

На правах рукописи



**Кониченко Александр Александрович**

Модель, алгоритм и специализированное устройство для классификации  
цифровых сигналов

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Курск - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Титов Виталий Семенович

Официальные оппоненты: Дегтярев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, декан факультета информатики и вычислительной техники

Егошина Ирина Лазаревна, кандидат технических наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем

Ведущая организация: Рязанский государственный радиотехнический университет

Защита состоится 21 сентября 2012г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.02 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета

Автореферат разослан 20 августа 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.105.02



Титенко Евгений Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время актуальным научным и практическим направлением развития средств вычислительной техники и систем управления является разработка высокоскоростных алгоритмов и специализированных устройств для аппаратно-программных систем классификации цифровых сигналов. Традиционный путь классификации сигналов в условиях неопределенности их структуры основан на обработке распределений сигналов и выявлении информативно-значимых признаков, что связано с существенной временной сложностью известных алгоритмов в динамично меняющихся условиях поступления данных. Сложность решения задачи классификации сигналов определяется существенным увеличением количества и размеров полей данных, использованием связанных между собой и динамически изменяемых таблиц декодирования формата сигнала для современных потоковых алгоритмов распознавания.

Задача поиска информативных признаков сигнала при значительном многообразии типов сигналов и вариантов выделения полей в них рассматривается как задача структурно-параметрического синтеза, что определяет создание специализированных вычислительных устройств и аппаратно-ориентированных алгоритмов для них. Как правило, признаки для классификации цифровых сигналов формируют специалисты предметной области, отыскивая формализуемые закономерности, характеризующие объекты разных классов. В связи с этим процесс поиска информативных признаков часто оказывается весьма трудоемким по времени, что ограничивает область эффективного применения аппаратно-программных систем классификации потоковых данных, структура которых сама динамично изменяется в процессе эксплуатации систем. Сложность решения задачи обработки и классификации цифровых сигналов в устройствах вычислительной техники определяется большим разбросом скоростей поступления данных (от 1,5 Мбит/с до 40 Гбит/с), сложным и неопределенной форматом данных и наличием динамически изменяющихся параметров. Кроме того, классификация сигналов в реальном масштабе времени определяет обработку поступающих данных по ограниченному количеству отсчетов, что приводит к необходимости анализа выборочных распределений.

Анализ существующих устройств вычислительной техники для обработки и классификации цифровых сигналов показал, что большинство из них ориентированы на обработку ограниченных групп цифровых сигналов без возможности предварительного анализа и адаптивной перестройки. Это обстоятельство не позволяет использовать такие устройства для обработки постоянно расширяющегося класса потоков цифровых сигналов. Указанные ограничения определили основное противоречие между объективной необходимостью обработки в одном устройстве представительного многообразия структур цифровых сигналов в реальном масштабе времени и недостаточной разработанностью методов и технических средств адаптивной обработки этих сигналов.

Таким образом, актуальной является **научно-техническая задача** разработки методов, моделей и устройств вычислительной техники для классификации цифровых сигналов на основе анализа их выборочных распределений, позволяющих повысить вероятность правильной классификации цифровых данных при одновременном снижении вычислительной сложности алгоритма и аппаратной сложности устройства.

Диссертационная работа выполнялась в рамках в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по государственному контракту от «30» октября 2011 г. № 07.514.11.4115 по теме: «Разработка теоретических основ построения распределенных информационно-аналитических систем, функционирующих на базе единого информационного пространства», № госрегистрации 01201177135, а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», госконтракт № 02.740.11.0692.

**Целью диссертационной работы** является повышение вероятности правильного распознавания в аппаратно-программных системах классификации цифровых сигналов, а также уменьшение аппаратной сложности таких систем.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются **следующие задачи**:

1. Анализ существующих методов и алгоритмов классификации цифровых сигналов в устройствах вычислительной техники и системах управления.
2. Разработка математической модели процесса классификации цифровых сигналов.
3. Разработка алгоритмов классификации цифровых сигналов.
4. Разработка структурно-функциональной организации специализированного устройства для классификации цифровых сигналов и экспериментальная проверка работоспособности устройства.

**Объект исследования** – процессы и устройства обработки и классификации цифровых сигналов.

**Предмет исследования** – методы, алгоритмы и специализированные устройства для классификации цифровых сигналов.

**Методы исследования.** В работе использованы модели и методы теории распознавания образов, математической статистики, цифровой обработки сигналов и численной оптимизации, проектирования ЭВМ.

**Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:**

1. Математическая модель процесса классификации цифровых сигналов, особенностью которой является преобразование цифровой последовательности к виду кодированного представления статистик мер рассогласования плотностей распределений числовых последовательностей и уточнение эталона, позволяющая повысить вероятность правильной классификации последующего сигнала на основе уточненного текущего эталона.
2. Аппаратно-ориентированный алгоритм классификации цифровых сигналов, основанный на формировании из входной и эталонной

последовательностей кодового представления, позволяющий исключить операции умножения, деления и снизить тем самым аппаратную сложность операционной части устройств для классификации цифровых сигналов.

3. Структурно-функциональная организация устройства для классификации последовательности цифровых сигналов, отличающаяся введением блока преобразования кодовой последовательности и блока адаптации, позволяющая классифицировать цифровые сигналы по нескольким заданным эталонным законам распределения и обеспечивающая динамическое уточнение заданных эталонов в процессе работы.

**Практическая значимость.** Полученные модель и алгоритм составляют алгоритмическую и реализационную основу для решения задач по разработке быстродействующих устройств для классификации последовательности цифровых сигналов. Результаты исследования могут быть использованы в специализированных аппаратных средствах для систем мониторинга, анализа, контроля и диагностики сложных технических объектов и человекомашинных систем (медицинская диагностика, системы дистанционного мониторинга, интеллектуальные системы видеонаблюдения и робототехники, устройства анализа сетевого трафика в распределенных системах и др.).

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ЗАО «Курсктелеком», в НИЦ (г. Курск) ФГУП 18-й ЦНИИ МО РФ, в в/ч 20728, а также используются в учебном процессе кафедры вычислительной техники Юго-Западного государственного университета при проведении занятий по дисциплинам «Основы теории цепей и сигналов», «Микропроцессорные системы в системах передачи и обработки сигналов».

**Соответствие паспорту специальности.** Согласно паспорту специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности (1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления. 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Проблемы создания и развития информационно-телекоммуникационных систем специального назначения», г. Орел, 2003 г.; конференции Института криптографии, связи и информатики (ИКСИ), г. Москва, 2005 г.; военно-научных конференциях в/ч 25714 (Курск), 2003 г., 2004 г., научных конференциях ФГУП «Курский НИИ» МО РФ, 2006 г., 2008 г., 2009 г., на научно-технических семинарах кафедры ВТ ЮЗГУ в течение 2007-2012 гг.

**Публикации.** Результаты проведенных исследований и разработок опубликованы в 15 научных трудах, в том числе в 4 статьях (в центральных

рецензируемых научных журналах и изданиях). Получено 2 патента РФ на изобретение.

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем предложены: в [1, 11] – алгоритм классификации последовательностей цифровых сигналов и способ разработки устройства классификации последовательностей цифровых сигналов, в [2, 4] – алгоритм и устройство устранения неопределенности в данных мониторинга, формируемых подразделениями МЧС, в [5-8] – модель процесса классификации и структурно-функциональная организация устройств для классификации последовательности цифровых сигналов, в [10, 13, 15] – алгоритмы работы и реализация устройств для классификации последовательности цифровых сигналов в устройствах анализа сетевого трафика.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 85 наименований, приложений. Основная часть диссертации изложена на 102 страницах машинописного текста и содержит 28 рисунков и 10 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и обоснованы основные задачи исследований, выносимые на защиту положения, отмечена научная новизна и практическая ценность работы.

**В первом разделе** проведен анализ существующих методов, алгоритмов и устройств для классификации цифровых сигналов.

Известно, что ряд практических задач распознавания и классификации в системах управления, вычислительной технике, телекоммуникации, телеметрии и распределенной обработки информации сводятся к статистической проверке гипотез. При этом часто используются меры рассогласования плотностей распределений, определяемых как функции от отношений правдоподобий Кульбака,  $\chi$ -квадрат, Питмена и др. Однако практическое применение этих статистик связано со следующими трудностями: отсутствие аналитических моделей для распределений статистик при малых выборках; высокие вычислительные затраты, необходимые для формирования статистик; необходимость удовлетворения требованиям разбиения вариационного ряда на число интервалов (не менее 8-10) и количество элементов в интервалах (не менее 50-60), что не всегда возможно при малых объемах выборки.

Высокая техническая сложность существующих решений с использованием традиционных вычислителей не позволяет решать задачи классификации сигналов в условиях малых выборок с достаточным быстродействием. Показано, что для создания быстродействующих специализированных устройств автоматизации поиска признаков пространств и классификации цифровых сигналов, процедуру анализа и распознавания сигнала предпочтительнее выполнять путем последовательного сравнения входных значений и эталонных значений, соответствующих известному закону распределения и хранящихся в памяти устройства.

**Во втором разделе** разработана математическая модель процесса классификации цифровых сигналов.

Составляющими математической модели являются аналого-цифровое преобразование сигнала  $F_{adc}$ , обработка сигнала  $F_o$  и коррекция эталона  $F_k$ :

$$F_{dig\_cl} = \{F_{adc}, F_o, F_k(\mu, k, X_k, W_k, d_k, y_k)\},$$

модель аналого-цифрового преобразования элемента

$$F_{adc} = X(i) = [k_{adc} u_{(i)\Delta t} + \Delta_{ia}]$$

где  $[]$  – операция определения наибольшего целого числа;  $u_{(i)\Delta t}$  – входной аналоговый сигнал;  $\Delta t$  – шаг квантования;  $k_{adc}$  – коэффициент передачи АЦП;  $\Delta_{ia}$  – погрешность преобразования АЦП, представляющая смещение характеристики преобразования по  $i$ -му сигналу.

Обработка сигнала заключается в сортировке, построении кодовой последовательности и определении вероятности отнесения к эталонному распределению на основе модели представления пар распределений  $F_{f2 \rightarrow f1}$ , рассмотренной в известных работах:

$$F_o = \{F_{sort}, F_{f2 \rightarrow f1}\},$$

$$F_{f2 \rightarrow f1}, F_{x_2}(x) = F_{x_2}(F_{x_1}^{-1}(r_x)) = F_{r_2}(r_x) \quad F_{x_2}(x) = r_x = F_{r_1}(r_x), \quad x \in [x^-, x^+] \quad r_x \in [0, 1].$$

Модель представления пар распределений и статистики мер рассогласования плотностей распределений с использованием данной модели позволяет найти соотношение между двумя законами распределения: законом распределения  $F_{x_2}(x)$  и законом распределения  $F_{x_1}(x)$ .

Графическое изображение построения кодовой последовательности и способ формирования кода по отсчетам сигнала приведены на рис. 1.

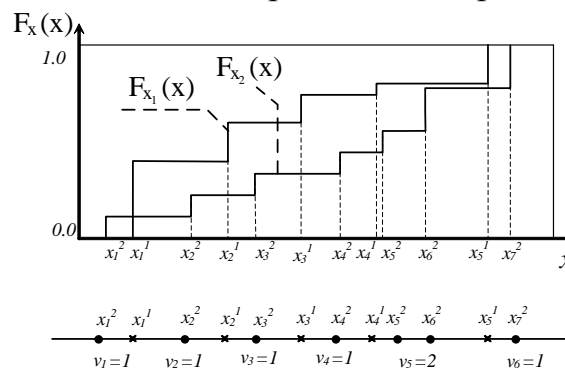


Рис. 1. Построение кодовой последовательности по отсчетам сигналов

На оси  $X$  символом "x" обозначены значения элементов первой последовательности сигналов и символом "•" – значения второй последовательности. Формирование кодовой последовательности заключается в следующем. Пусть  $v_i$  – число элементов второй последовательности, находящихся между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отсчетами вариационного ряда первой последовательности цифровых сигналов;  $n_1$  и  $n_2$  – количество элементов первой и второй последовательностей сигнала. Тогда код определяется как последовательность значений  $v_1, v_2, \dots, v_6$ , и для примера на рис. 1 получим код в виде 111121.

В работах проф. И.Г. Уразбахтина показано существование связи между значениями упорядоченного кода и статистик, вычисленных для кодовой модели. При этом моделям с большим числовым значением кодов соответствуют большие значения статистик.

Учитывая, что значения функций статистик будут одинаковыми для всевозможных перестановок (например, модели с кодами 111121, 211111 и т. д. будут иметь одинаковые значения статистик), определим числовое значение кода как число с  $(n_1+1)$  разрядом и основанием позиций  $n_2$ , т.е. как код, упорядоченный по убыванию значащих разрядов, начиная со старшего разряда, что позволяет для классификации цифровых сигналов использовать значения упорядоченного кода, построенные на основе значений отсчетов сигнала, обеспечивая тем самым отказ от расчетов по классическим формулам.

Коррекция  $F_k(\mu, k, X_k, W_k, d_k, y_k)$  заключается в уточнении эталона. При расчете на  $k$ -ом шаге работы алгоритма коррекции используются следующие исходные данные:  $X_k$  – вектор отсчетов входного сигнала (входная классифицируемая последовательность);  $W_k$  – вектор весовых коэффициентов (эталонная последовательность);  $y_k = P_{расч}$  – выходной сигнал (значение вероятности, рассчитанное по корректируемому эталону);  $d_k=1$  – образцовый сигнал.

Сигнал ошибки с временным индексом  $k$  вычисляется следующим образом:

$$\varepsilon_k = d_k - X_k^T \cdot W_k.$$

Формула, которая используется для рекурсивного обновления эталонов, имеет вид:

$$W_{k+1} = W_k + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_k \cdot X_k,$$

где  $\mu$  – параметр сходимости алгоритма, который определяет скорость и устойчивость процесса адаптации.

Алгоритм коррекции не требует операций возведения в квадрат, усреднения и вычисления производных, что обеспечивает простоту его аппаратной реализации в устройстве.

Таким образом, математическая модель процесса классификации цифровых сигналов заключается в аналого-цифровом преобразовании сигнала, обработке сигнала, включающей определение его закона распределения на основе кодовой последовательности, и коррекции эталона. Определение закона распределения сигнала выполняется на основе формирования кодовой последовательности путем упорядочивания отсчетов сигнала и соотнесения их в интервалы эталонных выборок, что исключает операции умножения, деления и т.п., и позволяет выполнить разработку операционной части специализированных устройств классификации, имеющих уменьшенную аппаратную сложность.

На основе предложенной модели процесс проектирования устройства классификации заключается в выборе устройства хранения эталонных значений величин, относящихся к закону распределения, соответствие которому определяется, разработке блока расчета для определения количества отличий цифрового сигнала от эталонного, разработке блок преобразования, позволяющий выполнить отнесение цифрового сигнала к известному классу. В качестве входов



блока преобразования выступает битовая последовательность, а в качестве выходов – вероятность отнесения к эталонному закону распределения.

Показано, что задача разработки специализированного устройства для классификации последовательностей цифровых сигналов является структурно-параметрической, так как, с одной стороны последовательность действий для классификации определяет структуру устройства, а действия по программированию отдельных блоков выполняются на основе расчетов с использованием разработанной модели, что предполагает расчет параметров устройства, включающий программирование его отдельных блоков.

**В третьем разделе** на основании предложенной модели процесса классификации последовательностей цифровых сигналов разработаны алгоритмы классификации последовательностей цифровых сигналов по имеющейся эталонной последовательности и по нескольким заданным эталонным законам распределения.

Обобщенный алгоритм классификации последовательности цифровых данных по имеющейся эталонной последовательности, основанный на использовании разработанной модели состоит из следующих шагов.

1. Записать в первое устройство хранения эталонную последовательность.
2. Записать во второе устройство хранения упорядоченные по убыванию кодовые последовательности и соответствующие им вероятности совпадения законов распределения.
3. Выполнить оцифровку входной последовательности (при необходимости) и записать во входные регистры устройства классификации.
4. Выполнить побитовое сравнение входной последовательности с эталонной и записать результат сравнения.
5. Преобразовать результат сравнения последовательности с эталонной, выделив первый бит превышения входного значения над эталонным.
6. Выполнить поразрядный подсчет результатов преобразования последовательности.
7. Сопоставить результат преобразования последовательности с вероятностью отнесения к заданному закону распределения.

Аппаратно-ориентированный алгоритм классификации последовательности цифровых данных по нескольким заданным эталонным законам распределения состоит из следующих шагов:

1. Записать в устройство хранения эталонные значения величин, относящихся к законам распределения, соответствие с которыми определяется ( $m$  эталонов).
2. Выполнить оцифровку входной последовательности (при необходимости) и записать во входной регистр устройства классификации.
3. Последовательно сравнить значения входной последовательности с каждым значением эталонной и записать результат сравнения. Если входное значение больше эталонного, записать 1, иначе – 0. Преобразовать результат

каждого сравнения, выделив первый бит превышения входного значения над эталонным.

4. Выполнить поразрядный подсчет результатов преобразования последовательности и записать в блок хранения вероятностей.

5. Сопоставить результат преобразования последовательности с вероятностью отнесения к заданному закону распределения (на основе подсчета количества отличий определить вероятность совпадения с эталоном, сохранить максимальную вероятность совпадения и номер соответствующего эталона).

6. Полученное значение вероятности больше значения на предыдущем шаге? Если нет, то перейти к шагу 11, иначе к шагу 8.

7. Сохранить новое значение вероятности и соответствующий номер эталона.

8. Есть ли необходимость уточнить эталон? Если нет, то перейти к шагу 10, иначе к шагу 9.

9. Записать новое значение вероятности и номер эталона в блок хранения эталонов.

10. Конец.

**В четвертом разделе** разрабатывается структурно-функциональная организация устройств классификации последовательностей цифровых сигналов.

В течение более 10 лет исследовались вопросы обоснованности защищаемой модели и алгоритмов классификации, его практической реализуемости и эффективности (в смысле быстродействия и достоверности обнаружения). Осуществлена программная проверка работоспособности алгоритмов классификации, а затем реализация устройства на ПЛИС Xilinx Virtex и Spartan и в настоящее время и на ПЛИС Altera Stratix. Разработанные устройства пригодны для анализа сигналов различных типов.

Разработаны схемы устройств цифровой обработки сигналов для классификации цифровых данных по имеющейся эталонной последовательности и для классификации цифровых сигналов по нескольким заданным эталонным законам распределения без перенастройки. Выполнен анализ быстродействия и эффективности устройств классификации.

Устройство для классификации последовательности цифровых сигналов по нескольким заданным эталонным законам распределения (рис. 2, рис. 3) работает следующим образом. До поступления на вход устройства классифицируемой последовательности в блок хранения эталонов (БХЭ) вводятся эталонные значения величин, относящихся к законам распределения, соответствие с которыми определяется ( $m$  эталонов). Аналоговая последовательность, после оцифровки в АЦП, записывается в регистре  $R_g$ . Регистр  $R_g$  обеспечивает сохранение последовательности и выдачу ее элементов на первые входы компараторов в соответствии с сигналами генератора тактовых импульсов. Объем регистра определяется длиной исследуемой последовательности. Исследуемые величины последовательно поступают на вход блока адаптации БА и на первые входы

компараторов, на вторые входы которых последовательно поступают эталонные значения величин из БХЭ, относящихся к закону распределения (эталону), соответствие с которым определяется. При превышении исследуемого значения над эталонным компаратор вырабатывает 1, в противном случае – 0. Количество компараторов определяется длиной исследуемой последовательности. Выходы компараторов соединены со входами блока преобразования кодовой последовательности (БПКП), логика работы которого представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Логика работы блока преобразования кодовой последовательности (БПКП)

Входные последовательности	Выходные последовательности
011111	100000
001111	010000
000111	001000
000011	000100
000001	000010
000000	000001

Генератор тактовых импульсов ГТИ обеспечивает функционирование счетчиков в процессе поразрядного подсчета, а также их приведение в исходное состояние для обработки следующего эталона.

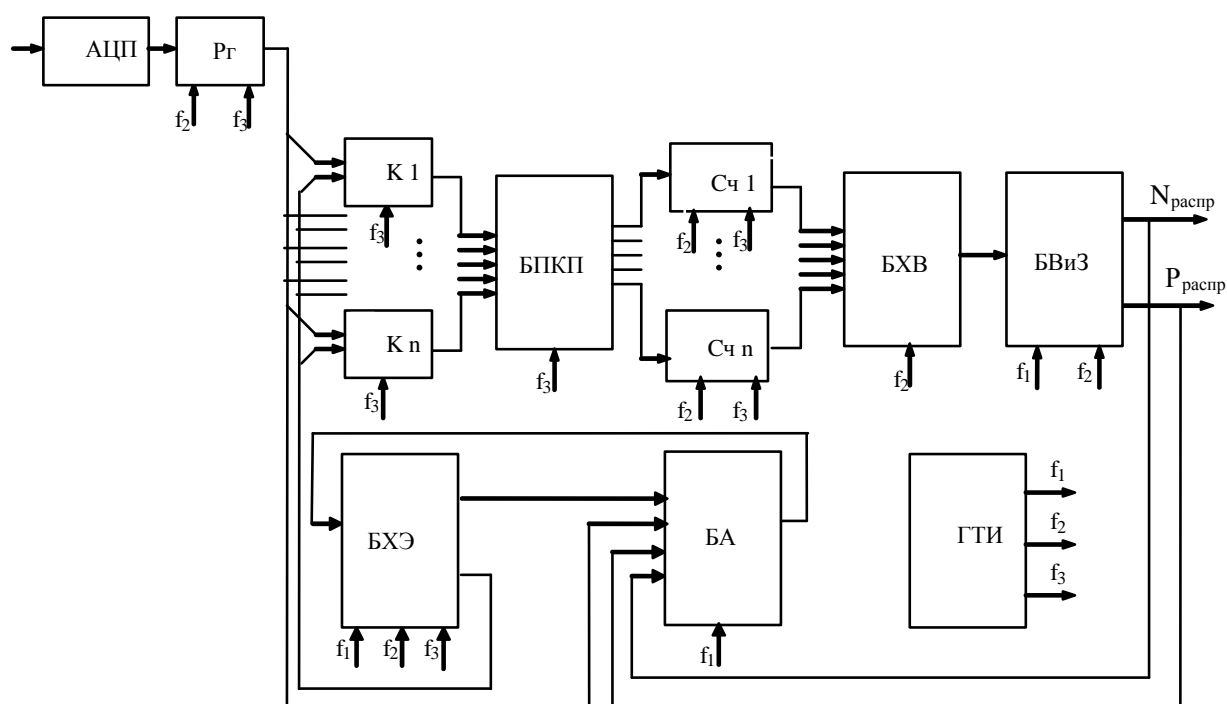


Рис. 2. Структурно-функциональная организация устройства классификации последовательности цифровых сигналов по заданным эталонным законам распределения



Рис. 3. Внешний вид модуля на базе устройства для классификации последовательности цифровых сигналов по заданным эталонным законам распределения

БХЭ обеспечивает хранение эталонных значений величин по нескольким эталонам, соответствующих исследуемым законам распределения, и их последовательную выдачу в соответствии с сигналами ГТИ, корректировка заданных эталонов производится по завершении полного цикла работы устройства на основании выходных данных блока адаптации и сигналов ГТИ.

Блок выбора и записи БВиЗ обеспечивает выбор максимального значения из рассчитанных вероятностей и обладает встроенной памятью, в которой сохраняются максимальное из рассчитанных значений вероятности и номер соответствующего ей эталона.

Выход БВиЗ является выходом устройства и обеспечивает по сигналу ГТИ выдачу значения вероятности и номера соответствующего ей эталона.

Вероятность, полученная по таблице преобразования БВиЗ для первого эталона, сохраняется в памяти, также в памяти сохраняется номер эталона. Каждое последующее значение вероятности, полученное из блока хранения вероятностей БХВ, сравнивается со значением, сохраненным в памяти БВиЗ. Если рассчитанное значение больше, то осуществляется перезапись значения вероятности и номера соответствующего ей эталона в БВиЗ.

Таблица преобразования БХВ приведена в табл. 2 (на примере 6-ти входных значений в последовательности).

Таблица 2.

Преобразование в БХВ (на примере 6 входных значений)

Входная последовательность	Вероятность отнесения к эталонному закону распределения
6000000	0.018

5100000	0.073
4200000	0.118
4110000	0.251
3300000	0.263
3111000	0.591
2211000	0.888
2111100	0.991
1111110	0.999

БА обеспечивает уточнение эталонов в БХЭ, обладает встроенной памятью. Во встроенной памяти БА сохраняется входная последовательность, поступающая на вход из Рг, а также данные, необходимые для рекурсивного уточнения эталонов. По сигналу ГТИ на вход из БВиЗ поступает номер эталона, соответствующего классифицируемой последовательности, а также значение вероятности и обеспечивается считывание данного эталона из БХЭ. При реализации операции уточнения эталона устройство работает как адаптивный линейный сумматор. БХЭ с заданным эталоном в таком случае является адаптивным фильтром размерности  $n$  (определяемой количеством элементов в эталоне). Уточнение эталона производится с использованием метода наименьших квадратов. В зависимости от характера классифицируемых последовательностей БА может быть настроен на использование модификаций метода наименьших квадратов, направленных на ускорение сходимости или на уменьшение числа арифметических операций.

ГТИ обеспечивает синхронизацию элементов устройства на трех частотах:  $f_1$  – частота, соответствующая одному полному циклу работы устройства (сравнение входной последовательности из  $n$  элементов по  $m$  эталонам);  $f_2$  – частота, обеспечивающая цикл сравнения входной последовательности по  $m$ -ому эталону ( $f_1 = f_2/m$ );  $f_3$  – частота, обеспечивающая обработку каждого  $n$ -ого элемента входной последовательности ( $f_1 = f_3/(m \cdot n)$ ). Импульс  $f_1$  обеспечивает выдачу БВиЗ рассчитанного значения вероятности, номера соответствующего ей эталона, уточнение данного эталона блоком адаптации, запись уточненного эталона в БХЭ. Импульс  $f_2$  обеспечивает подключение записанной в памяти регистра Рг входной последовательности для сравнения с новым эталоном; подключение следующего эталона для сравнения в БХЭ; приведение счетчиков в исходное состояние для обеспечения сравнения с новым эталоном. Импульс  $f_3$  обеспечивает проведение последовательных операций для каждого элемента входной последовательности, поступающей из регистра.

Таким образом, отнесение последовательности к известному классу осуществляется путем последовательного сравнения входных значений и значений, соответствующих известному закону распределения и хранящихся в БХЭ.

Для технической реализации устройства классификации последовательности цифровых сигналов использован аналогово-цифровой преобразователь типа AD9054ABST-200, регистр, блок адаптации, компараторы, счетчики, блок выбора и записи, блок преобразования кодовой последовательности и генератор тактовых

импульсов реализованы на перепрограммируемых логических интегральных схемах XC2S200E с памятью хранения структуры схемы XCF02S – фирмы XILINX, блок хранения эталонов реализован на постоянном запоминающем устройстве T27C1024.

Аппаратная сложность устройства зависит от количества отсчетов в классифицируемом сигнале. Для обработки 8 отсчетов сложность устройства порядка 3000 эквивалентных вентилях, для 50 отсчетов – порядка 15000 эквивалентных вентилях, что примерно в 1,5 раза меньше, чем у аналога.

Сравнительный анализ полученных в ходе моделирования параметров разработанного устройства представлен в табл. 3, табл. 4 и на рис. 4, где также обозначены границы области эффективного (в смысле быстродействия и достоверности классификации) применения устройства. В качестве показателей эффективности выбраны:

1) вероятность отнесения анализируемой последовательности к классу, которому она действительно принадлежит P1;

2) вероятность ложного отнесения анализируемой последовательности к классу, если она ему не принадлежит P2;

3) вычислительная сложность алгоритма или аппаратная сложность устройства для его реализации C (T);

Таблица 3.

Параметры классификации разработанного устройства

Количество отсчетов	6	8	10	50	100
P1 по Кульбаку или хи-квадрат	0,50	0,50	0,50	0,90	0,95
P1(разр. устр-во)	0,67	0,73	0,81	0,88	0,90
P2 по Кульбаку или хи-квадрат	0,50	0,50	0,50	0,10	0,05
P2(разр. устр-во)	0,33	0,27	0,19	0,12	0,10
C (T) по Кульбаку или хи-квадрат	10000			100000	
C (T) (разр. устр-во)	1000	1500	2000	5000	

Таблица 4.

Параметры разработанного устройства

	Быстродействие (усл. ед.) (20 отсчетов)	Возможность уточнения эталонов (Есть/нет)
Программная реализация (классификация по хи- квадрат)	1	есть
Статистический анализатор	0,5	нет
Разработанное устройство	0,1	есть

Устройство для классификации последовательности цифровых сигналов по сравнению с прототипом обладает более высоким быстродействием, обеспечивает

классификацию входной последовательности по нескольким заданным эталонным законам распределения без его перенастройки и обеспечивает уточнение заданных эталонных законов.

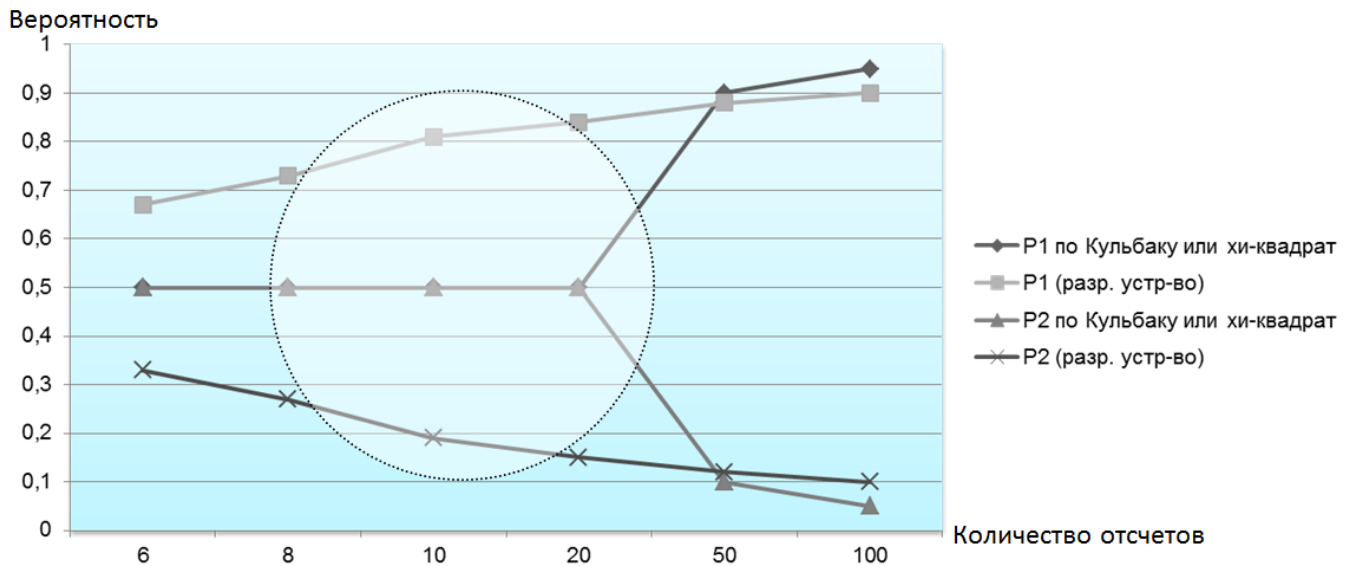


Рис. 4. Сравнительный анализ полученных в ходе моделирования параметров разработанного устройства и границы области эффективного применения устройства

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

**В приложениях** приведены, акты о внедрении, схемы отдельных блоков устройства, созданные в специализированной среде разработки ПЛИС, листинги программ, реализующих разработанные алгоритмы.

### Основные результаты работы

При решении поставленной в диссертационной работе задачи были получены следующие результаты.

1. По результатам анализа существующих методов, алгоритмов и устройств классификации последовательностей цифровых сигналов разработана математическая модель процесса классификации цифровых сигналов, особенностью которой является преобразование цифровой последовательности к виду его упорядоченного кодированного представления и уточнение эталона, позволяющая повысить вероятность правильной классификации последующего сигнала на основе уточненного текущего эталона.

2. Разработан аппаратно-ориентированный алгоритм классификации цифровых сигналов, основанный на формировании из входной и эталонной последовательностей кодового представления, позволяющий снизить вычислительные затраты устройств для классификации последовательностей цифровых сигналов, за счет использования операции сравнения и типовых арифметических операций.

3. На основе разработанной модели классификации цифровых сигналов создана структурно-функциональная организация специализированных устройств для классификации цифровых сигналов, по нескольким заданным эталонным законам распределения, отличающаяся введением дополнительных блоков для

реализации алгоритма классификации на основе кодовых схем представления сигнала, позволяющая выполнять разработку устройств для классификации цифровых сигналов на перспективной элементной базе ПЛИС. Введение блока преобразования кодовой последовательности и блока адаптации позволило вести классификацию последовательности цифровых сигналов по нескольким заданным эталонным законам распределения и осуществлять динамическое уточнение заданных эталонов в процессе работы устройства.

4. Сравнительный анализ характеристик разработанного устройства показал, что устройство для классификации цифровых сигналов по сравнению с прототипом, имеет большее быстродействие меньшую аппаратную сложность (в 1,5-5 раз в зависимости от количества отсчетов), позволяет повысить вероятность отнесения анализируемой последовательности к классу, которому она принадлежит в 1,3-1,4 раза, снизить вероятность ложного отнесения в 1,5-2 раза для малых объемов выборки.

### **Список публикаций по теме диссертации**

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Кониченко, А.А. Классификация последовательностей сигналов, основанная на кодах / А.А. Кониченко, А.В. Соколов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т.10. № 2. С.33-35.

2. Кониченко, А.А. Автоматизация устранения неопределенности в информационно-аналитических системах МЧС / А.Л. Бутов, А.Т. Миргалеев, А.С. Сизов, А.А. Кониченко, С.Ю. Сазонов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т.10. № 2. С.18-26.

3. Кониченко, А.А. Устройство классификации последовательностей сигналов // Датчики и системы. 2012. №4. С. 46-48.

4. Кониченко, А.А. Алгоритм и устройство устранения неопределенности в информационно-аналитических системах МЧС / А.А. Кониченко, А.Т. Миргалеев // Известия Юго-западного государственного университета. 2012. № 1 (40). Ч.1. С.93-98.

### **Патенты**

5. Патент 2268485 Российская Федерация, МПК G06F17/18. Устройство для классификации последовательности цифровых сигналов / Кониченко А.А., Уразбахтин И.Г., Борисоглебская Л.Н., заявл. 20.05.2003, опубл. 20.01.2006, бюл. №2.

6. Патент 2453915 Российская Федерация, МПК G06F17/18. Устройство для классификации последовательности цифровых сигналов / Островский Е.О., Кониченко А.А., заявл. 15.12.2010, опубл. 20.06.2012.

### **Статьи и материалы конференций**

7. Кониченко, А.А. Подход к распознаванию закона распределения цифровых последовательностей / А.А. Кониченко, И.Г. Уразбахтин, Л.Н. Борисоглебская // Проблемы создания и развития информационно-телекоммуникационных систем специального назначения: материалы 3-й Всероссийской научной конференции. г. Орел: Академия ФАПСи, 2003. С.32-36.



8. Кони́ченко, А.А. Повышение оперативности в решении задач классификации последовательности цифровых сигналов на основе моделей канонического представления / А.А. Кони́ченко, Э.И. Уразбахтин // Материалы конференции. г. Москва: ИКСИ, 2005. С.41-43.

9. Кони́ченко, А.А. Возможные пути обеспечения бескомпроматного доступа к ресурсам глобальной вычислительной сети/ А.А. Кони́ченко// Материалы XXIV военно-научной конференции войсковой части 25714. Курск, 2003. С.21-24.

10. Кони́ченко, А.А. Обзор существующих средств анализа защищенности вычислительных систем / А.А. Кони́ченко, Д.В. Лапин // Материалы XXV военно-научной конференции войсковой части 25714. Курск, 2004. С.36-39.

11. Кони́ченко, А.А. Классификация цифровых сигналов на основе моделей канонического представления / А.А. Кони́ченко, Э.И. Уразбахтин // Системы и методы обработки и анализа информации: Сборник научных статей. М: Горячая Линия-Телеком, 2005. С.133-138.

12. Кони́ченко, А.А. Способ распознавания сложноструктурированной информации/ А.А. Кони́ченко, Д.В. Лапин, Е.А. Петрик// Материалы XXVI научной конференции ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. Курск, 2006. С.4-7.

13. Кони́ченко, А.А. Способ создания комплекса моделирования доступа к каналам двусторонней спутниковой связи Diresway / А.А. Кони́ченко, Д.В. Лапин // Материалы XXVI научной конференции ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. Курск, 2006. С.17-19.

14. Кони́ченко, А.А. Анализ взаимодействия абонентов компьютерной сети на основе выделения адресной и служебной информации из сетевого трафика / А.А. Кони́ченко// Материалы XXVIII научной конференции ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. Курск, 2008. С.49-51.

15. Кони́ченко, А.А. Особенности реализации специальных вычислителей на базе графических процессоров / А.А. Кони́ченко, К.Ю. Вохмянин// Материалы XXIX научной конференции ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. Курск, 2009. С.35-37.

Подписано в печать 17.08.12. Формат 60×84 1/16 .

Печатных листов 1,0. Тираж 120 экз. Заказ \_\_\_\_.

Юго-Западный государственный университет,  
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.