

*На правах рукописи*



**Ревуцкий Вадим Андреевич**

**УСТОЙЧИВЫЕ К МЕШАЮЩИМ ФАКТОРАМ  
АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Специальность:

05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ) на кафедре радиоправления и связи

- Научный руководитель - заслуженный работник ВШ РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Кириллов Сергей Николаевич
- Официальные оппоненты - доктор технических наук Ключко Владимир  
Константинович, заведующий кафедрой  
эконометрики и математического моделирования  
РГРТУ (г. Рязань)
- кандидат технических наук Бурнашев Рустам  
Умидович, начальник кафедры комплексов  
шифрования и передачи данных Рязанского  
высшего воздушно-десантного командного  
училища имени генерала армии В. Ф. Маргелова  
(г. Рязань)
- Ведущая организация - ОАО «Калужский научно-исследовательский  
радиотехнический институт», (г. Жуков,  
Калужской области)

Защита состоится «13» декабря 2013 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 Рязанского государственного радиотехнического университета по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ.

Автореферат разослан « 8 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.04

Д.т.н., проф.



Овечкин Г.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время широкое распространение во многих радиосистемах передачи информации (РСПИ) получили помехоустойчивые коды (ПК) различного класса, типа и параметров, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки в цифровых данных, передаваемых по радиоканалу. К основным типам линейных ПК, которые используются в большинстве РСПИ, относятся сверточные (СК), блочные (БК) и составные коды (СсК). При этом к классу СК принадлежат перфорированные и неперфорированные коды, к БК - циклические ПК и коды с низкой плотностью проверок на четность, а к СсК - каскадные коды и такие высокоэффективные ПК, как турбо-коды.

При этом возможны ситуации, когда необходимо определить, ПК какого класса и с какими параметрами используется в радиоканале передачи интегрированных цифровых информационно-управляющих потоков некоторой РСПИ.

К настоящему моменту в области решения задач распознавания вида ПК и анализа дискретных структур известны работы таких отечественных ученых, как: А. П. Алферов, С.М. Авдошин, С. Г. Баричев, В. М. Сидельников, а также таких зарубежных ученых, как: Б. Шнайер, Н. Смарт, Д. Ф. Зиглер.

При этом наибольший вклад в теорию помехоустойчивого кодирования внесли следующие отечественные ученые: Ю. Л. Васильев, Л. М. Финк, К. Ш. Зигангиров, В. В. Золотарев, В. В. Зяблов, В. М. Дорофеев, В. Д. Колесник, а также зарубежные ученые: К. Е. Шеннон, Р. У. Хемминг, И. С. Рид, Г. Соломон, Р. К. Боуз, Д. К. Рой-Чоудхури, Э. Р. Хоквингем, Э. Д. Витерби, Э. Берликемп, Д. Месси, У. Питерсон, Э. Уэлдон, Т. Кассами, Е. Ивадари, М. Голей и др.

Так, при решении задач радиомониторинга может возникнуть необходимость извлечения первичной информации на основе анализа принятых радиосигналов от передающей аппаратуры, анализируемой РСПИ. При этом одним из этапов обратного преобразования сигналов в общей структуре РСПИ, является декодирование ПК, для выполнения которого необходимо знание его внешних параметров, а также порождающих элементов (ПЭ).

В случае использования РСПИ с адаптацией ПК к уровню помех также требуется устранить кратковременную неопределенность о текущих параметрах системы помехоустойчивого кодирования.

При этом в задачах распознавания вида ПК объем априорной информации о системе помехоустойчивого кодирования может быть различным: от списка возможных типов, до полного отсутствия информации о характеристиках кодов, которые могут быть представлены в анализируемой двоичной последовательности (АДП), получаемой при демодуляции сигналов РСПИ.

Главными недостатками существующих алгоритмов являются необходимость использования крайне большого объема статистического материала, невозможность распознавания ПК большой длины, а также принятия решения в реальном масштабе времени.

При этом существующие алгоритмы, позволяют обнаруживать лишь полностью известные ПК, что не обеспечивает возможности распознавания ПК в случае большого числа гипотез о классе и параметрах кода, а также при наличии мешающих факторов (шумов и помех в радиоканале РСПИ), приводящих к ошибкам в АДП.

Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритмов распознавания вида ПК при действии мешающих факторов в близком к реальному масштабу времени.

**Цель и задачи работы.** Основной целью работы является разработка алгоритмов обнаружения, оценки внешних параметров и ПЭ для ПК в интересах построения высоконадежной системы распознавания вида ПК в близком к реальному масштабу времени при действии мешающих факторов.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач:

- обоснование алгоритмов предварительной обработки АДП в интересах выделения информативных статистических характеристик, позволяющих обнаружить и оценить внешние параметры ПК различного класса.

- разработка алгоритмов обнаружения, оценки внешних параметров и ПЭ для ПК различного класса на фоне других кодов и случайных двоичных последовательностей (СДП), при действии мешающих факторов;

- обоснование общей структуры системы распознавания вида ПК на основе совместного использования алгоритмов обнаружения, оценки внешних параметров и ПЭ, позволяющей достичь компромисса между надежностью решений системы и аппаратно-вычислительными ресурсами, требуемыми на ее реализацию в близком к реальному масштабу времени;

- анализ вычислительных затрат на реализацию системы распознавания вида ПК для выбора элементной базы, обеспечивающей близкое к реальному масштабу времени функционирование.

**Методы исследований.** В работе использовались методы математической статистики и статистической радиотехники, кодирования в полях Галуа, математический аппарат теории вероятностей, математический аппарат теории Марковских процессов, матричного исчисления, вычислительной математики, а также новейшие достижения в области цифровой обработки информации.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

- 1 Алгоритм предварительной обработки АДП на основе расчета матриц перехода (МП), позволяющий компактно представить данную последовательность и выявить ее статистические особенности.

- 2 Устойчивые к мешающим факторам алгоритмы распознавания видов СК и БК на основе совместного использования алгоритмов обнаружения и оценки внешних параметров ПК в масштабе нереального времени.

- 3 Алгоритмы обнаружения и оценки внешних параметров БК различного типа на основе автокорреляционной функции (АКФ) и закона распределения вероятности весов (ЗРВВ) для АДП, а также множественных свойств БК, позволяющие распознать такие блочные ПК, как: коды Рида-Соломона (РС),

Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), Голея (КГ), Рида-Маллера (РМ), Хемминга (КХ) и низкоплотностные коды (LDPC) в близком к реальному масштабу времени.

4 Устойчивый к мешающим факторам алгоритм распознавания СсК, включающий алгоритмы распознавания турбо-кодов и каскадных ПК, функционирующий в близком к реальному масштабу времени.

5 Устойчивый к мешающим факторам алгоритм оценки ПЭ различных ПК на основе схемы декодер-кодер, позволяющий в реальном масштабе времени принимать решения о виде ПК, при условии, что его ПЭ принадлежит известному множеству.

#### **Практическая значимость и внедрения результатов работы.**

Предложенная в работе система распознавания вида ПК может быть использована при решении задач радимониторинга, как для принятия оперативных решений, так и для пополнения априорной информации о возможных ПК, а также в радиосистемах с адаптацией ПК. Результаты диссертационной работы были внедрены в рамках НИОКР с ОАО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт».

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1 Алгоритм предварительной обработки анализируемой двоичной последовательности, позволяющий компактно представить данную последовательность посредством матрицы переходов в интересах построения высоконадежного алгоритма распознавания вида сверточных кодов.

2 Устойчивые к мешающим факторам алгоритмы распознавания вида сверточных, блочных и составных помехоустойчивых кодов, обеспечивающие вероятность правильного распознавания  $P_{n.p.} \geq 0,94$ ,  $P_{n.p.} \geq 0,91$  и  $P_{n.p.} \geq 0,89$  соответственно при вероятности ошибок в радиоканале передачи информации  $P_{ош.б} \leq 0,01$ .

3 Алгоритм оценки порождающих элементов на основе схемы декодер-кодер, позволяющий распознать вид помехоустойчивого кода из известного множества в реальном масштабе времени при наличии мешающих факторов и обеспечивающий вероятность правильных решений  $P_{n.p.} > 0,82$  при вероятности ошибок в радиоканале передачи информации  $P_{ош.б} < 3 \cdot 10^{-3}$ .

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях (НТК): 15-й, 17-й ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях», РГРТУ (г. Рязань 2010, 2012); 15-й, 17-й МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», РГРТУ (г. Рязань 2010, 2012); 13-й, 14-й, 15-й, МНТК "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (г. Москва 2011, 2012, 2013); 16-й, 17-й ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов "Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы" РГРТУ (г. Рязань 2011, 2012); 20-й МНТК «Современное телевидение и радиоэлектроника», (г. Москва 2012); X МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (г. Владимир 2013); 6-й МНТК

«Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» имени В. Ф. Уткина (г. Рязань 2013 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ. Из них 8 статей в научно-технических журналах и межвузовских сборниках, 3 из которых в журналах рекомендованных ВАК, а также 11 тезисов докладов на МНТК и ВНТК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и 9 приложений. Диссертация содержит 149 с. основного текста и 60 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и решаемые в работе задачи. Перечислены новые научные результаты, полученные в работе, показаны ее практическая ценность и апробация. Сформулированы основные положения на защиту.

**В первой главе** разработаны алгоритмы обнаружения и оценки внешних параметров СК на основе алгоритма предварительной обработки АДП.

В интересах построения алгоритма обнаружения СК с известными внешними параметрами  $(m_0, n_0, k_0)$ , где  $m_0$  - максимальная длина регистров сдвига в составе кодера,  $n_0$  - длина выходного и  $k_0$  - длина входного кадров, предложен алгоритм предварительной обработки АДП.

Предлагается представить АДП длиной  $L$  символов в виде МП -  $W(N_i, N_j)$ , элементы которой показывают вероятность последовательного появления в данном потоке определенных кодовых комбинаций длиной  $m_0 \cdot n_0$  символов, что соответствует выбору кодовых слов СК, равных длине кодового блока такого ПК.

$$W(N_i, N_j) = \sum_{x=1}^{V_C} f(\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_{x+X+I}, N_i, N_j), \quad i, j = \overline{1, 2^X}, \quad (1)$$

где  $V_C = L / (2m_0n_0 + I + m_0 - 1)$  - число сегментов длиной  $2X + I$  в потоке  $\overline{\mathbf{B}}$ , выделяемых с шагом  $s$ , а также

$$f(\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_{x+X+I}, N_i, N_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{B}_x = N_i \text{ и } \mathbf{B}_{x+X+I} = N_j; \\ 0, & \text{если } \mathbf{B}_x \neq N_i \text{ и } \mathbf{B}_{x+X+I} \neq N_j. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь функция  $f(\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_{x+X+I}, N_i, N_j)$  в выражении (2) играет роль вероятностного идентификатора наступления такого события, как последовательное появление сегментов  $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_{x+X+I}$ , соответствующих текущим координатам  $N_i, N_j$  в МП -  $W(N_i, N_j)$ .

При этом понятие МП заимствовано из теории конечных автоматов Маркова, где посредством данной математической модели описывается

вероятность изменения состояния определенной конечной системы, которой в рассматриваемом случае является сверточный кодер.

Затем производится нормировка полученной гистограммы путем деления на общее количество пар сегментов в АДП числом  $V_C$ , чтобы выполнялось условие:  $\sum_{i=1}^{2^x} \sum_{j=1}^{2^x} W(N_i, N_j) = 1$ .

В результате экспериментальных исследований было показано, что в случае совпадения истинного и гипотетического СК матрица переходов имеет разреженную структуру с выраженными максимумами и минимумами. При  $n_{\text{зун}} \neq n_{\text{исм}}$  наблюдается появление в МП элементов промежуточного значения и увеличение общего числа ненулевых элементов по сравнению со случаем  $(m_{\text{зун}}, n_{\text{зун}}, k_{\text{зун}}) = (m_{\text{исм}}, n_{\text{исм}}, k_{\text{исм}})$ . В случае анализа основного числа несверточных ПК, получаемая МП практически не имеет нулей и состоит из близких по значению элементов.

С учетом случайных искажений МП, для обнаружения СК на ее основе, использовались гистограммы уровней (ГУ) по амплитудам данной матрицы. В результате экспериментальных исследований получено, что ГУ сверточных ПК в случае совпадения истинных и гипотетически параметров имеет ярко выраженный двухмодовый характер, а компоненты ГУ разнесены по краям области ее определения и не пересекаются. При частичном совпадении параметров в ГУ образуется три и более моды, а для СДП и БК имеет место одна выраженная компонента, расположенная близко к нулю.

Обосновано использование бета-распределений, аппроксимирующих ГУ для СК и несверточных ПК, на основе чего получен оптимальный алгоритм обнаружения СК с известными параметрами на фоне несверточных кодов (рисунок 1).

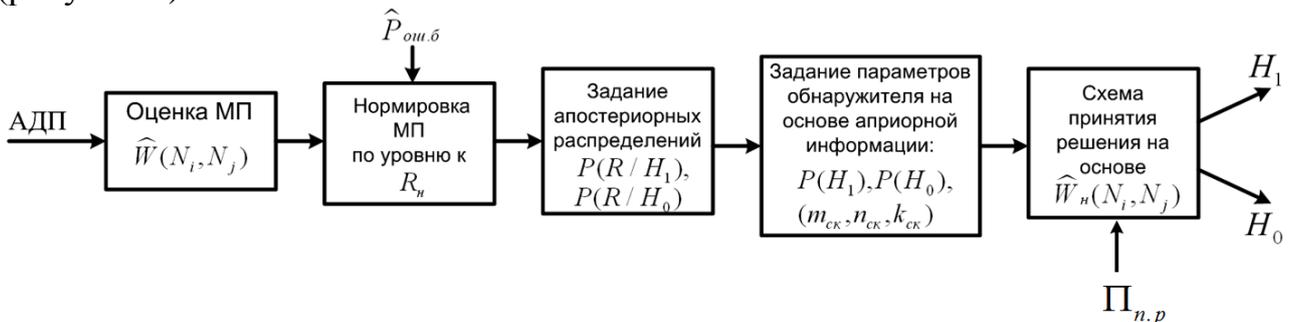


Рисунок 1

При этом схема принятия решения может быть оптимальной по критерию Байеса, а также квазиоптимальной.

Экспериментальные исследования данного алгоритма, проведенные для СК, БК, ССК и СДП с различными параметрами, показали, что предложенный алгоритм является устойчивым к мешающим факторам.

Таким образом, обоснован оптимальный по критерию Байеса алгоритм обнаружения различных сверточных ПК с известными внешними параметрами, обеспечивающий в среднем вероятность правильного обнаружения  $P_D \geq 0,98$  и вероятность ложной тревоги  $P_F \leq 0,03$  при вероятности ошибки в канале

передачи информации  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ . При этом предложен квазиоптимальный алгоритм обнаружения, обеспечивающий сокращение вычислительных затрат по сравнению с оптимальным алгоритмом до 64 раз, который показал близкие характеристики (в среднем хуже на 0,01), такие как вероятности правильного обнаружения  $P_D \geq 0,97$  и ложной тревоги  $P_F \leq 0,04$  при вероятности ошибок в АДП  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ .

В интересах повышения эффективности алгоритма обнаружения СК с известными внешними параметрами, обоснованы параметры алгоритма накопления решений, что также позволило использовать данный алгоритм для АДП переменной длины.

В интересах построения алгоритма оценки внешних параметров СК, предложен критерий разреженности МП -  $K_{МП} = 2^{2 \cdot X} / \mathbf{V}\{R_{\max}\}$ , где  $\mathbf{V}\{R_{\max}\}$  есть множество максимумов МП.

В ходе предварительных экспериментов получены зависимости данного критерия от интервала  $I$  между сегментами АДП, для которых вычислялась МП.

Из анализа дынных зависимостей (рисунки 2, 3), следует, что при совпадении истинных и гипотетических параметров СК зависимость  $K_{МП}(I)$  всегда имеет монотонно убывающий характер и входит в насыщение при  $I_0 = m_{уст} - 1$ .

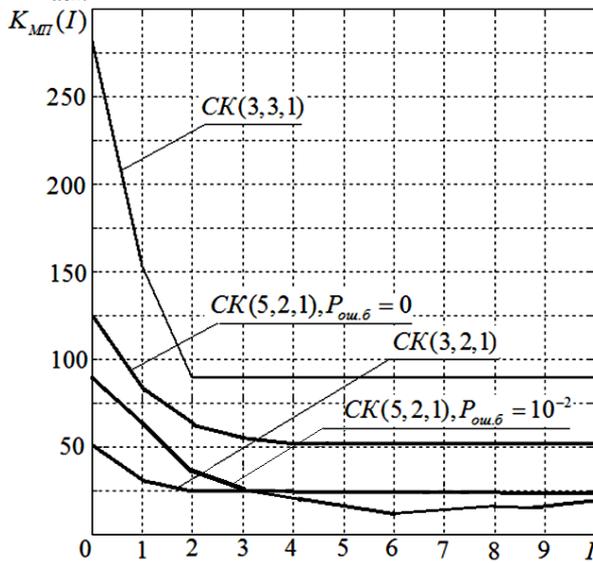


Рисунок 2

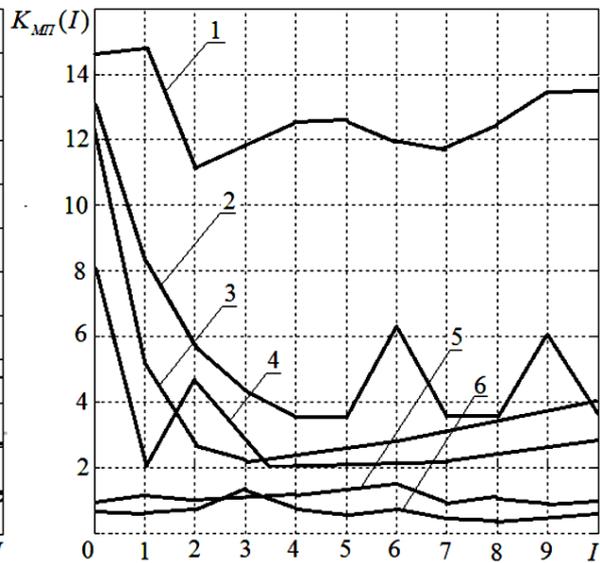


Рисунок 3

Здесь на рисунке 2 зависимости построены при совпадении истинных и гипотетических параметров СК. На рисунке 3 зависимость 1 имеет место, когда предполагается СК (5,2,1), а в АДП представлен СК (3,3,1), зависимости 2 и 3 - СК (3,2,1) и СК (3,3,1) поочередно используются как истинные и гипотетические, 4 - предполагается СК (2,3,2), а истинным является СК (5,2,1), 5 и 6 - в АДП представлены код Рида - Соломона (255,223) и СДП соответственно, а предполагается наличие СК (5,2,1).

С учетом структуры сверточного кодера и потока на его выходе при совпадении отдельных параметров истинного и гипотетического СК  $n_{сут} = n_{уст}$

имеет место общая зависимость положения точки насыщения зависимости  $K_{МП}(I)$  от параметров СК, которая определяется как:

$$I_0 = 2m_{уст} - m_{zum} - 1, \quad (3)$$

откуда зная  $I_0$  можно вычислить  $m_{уст}$ . Также видно, что при достаточно высокой вероятности битовой ошибки в АДП  $P_{ош.б} = 10^{-2}$  зависимость  $K_{МП}(I)$  для заданного СК существенно снижается, при этом общий вид зависимости сохраняется.

Подобное смещение вниз зависимости  $K_{МП}(I)$  наблюдается также в случае частичного несовпадения истинных и гипотетических параметров СК (в особенности при  $n_{zum} \neq n_{уст}$ ), что видно из сравнения зависимостей для СК с параметрами (3,3,1). При этом появляются всплески данной зависимости.

В случае полного несовпадения истинных и гипотетических параметров СК, а также при наличии несверточных ПК, даже в отсутствии ошибок зависимости  $K_{МП}(I)$  имеют близкий к равномерному вид и расположены на порядок ниже, чем при совпадении истинных и гипотетических параметров.

С учетом полученных экспериментальных результатов структура алгоритма оценки внешних параметров СК имеет следующий вид (рисунок 4).

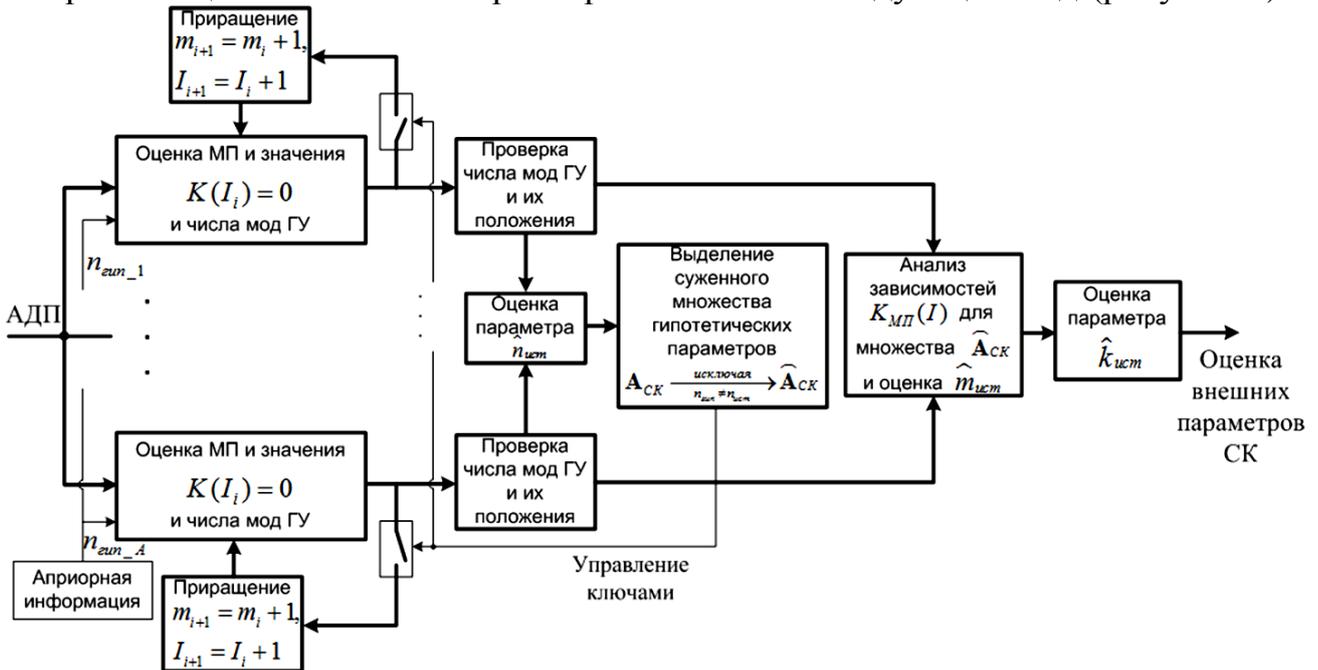


Рисунок 4

На первом этапе данного алгоритма с использованием свойств ГУ выполняется оценка параметра  $n_{уст}$ , далее с использованием зависимостей  $K_{МП}(I)$  оценивается параметр  $m_{уст}$ , а после параметр  $k_{уст}$ :

$$k_{уст} = (3m_{уст} - 1)^{-1} \cdot \log_2 [\mathbf{V}\{R_{max}\}].$$

В ходе экспериментальных исследований получено, что при вероятности битовой ошибки в АДП  $P_{ош.б} < 10^{-2}$ , предложенный алгоритм в среднем обеспечивает вероятность правильного решения о значении внешних

параметров СК, представленного в АДП, равную  $P_{n.p.} \geq 0,955$ .

Установлено, что близость свойств различных СК не дает возможности распознать вид СК только на основе алгоритмов обнаружения или оценки параметров, поэтому предложено проводить обнаружение типов СК, организованных по признаку равенства параметра  $n$ , с дальнейшей оценкой параметров внутри типа.

Структурная схема алгоритма распознавания вида СК на фоне других ПК приведена на рисунке 5.

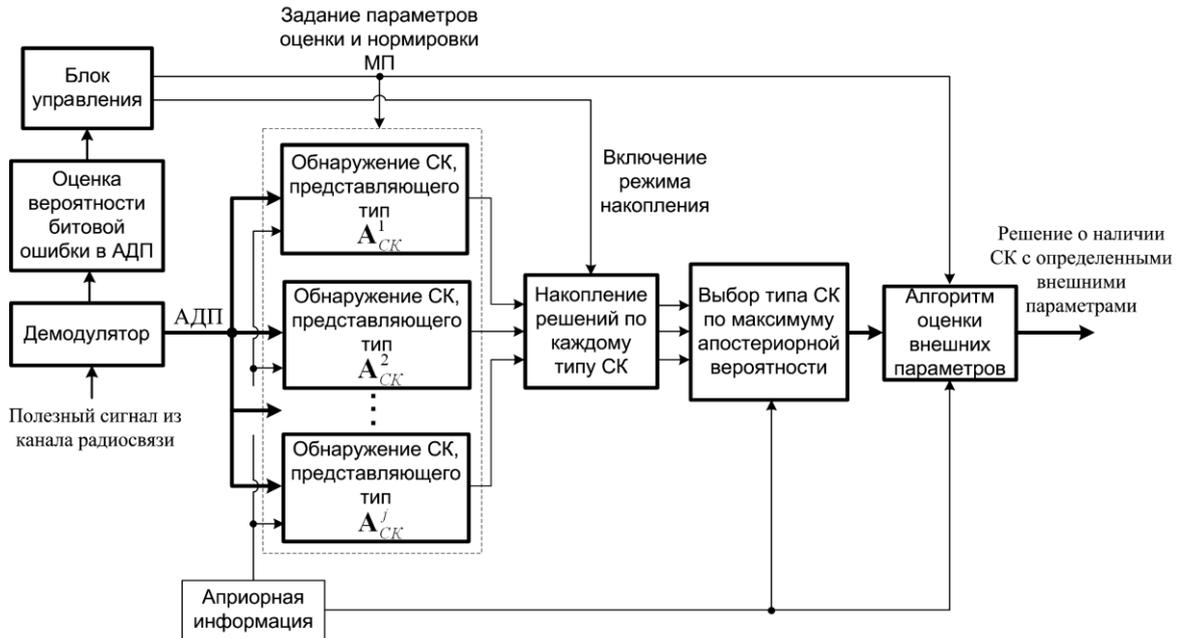


Рисунок 5

В ходе экспериментальных исследований алгоритма распознавания вида СК, при которых также использовалась БК, СсК и СДП, получены следующие зависимости вероятностей

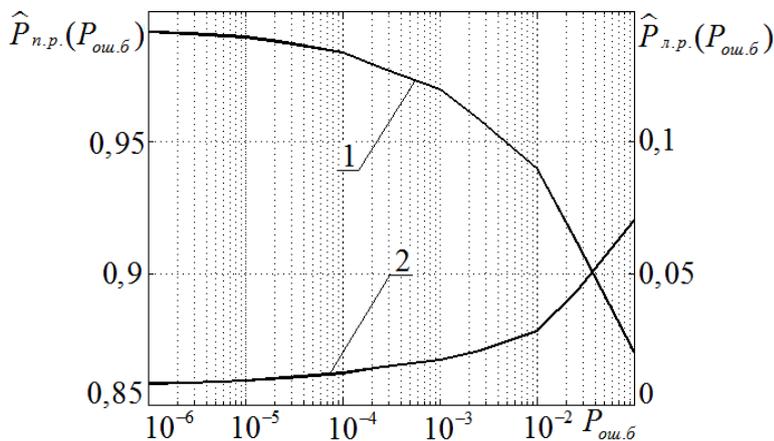


Рисунок 6

правильного  $P_{n.p.}$  и ложного  $P_{л.р.}$  распознавания от вероятности битовой ошибки в АДП -  $P_{ош.б}$  (рисунок 6).

Из анализа данных зависимостей следует, что предложенный алгоритм обеспечивает вероятность правильного распознавания  $P_{n.p.} \geq 0,94$  и вероятность ложного распознавания  $P_{л.р.} \leq 0,03$  при вероятности ошибок  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$  для СК, принадлежащего известному множеству.

**Во второй главе** обоснованы алгоритмы обнаружения и оценки внешних параметров БК на фоне СК и СДП.

При этом обоснован алгоритм обнаружения и предварительной оценки параметров на основе АКФ и ЗРВВ для АДП.

Так как при наличии блочного ПК в АДП присутствует периодически повторяющаяся синхропоследовательность (СП), то можно предположить наличие корреляционной связи внутри анализируемого потока  $\bar{\mathbf{B}}$ , который в зависимости от момента времени  $t_i$  обозначим как  $B(t_i)$ .

Пусть данный поток дискретных событий является эргодическим, тогда АКФ -  $K_{\mathbf{B}}(\tau)$  последовательности  $B(t_i)$  определяется как:

$$K_{\mathbf{B}}(\tau) = D_{\mathbf{B}}^{-1} \frac{1}{L_{\mathbf{B}} - \tau} \left( \sum_{i=0}^{L_{\mathbf{B}} - \tau} B(t_i) \cdot B(t_i - \tau) - M_{\mathbf{B}}^2 \right), \quad (4)$$

где  $D_{\mathbf{B}}$  - дисперсия и  $M_{\mathbf{B}}$  - математическое ожидание (МО) для АДП, а  $L_{\mathbf{B}}$  - ее длина.

Так, наличие СП, имеющих длину  $\tau_{СП}$  и расположенных на расстоянии  $T$  символов, приводит к появлению локальных всплесков в АКФ для АДП в точках  $\Delta = m(T + \tau_{СП})$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Напротив, при наличии СК, которые, как правило, самосинхронизируемы, АКФ не имеет выраженных всплесков.

Получен алгоритм обнаружения периодических всплесков АДП, позволяющий обнаружить БК, а также оценить параметры СП для ПК.

Непосредственно ЗРВВ  $W(\nu, N)$  представляет собой оценку относительной частоты появления  $\nu$  единиц в последовательности  $B(t_i)$  на прилегающих сегментах длиной  $N$  символов, выделяемых с шагом  $N$  символов. При этом оценка ЗРВВ  $W(\nu, N)$  производилась для потока КС предполагаемого БК, выделяемого из АДП на основе полученных ранее оценок интервала между СП  $T_0$  и их вида  $\bar{S}_{СП}$

В случае, когда АДП представляет собой СДП, все возможные комбинации длиной  $N$  равновероятны, что определяет ЗРВВ  $W_{СДП}(\nu, N)$  как биномиальный  $W_{СДП}(\nu, N) \approx W_{бу}(\nu, N)$ .

В ходе предварительных экспериментальных исследований доказана согласованность ЗРВВ для СДП с биномиальным законом. Также получено, что при наличии турбо-кодов и СК в АДП оценка ЗРВВ тоже соответствует биномиальному закону  $W_{СК}(\nu, N) \approx W_{бу}(\nu, N)$ . При этом сравнение ЗРВВ проводилось по критерию согласия К. Пирсона -  $\chi^2$ , и значение оценки критерия  $\chi^2$  с доверительной вероятностью 0,95 попало в односторонний доверительный интервал  $\chi^2 \leq 0,05$ .

Показано, что отклонение ЗРВВ для отдельных БК, выделенных в ходе предварительных экспериментов является существенным.

Это позволяет построить алгоритм быстрого обнаружения БК (рисунок 7).

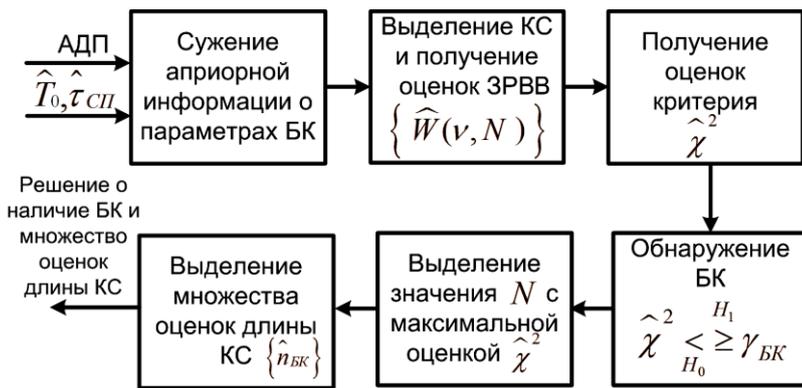


Рисунок 7

В результате процедура обнаружения LDPC кодов содержит шаги:

- 1) Расчет МО -  $\alpha_w$  на основе оценок ЗРВВ.
- 2) Сравнение полученных оценок МО с модой биномиального закона.
- 3) Принятие решения о наличии LDPC кода по правилу:  $\alpha_w \underset{H_0}{<} \underset{H_1}{>} \rho_\alpha$ , где  $H_1$  и  $H_0$  гипотезы о наличии и отсутствии LDPC кода соответственно.

Проводились экспериментальные исследования ЗРВВ для LDPC кодов, и был получен порог  $\rho_\alpha = 0,36$ , при вероятности ложной тревоги  $P_{л.т} \leq 10^{-3}$ .

Также в работе представлены алгоритмы распознавания БК различного класса на основе их множественных свойств, в состав которых входит алгоритм обнаружения циклического БК, содержащий следующие шаги:

1) Производится разбиение АДП в интересах оценки цикличности обнаруженного БК соответственно гипотетическим параметрам циклических БК.

2) Выполняется оценка показателя цикличности  $\varphi_{БК}$  для выделенных из АДП оценок КС, определяемого как:  $\varphi_{БК} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L/n_{сдв}} F(i)$ , где  $F(i)$  - есть частота совпадения всех циклических сдвигов выделенного кодового слова с другими кодовыми словами в АДП.

3) Производится сравнение максимальной оценки  $\varphi_{БК}$  с порогом  $\xi_\varphi$ , на основе чего и принимается решение о наличии циклического БК.

В результате объединения предложенных алгоритмов и процедур обнаружения и оценки внешних параметров БК различного типа получен устойчивый к мешающим факторам алгоритм распознавания вида БК, позволяющий также обнаружить турбо-код.

Экспериментальные исследования данного алгоритма позволили получить зависимости вероятностей правильного и ложного распознавания вида БК от вероятности битовой ошибки в канале передачи информации (рисунок 8).

Замечено, что в случае LDPC кодов МО -  $\alpha_{w,1}$  числа единиц в сегментах АДП, получаемое на основе оценок ЗРВВ, существенно смещено в сторону нуля относительно МО для биномиального закона -  $\alpha_{w,2}$ , что может быть использовано для обнаружения низкоплотностных кодов.

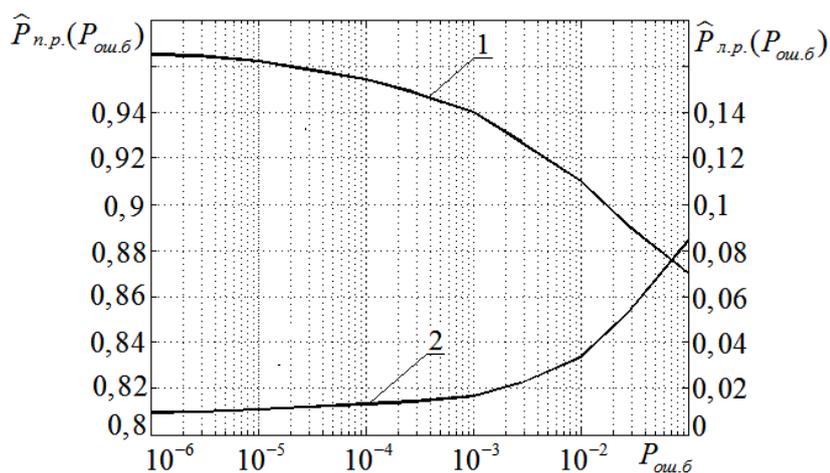


Рисунок 8

В третьей главе разработаны алгоритмы обнаружения и оценки параметров составных ПК, что составляет процедуру распознавания вида СсК, а также алгоритм оценки ПЭ для ПК различного класса.

Так как к СсК относятся турбо-коды и каскадные ПК, алгоритм распознавания вида составных ПК основан на совместном использовании алгоритмов распознавания данных типов кодов в отдельности.

Получен алгоритм распознавания турбо-кодов, основанных на СК, на фоне несоставных ПК, а также каскадных кодов и турбо-кодов произведения.

Данный алгоритм основан на параллельном включении алгоритмов обнаружения турбо-кодов на основе СК с известными параметрами (рисунок 9).

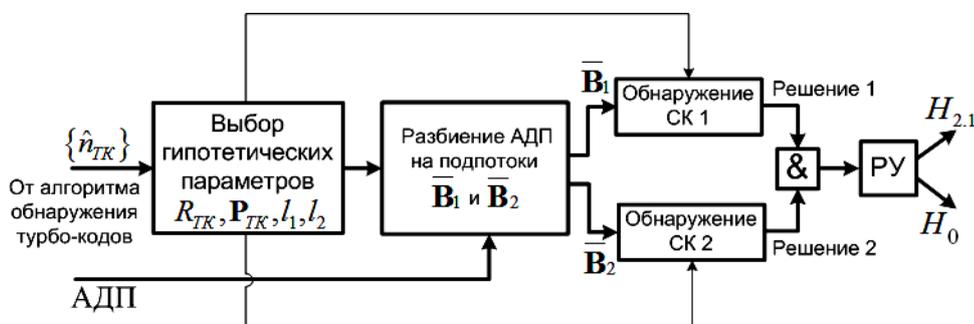


Рисунок 9

Здесь гипотеза  $H_{2.1}$  предполагает наличие турбо-кода на основе СК, а  $H_0$  его отсутствие.

Здесь гипотеза  $H_{2.1}$  предполагает наличие турбо-кода на основе СК, а  $H_0$  его отсутствие.

В случае каскадных ПК последовательно выполняется распознавание внутреннего и внешнего кодов на основе ранее рассмотренных алгоритмов распознавания вида СК и БК. При этом в состав алгоритма распознавания каскадных ПК также входит алгоритм оценки ПЭ.

Были проведены экспериментальные исследования предложенного алгоритма распознавания вида СсК, в результате чего была получена зависимость вероятности правильных решений  $P_{н.р.}$  на его выходе от вероятности ошибок  $P_{ош.б}$  в радиоканале передачи информации (рисунок 10).

При этом в качестве составных ПК рассматривались каскадные коды на основе кодов БЧХ, СК, РС и LDPC. Также в качестве СсК рассматривались турбо-коды на основе СК, а в качестве несоставных ПК – СК, БК и СДП.

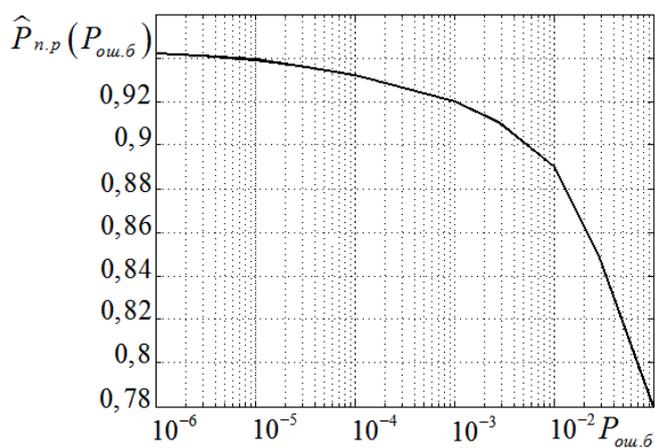


Рисунок 10

Из анализа данной зависимости следует, что предложенный алгоритм распознавания вида СсК обеспечивает вероятность правильных решений  $P_{n.p.} \geq 0,89$  при вероятности ошибок  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ .

Также получен алгоритм оценки ПЭ помехоустойчивых кодов, построенный на основе параллельного совмещения схем декодер-кодер, работающих в реальном

масштабе времени и позволяющих проверить отдельный гипотетический ПЭ на истинность. При этом схема декодер-кодер имеет вид (рисунок 11).

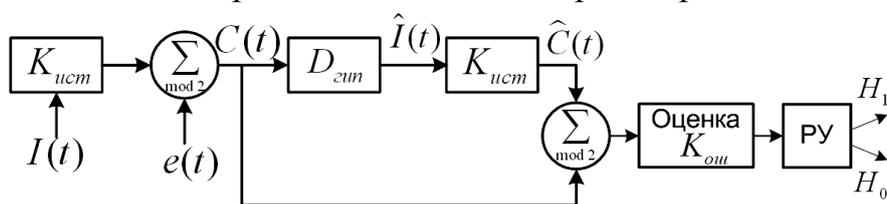


Рисунок 11

Экспериментальные исследования показали, что предложенный алгоритм оценки ПЭ позволяет правильно принять решения

о виде ПЭ помехоустойчивого кода, представленного в АДП, с вероятностью  $P_{n.p.} \approx 0,82$  при вероятности битовой ошибки в радиоканале

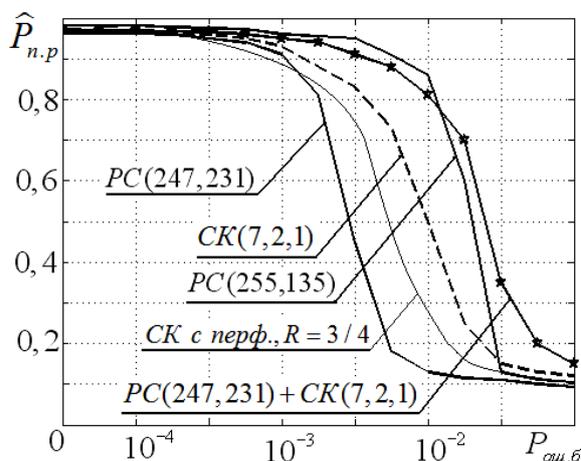


Рисунок 12

передачи информации  $P_{ош.б} \leq 3 \cdot 10^{-3}$  (рисунок 12).

В четвертой главе обоснована общая структура системы распознавания вида ПК на основе совместного использования алгоритмов распознавания ПК различного класса и оценки ПЭ.

Проведен анализ вычислительных затрат на реализацию отдельных блоков данной системы, а также возможностей распараллеливания

трудоемких операций, в результате чего из общего числа ПК наибольших затрат требует распознавание блочных кодов. На основе полученных оценок вычислительных затрат и числа параллельных процессов предложена аппаратная архитектура системы распознавания вида ПК на основе цифрового сигнального процессора (ЦСП) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), что показано на рисунке 13.

Также сформированы требования к аппаратным характеристикам элементной базы, позволяющих выполнять распознавание вида ПК в реальном масштабе времени (алгоритм оценки ПЭ) и в близком к реальному масштабу времени (алгоритмы распознавания вида ПК).

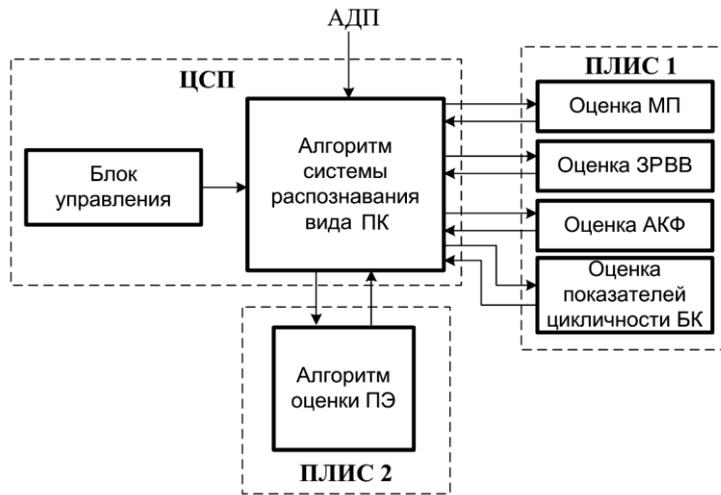


Рисунок 13

(ЛЯ), 2 188 Мбайт памяти, распределенной по кристаллу, 600 встроенных умножителей на базе процессоров DCP 48, 11 700 кбайт встроенной блочной памяти, максимальная частота 700 МГц. В качестве ПЛИС 1 выбрана модель с пониженными характеристиками - XC7K70T из того же семейства кристаллов.

Также проведен анализ моделей ЦСП, в результате которого для реализации общего алгоритма системы распознавания вида ПК и блока управления выбрана модель процессора BF537 фирмы Analog Devices. Данный ЦСП обеспечивает возможность вычислений на двух ядрах с тактовой частотой до 600 МГц.

Так, если известно множество возможных ПЭ, то для выбранной элементной базы временные затраты на принятие системой распознавания вида ПК решений, получаемых в масштабе реального времени, составляют  $3 \cdot 10^{-6}$  с., а в масштабе нереального времени, когда известно только множество возможных видов кодов, время на принятие решения составляет не более 7 мин.

Полученные результаты соответствуют требованиям к возможности распознавания вида ПК в реальном и близком к реальному масштабам времени.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты диссертационной работе:

1 Разработаны алгоритмы обнаружения и оценки внешних параметров сверточных помехоустойчивых кодов, при этом:

- обоснован алгоритм предварительной обработки АДП на основе расчета МП, позволяющий получить ее компактное представление в интересах построения алгоритма распознавания вида СК на фоне несверточных ПК;

- обоснован устойчивый к мешающим факторам алгоритм обнаружения СК с известными внешними параметрами на фоне несверточных ПК, обеспечивающий в среднем вероятность правильного обнаружения  $P_D \geq 0,98$  и вероятность ложной тревоги  $P_F \leq 0,03$  при  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ . Также предложен квазиоптимальный алгоритм, обеспечивающий сокращение вычислительных затрат по сравнению с оптимальным алгоритмом до 64 раз, который показывает близкие к оптимальному алгоритму характеристики правильного обнаружения  $P_D \geq 0,97$  и вероятности ложной тревоги  $P_F \leq 0,04$  при  $P_{ош.б} \leq 0,01$ ;

На основе данных требований произведен выбор моделей ЦСП, а также ПЛИС 1 и ПЛИС 2.

В результате по аппаратно-стоимостным характеристикам для реализации алгоритма оценки ПЭ наилучшим является кристалл ПЛИС фирмы Xilinx семейства Kintex модели XC7K160T, имеющей следующие характеристики:

162 240 логических ячеек

- разработан устойчивый к мешающим факторам алгоритм оценки внешних параметров СК, обеспечивающий в среднем вероятность правильного решения, равную  $P_{n.p.} \geq 0,955$  при вероятности битовой ошибки  $P_{ош.б} < 10^{-2}$ ;

- обоснован алгоритм распознавания вида СК на основе совместного использования алгоритмов обнаружения и оценки внешних параметров сверточных ПК, обеспечивающий вероятность правильного распознавания в масштабе нереального времени, равную  $P_{n.p.} \geq 0,94$  при вероятности битовой ошибки в АДП  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ .

2 Разработаны алгоритмы обнаружения и оценки внешних параметров блочных помехоустойчивых кодов, позволяющие на фоне неблочных ПК с высокой надежностью в масштабе нереального времени определить представлен ли в АДП блочный код определенного вида из априорного множества, а также обнаружить турбо-код. При этом в ходе разработки:

- обоснован алгоритм обнаружения и оценки внешних параметров БК на основе АКФ и ЗРВВ для АДП, а также множественных свойств БК, позволяющий распознать такие БК, как коды РС, БЧХ, КГ, РМ, КХ и LDPC;

- предложена блок-схема устойчивого к мешающим факторам алгоритма распознавания вида БК, обеспечивающего вероятности правильного и ложного распознавания  $P_{n.p.} \geq 0,91$  и  $P_{n.p.} < 0,04$  соответственно при вероятности битовой ошибки  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ .

3 Обоснован устойчивый к мешающим факторам алгоритм распознавания вида ССК, включающий алгоритмы распознавания турбо-кодов и каскадных ПК, обеспечивающий вероятность правильного решения в масштабе нереального времени о наличии в АДП составного ПК с определенными параметрами, равную  $P_{n.p.} \geq 0,89$  при вероятности битовой ошибки не более  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$  и  $P_{n.p.} \geq 0,94$  в отсутствии ошибок.

4 Обоснован устойчивый к мешающим факторам алгоритм оценки ПЭ различных ПК на основе схемы декодер-кодер, позволяющий в реальном масштабе времени распознать вид ПК из известного множества и обеспечивающий вероятность правильных решений  $P_{n.p.} \geq 0,82$  при вероятности ошибок  $P_{ош.б} < 3 \cdot 10^{-3}$ .

5 Обоснована общая структура системы распознавания вида ПК на основе совместного использования алгоритмов обнаружения, оценки внешних параметров и ПЭ для ПК различного класса, обеспечивающая наиболее эффективное сочетание надежности принимаемых близко к реальному масштабу времени решений и аппаратно-вычислительных ресурсов, требуемых на реализацию данной системы. При этом надежность принимаемых решений составила  $P_{n.p.} \geq 0,87$  при вероятности ошибок  $P_{ош.б} \leq 10^{-2}$ .

6 Обоснована элементная база, позволяющая реализовать алгоритм оценки ПЭ на основе схемы декодер-кодер в реальном масштабе времени за 3 мкс, а

алгоритм распознавания неизвестного вида ПК в близком к реальному масштабу времени за 7 мин.

7 Показано, что для реализации алгоритма оценки ПЭ в масштабе реального времени подходит ПЛИС семейства Kintex фирмы Xilinx - XC7K160T, характеристики которой: 65 000 ЛЯ, 838 кбайт памяти, распределенной по кристаллу, 240 встроенных умножителей на базе процессоров DCP 48, 4 860 кбайт встроенной блочной памяти, максимальная частота 700 МГц. При этом для реализации системы распознавания вида ПК в масштабе нереального времени выбрана ПЛИС XC7K70T с менее высокими характеристикам, а для реализации общего алгоритма системы и блока ее управления модель процессора VF537 фирмы Analog Devices

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1 Ревуцкий В.А., Алгоритм распознавания типа и оценки параметров помехоустойчивых кодов. // XV ВНТК. студентов, молодых ученых и специалистов. Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании. НИТ-2010. Рязань. РГРТУ. 2010. - С 90-93.

2 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А., Процедура классификации помехоустойчивых кодов, используемых в системах спутниковой связи. // 16-я МНТК. Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Рязань. РГРТУ. 2010. - С. 93-94.

3 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А., Семин Д.С., Емельяненко Д.А. Алгоритм распознавания типа и оценки параметров помехоустойчивых кодов. // 13-я Международная конференция. Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA -2011. Выпуск XIII - 2, Доклады. Москва. - С 30-33.

4 Ревуцкий В.А. Алгоритм классификации помехоустойчивых кодов // Межвузовский сборник научных трудов. Информационные технологии. РГРТУ. Рязань 2011. - С. 126-130.

5 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А., Алгоритм распознавания типа и оценки параметров помехоустойчивых кодов. // IX МНТК. Перспективные технологии в средствах передачи информации. Вл.ГУ. Владимир 2011. – С. 45 - 47.

6 Ревуцкий В.А., Алгоритм классификации несанкционированного источника излучений. // XXIV ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. РГРТУ. Рязань 2011. – С. 229-233.

7 Кириллов С.Н., Бузыкагов С.Н., Слесарев А.С., Бердников В.М., Косткин И.В., Покровский П.С., Ревуцкий В.А., Семин Д.С., Разработка системы анализа устойчивости цифровых систем телекоммуникаций к действию различного вида помех. // 14-я МНТК. Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA. Москва 2012. – С 126 - 129.

8 Косткин И.В., Ревуцкий В.А. Модель взаимного перемещения фоторегистрирующего устройства и снимаемой сцены для эффективного

сжатия видеоданных в ракетно-космических информационных системах. // V МНТК. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. Москва 2012. – С. 43-45.

9 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А. Алгоритм классификации помехоустойчивых кодов в системах спутниковой связи. // 17-я международная научно-техническая конференция. Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. РГРТУ. Рязань 2012. – 124 с., часть 2. - С. 33-35.

10 Ревуцкий В.А. Алгоритм классификации помехоустойчивых кодов в системах спутниковой связи. // Межвузовский сборник научных трудов. Методы и средства обработки и хранения информации. РГРТУ. Рязань 2012. - С. 71-74.

11 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А. Алгоритм обнаружения сверточных кодов на фоне случайной двоичной последовательности. // Вестник РГРТУ - 2012 - №4 (выпуск 42). – С. 3-8.

12 Ревуцкий В.А. Алгоритм обнаружения и оценки параметров сверточных кодов. // Межвузовский сборник научных трудов. Информационные технологии в научных исследованиях. РГРТУ. Рязань 2012. – С. 128-131.

13 Ревуцкий В.А. Алгоритм обнаружения сверточных ПК. // 17-я ВНТК. Новые информационные технологии в научных исследованиях. Рязань 2012. - С. 147-149.

14 Ревуцкий В.А. Алгоритмы обнаружения несанкционированного информационного источника излучений. // 25-я ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. РГРТУ. Рязань 2012. - С. 27-30.

15 Ревуцкий В.А. Алгоритм оценки параметров сверточных помехоустойчивых кодов на основе матриц перехода. // Межвузовский сборник научных трудов. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. РГРТУ. Рязань. - С.139–144.

16 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А. Алгоритм оценки типа и параметров помехоустойчивых кодов на основе схемы декодер-кодер // Вестник РГРТУ - 2013.- №1 (Выпуск 43). - С. 3-6.

17 Кириллов С.Н., Косткин И.В., Покровский П.С., Слесарев А.С., Бердников В.М., Ревуцкий В.А., Семин Д.С. Формирователь радиосигналов унифицированных средств контроля радиотехнических изделий. // 15-я МНТК. Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA. Москва 2013. – С. 248-251.

18 Кириллов С.Н., Ревуцкий В.А. Алгоритм оценки параметров сверточных помехоустойчивых кодов.// Вестник РГРТУ - 2013. - №3 (выпуск 45). – С. 45-46.

Соискатель

/В.А. Ревуцкий/

Ревуцкий Вадим Андреевич

Устойчивые к мешающим факторам алгоритмы распознавания вида  
помехоустойчивых кодов в радиотехнических системах

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 05.11.2013  
Формат бумаги 60x84 1/16.  
Тираж 100 экз. Заказ № 292.  
Отпечатано в ООО «Полиграф»  
390025, г. Рязань, ул. Нахимова, д.13