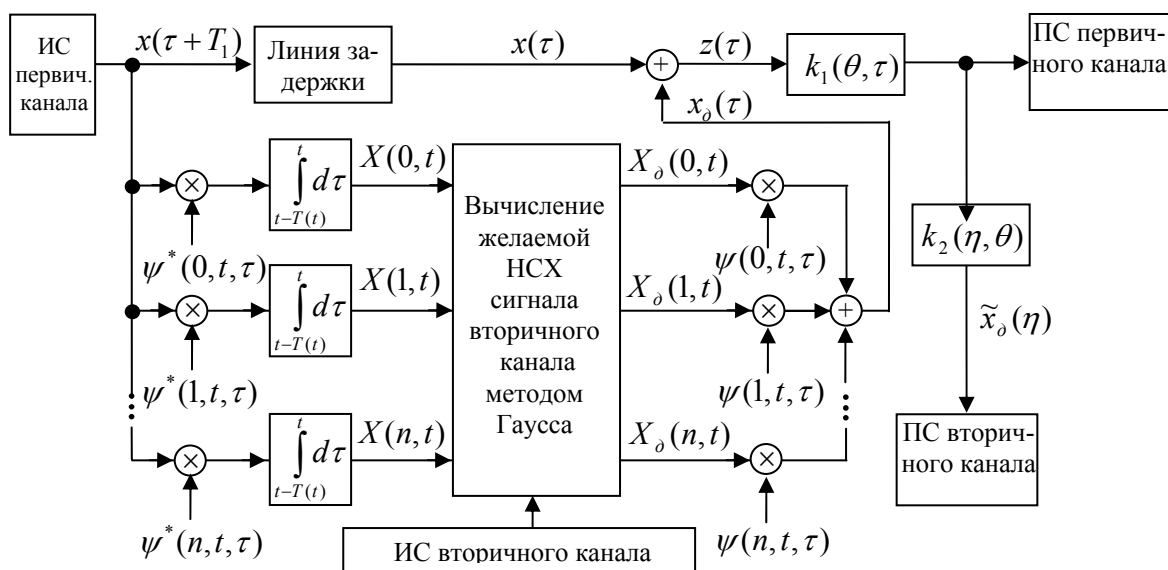


Рисунок 4 – Модель нестационарного вторичного уплотнения

Решается подзадача выделения вторичного сигнала. Оптимизационный синтез ДНПФ фильтра выделения сигнала нестационарного вторичного канала является классической задачей оптимальной фильтрации представленной в терминах спектральной теории Солодовникова В.В. Модель нестационарного вторичного канала представлена на рис. 5.

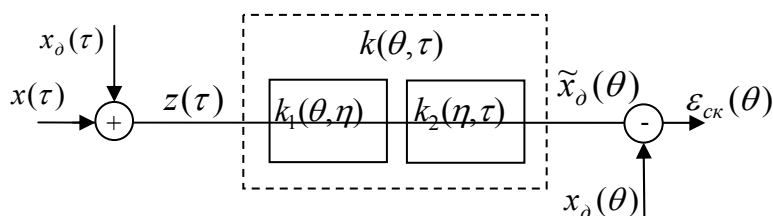


Рисунок 5 – Модель нестационарного вторичного канала связи

На рис. 5, $k_1(\theta, \tau)$ - импульсная передаточная функция взвешивающего фильтра; $k_2(\theta, \tau)$ - импульсная передаточная функция фильтра выделения сигнала вторичного канала, подлежащая определению; $\tilde{x}_\delta(\theta)$ - сигнал оценки вторичного канала; $\varepsilon_{ск}(\theta)$ - ошибка оценивания вторичного сигнала.

Решение ищется на базе оптимизационного метода и заключается в определении ДНПФ $W_2(h, i, t, t)$ фильтра выделения вторичного сигнала, обеспечивающего минимум среднеквадратической ошибки $\varepsilon_{ск}(\theta)$ оценивания вторичного сигнала в каждый момент времени t . Оптимизационная задача решается для совокупной ДНПФ вторичного канала $W(t, t)$, после чего определяется ДНПФ фильтра выделения $W_2(t, t)$ по формуле:

$$W(h, i, t, t) = \sum_v W_2(h, v, t, t) W_1(v, i, t, t), \quad (7)$$

где $W_1(h, i, t, t)$ - заданная ДНПФ взвешивающего фильтра; $W_2(h, i, t, t)$ - ДНПФ фильтра выделения вторичного сигнала; $W(h, i, t, t)$ - ДНПФ вторичного канала.

Выражение для определения ДНПФ вторичного канала $W(t, t)$ имеет вид:

$$W(t, t) = S'_{x_d x_d}(t, t) [S'_{x_d x_d}(t, t) + S'_{xx}(t, t) + \lambda E]^{-1}, \quad (8)$$

где $S'_{xx}(h, i, t, t) = X(h, t)X(i, t)$ - нестационарная спектральная плотность (НСП) основного сигнала $x(\tau)$; $S'_{x_d x_d}(t, t)$ - НСП вторичного сигнала $x_o(\tau)$; λ - множитель, необходимый для регуляризации задачи, связанной с плохой обращаемостью суммы матриц $[S'_{x_d x_d}(t, t) + S'_{xx}(t, t)]$.

Априорная неопределенности относительно НСП основного и вторичного сигналов, возникающей на приемной стороне при синтезе ДНПФ фильтра выделения, устраняется путем решения оптимизационной задачи вторичного уплотнения для оценки основного сигнала $\tilde{x}(\tau)$. Данная идея реализована в блоке устранения априорной неопределенности и приема, модель которого представлена на рис. 6.

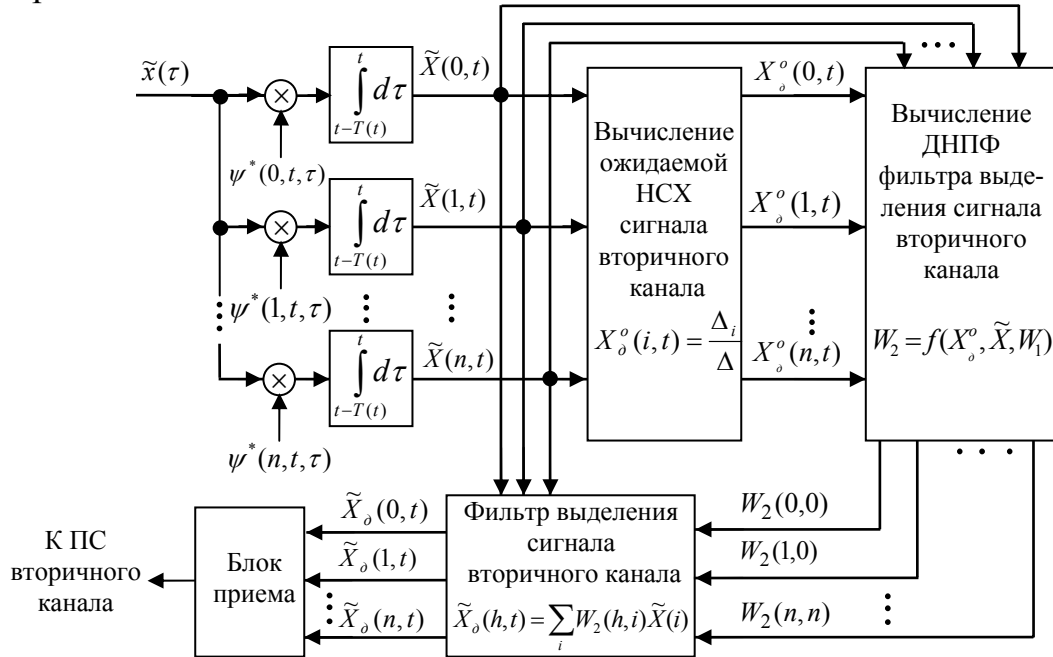


Рисунок 6 – Модель блока устранения априорной неопределенности и приема

Для разработанного оптимизационного метода нестационарного вторичного уплотнения приведены примеры расчета НСХ вторичного сигнала и ДНПФ фильтра выделения вторичного сигнала, а также выполнено численное моделирование со следующими исходными данными: сигнал основного канала – меандр, фильтр предсказания – апериодическое звено первого порядка, базис - нестационарные тригонометрические функции, $n = 21$. Результаты представлены на рис. 7.

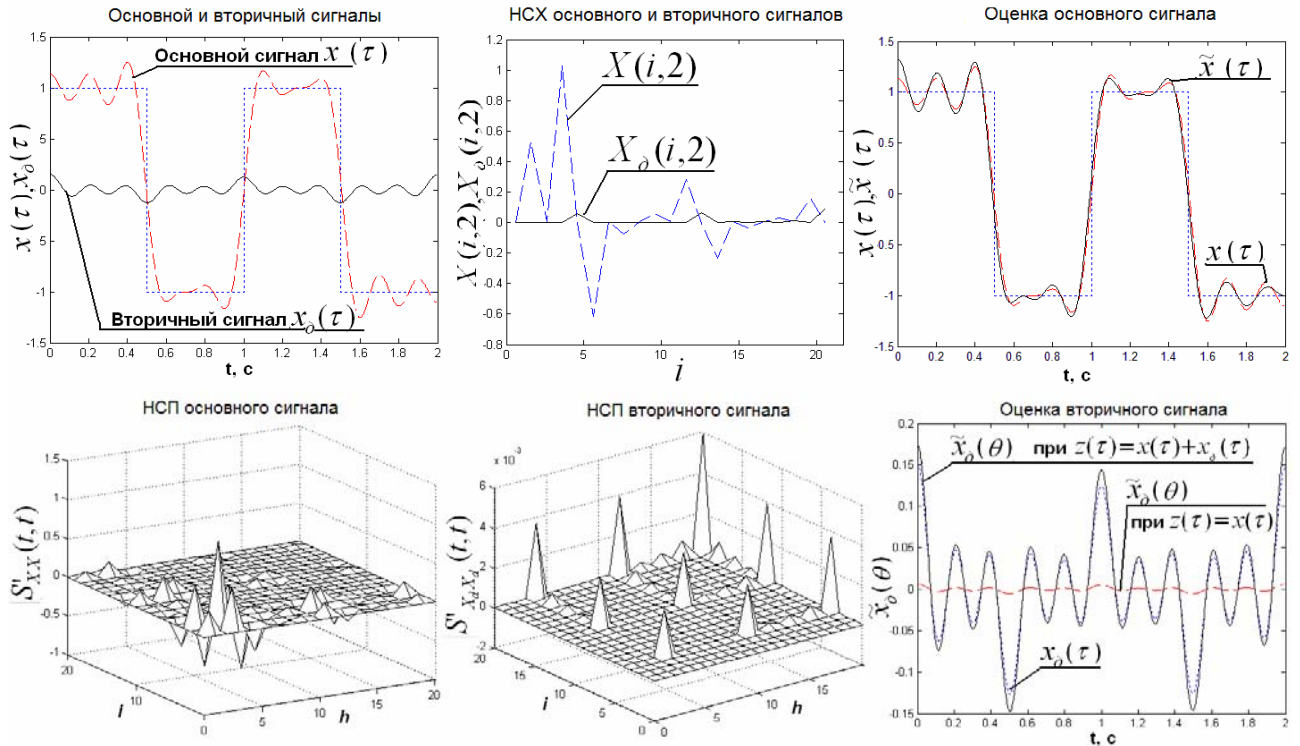


Рисунок 7 – Результаты численного моделирования нестационарного вторичного уплотнения на основе оптимизационного метода

Как следует из рис. 7, при приемлемом уровне искажения основного сигнала, достигается выделение вторичного сигнала. При этом о наличии или отсутствии вторичного сигнала $x_o(\tau)$ на текущем интервале можно однозначно судить по амплитуде его оценки $\tilde{x}_o(\theta)$.

В третьей главе ставится и решается задача нестационарного вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов параметрическими методами. Решение задачи предлагается в качестве альтернативы оптимизационному методу и позволяет упростить синтез вторичного сигнала и уменьшить априорную неопределенность на приемной стороне за счет поиска параметров вторичного сигнала в удобном функциональном классе. Задача формулируется следующим образом: на вход фильтра предсказания (рис.8), в общем случае нестационарного, с известной импульсной переходной функции $k(\theta, \tau)$, $\theta - \tau \geq 0$ поступает групповой сигнал $z(\tau) = x(\tau) + x_o(\tau)$, являющийся результатом аддитивного «смешения» основного $x(\tau)$ и вторичного $x_o(\tau)$ нестационарных гауссовских случайных сигналов.

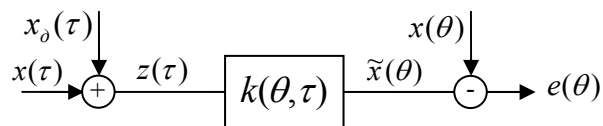


Рисунок 8 – Модель нестационарного вторичного уплотнения для параметрического метода

Необходимо определить НСХ вторичного сигнала исходя из следующих двух условий:

1. Обеспечение минимума взаимной корреляционной функции сигналов ошибки и оценки в основном канале на нестационарном отрезке $\tau = (0, t)$:

$$K_{e\tilde{x}}(t) = \int_0^t e_1(\tau)\tilde{x}(\tau)d\tau \rightarrow \min. \quad (9)$$

2. Ограничение дисперсии ошибки в канале воспроизведения сигнала основного канала:

$$\sup(\sigma^2(t)) = \int_0^t e_1(\tau)e_1(\tau)d\tau \leq c, \quad (10)$$

где c - некоторая заданная константа.

Результирующая система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_i X(i, t) - 2 \sum_i \sum_h W(i, h, t, t)(X(h, t) + X_o(h, t)) = 0; \\ \sum_i X^2(i, t) - \sum_h W^2(i, h, t, t)\{X^2(h, t) + X_o^2(h, t)\} = c. \end{cases} \quad (11)$$

Поиск НСХ сигнала вторичного канала сводится к решению первого уравнения системы методом Гаусса с одновременным контролем выполнения второго равенства системы. Отмечается, что положительными качествами параметрического метода является то, что поиск параметров вторичных сигналов ведется в известном функциональном классе, что упрощает их реализацию и снижает априорную неопределенность, а также уменьшение количества вычислений. К недостатку следует отнести увеличение искажения сигнала основного канала из-за неоптимального сигнала вторичного канала.

Далее решается задача параметрического синтеза квазиортогонального узкополосного (фазоманипулированного) вторичного сигнала. Для фазоманипулированного вторичного сигнала, НСХ которого описывается уравнением:

$$F_i(h) = \begin{cases} \alpha^i \frac{-\omega_i t \sqrt{2t}}{(h^2 \pi^2 - \omega_i^2 t^2)} [(-1)^h \sin(\omega_i t + \varphi) - \sin \varphi], & \text{при } h = 1, 2, \dots; \\ \alpha^i \sqrt{\frac{t}{2}} \cos \varphi, & \text{при } h = h_i = \frac{\omega_i t}{\pi}, \end{cases} \quad (12)$$

система уравнений (11) примет вид:

$$\begin{cases} \sum_i X(i, t) - 2 \sum_i \sum_h W(i, h, t, t)(X(h, t) + \alpha^h \sqrt{\frac{t}{2}}) = 0; \\ \sum_i X^2(i, t) - \sum_h W^2(i, h, t, t)\{X^2(h, t) + \alpha^h \alpha^h \frac{t}{2}\} = c. \end{cases} \quad (13)$$

После определения n пар значений (h_i, α^i) , соответствующих возможным сочетаниям амплитуды и частоты вторичного фазоманипулированного сигнала, производится выбор пары с максимальным значением α^i , что соответствует наибольшей помехоустойчивости вторичного канала. Для разработанного метода предложена модель нестационарного вторичного уплотнения и приемника

фазоманипулированных вторичных сигналов в условиях априорной неопределенности, представленные на рис. 9, 10, соответственно.

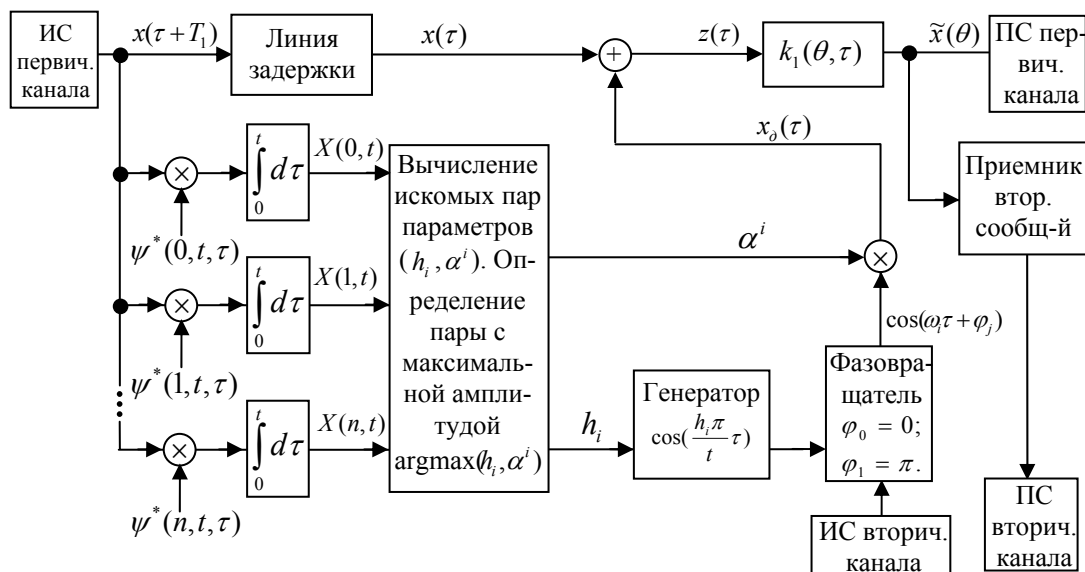


Рисунок 9 – Модель вторичного уплотнения на основе параметрического метода

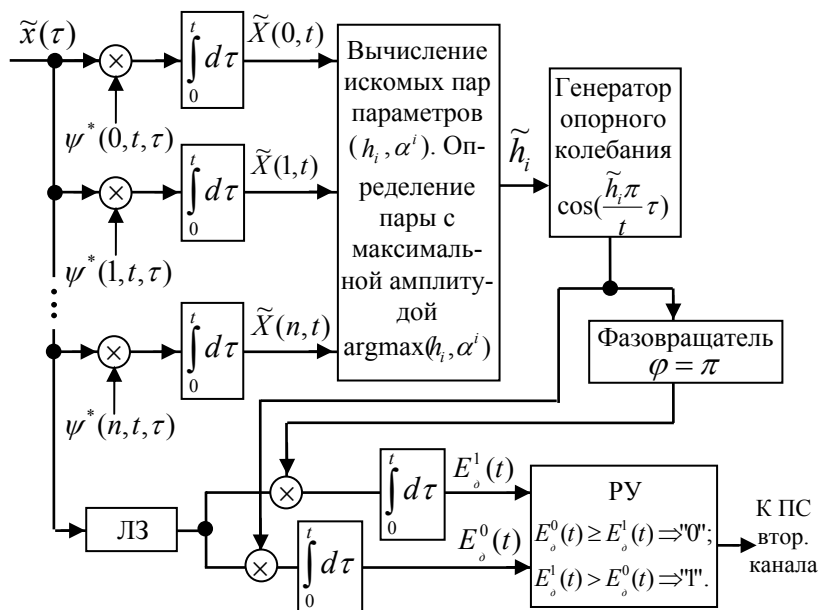


Рисунок 10 – Модель приемника фазоманипулированных вторичных сигналов

Прием вторичных сигналов в данном случае производится по корреляционной когерентной схеме с устранением априорной неопределенности относительно частоты несущего колебания вторичного сигнала. Для параметрического метода вторичного уплотнения также проведено численное моделирование. Результаты представлены на рис.11.

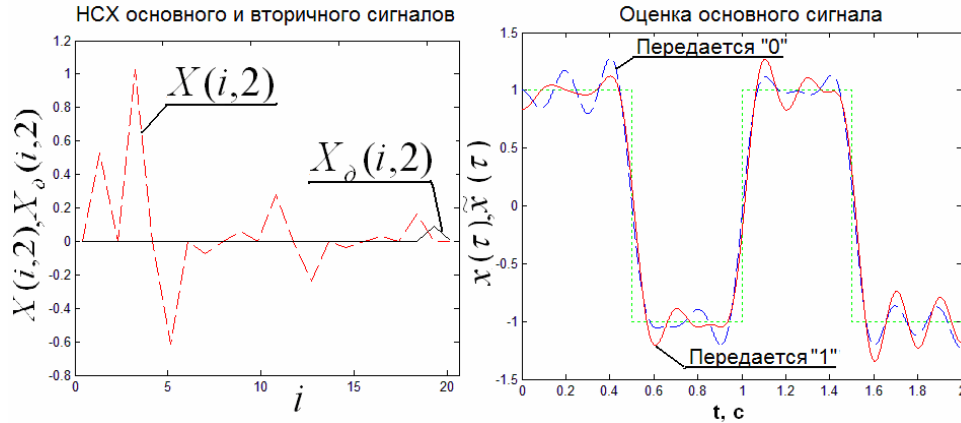


Рисунок 11 – Результаты численного моделирования нестационарного вторичного уплотнения на основе параметрического метода

В четвертой главе на основе методов, предложенных во второй и третьей главах, разработаны алгоритмы и проведены эксперименты (компьютерное моделирование) по вторичному уплотнению цифрового звукового сигнала формата WAV и цветоразностных компонент Cr, Cb видеозображения без сжатия и со сжатием по стандарту MPEG-2. Исследованы зависимости значений вероятности ошибки при приеме вторичных сообщений $p_{\text{ош}}$ и СКО оценки основного сигнала $\tilde{\epsilon}_1$ от количества отсчетов N уплотняемого сигнала и значения множителя Лагранжа α . Результаты приведены на рис. 12.

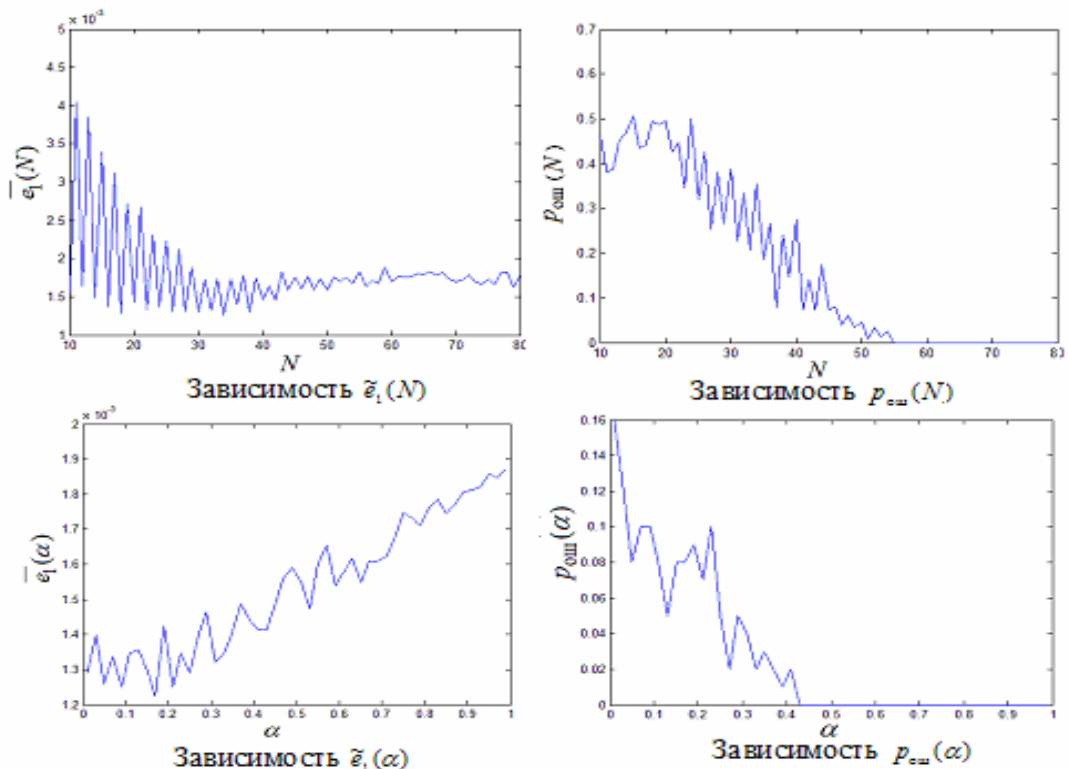


Рисунок 12 – Результаты исследования зависимостей $\tilde{\epsilon}_1(N)$, $\tilde{\epsilon}_1(\alpha)$ и $p_{\text{ош}}(N)$, $p_{\text{ош}}(\alpha)$

Из рис. 12 следует, что величина искажения основного сигнала и помехоустойчивость вторичного канала связаны обратной зависимостью. Так увеличение мощности вторичного сигнала (путем изменения множителя Лагранжа в

выражении (5)) ведет к снижению вероятности ошибки при приеме вторичного сообщения (при значениях множителя Лагранжа 0,45, $p_{\text{ош}}$ стремится к нулю), но увеличивает дисперсию ошибки воспроизведения основного сигнала примерно на 35% (что является приемлемой величиной). Увеличение же количества отсчетов в интервалах наблюдения с 30 до 60 единиц приводит к снижению вероятности ошибки при приеме вторичного сигнала с 0,2 практически до нуля, однако уменьшает скорость передачи вторичных сообщений в 2 раза и в 4 раза увеличивает временные задержки на обработку сигналов.

В ходе моделирования производилась оценка пропускной способности синтезированных вторичных каналов:

- для цифрового звукового сигнала формата WAV скорость вторичного канала составила 1633 бит/с, при уровне искажения не воспринимаемом человеком;
- для цветоразностных компонент Cr, Cb цифрового видеозображения размером 720×525 без сжатия скорость вторичного канала составила 1890000 бит/с (визуальную оценку степени искажений можно провести по изображениям, представленным на рис.13);
- для цифрового видеопотока главного уровня главного профиля стандарта MPEG-2 скорость вторичного канала составила 31104 бит/с для структуры GOP 15/3 и 66096 бит/с для структуры GOP 4/1;
- для цветоразностных компонент Cr, Cb цифрового видеозображения размером 720×525 без сжатия на основе параметрического метода скорость вторичного канала составила 252 кбит/с.

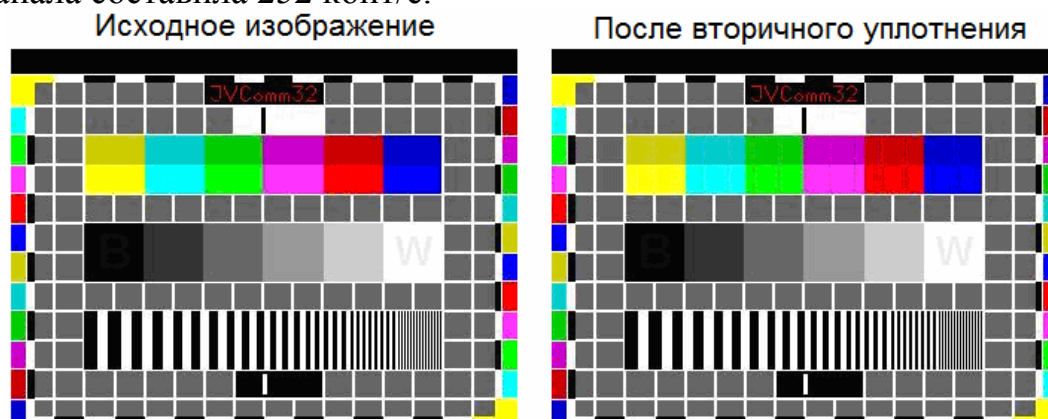


Рисунок 13 – Исходное и уплотненное изображение

При этом вероятность ошибки при приеме вторичного сигнала не превышала значение 3×10^{-5} , временная задержка в процессе передачи вторичного сигнала снизилась более чем в 10^3 раз по сравнению с вторичным уплотнением, основанным на непрерывном Фурье-преобразовании.

В заключении изложены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе в ходе исследования.

В приложении представлен листинг и описание программного комплекса, использовавшегося в ходе моделирования нестационарного вторичного уплотнения, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана модифицированная модель вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов, основанная на технологии нестационарного спектрального анализа процессов информационного обмена, что позволяет более качественно описывать процессы в каналах ТС, сократить временные задержки и увеличить пропускную способность современных (в том числе цифровых) ТС.

2. Разработан оптимизационный метод нестационарного вторичного уплотнения каналов, базирующийся на анализе нестационарных свойств сигналов и трактов ТС с помощью аппарата спектральной теории Солодовникова В.В., позволяющий получить оптимальный вид характеристики вторичного сигнала, обеспечивающий его наилучшее выделение при ограничении искажения основного сигнала. Метод позволяет повысить скорость передачи вторичных сообщений в 7,8 раза и сократить временные задержки более чем в 10^3 раз.

3. Разработан метод параметрического синтеза нестационарной спектральной характеристики сигнала вторичного канала, основанный на анализе нестационарных свойств сигналов и трактов ТС с помощью аппарата спектральной теории Солодовникова В.В., позволяющий определять параметры вторичного сигнала в удобном классе функциональных характеристик. Метод позволяет упростить практическую реализацию вторичного уплотнения, а также повысить пропускную способность вторичного канала на 40 %, сократить временную задержку более чем в 10^3 раз.

4. Предложены алгоритмы выделения сигналов нестационарного вторичного канала в условиях частичной априорной неопределенности, на основе алгоритма корреляционного когерентного приема, позволяющие определять оценки неизвестных нестационарных спектральных характеристик сигналов основного и вторичного каналов на приемной стороне без передачи информации о параметрах сигналов по основным каналам.

5. Разработан программный комплекс имитационного моделирования нестационарного вторичного уплотнения цифровых систем передачи мультимедийной информации без сжатия, а также стандарта MPEG-2, базирующийся на предложенных методах и алгоритмах. Как показало имитационное моделирование, разработанные методы и алгоритмы позволяют увеличить пропускную способность ТС до 20% и уменьшить временную задержку в процессе информационного обмена более чем в 10^3 раз относительно известного метода вторичного уплотнения.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Критериальный синтез спектральных характеристик сигналов нестационарного вторичного канала связи / Зевиг В.Г., Кузнецов И.В., Султанов А.Х. // Вестник УГАТУ, 2009, Серия: машиностроение, энергетика, электроника и измерительная техника, радиосвязь и техника, том 12, №2 (31), с. 182-189. (Соискателем предложен метод оптимального синтеза характеристик сигнала нестационарного вторичного канала на основе аппарата спектральной теории Солодовникова В.В.)

2. Вторичное уплотнение нестационарных сигналов критериальными методами / Зевиг В.Г., Кузнецов И.В., Султанов А.Х. // Инфокоммуникационные техноло-

гии, 2009, Том 7, №2, с. 97-102 (*Соискателем предложен метод оптимального синтеза и выделения сигнала нестационарного вторичного канала*)

В других изданиях

3. О развитии методов вторичного уплотнения сигналов для нестационарной телекоммуникационной системы / Кузнецов И.В., Зевиг В.Г. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы 8-й международной научно-технической конференции. – Уфа, 2007. – с. 67-70. (*Соискателем предложена постановка задачи нестационарного вторичного уплотнения каналов ТС и её решение на основе метода переменных состояния*)

4. Об особенностях синтеза характеристик сигналов нестационарного вторичного канала ТС / Зевиг В.Г., Жданов Р.Р. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Материалы Девятой Международной научно-технической конференции. – Казань, 2008. – с. 65-67. (*Соискателем проведено сравнение методов анализа нестационарных сигналов и систем. В задаче нестационарного вторичного уплотнения телекоммуникационных каналов предложено использовать спектральный метод Солодовникова В.В.*)

5. Сравнение методов анализа сигналов в задаче синтеза нестационарного вторичного канала ТС / Зевиг В.Г. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Материалы Девятой Международной научно-технической конференции. – Казань, 2008. – с. 67-68. (*Соискателем проведено сравнение анализа нестационарных сигналов на основе разложения в усеченный ряд Фурье и применения спектрального метода Солодовникова В.В.*)

6. Критериальный синтез нестационарного вторичного канала ТС / Кузнецов И.В., Зевиг В.Г. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Материалы Девятой Международной научно-технической конференции. – Казань, 2008. – с. 68-70. (*Соискателем предложена оптимизационная задача нестационарного вторичного уплотнения каналов ТС и её решение*)

7. Анализ изображений спектральным методом Солодовникова В.В. / Кузнецов И.В., Зевиг В.Г., Жданов Р.Р. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Материалы Девятой Международной научно-технической конференции. – Казань, 2008. – с. 70-72. (*Рассмотрен вопрос анализа изображений на основе разложения по нестационарным ортонормированным функциям*)

8. Параметрический синтез спектральных характеристик сигналов нестационарного вторичного канала связи / Зевиг В.Г. // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов 4-й всероссийской школы семинара аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Уфа, 2009, Том 2, с. 151-155. (*Соискателем предложен метод параметрического синтеза спектральных характеристик сигнала нестационарного вторичного*)

ЗЕВИГ Владимир Георгиевич

МЕТОДЫ ВТОРИЧНОГО УПЛОТНЕНИЯ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.05.09 . Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отг. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 219

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии УГАТУ
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12