

На правах рукописи

**Койгеров Алексей Сергеевич**

**АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КОДОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ  
В СИСТЕМЕ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ,  
РЕАЛИЗУЕМОЙ НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ  
НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в технике и технологиях)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2011

Работа выполнена на кафедре «Электроника и оптическая связь» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП).

- Научный руководитель:** доктор технических наук  
**Дмитриев Валерий Федорович**
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Богословский Сергей Владимирович**
- кандидат технических наук  
**Гильмутдинов Марат Равилевич**
- Ведущая организация:** ФГУП «НИИ «Вектор»,  
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «17» мая 2011 г. в 16 часов в ауд. 53-01 на заседании диссертационного совета Д 212.233.02 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «9» апреля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Л.А. Осипов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние годы одним из перспективных и бурно развивающихся направлений радиоэлектроники стала радиочастотная идентификация. Области её применения являются маркировка багажа, прослеживание маршрутов разных грузов и объектов, скрытая маркировка контейнеров и автомобилей, инвентаризация товаров на складах и т.д.

В системах радиочастотной идентификации используются радиомаркеры с различными принципами действия: электронные носители данных, основанные на интегральных схемах; носители, использующие для хранения данных физические явления и принципы. Динамика развития систем радиочастотной идентификации показывает, что возрастает потребность в использовании радиомаркеров на основе поверхностных акустических волн. Рост интереса к системам радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах обуславливается, с одной стороны, успехами в области технологии и конструирования акустоэлектронных устройств, с другой – прогрессом в области проектирования систем идентификации, диктующим новые, более жесткие, требования к радиомаркерам. Радиомаркеры на поверхностных акустических волнах обладают рядом преимуществ перед другими технологиями бесконтактной идентификации, такими как работа по радиоканалу при отсутствии встроенных источников питания, большая дальность действия, высокое быстродействие, малые масса и габариты, высокая радиационная стойкость, широкий диапазон рабочих температур, практически неограниченный срок службы радиомаркеров.

Система радиочастотной идентификации состоит из считывающего устройства с антенной и некоторого числа радиомаркеров, каждый из которых имеет антенну. В случае если в зоне действия считывателя находится несколько объектов с радиомаркерами, то их ответные сигналы могут перекрываться, что вызывает проблему “коллизии” и затрудняет распознавание объектов. Для решения данной проблемы используют различные механизмы “антиколлизии”, позволяющие одновременно распознавать несколько различных объектов, находящихся в зоне действия считывателя. Наиболее общими классификационными признаками для антиколлизии являются пространство, частота, время, кодовая структура.

Подобная задача имеет место в многоадресных системах передачи информации, где для ее решения применяются шумоподобные сигналы с различными типами модуляции. В таких системах принципы кодового разделения сигналов и согласованной фильтрации используются для разделения информации, предназначенной различным абонентам. Благодаря возможности сжатия во времени сложных сигналов, они широко применяются в радиолокационных и навигационных измерениях, а также в различных системах передачи информации. Сегодня технология шумоподобных сигналов нашла применение в сотовой связи (*CDMA, Code*

*Division Multiply Access*). Примерами таких телекоммуникационных систем являются системы *cdmaOne*, *WCDMA* и *cdma2000*. Кодовое разделение сигналов также используется и в системах *GPS (Global Positioning System)* и ГЛОНАСС для разделения сигналов навигационных спутников.

Для реализации антиколлизийного механизма в системах радиочастотной идентификации могут быть использованы как метод согласованной фильтрации, так и метод корреляционной обработки сигналов.

**Актуальность поставленной проблемы определяют следующие аспекты:**

- необходимость исследования применимости существующих кодовых последовательностей к сигналам, которые будут формироваться радиомаркерами на поверхностных акустических волнах, и поиска на множестве известных кодовых последовательностей ансамблей с требуемыми в системах радиочастотной идентификации корреляционными свойствами;

- применение сложных сигналов позволяет значительно улучшить помехоустойчивость обнаружения объектов и увеличить дальность действия системы за счет увеличения отношения сигнал-шум после корреляционной обработки сигнала, принятого от радиомаркера;

- корреляционная обработка в системах радиочастотной идентификации позволяет решить проблему коллизии при распознавании нескольких радиомаркеров, одновременно попавших в зону опроса;

- ряд вопросов, связанных с разработкой систем радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах и решающих проблему коллизии при помощи кодового разделения сигналов, недостаточно изучен, в том числе: алгоритмы выбора фазоманипулированных кодовых последовательностей с требуемыми аperiodическими корреляционными свойствами, анализ временно-позиционных кодов с заданными корреляционными свойствами, особенности функционирования системы на поверхностных акустических волнах с использованием радиомаркера как согласованного фильтра;

- потребность в алгоритме расчета радиомаркеров на поверхностных акустических волнах с заданными характеристиками, такими как неравномерность амплитуды импульсного отклика и уровень ложных сигналов в результате переотражений поверхностных акустических волн внутри как преобразователя, так и отражательных структур.

Таким образом, исследование корреляционного метода и решение проблемы коллизии применительно к системе радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения и является актуальной задачей.

**Целью работы** является анализ алгоритмов кодового разделения сигналов в системе радиочастотной идентификации, реализуемой на основе устройств на поверхностных акустических волнах, развитие метода расчета и

разработка алгоритмов проектирования радиомаркеров с заданными характеристиками.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретически и экспериментально исследовать возможности применения фазоманипулированных и дискретно-кодированных сигналов в системе радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах при условии использования метода корреляционной обработки или согласованной фильтрации;
- исследовать основные законы фазовой двоичной манипуляции импульсов с целью создания ансамбля сигналов с «хорошими» авто- и взаимокорреляционными свойствами, пригодными для решения задачи антиколлизии;
- исследовать принципы построения системы радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах с кодовым разделением сигналов;
- разработать алгоритм расчета радиомаркеров на поверхностных акустических волнах на основе обобщенного метода связанных мод;
- установить адекватность теоретических моделей полученным результатам экспериментальных исследований разработанных радиомаркеров на поверхностных акустических волнах.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проведены с использованием методов обработки информационных сигналов, теории случайных процессов, теории оптимального обнаружения и метода связанных мод. Расчеты и компьютерное моделирование выполнены с использованием численных методов прикладной математики и методов имитационного моделирования на языке высокого уровня программирования (язык среды *Matlab*).

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Проведен теоретический анализ возможности использования моделей фазоманипулированных и дискретно-кодированных сигналов в качестве ответных сигналов радиомаркеров на поверхностных акустических волнах. При анализе учтены особенности работы системы радиочастотной идентификации с кодовым разделением сигналов, реализуемой на основе устройств на поверхностных волнах, для решения проблемы коллизии.
2. Предложен и исследован алгоритм модуляции кодовых фазоманипулированных последовательностей с целью увеличения ансамбля квазиортогональных сигналов.
3. Предложен и реализован алгоритм расчета радиомаркеров на поверхностных акустических волнах различного конструктивного исполнения для систем радиочастотной идентификации на основе обобщенного метода связанных мод (*COM, Coupling of Modes*) и метода *P*-матриц.
4. На основе предложенных алгоритмов кодирования и расчета устройств на поверхностных акустических волнах для систем

радиочастотной идентификации проведены экспериментальные исследования изготовленных радиомаркеров, в том числе исследованы корреляционные свойства их импульсных откликов.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны теоретический метод, модели и практические методики проектирования новых радиомаркеров на поверхностных акустических волнах различного конструктивного исполнения с заданными характеристиками;

- установлено, что применение в качестве «уникальных» кодовых последовательностей радиомаркеров модифицированных последовательностей максимальной вероятности позволяет существенно увеличить объем кодового ансамбля радиомаркеров по сравнению с другими правилами формирования кодов, позволяющими получать квазиортогональные последовательности и решать задачу антиколлизии;

- разработано программное обеспечение, которое позволяет проводить анализ основных характеристик корреляционных функций кодовых последовательностей для систем радиочастотной идентификации, а также позволяет находить группы последовательностей, имеющие заданные корреляционные свойства и пригодные для решения задачи коллизии в системах радиочастотной идентификации;

- использование найденных на основе оригинального алгоритма кодовых последовательностей в предложенной модели идентификации позволяет увеличить дальность считывания данных с радиомаркеров, а в некоторых случаях увеличить скрытность системы радиочастотной идентификации при работе передатчика на пониженном уровне мощности.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, корректным использованием математического аппарата и логической обоснованностью выводов, а также соответствием теоретических результатов результатам математического моделирования и измерений при практической реализации.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования принципов построения системы радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах с кодовым разделением сигналов.
2. Результаты анализа корреляционных свойств модифицированных последовательностей максимальной вероятности.
3. Алгоритм расчета радиомаркеров на поверхностных акустических волнах различного конструктивного исполнения для систем радиочастотной идентификации на основе обобщенного метода связанных мод.
4. Результаты экспериментальной апробации предложенных алгоритмов выбора кодов и метода расчета радиомаркеров.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XI, XII и XIII международной молодежной научной конференции «Волновая электроника и её применение в информационных и телекоммуникационных системах» (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010), на научной сессии ГУАП, посвященной Всемирному дню космонавтики (2010), на 65-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио – «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова», СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2010), на Всероссийской конференции с международным участием «Пьезотехника и акустоэлектроника: от фундаментальных исследований до внедрения в народное хозяйство Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 2010), на секции "Радиоэлектроника" Дома ученых имени А.М. Горького (Санкт-Петербург, 2011).

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы в ОАО «НПП «Радар ммс» при проведении ОКР «Дистанция» и «Влажность» по разработке устройств на поверхностных акустических волнах, а также в учебном процессе при подготовке магистров по направлениям «Радиотехника» и «Информатика и вычислительная техника» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Результаты работы подтверждены актами о внедрении.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, 5 из которых – статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК России, 7 – публикации в материалах российских и международных форумов и конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 156 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников (102 наименования). Работа включает 43 рисунка и 16 таблиц.

**Личный вклад автора.** Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, разработке программ расчетов, получении и анализе результатов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлен обзор научной литературы за последние годы, затрагивающей вопросы создания систем радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в целом, а также систем передачи информации с кодовым разделением сигналов.

Радиомаркеры на ПАВ относятся к классу «только чтение» и работают

только на считывание информации. На опросный импульс считывателя радиомаркер формирует набор ответных импульсов, несущих определенный код, обусловленный топологией ПАВ-устройства (рисунок 1). Следует отметить, что дальность считывания системы идентификации на ПАВ зависит от нескольких факторов. Один из них – это потери непосредственно в радиомаркере, достигающие величин 30-50 дБ. Поскольку радиомаркер на ПАВ – это прототип многоотводной линии задержки, то с увеличением числа этих отводов возрастают потери, связанные с распределением энергии между ними. В свою очередь, число отводов определяет число знаков кода, а значит, число возможных кодовых комбинаций.

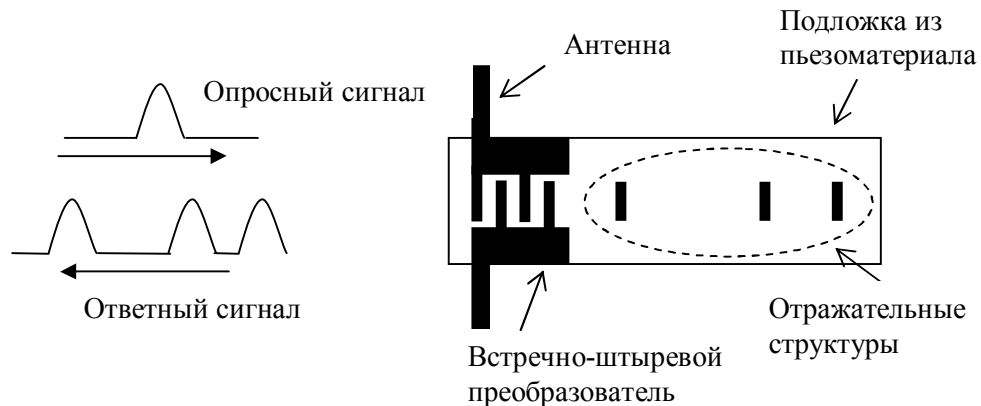


Рисунок 1 – Принцип работы радиомаркера на ПАВ

Анализ конструктивных топологических решений для радиомаркеров на ПАВ показал, что конструкции радиомаркера с отражательными структурами (рисунок 2) обеспечивают наилучшие его параметры.

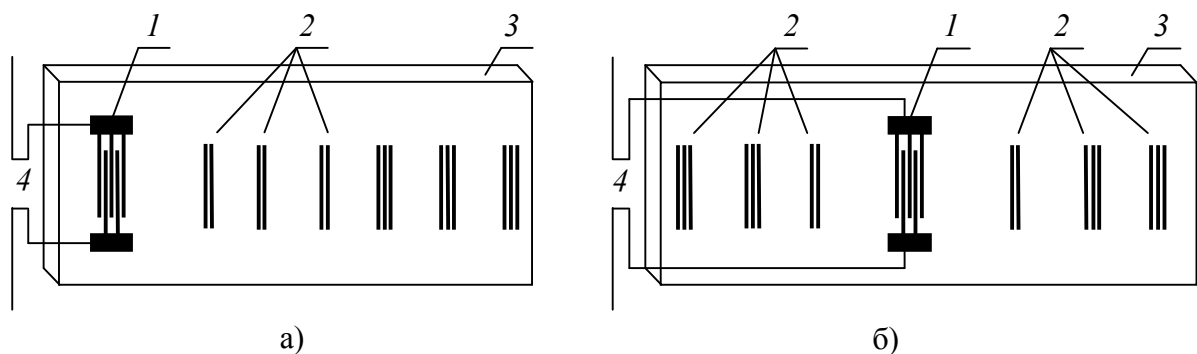


Рисунок 2 – Конструкция радиомаркера на ПАВ с отражательными структурами: условное изображение конструкции радиомаркера и способ подключения ее к антенне; 1 – ВШП, 2 – отражательные структуры, 3 – пьезоподложка, 4 – антенна: а – традиционная схема; б – схема с использованием двунаправленности ВШП

В конструкции радиомаркера, приведенной на рисунке 2, встречно-штыревой преобразователь используется для преобразования электрического сигнала, поступающего от антенны в устройство на ПАВ и обратно. Отражательные структуры (ОС) в виде групп металлических полосок или канавок располагаются на поверхности пьезоподложки таким образом, чтобы после отражения поверхностной акустической волны от каждой



отражательной структуры и ее обратного преобразования на встречно-штыревом преобразователе в антенну радиомаркера поступила кодовая последовательность импульсов.

Достоинствами конструкции радиомаркера с отражательными структурами являются:

- хорошее согласование радиомаркера с антенной и, как следствие, минимальные потери на рассогласовании;
- регулируемый коэффициент отражения от каждого отражателя (при помощи изменения толщины металла или глубины канавок) и, как следствие, возможность выбрать его оптимальную величину;
- возможность реализовать кодовые последовательности, имеющие более 32 символов;
- небольшая изрезанность амплитудно-частотной характеристики, не чувствительная к коду, что обеспечивает отсутствие разброса электрических параметров радиомаркера в зависимости от заданного кода;
- длина подложки радиомаркера в два раза меньше по сравнению с конструкцией на встречно-штыревых преобразователях.

К недостаткам можно отнести следующее:

- большее число технологических операций при изготовлении по сравнению с радиомаркером на встречно-штыревых преобразователях;
- необходимость хорошей расчетной теории для учета переотражений акустических волн внутри отражательных структур и других вторичных эффектов.

Систему радиочастотной идентификации на ПАВ можно отнести к классу дальних систем, где считывание информации происходит на расстояниях больше 1 метра. Разработку радиочастотных систем, также как и радиолокационных систем, следует начинать с исследования ограничений, накладываемых уравнением дальности. На основе анализа уравнения дальности можно сделать вывод, что применение сложных сигналов позволяет улучшить помехоустойчивость обнаружения объектов и увеличить дальность действия системы за счет увеличения отношения сигнал-шум после корреляционной обработки сигнала принятого от радиомаркера.

Существует пять различных решений задачи антиколлизии: частотное, временное, кодовое, пространственное и поляризационное разделение.

Представленный обзор антиколлизии алгоритмов показал, что для выделения и идентификации отдельного радиомаркера в системе радиочастотной идентификации на ПАВ наиболее подходит модифицированный множественный доступ с кодовым разделением, использующий метод корреляционной обработки сигналов или принцип согласованной фильтрации. Применение кодового разделения позволяет сохранить большой ансамбль кодов в системе сигналов, а соответственно, и число радиомаркеров, тогда как разделение по времени и частоте ограничивает ансамбль числом временных и частотных каналов. При этом ансамбль кодов должен иметь хорошие автокорреляционные функции,

имеющие выраженный корреляционный пик, а взаимокорреляционные функции (ВКФ) в выбранной группе кодов должны иметь низкий уровень максимального значения пиков.

По обзору применения кодового разделения сигналов в системах передачи информации можно сделать вывод, что технология кодового разделения и шумоподобные сигналы используются при построении сотовых систем связи второго (*CDMA IS-95*) и третьего поколений (*W-CDMA, UMTS*), спутниковых систем связи (*Globalstar*) и навигации (*GPS*), локальных радиосетей (стандарт *IEEE 802.11*) и в ряде других систем.

Использование расширяющих последовательностей и метода временного сдвига по периодической автокорреляционной функции (АКФ) для асинхронного кодового разделения в системе радиочастотной идентификации на ПАВ затруднительно ввиду ограничения длин кодовых последовательностей, связанных с трудностями реализации ПАВ-устройств.

**Во второй главе** исследованы корреляционные свойства сигналов, используемых в системе радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах с кодовым разделением сигналов с целью создания ансамбля сигналов с «хорошими» авто- и взаимокорреляционными свойствами, пригодными для решения задачи антиколлизии.

Проведен теоретический анализ возможности использования моделей фазоманипулированных и дискретно-кодированных сигналов в качестве ответных сигналов радиомаркеров на ПАВ. Сигнал ответа маркера представляет собой дискретный информационный сигнал, имеющий вид последовательности прямоугольных импульсов с фазовой манипуляцией.

В диссертации принята следующая математическая модель фазоманипулированной последовательности:

$$S(t) = \sum_{n=1}^N a_n S_0(t - (n-1)\tau_0), \quad (1)$$

Фазоманипулированный сигнал по (1) состоит из  $N$  прямоугольных импульсов  $S_0(t)$ , причем  $n$ -й импульс имеет амплитуду  $a_n$  и запаздывает относительно начала координат на время  $(n-1)\tau_0$ , равное суммарной длительности всех предыдущих импульсов ( $\tau_0$  – длительность элементарного импульса).

Любую бифазную дискретно-кодированную последовательность можно определить на основании выражения:

$$X = \{a_n\}_{1,N}, a_n = \exp(j\varphi_n), n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где значение фазы на каждом  $n$ -ом кодовом интервале может принимать лишь одно из двух значений  $\{0, \pi\}$ , модуль каждого кодового элемента  $|a_n|=1$ ,  $N$  – количество кодовых элементов в последовательности,  $j$  – мнимая единица.

Нормированная АКФ дискретно-кодированных последовательностей по (2) определяется на основании выражения:

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=\tau+1}^N a_n a_{n-\tau}^*, \tau = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

где  $a_n^*$  – комплексно сопряженный кодовый элемент дискретной последовательности  $X$ ; для фазоманипулированных сигналов с двумя значениями фазы  $a_n^* = a_n$ .

Нормированную ВКФ двух фазоманипулированных последовательностей  $X^{(j)} = \{a_n^{(j)}\}_{1,N}$  и  $X^{(k)} = \{a_n^{(k)}\}_{1,N}$  определим на основании выражения:

$$\eta_{jk}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=n_1}^{n_2} a_n^{(j)} (a_{n-\tau}^{(k)})^* . \quad (4)$$

По результатам исследования принципов построения системы радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах, использующей сложные сигналы для кодового разделения сигналов, определено следующее: ансамбль кодов, обладающий «хорошими» корреляционными свойствами, ограничен; для увеличения числа кодов необходимо увеличивать число символов кода, но при этом растут вносимые потери маркера, связанные с его топологическими особенностями; должна обеспечиваться одинаковая интенсивность всех ответных сигналов радиомаркеров, иначе сигнал взаимной помехи от ближайшего маркера может превзойти по интенсивности остальные полезные сигналы; имеет место асинхронный режим работы системы.

Анализ корреляционных свойств ортогональных последовательностей и некоторых типов псевдослучайных последовательностей, используемых в системах связи с кодовым разделением сигналов, показал, что их технологическая привлекательность обеспечивается: 1) большими длинами последовательностей, в результате чего известные ансамбли кодов, такие как М-последовательности, коды Голда и Касами, имеют большой размер систем сигналов; 2) возможностью работы по периодическим ВКФ и АКФ; 3) синхронным режимом работы, где возможно применение функций Уолша. Системы радиочастотной идентификации на ПАВ требуют несколько другого подхода.

Определены условия, предъявляемые к дискретно-кодированному сигналу, оптимальному с позиции критериев, полученных в рамках метода максимального правдоподобия, и требования, предъявляемые к дискретно-кодированным сигналам, оптимальным с позиции критериев, отражающих стремление к минимизации уровня взаимных корреляционных шумов при их распознавании.

*Условие 1.* Максимальное значение уровня боковых лепестков АКФ кодовой последовательности не должно быть выше порогового уровня  $A_A$ .

*Условие 2.* Максимальное значение ВКФ внутри выбранного массива «хороших» кодовых последовательностей не должно быть выше порогового уровня  $A_B$ .

Уровень  $A_B$  определяется по отношению к значению АКФ в группе кодов, отвечающих условию 1.

Исследован метод временного сдвига по периодической АКФ для кодового разделения сигналов в системе радиочастотной идентификации на ПАВ. При использовании этого метода для систем радиочастотной идентификации на ПАВ выявлена следующая проблема: для получения большого ансамбля дискретно-кодированных последовательностей требуется большая длина исходной последовательности, что накладывает ограничение на применение в случае использования радиомаркеров на ПАВ.

Предложен и исследован алгоритм модуляции кодовых фазоманипулированных последовательностей с целью увеличения ансамбля квазиортогональных сигналов. В качестве исследуемого массива кодов в данной работе были выбраны модифицированные последовательности максимальной вероятности, которые имеют хорошие автокорреляционные свойства. Для формирования данного типа последовательностей применяется блочная структура (рисунок 3), предложенная в работах Варакина Л.Е.

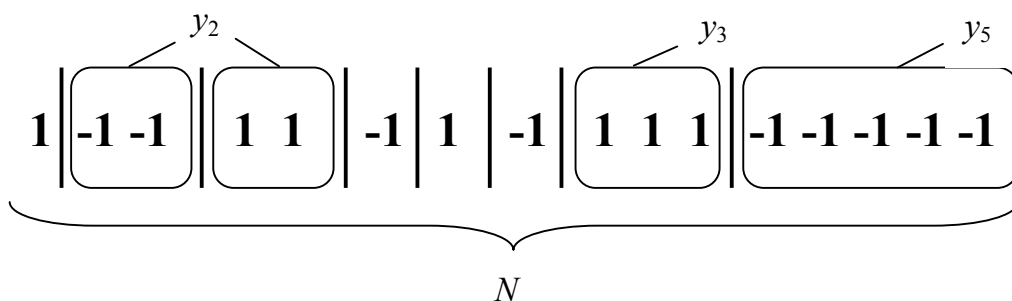


Рисунок 3 – Структура кодовой последовательности длиной 16 знаков

Параметр  $N$  в данном случае – число бит (или знаков). Общее число блоков обозначим как  $M$ . Представленные на рисунке 3  $y_2$ ,  $y_3$  и  $y_5$  – блоки длины  $k = 2$ ,  $k = 3$  и  $k = 5$  соответственно.

Отличие подхода, представленного в диссертационной работе заключается в следующем:

- не используется вероятностный подход к формированию массива кодов;
- последовательности формируются согласно требованиям к порогам  $A_A$  и  $A_B$ ;
- для получения большего ансамбля кодов используются не только оптимальная блочная структура, но и расширенные правила формирования блоков.

В результате численного анализа исследованы аperiodические корреляционные свойства кодов длиной  $N=16$ . Регулярное правило формирования модифицированных последовательностей максимальной вероятности позволяет получить на первом этапе исходный массив кодов, например, для правила  $M=8$ :  $y_1=3$ ,  $y_2=3$ ,  $y_3=1$ ,  $y_4=1$  – 1120 кодов, для числа блоков  $M=8$ , включающего в себя 8 групп:  $y_1=5$ ,  $y_2=1$ ,  $y_3=1$ ,  $y_6=1$ ;  $y_1=5$ ,  $y_2=1$ ,  $y_4=1$ ,  $y_5=1$ ;  $y_1=5$ ,  $y_3=2$ ,  $y_5=1$ ;  $y_1=4$ ,  $y_2=3$ ,  $y_6=1$ ;  $y_1=4$ ,  $y_2=2$ ,  $y_3=1$ ,  $y_5=1$ ;  $y_1=4$ ,  $y_2=1$ ,  $y_3=2$ ,  $y_4=1$ ;  $y_1=3$ ,  $y_2=4$ ,  $y_5=1$  и  $y_1=3$ ,  $y_2=3$ ,  $y_3=1$ ,  $y_4=1$  – 4200, а для расширенного правила, объединяющего  $M=7$ ,  $M=8$ ,  $M=9$  – 12109. На втором этапе формируют условия к порогам  $A_A$  и  $A_B$ . Следующий шаг – отбор «хороших»

кодовых последовательностей из заданного на первом этапе массива в соответствии с условием к порогу  $A_A$ , а затем и условием к порогу  $A_B$ .

В ходе исследования выполнен расчетный анализ апериодических АКФ и ВКФ по (3) и (4) последовательностей с числом блоков  $M=7$ ,  $M=8$  и  $M=9$ . Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа корреляционных свойств кодов

Правило формирования	Пороги $A_A$ и $A_B$	Число кодов
$M=8: y_1=4, y_2=2, y_3=1, y_5=1$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ	23
$M=8: y_1=4, y_2=2, y_3=1, y_5=1$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=4,6$ дБ	83
$M=8$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ	23
$M=7$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ	20
$M=9$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ	23
$M=7, M=8, M=9$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ	26
$M=7, M=8, M=9$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=4,6$ дБ	120
$M=7, M=8, M=9$	$A_A=8,5$ дБ, $A_B=6$ дБ, $\tau = -1, 0, 1$	66

Рассмотренный регулярный метод формирования последовательностей с фазовой двоичной манипуляцией для заданной размерности  $N$  позволяет получить корреляционные свойства, близкие к свойствам  $M$ -последовательностей.

При практическом использовании обычно требуется большее количество возможных кодовых комбинаций. Установлено, что к увеличению общего числа кодовых комбинаций может привести:

- ограничение интервала наблюдения, то есть условие к порогу  $A_B$  будет выполняться только на  $\tau = -1, 0, 1$ , для  $A_A=8,5$  дБ и  $A_B=6$  дБ число последовательностей составляет 66 (таблица 1);
- увеличение длины кодовых последовательностей, общий массив кодов при  $N=32, M_0=16, y_1=8, y_2=4, y_3=2, y_4=1, y_6=1$  составляет 10810800.
- использование технологии кодового разделения сигналов совместно с пространственным разделением и последовательным опросом; в этом случае требования к антиколлизийным свойствам для подгруппы кодов могут быть снижены; для пространственного разделения требуется сложная антенная система приемопередатчика.

Исследованы особенности работы системы на ПАВ с использованием маркера как согласованного фильтра. В этом случае сигнал опроса представляет собой «зеркальный» во времени код маркера, который и необходимо идентифицировать. Считыватель последовательно опрашивает группу пассивных маркеров, находящихся в зоне считывания. После приема ответных сигналов производится их детектирование по амплитуде и сравнение их уровней с заранее выбранным пороговым уровнем. При выявлении сигнала, превышающего пороговый уровень, делается вывод о наличии в группе разыскиваемого маркера, идентификационный код которого зеркален с кодом, содержащимся в сигнале опроса. Одним из

преимуществ такого способа работы является отсутствие на приемной стороне набора согласованных фильтров. Также нет необходимости последовательно подвергать принятый сигнал корреляционной обработке со всеми кодами, находящимися в базе данных. К минусам можно отнести следующее: при больших длинах кодов потребуются отдельные приемная и передающая антенны; длина элементарного импульса кодовой последовательности должна быть такой, чтобы длины интервала корреляции было достаточно для принятия решения о превышении заданного порога.

Проведен анализ возможности использования радиомаркеров с временно-позиционными кодами, имеющие заданные корреляционные свойства. Временно-позиционные коды при соответствующем подходе могут быть использованы в двух режимах работы считывателя: при «побитовом» приеме и при обработке сигнала в «целом» – случай корреляционной обработки. С увеличением числа позиций ( $p$ ) временно-позиционного кода улучшаются автокорреляционные свойства и увеличивается число возможных кодовых комбинаций ( $L=p^N$ ). 16-значный пятипозиционный код с бифазной модуляцией позволяет получить минимальный уровень боковых лепестков АКФ в 18 дБ и минимальный уровень ВКФ в 14 дБ. Объем системы сигналов при  $A_A=18$  дБ и  $A_B=8,5$  дБ составит более 1000 кодов.

**В третьей главе** на основе модифицированных уравнений для связанных волн построен алгоритм расчета радиомаркера на ПАВ. Теория расчета применима к встречно-штыревым преобразователям и отражательным структурам любого типа, в том числе к аподизованным преобразователям с линейной топологией и произвольно меняющимся периодом и полярностью подключения электродов к контактным шинам, и произвольно меняющимся шагом отражательных структур.

При проектировании топологии устройств на поверхностных акустических волнах для радиомаркеров используем метод моделирования, основанный на модифицированных уравнениях для связанных мод. Основная цель – учет и частичная компенсация многократных отражений между отдельными отражательными структурами, поскольку переотражения в отражательных и электродных структурах приводят к пульсациям частотных характеристик.

Используемый метод расчета основан на рассмотрении в структуре устройства двух однородных плоских волн, распространяющихся во встречных направлениях:

$$R(z, \omega) = R(\omega) \exp(-j\omega z),$$

$$S(z, \omega) = S(\omega) \exp(+j\omega z),$$

где  $R(\omega)$ ,  $S(\omega)$  – комплексные амплитуды поверхностных потенциалов с волновым числом  $k$  и круговой частотой  $\omega$ , имеющие значения поверхностных электрических потенциалов.

Показано, что при распространении ПАВ в периодической электродной структуре имеют место процессы отражения и преобразования ПАВ. Присутствие электродов на поверхности меняет скорость распространения

волн и обуславливает взаимную связь между волнами. Взаимная связь обусловлена двумя причинами. Во-первых, частичным отражением ПАВ от электродов и, во-вторых, возбуждением ПАВ посредством высокочастотного тока, протекающего в металлических электродах.

Можно записать уравнения, связывающие комплексные амплитуды ПАВ на входе  $R_K(\omega)$ ,  $S_K(\omega)$  и выходе  $R_{K+1}(\omega)$ ,  $S_{K+1}(\omega)$   $K$ -го элемента структуры, и уравнение для тока через  $K$ -й электрод  $I_K(\omega)$ . Для формализации процесса вычисления уравнения связанных волн удобно представить в матричной форме. Рассмотрим ПАВ-устройство, состоящее из двух различных ПАВ-структур (рисунок 4, а). Электрические порты ПАВ-устройств типа ВШП соединены параллельно. Акустические порты ПАВ-устройств соединены последовательно.

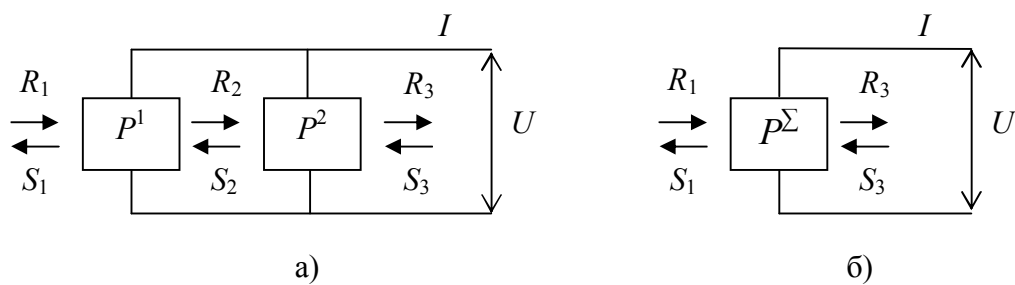


Рисунок 4 – Эквивалентная акустоэлектрическая схема ПАВ-устройства: а – для двух структур; б – преобразованная

$$\begin{bmatrix} S_K(\omega) \\ R_{K+1}(\omega) \\ I_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^K(\omega) & P_{12}^K(\omega) & P_{13}^K(\omega) \\ P_{21}^K(\omega) & P_{22}^K(\omega) & P_{23}^K(\omega) \\ P_{31}^K(\omega) & P_{32}^K(\omega) & P_{33}^K(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_K(\omega) \\ S_{K+1}(\omega) \\ U_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Показано, что основная идея при синтезе топологии устройства на ПАВ состоит в следующем: сначала определяется оптимальная конструкция радиомаркера и составляется эквивалентная акустоэлектрическая схема устройства; далее вычисляются  $P$ -матрицы всех элементарных звеньев устройства. Используя  $P$ -матрицы для каждого элементарного звена, можно вычислить суммарную матрицу, определяющую связь комплексных амплитуд волн на входе и выходе ПАВ-структуры, состоящей из звеньев (рисунок 4, б).

В общем случае ПАВ-структурами могут быть один электрод ВШП, несколько электродов ВШП, ВШП целиком, одна полоска (канавка) ОС, несколько полосок (канавок) ОС, зазор (свободная или металлизированная поверхность) пьезоэлектрика.

Компоненты суммарной  $P$ -матрицы можно выразить через компоненты матриц  $\mathbf{P}^1$  и  $\mathbf{P}^2$ . Например, элемент  $P_{33}$  суммарной  $P$ -матрицы из (5) вычисляется следующим образом:

$$P_{33}^\Sigma = P_{33}^1 + P_{33}^2 + P_{32}^1 \frac{P_{13}^2 + P_{11}^2 P_{23}^1}{1 - P_{11}^2 P_{22}^1} + P_{31}^2 \frac{P_{23}^1 + P_{22}^1 P_{13}^2}{1 - P_{11}^2 P_{22}^1}$$

В данной работе предлагается устройства на ПАВ, состоящие из преобразователей и отражательных структур, включенных в произвольной комбинации путем последовательных преобразований, сводить к двум ПАВ-структурам, одна из которых подключена к генератору, а другая – к нагрузке (рисунок 5, а),  $P$ -матрицы, их описывающие, соответственно  $P^A$  и  $P^B$  (рисунок 5, б). Отметим, что в действительности каждая из матриц  $P^A$  и  $P^B$  может описывать некую комбинацию ВШП и ОС. Получение суммарной  $P$ -матрицы ПАВ-структуры и зазора ( $P^C$ ) представлено на рисунке 5, в.

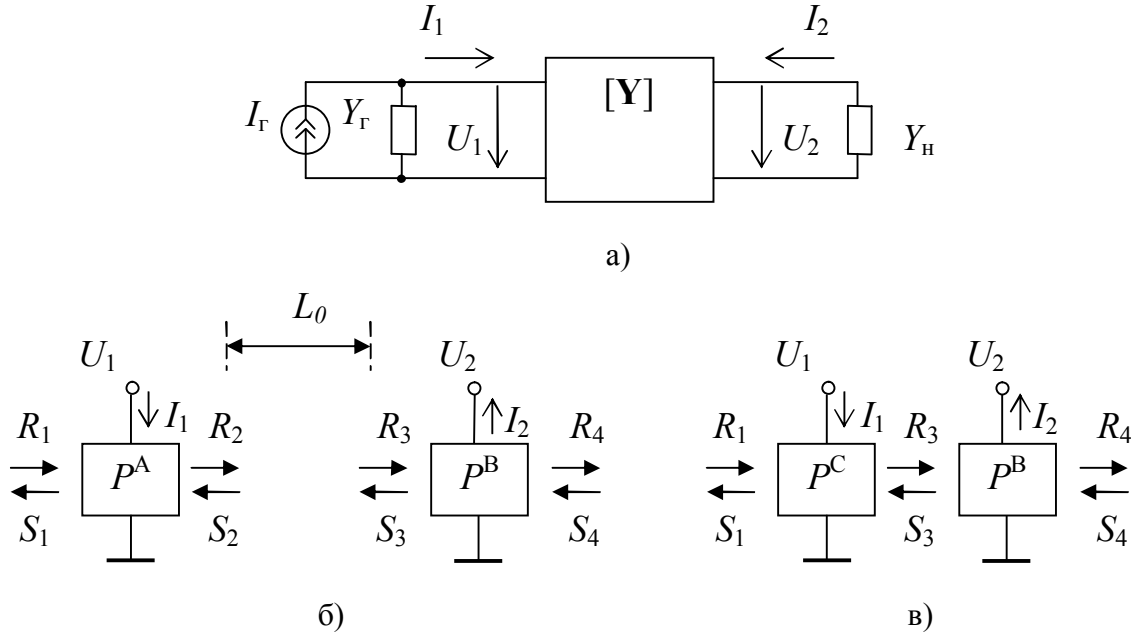


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы ПАВ-устройства:  
а – электрическая; б – акустоэлектрическая; в – преобразованная

Применительно к эквивалентной схеме, изображенной на рисунке 5, коэффициент передачи запишем как:

$$S_{11} = \frac{\left( Y_0 - P_{33}^C - P_{11}^B \frac{P_{32}^C P_{23}^C}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right) \left( Y_0 + P_{33}^B + P_{22}^C \frac{P_{31}^B P_{13}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right) + \left( \frac{P_{32}^C P_{13}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \cdot \frac{P_{23}^C P_{31}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right)}{\left( Y_0 + P_{33}^C + P_{11}^B \frac{P_{32}^C P_{23}^C}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right) \left( Y_0 + P_{33}^B + P_{22}^C \frac{P_{31}^B P_{13}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right) - \left( \frac{P_{32}^C P_{13}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \cdot \frac{P_{23}^C P_{31}^B}{1 - P_{11}^B P_{22}^C} \right)}$$

Далее, используя прямое преобразование Фурье, от коэффициента передачи переходим к импульсному отклику радиомаркера. Тем самым получаем временной отклик радиомаркера, по которому можем судить об уровне ложных сигналов и неравномерности амплитуд импульсов, несущих заложенный информационный код. Алгоритм расчета представлен на рисунке 6.

Приведенные в данном разделе соотношения позволяют путем расчетного анализа конкретной структуры радиомаркера определять глубину канавок в отражательных структурах (неизменную для всех ОС, но при разном числе канавок в каждой ОС), при которой достигаются минимальные потери при вариации амплитуды отдельных импульсов в импульсной характеристике не более некоторой заданной величины, например, 2 дБ.



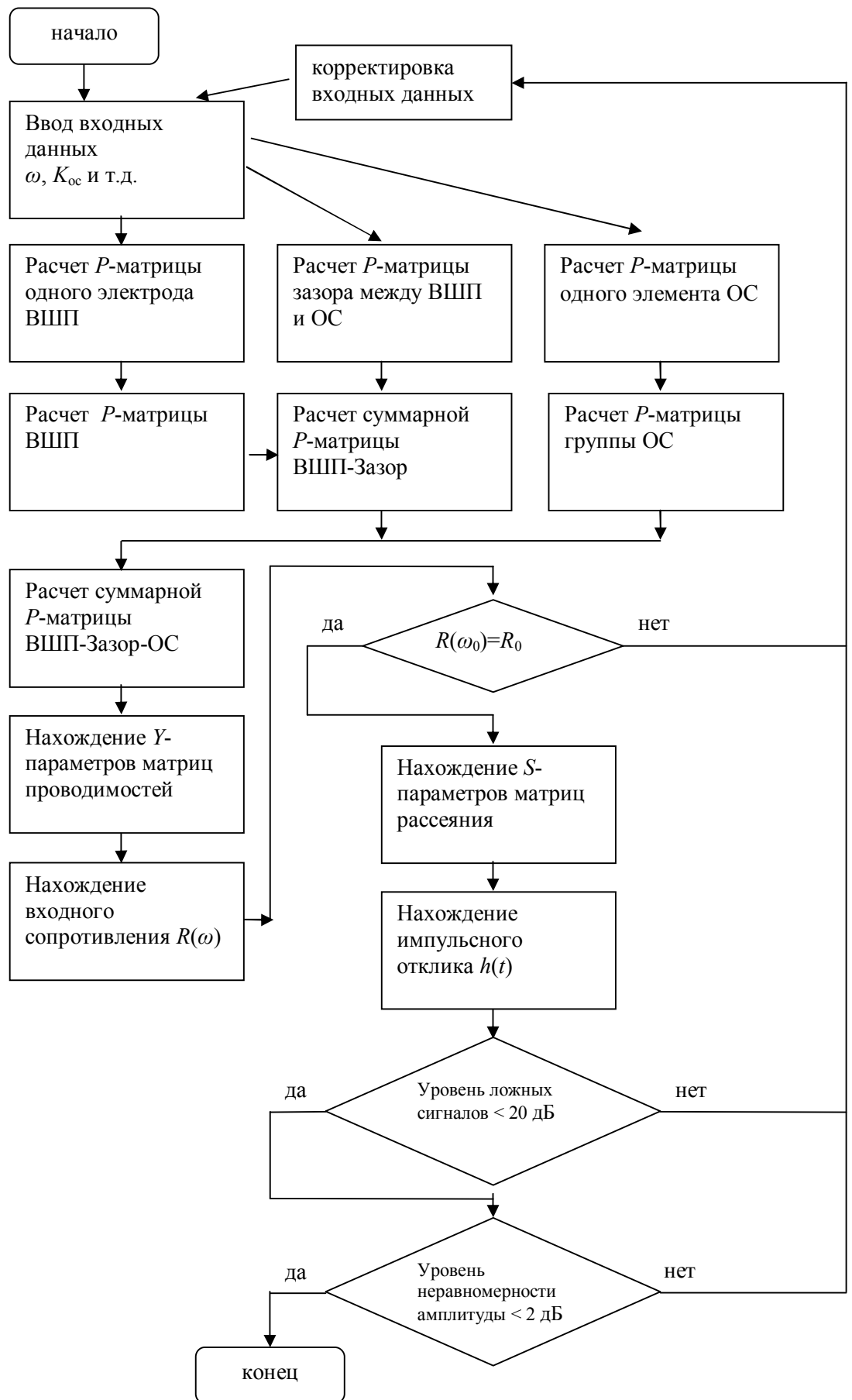


Рисунок 6 – Алгоритм расчета радиомаркера на ПАВ

**В четвертой главе** представлены результаты практической реализации разработанных радиомаркеров на ПАВ с заданными характеристиками.

Основываясь на полученных в предыдущих разделах теоретических данных по выбору оптимальной конструкции, уникальных кодовых последовательностей и метода расчета, проведены экспериментальные исследования разработанных радиомаркеров на ПАВ на *YZ*-срезах  $LiNbO_3$  с заданными характеристиками. В качестве конструкций радиомаркеров рассмотрены два типа: первый тип – конструкция по традиционной схеме, представленная ранее на рисунке 2, а; второй тип – конструкция с использованием двунаправленности ВШП, представленная на рисунке 2, б. В качестве кодовых последовательностей выбраны модифицированные последовательности максимальной вероятности длиной 16 и 24 символа. ВШП состоял из 20 электродов. Число канавок в каждой ОС изменялось от 8 (ОС ближайšie к ВШП) до 12 (ОС удаленные от ВШП) при постоянной их глубине, равной  $\sim 40$  нм, и ширине около 1 мкм. Апертура структуры составила 300 мкм.

Проведен анализ основных параметров изготовленных радиомаркеров на ПАВ по импульсному отклику. Потери не превышают значения 35 дБ. Уровень неравномерности амплитуды в измеренном импульсном отклике не превышает значения 2 дБ. Уровень ложных сигналов не менее 15 дБ.

Основные параметры АКФ и ВКФ, полученные для радиомаркеров с различными фазоманипулированными кодами, сведены в таблице 2. При вычислениях АКФ и ВКФ использованы данные в виде оцифрованных импульсных откликов радиомаркеров, полученных цифровым осциллографом *Agilent DSO 80304B*.

Таблица 2 – Основные параметры АКФ и ВКФ радиомаркеров

Коды	$\max\{\text{АКФ}\}$ , дБ	$\max\{\text{ВКФ}\}$ , дБ				
		1	2	3	4	5
16-битный код						
$X_1^{16}$	15,9	–	-9,7	-9,0	-8,1	-8,5
$X_2^{16}$	16,1	–	–	-8,6	-8,5	-7,9
$X_3^{16}$	15,9	–	–	–	-8,3	-9,0
$X_4^{16}$	15,3	–	–	–	–	-9,3
$X_5^{16}$	16,1	–	–	–	–	–
24-битный код						
$X_1^{24}$	17,1	–	-10,1	-10,5	-11,8	-7,3
$X_2^{24}$	16,8	–	–	-7,8	-9,6	-9,8
$X_3^{24}$	16,9	–	–	–	-10,3	-5,6
$X_4^{24}$	16,8	–	–	–	–	-9,7
$X_5^{24}$	17,0	–	–	–	–	–

Проведен анализ корреляционных свойств изготовленных радиомаркеров на ПАВ (рисунки 7–9). Уровень боковых лепестков (УБЛ) не превышает значения 10 дБ для всех типов радиомаркеров. Уровень  $\max\{\text{ВКФ}\}$  близок к расчетному, но для конструкции радиомаркера с 24 битами для пары кодов есть отклонения от расчетного более чем на 4 дБ, что объясняется рассогласованием фаз в двух частях кода при “сшивке” на вполне определенной глубине канавок в ОС.

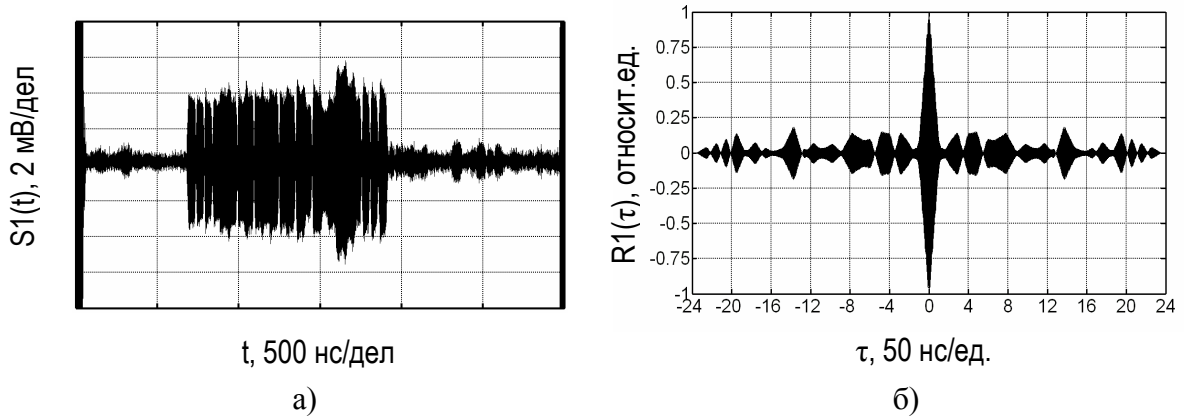


Рисунок 7 – Радиомаркер с 24-битным кодом  $X_1^{24}$ . Потери 34 дБ,  $\max\{\text{АКФ}\}=16,7$  дБ,  $\tau=55,3$  нс, УБЛ=-14,8 дБ: а – измеренный импульсный отклик; б – АКФ

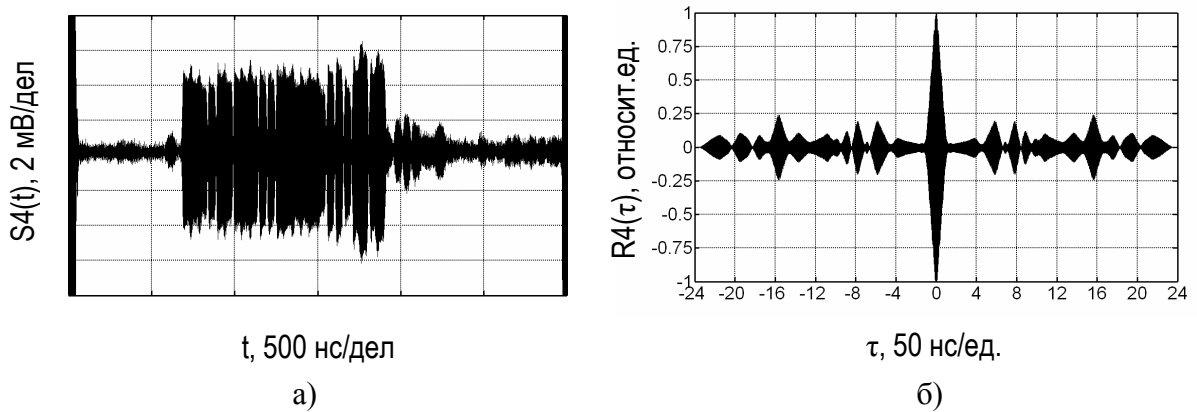


Рисунок 8 – Радиомаркер с 24-битным кодом  $X_4^{24}$ . Потери 33,5 дБ,  $\max\{\text{АКФ}\}=16,9$  дБ,  $\tau=62,3$  нс, УБЛ=-14,5 дБ: а – измеренный импульсный отклик; б – АКФ

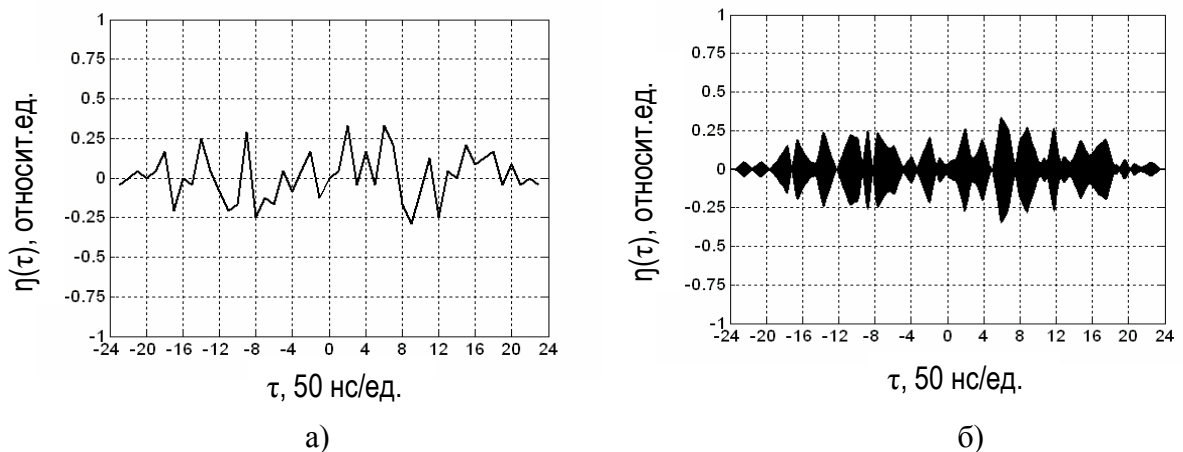


Рисунок 9 – Нормированные взаимокорреляционные функции маркеров  $X_1^{24}$  и  $X_4^{24}$ : а – расчетная; б – измеренных импульсных откликов

Проведенные экспериментальные исследования разработанных радиомаркеров на ПАВ показали хорошее совпадение с расчетными данными, что свидетельствует об адекватности разработанных теоретических моделей.

**В заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований и возможные направления дальнейших исследований

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- Предложен и реализован алгоритм расчета радиомаркеров на ПАВ различного конструктивного исполнения для систем радиочастотной идентификации на основе *SOM*-метода и метода *P*-матриц. Выведены соотношения для компонентов суммарной *P*-матрицы устройства. Выведены соотношения для *Y*-параметров матрицы проводимости и *S*-параметров матрицы рассеяния с учетом суммарных *P*-матриц.
- Теоретически и экспериментально исследованы возможности применения фазоманипулированных и дискретно-кодированных сигналов в системах радиочастотной идентификации на ПАВ при условии использования метода корреляционной обработки или согласованной фильтрации. Учтены особенности работы системы с кодовым разделением сигналов для решения проблемы коллизии.
- Проведен анализ конструктивных топологических решений для радиомаркеров на ПАВ. Установлено, что конструкции радиомаркера с отражательными структурами обеспечивают наилучшие его параметры.
- Установлено, что применение сложных сигналов позволяет значительно улучшить помехоустойчивость обнаружения объектов, увеличить дальность действия системы и решить задачу антиколлизии для ограниченного числа объектов, определяемого на основе компромисса между взаимным расположением объектов в зоне опроса, типом кода и его допустимой длиной.
- Предложен и исследован алгоритм модуляции кодовых фазоманипулированных последовательностей с целью увеличения ансамбля квазиортогональных сигналов. Формирование массива кодов в виде модифицированных последовательностей максимальной вероятности обеспечивает «хорошие» корреляционные свойства по минимальному уровню боковых лепестков АКФ и минимальному уровню ВКФ и позволяет отнести его к большим системам сигналов, в отличие от систем с другими правилами формирования кодовых последовательностей той же длины при решении задачи коллизии. Данное правило позволяет формировать последовательности различной длины с заданными корреляционными свойствами.
- Исследованы возможности применения временно-позиционных кодов с «хорошими» корреляционными свойствами. 16-значный пятипозиционный код с бифазной модуляцией позволяет получить минимальный уровень

боковых лепестков АКФ в 18 дБ и минимальный уровень ВКФ в 14 дБ. Объем системы сигналов при  $A_A=18$  дБ и  $A_B=8,5$  дБ составит более 1000 кодов.

- На основе предложенных алгоритмов кодирования и расчета устройств на ПАВ для систем радиочастотной идентификации проведены экспериментальные исследования изготовленных ПАВ-радиомаркеров длиной 16 и 24 символа, исследованы корреляционные свойства их импульсных откликов.
- Установлено, что для конструкции радиомаркера с 24-значным кодом, формируемым набором отражательных структур в виде топологических неоднородностей, расположенных симметрично относительно преобразователя, потери составляют 35 дБ и сравнимы с потерями в 16-значной конструкции, выполненной по традиционной схеме.
- Проведен анализ основных параметров изготовленных радиомаркеров на ПАВ по импульсному отклику. Потери не превышают значения 35 дБ. Уровень неравномерности амплитуды в измеренном импульсном отклике не превышает значения 2 дБ. Уровень ложных сигналов не менее 15 дБ. Уровень боковых лепестков не превышают значения 10 дБ для всех типов радиомаркеров.
- Установлена адекватность теоретических моделей полученным результатам экспериментальных исследований разработанных ПАВ-радиомаркеров.

Результаты практической реализации диссертационной работы подтверждены актами внедрения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Koygerov, A.S. Investigation of correlation approach to solution anti-collision problem for SAW tag systems / A.S. Koygerov, S.A. Zabuzov, V.F. Dmitriev // Preliminary program and abstracts of XI International conference for young researches «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems». St. Petersburg. Russia. 2008. P. 36.
2. Koygerov, A.S. Optimization of SAW tags with encoding reflective array / A.S. Koygerov, V.F. Dmitriev, V.V. Novikov // Preliminary program and abstracts of XI International conference for young researches «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems». St. Petersburg. Russia. 2008. P. 40.
3. **Койгеров, А.С. Оптимизация радиоиентификатора на ПАВ с кодирующими отражательными структурами / А.С. Койгеров, В.Ф. Дмитриев, В.В. Новиков // Вопросы радиоэлектроники. М. 2009. Серия ОТ. Вып. 3. С. 173-179.**
4. **Койгеров, А.С. Оптимальные кодовые последовательности для решения проблемы коллизии в системах радиочастотной идентификации / А.С. Койгеров, В.Ф. Дмитриев // Вопросы радиоэлектроники. М. 2009. Серия ОТ. Вып. 3. С. 179-190.**

5. Koygerov, A.S. Development of the RFID SAW tags being established on conductive surfaces / A.S. Koygerov, U.A. Nitrov // Preliminary program and abstracts of XII International conference for young researches «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems». St. Petersburg. Russia. 2009. P. 51.
6. **Койгеров, А.С. Исследование корреляционного метода для решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ / А.С. Койгеров, С.А. Забузов, В.Ф. Дмитриев//Информационно-управляющие системы. Санкт-Петербург. 2009. Вып. 5. С. 48-55.**
7. Койгеров, А.С. К вопросу о дальности действия систем РЧИД на ПАВ / А.С. Койгеров // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. Технические науки. СПбГУАП. 2010. С. 37-40.
8. Койгеров, А.С. Вопросы согласования радиомаркера с антенной в системе радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах / А.С. Койгеров, И.Н. Смелов // Сборник трудов 65-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио, «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова» (СПБНТОРЭС). СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. С. 259-260.
9. Koygerov, A.S. Modeling of SAW tag using time position and orthogonal frequency coding / A.S. Koygerov, V.F. Dmitriev // Preliminary program and abstracts of XIII International conference for young researches «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems». St. Petersburg. Russia. 2010. P. 44.
10. **Койгеров, А.С. Корреляционные свойства радиоидентификаторов на ПАВ с фазоманипулированными кодами / А.С. Койгеров, В.Ф. Дмитриев, А.Н. Носков // Вопросы радиотехники. М. 2010. серия ОТ. Вып. 4. С. 5-14.**
11. **Койгеров, А.С. Радиомаркер на поверхностных акустических волнах с помехоустойчивым частотно-манипулированным кодом / А.С. Койгеров, В.Ф. Дмитриев // Информационно-управляющие системы. Санкт-Петербург. Вып. 4. 2010. С. 22-28.**
12. Койгеров, А.С. Исследование проблемы кодового разделения сигналов в системе радиочастотной идентификации на ПАВ / А.С. Койгеров // Всероссийская конференция с международным участием «Пьезотехника и акустоэлектроника: от фундаментальных исследований до внедрения в народное хозяйство Российской Федерации». СПбГУАП. 2010. С. 26-28.

Формат 60x84 1\16. Бумага офсетная.  
Тираж 100 экз. Заказ № 92.

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67