

Разработка цифровой помехоустойчивой  
системы многоканальной передачи  
аудиосигнала

## Содержание

Введение.....	3
Постановка задачи.....	4
1. Обеспечение помехоустойчивости канала передачи данных.....	6
1.1. Помехи, возникающие в канале передачи данных.....	8
1.2. Выбор типа канала передачи сигнала.....	11
1.3. Обзор методов помехоустойчивого кодирования.....	13
2. Практическая реализация цифровой помехоустойчивой системы многоканальной передачи аудиосигнала .....	14
2.1. Разработка алгоритма работы устройства.....	15
2.2. Разработка структурной схемы устройства, обоснование функциональных узлов.....	17
3. Экспериментальная оценка помехоустойчивости.....	26
Выводы.....	28
Список литературы.....	29
Приложения	

## Введение

На практике связующим звеном между микшерными пультами и оборудованием на сцене являются провода-мультикоры, где под общей оболочкой расположены сразу несколько жил-проводников, скрученных и заэкранированных попарно, а вся конструкция кабеля рассчитана на работу в трудных условиях эксплуатации. В связи с тем, что коммутация такого кабеля каждый раз осуществляется с учётом особенностей сцены и места проведения мероприятия, он должен быть достаточно прочным и одновременно гибким и при сматывании не закручиваться вокруг своей оси. Технические характеристики мультикора должны оставаться неизменными, независимо от температуры окружающей среды и других условий. Спецификация такого кабеля - передача аудиосигналов в любых условиях.

При разработке системы многоканальной передачи аудиосигналов возникают такие проблемы, как работа с различными источниками сигналов, которые имеют разные физические характеристики, устранение внешних помех и перекрестных наводок. Поэтому основной задачей разработчика является создание системы передачи звука, которая имеет характеристики максимально близкие к идеальным, при этом сохраняя приемлемую стоимость и высокие эксплуатационные характеристики.

## Постановка задачи

При построении большой системы звукоусиления, часто возникает необходимость большого количества соединений между элементами (ФОН, мониторный пульт, системы записи и пр.).

Использование аналоговых кабелей и кабелей-мультикоров может значительно увеличить стоимость проекта, а качество и надежность звукового тракта при этом падает. Это связано с большим количеством одновременно подключенных каналов, различным уровнем сигналов, передаваемых по жилам кабеля, наличие внешних помех, возникновение паразитных емкостей и перекрестных наводок.

Перекрёстные наводки являются одной из важных проблем. При контрольном прослушивании отдельного канала на микшерном пульте, помимо инструмента, подключённого к этому каналу, могут быть слышны посторонние звуки. Это явление существует, поскольку вместе с акустическими помехами существуют индуктивные наводки, возникающие в самом микшерном пульте, которые при правильных настройках можно если не свести к нулю, то хотя бы существенно минимизировать.

Полностью исключить появление перекрёстных наводок в проводимом мультикоре невозможно, однако симметричный сигнал минимизирует возможность возникновения этого эффекта. В зависимости от марки производителя и ценовой категории микшерного пульта показатель его переходного затухания на частоте 1 кГц и номинальной мощности может достигнуть максимальной отметки 90 дБ. Плохое качество сборки и монтажа многоконтактных разъёмов также может привести к возникновению перекрёстных наводок и помех.

Цифровые системы многоканальной передачи аудиосигналов обеспечивают высокое качество звучания, большой динамический диапазон и устойчивость к перегрузкам. Многоканальные аудиопотоки передаются между модулями входов/выходов по каналу передачи данных на расстояние

до 100 м с малой задержкой во времени, а автоматическая система коррекции ошибок делает систему отказоустойчивой.

Компоненты системы соединяются с помощью легкого и надежного кабеля CAT-5E, оборудованного разъемами RJ-45. Протяженность соединений системы может быть увеличена до 150м.

Задачей данной работы является анализ математической модели алгоритма передачи данных и создание на ее основе цифровой помехоустойчивой системы многоканальной передачи аудиосигнала.

Устройство должно обеспечить высокую надежность, которая заключается в защищенности от помех, возникающих при передаче по каналу связи, возможность исправления ошибок в передаваемой информации, работу в режиме реального времени, экономичность.

## 1. Обеспечение помехоустойчивости канала передачи данных

### 1.1. Помехи, возникающие в канале передачи данных

Канал передачи данных - это средства двухстороннего обмена данными, которые включают в себя линии связи и аппаратуру передачи (приема) данных. В зависимости от физической среды передачи данных каналы связи можно разделить на:

- проводные линии связи без изолирующих и экранирующих оплеток;
- кабельные, где для передачи сигналов используются такие линии связи как кабели "витая пара", коаксиальные кабели или оптоволоконные кабели;
- беспроводные (радиоканалы наземной и спутниковой связи), использующие для передачи сигналов электромагнитные волны, распространяющиеся по эфиру.

В цифровых системах многоканально передачи аудиосигналов каналы связи выполняются на основе кабеля типа «витая пара». По своим конструктивным особенностям кабели «витая пара» обеспечивают высокий уровень электромагнитной защищенности, но при монтаже идеальная свивка пар в кабеле нарушается, и в результате ожидаемые параметры защищенности не обеспечиваются.

Помехи, действующие в канале передачи данных, имеют как аддитивный, так и мультипликативный характер. Аддитивные помехи содержат три составляющие: флуктуационную, гармоническую, и импульсную.

Флуктуационная помеха в большинстве случаев имеет нормальное распределение. Причинами флуктуационных помех являются не только собственные шумы активных и пассивных элементов каналообразующей аппаратуры, но и шумы цепей кабельных линий, а также шумы, возникающие за счет внешних электромагнитных воздействий.

Одним из наиболее распространённых видов гармонических помех, появляющихся в линиях системы, является помеха на частоте переменного

тока 50 Гц и ее высшие гармоники, а также синусоидальные помехи более высоких частот, попадающие в канал за счет передачи какой-либо информации по соседним линиям связи.

Импульсные помехи, как флуктуационные, так и гармонические, чаще всего проникают в канал через линейный тракт системы передачи. Эти помехи на выходе канала представляют собой реакцию канала на ударное воздействие короткого импульса длительностью около 75 мкс.

Одним из основных параметров импульсной помехи является ее амплитуда, т. е. величина максимального выброса напряжения. Для оценки распределения амплитуд импульсных помех используют вероятность суммарного времени превышения импульсной помехой определенного порогового значения, или вероятность превышения амплитудой помехи определенного уровня. Важным параметром импульсной помехи является ее интенсивность  $V_{ип}$ , которая определяется количеством импульсных помех, превысивших заданный порог в час, превысивших заданные пороги [1].

Мультипликативные помехи в каналах связи выражаются в основном в изменении остаточного затухания, приводящего к изменениям уровня сигнала. Различают плавные и скачкообразные изменения уровня сигнала. Резкое занижение уровня относительно номинального называют перерывом сигнала.

При передаче сигнала по каналу связи возникают паразитные индуктивные и емкостные связи, которые вызывают помехи и соответственно приводят к искажению передаваемого сигнала.

Паразитные индуктивные и емкостные связи представляют собой физические факторы, характеризующие влияние электрических и магнитных полей, возникающих цепях любого функционирующего радиоэлектронного средства.

Паразитная индуктивная связь проявляется в ходе следующих физических процессов. В пространстве, окружающем любую цепь, по которой протекает электрический ток  $I$ , возникает магнитное поле,

постоянное или переменное. В соседних проводниках, находящихся в переменном магнитном поле, возбуждаются переменные э.д.с.  $E=I\omega M$ , где  $M$  - взаимная индуктивность. Величина  $M$  пропорциональна индуктивности влияющих друг на друга элементов цепей и обратно пропорциональна расстояния между ними. Например, взаимоиндуктивность двух медных прямых параллельных проводников длиной 100 мм и толщиной 0.02 мм при интервале между ними 2 мм составляет 0.07 мкГн, а при интервале 10 мм - 0.04 мкГн.

Емкостная паразитная связь возникает между любыми элементами схемы, прежде всего, между параллельно расположенными проводами, а также точками схемы и корпусом (шасси). Емкостная связь зависит от геометрических размеров элементов цепей и расстояния между ними. Например, емкость между двумя параллельными проводами длиной 100 мм и диаметром 0.1 мм уменьшается с 0.75 пф до 0.04 пф при увеличении расстояния между ними с 2 до 50 мм. Для проводов диаметром 2 мм эта емкость при тех же условиях снижается с 5 пф до 0.07 пф [7].

Из-за паразитных индуктивных и емкостных связей возникают паразитные наводки - нежелательные электромагнитные сигналы от проложенных в жгутах смежных кабелей. Наводки могут привести к недопустимому уровню помех в канале связи и, следовательно, потере информации.

## 1.2. Выбор типа канала передачи сигнала

При проектировании устройства приема-передачи информации важно выбрать тип канала связи, который обеспечивает наименьшую степень искажения сигнала.

При передаче сигнала по кабелю типа «витая пара» возникают индуктивные и емкостные наводки, которые приводят к искажению сигнала и, как результат, потере информации.



Кардинальным средством устранения индуктивных и емкостных связей является применение источников сигнала с дифференциальным токовым выходом и приемников с низкоомным (токовым) дифференциальным входом (рис. 1.1). Токи источников тока на рис. 1.1 строго равны между собой и противоположно направлены. Индуктивная наводка здесь мала, поскольку информация передается в форме тока, а емкостная наводка мала, поскольку при хорошей симметрии линии передачи она является синфазной и подавляется входным дифференциальным приемником.

### **Токовый дифференциальный канал**

Для получения высокого качества передачи сигнальные провода должны быть экранированы и выполнены в виде витой пары, чтобы обеспечить лучшую согласованность их продольных импедансов и импеданса на "землю". Различие в длине проводов и в частотных характеристиках их импедансов могут быть причиной появления помехи на высоких частотах.

Для получения высокой степени согласованности линий в витой паре лучше использовать провода, специально изготовленные и аттестованные для инструментальных индустриальных применений. Использование двух витых пар вместо одной, соединенных параллельно, позволяет снизить продольный импеданс проводов и повысить точность передачи сигнала.

Примером реализации дифференциального способа передачи токового сигнала может служить пара дифференциального токового передатчика SSM2142 и дифференциального приемника SSM2141 (Analog Devices), которые имеют коэффициент ослабления синфазного сигнала 100 дБ на частоте 60 Гц, и работают на нагрузку 600 Ом, создавая на ней максимальное падение напряжения 10В.

Недостатком токовых каналов передачи информации является то при бесконечно большом сопротивлении источника и приемника сигнала (относительно земли) напряжение емкостной наводки является максимальным. Вторым недостатком является низкое быстродействие,

ограниченное временем заряда емкости кабеля малым током источников  $I_1=I_2$ .

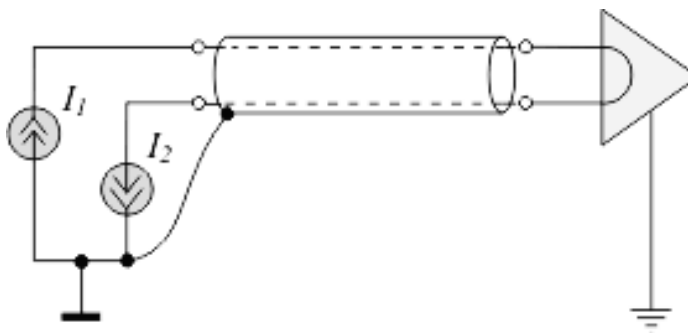


Рисунок 1.1 - Дифференциальный источник и приемник тока

### Балансный канал

Наиболее совершенной на настоящий момент системой передачи сигналов является балансная цепь, реализованная в интерфейсах RS-485 и CAN (рис. 1.2). В ее основе лежат следующие принципы:

- применение балансного источника сигнала;
- применение витой пары с идентичными характеристиками проводов;
- применение дифференциального приемника сигнала;
- передача мощности (а не тока или напряжения).

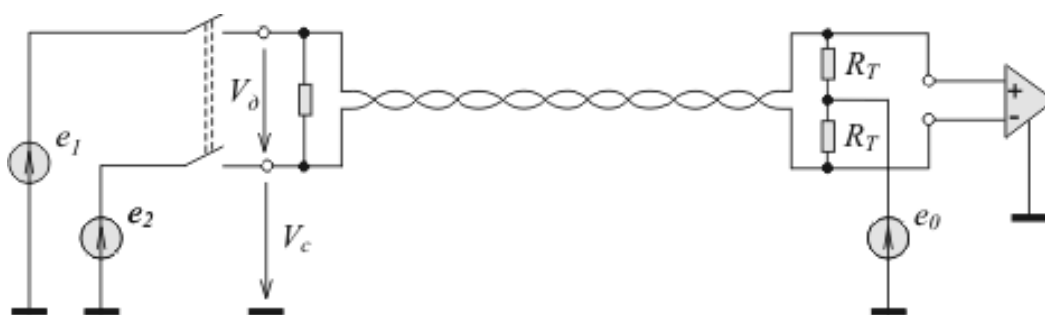


Рисунок 1.2 - Балансная схема передачи дифференциального сигнала

Идея, положенная в основу балансного канала передачи электрических сигналов, состоит в компенсации индуктивных и емкостных наводок и в ослаблении кондуктивных. Для обеспечения хорошей компенсации помех в дифференциальном приемнике сигнала они должны быть одинаковы на обоих входах дифференциального усилителя. Для этого:

- источник сигнала должен иметь идентичные выходные сопротивления по обоим выходам как на постоянном токе, так и во всем диапазоне частот передаваемых сигналов;

- линия связи (витая пара, лучше экранированная) должна иметь одинаковые для обоих проводов пары продольные сопротивление и индуктивность (для идентичности индуктивных наводок);

- витая пара должна иметь одинаковые емкости на землю для обоих проводов пары (для идентичности емкостных наводок);

- дифференциальный приемник должен иметь одинаковые частотные характеристики по обоим входам и высокую точность операции вычитания.

Для хорошей компенсации помех дифференциальный приемник должен иметь строго одинаковые коэффициенты передачи по обоим каналам и высокую точность операции вычитания. Для подавления синфазной помехи приемник должен иметь большой коэффициент подавления синфазного сигнала. Помехоустойчивость канала улучшается также благодаря тому, что балансный передатчик позволяет повысить в 2 раза размах передаваемого сигнала.

Перечисленные принципы успешно реализованы в интерфейсе RS-485, чем и объясняется его высокая популярность.

Для передачи сигнала в разрабатываемом устройстве выбран балансный канал, так как метод балансной передачи сигнала устраняет индуктивные и емкостные наводки, дифференциальный приемник подавляет синфазную помеху.

### 1.3. Обзор методов помехоустойчивого кодирования

Канал передачи, в котором возможны искажения, называется каналом с помехами (или шумами). Очевидно, что наличие помех приводит к потере информации. Чтобы в условиях помех получить на приемнике требуемый объем информации, необходимо принимать специальные меры. Одной из таких мер является введение избыточности в передаваемые сообщения; при

этом трансмиттер информации выдает заведомо больше символов, чем это было бы нужно при отсутствии помех [2].

Рассмотрим и проведем сравнение основных помехоустойчивых кодов, которые позволяют обнаруживать и исправлять ошибки в информационном сообщении с целью выбора наиболее оптимального решения для использования в разрабатываемом устройстве.

### **Код с проверкой на чётность**

Самым простым линейным блочным кодом является код, построенный с помощью одной общей проверки на четность, в котором проверочным разрядом является результат суммирования по модулю 2 всех бит пакета. Преимуществом данного кода является его простота реализации и скорость вычисления. Недостатком кода с проверкой на четность является то, что он может обнаружить только ошибку нечетной кратности, но не показывает, какой именно бит является искаженным, и не позволяет ошибку исправить.

### **Код Хемминга**

Коды Хемминга - коды, в которых проверочные разряды формируются линейным преобразованием информационных разрядов. Недостатки: код Хемминга может исправлять только одиночные ошибки. Коды Хэмминга, в основном применяются в качестве составляющих элементов более эффективных каскадных кодов [2].

### **БЧХ код (Код Боуза — Чоудхури — Хоквингхема)**

БЧХ-код является циклическим кодом, который можно задать порождающим полиномом. Коды БЧХ обладают хорошими корректирующими способностями и позволяют обнаруживать и исправлять ошибки с учетом группирования, что очень важно для реальных каналов. При этом они обладают нечетными значениями минимального кодового расстояния. Циклические коды БЧХ получили применение в аппаратуре передачи данных.

## **Коды Рида – Соломона**

Коды Рида-Соломона — недвоичные циклические коды, позволяющие исправлять ошибки в блоках данных. Элементами кодового вектора являются не биты, а группы битов (блоки). Коды Рида-Соломона позволяют исправлять пакеты ошибок. Существуют классы кодов Рида-Соломона, позволяющие исправлять многократные пакеты ошибок. Коды Рида-Соломона применяются для исправления ошибок во многих системах: устройствах памяти; беспроводных или мобильных коммуникациях; спутниковых коммуникациях; цифровом телевидении, скоростных модемах [3].

### **1.4. Выбор помехоустойчивого кода**

Соответствие отправленного и полученного информационных пакетов является основной задачей помехоустойчивого кодирования. Помехи в канале связи, которые перечислены в п. 1.1., могут существенно исказить передаваемую информацию. Высокие требования к помехозащищенности обусловлены сферой применения разрабатываемого устройства: высококачественное воспроизведение аудиосигнала после передачи его по каналу связи зависит от способности примененного кода восстанавливать данные после возникновения различных типов ошибок: случайных, единичных, перекрестных, пакетных. Для того чтобы информационный пакет был восстановлен в исходный вид после передачи по каналу связи с определенной вероятностью искажения бита, необходимо применить помехоустойчивый код, который обеспечивает полное восстановление искаженной информации.

С целью экспериментального определения наиболее эффективного кодирующего алгоритма, который обеспечивает необходимую степень защищенности от помех, был спроектирован и создан макет устройства, которое имеет в своем составе передатчик информации, модель канала связи, приемник информации.

## **2. Практическая реализация цифровой помехоустойчивой системы многоканальной передачи аудиосигнала**

В данном пункте разработаны алгоритм работы и структурная схема цифровой системы многоканальной передачи аудиосигнала. Устройство состоит из двух основных блоков: передатчика и приемника.

Функции передатчика:

- автоматическая регулировка поступающего на вход аналогового сигнала;
- дискретизация аналогового сигнала и представление последнего в цифровой форме;
- управление аналогово-цифровым преобразованием;
- захват и сохранение сигнала с 16 входных каналов;
- помехоустойчивое кодирование информационного пакета заданным кодом;
- формирование информационного пакета для передачи;
- модулирование информационного пакета для передачи;
- реализация схемы задержки на 1 такт;
- преобразование сигнала для передачи в канал связи;
- передача информационного пакета в канал связи по трем линиям.

Функции приемника:

- преобразование входного сигнала в логические уровни;
- захват информационного пакета с канала связи;
- реализация схемы задержки на 1 такт;
- реализация сравнения сигналов, полученного с трех линий канала;
- демодулирование входного сигнала;
- сохранение информационного пакета в память;
- декодирование полученного информационного пакета;
- выдача информационного пакета в порт;
- преобразование цифрового сигнала в аналоговый;
- тактирование цифро-аналогового преобразователя.

## 2.1. Разработка алгоритма работы устройства

В соответствии с поставленной задачей и учитывая требования к функциям блоков приемника и передатчика, составим алгоритм работы проектируемого устройства.

К входному шестнадцатиразрядному порту устройства обработки, которое представляет собой микроконтроллер, подключены 16 аналогово-цифровых преобразователей с разрядностью 16 бит. При запуске устройства два внутренних таймера микроконтроллера начинают выдавать тактовые импульсы для аналогово-цифровых преобразователей. Первый таймер с частотой синхроимпульсов 48 кГц предназначен для задания частоты дискретизации аналогового сигнала в АЦП. Второй таймер с частотой 768 кГц обеспечивает выдачу цифрового сигнала через последовательный интерфейс АЦП в порт микроконтроллера. С каждым синхроимпульсом таймера 2 аналогово-цифровые преобразователи осуществляют выдачу одного бита преобразованного сигнала. По синхросигналу таймера 2 поступившие на вход порта биты считываются и записываются в буфер памяти, который имеет 16 ячеек по 16 бит. При заполнении буфера памяти устройство начинает обработку информационного пакета. Так как на порт ввода информация поступает непрерывно, то с целью ее записи используется поочередно два буфера памяти: с первого производится считывание записанной ранее информации, во второй производится запись информации с порта. При заполнении буфера памяти запускается алгоритм кодирования с помощью помехоустойчивого кода Рида-Соломона. Закодированный информационный пакет сохраняется в буфер памяти. Производится формирование информационного пакета и подготовка его к передаче по каналу связи. Формирование информационного пакета заключается в программном сдвиге на 1 такт передачи пакета по трем каналам связи с целью помехозащищенности. Перед началом передачи в порт передается информационная последовательность бит, которая дает приемнику команду о поступлении информационного пакета. После происходит модуляция

сигнала выбранным типом модулирования и преобразование логических уровней в двухполярный сигнал. Таким образом, сформированный информационный пакет передается в канал связи. По окончании передачи данных передатчик выдает в порт информационную последовательность, которая сигнализирует о завершении передачи.

На стороне приемника изначально производится обратное преобразование двухполярного сигнала в логические уровни нуля и единицы. Перед поступлением информационного пакета приемник получает от передатчика команду для подготовки к приему в виде последовательности бит и устройство синхронизации настраивается на прием данных с порта. Происходит демодуляция цифрового сигнала. Так как по трем линиям канала связи был передан информационный пакет, со смещением на 1 такт относительно предыдущей линии, то осуществляется обратный сдвиг с целью «выравнивания» поступающих данных. Производится сравнение по мажоритарному принципу поступающих по трем линиям бит. Если в одной из линий бит был искажен вследствие влияния помехи, то необходимое значение восстанавливается исходя из остальных двух сравниваемых бит. После прохождения сравнения по мажоритарному принципу информация записывается в буфер памяти для временного хранения. Когда прием и предварительная обработка информационного пакета закончены, и он полностью записан в буфер, начинается процедура декодирования информации выбранным ранее методом. Восстановленный информационный пакет записывается в буфер памяти, после чего происходит подготовка его к выдаче в порт вывода. Сформированные битовые последовательности, где каждый из 16 бит соответствует определенному каналу, отправляются в порт. С каждой отправкой битовой последовательности производится тактирование цифро-аналогового преобразователя. ЦАП принимает поступающую на его вход по последовательному интерфейсу информационную последовательность и преобразует в аналоговый сигнал.



## 2.2. Описание структурной схемы устройства, обоснование функциональных узлов.

Для реализации функций передатчика и приемника требуются функциональные блоки, структурные схемы которых приведены в приложении 2 и в приложении 3.

Передатчик имеет 16 входных каналов. Каждый канал подключен к блоку, который имеет в своем составе предварительный усилитель, блок автоматической регулировки усиления и аналогово-цифровой преобразователь.

**Устройство управления.** Задачей устройства управления является контроль над всеми действиями передатчика, выдача управляющих сигналов на структурные блоки устройства, тактирование АЦП, синхронизация работы структурных узлов. Устройство управления реализовано на базе микроконтроллера.

**Предварительный усилитель сигнала с блоком автоматической регулировки усиления (АРУ).** Предназначается для согласования входного напряжения АЦП с уровнем входного сигнала. При низком уровне входного сигнала АРУ повышает коэффициент усиления предварительного усилителя; при слишком высоком уровне входного сигнала, который превышает максимально допустимое входное напряжение АЦП, АРУ понижает коэффициент усиления, то есть производит компрессию входного сигнала.

**Аналогово-цифровой преобразователь.** Согласно теореме Котельникова, частота дискретизации сигнала должна быть минимум в два раза выше максимальной частоты этого сигнала. Максимальная частота звука, воспринимаемая человеком – 22 кГц, следовательно, частота дискретизации – 44 кГц. АЦП должен удовлетворять следующим условиям: разрядность 16 бит, частота дискретизации сигнала 44100 Гц, наличие последовательного интерфейса для выдачи цифрового сигнала. Требуемая скорость выдачи сигнала по последовательному интерфейсу равняется 705600 бит/с.

При работе АЦП в режиме последовательной выдачи кода необходимо применение двух источников синхроимпульсов: первый обеспечивает требуемую частоту дискретизации сигнала, второй тактирует выдачу последовательного кода.

Так как все 16 АЦП работают в синхронном режиме, то их соответствующие входы CLD и CLK подключены к двум таймерам.

**Источник опорного напряжения** предназначен для поддержания постоянного напряжения на АЦП. Опорное напряжение является эталонной мерой, с которой сравнивается сигнал, поступающий на преобразователь.

Функцию сбора, обработки и передачи информации выполняет устройство, реализованное на микроконтроллере. В связи с разнообразием выполняемых функций его целесообразно разделить на несколько условных блоков и рассматривать их по отдельности. Таким образом, можно выделить следующие функциональные блоки: порт ввода, буфер памяти, кодировщик помехоустойчивого кода, формирователь информационного пакета, таймеры, модулятор сигнала, порт выдачи сигнала в канал связи, устройство управления. Приведем детальное описание этих блоков с алгоритмами их функционирования.

**Порт ввода** – 16-разрядный порт микроконтроллера. К каждому разряду порта подключен отдельный канал. При передаче сигнала от АЦП производится считывание поступившей на порт информации с дальнейшей ее записью в буфер памяти. Когда буфер памяти заполнен, запись в порт прекращается.

**Буфер памяти.** Буфер памяти предназначен для временного хранения полученного сигнала. Размер буфера определяется по следующему принципу: АЦП за один такт преобразования выдает по последовательному порту 16 бит информации, к порту ввода подключено 16 АЦП. Следовательно, требуемый размер буфера памяти равен произведению разрядности АЦП на их количество. Требуемый размер буфера памяти – 256

бит, то есть 32 байта, в его качестве используется оперативная память микроконтроллера.

С целью временного хранения полученного сигнала используется два буфера памяти. Так как прием входного сигнала осуществляется непрерывно и на время обработки информационного пакета один из буферов будет занят хранимой в нем информацией, то запись производится во второй буфер памяти. При обработке информации со второго буфера запись осуществляется в первый буфер памяти.

**Кодировщик помехоустойчивого кода.** Согласно п. 1.4. для помехоустойчивого кодирования выбран код Рида-Соломона. Существует два способа кодирования с помощью данного кода: аппаратный и программный. С целью уменьшения аппаратных затрат выбран программный способ кодирования.

**Буфер памяти.** Предназначается для временного хранения закодированной информации, которая поступает из кодировщика. Буфер памяти расположен в оперативной памяти микроконтроллера.

**Формирователь информационного пакета.** Закодированная и подготовленная к передаче информация хранится в Буфере памяти 2. Задача формирователя информационного пакета состоит в формировании требуемой последовательности бит и ее пересылке в выходной порт устройства.

С целью большей защиты от помех информационного пакета, передаваемого по каналу связи, и большей вероятности получения его в том виде, в котором он был отправлен, применяется следующий метод.

Так как кабель CAT-5E, который служит каналом передачи информации, имеет четыре пары проводов, то передача данных осуществляется отдельно по трем парам проводов: по каждой паре проводов данные передаются со смещением на один такт относительно предыдущей пары.

Примененный метод передачи имеет следующее обоснование: для меньшей вероятности появления ошибки в передаваемых данных один и тот же сигнал передается по трем линиям одновременно. На стороне приемника

при получении информационного пакета проводится побитное сравнение полученных данных по мажоритарному принципу «два из трех» и принимается решение о поступившем на вход бите информации. Однако помеха одновременно воздействует на канал связи в целом и при синхронной передаче сигнала искажению подвергаются данные во всех трех линиях. Таким образом, три сравниваемых бита будут искажены, и ошибка на стороне приемника не обнаружена. В случае смещения выдачи информационного пакета по каждой линии на 1 бит в момент времени воздействию помехи будет подвержен только один бит пакета. Два остальных бита либо запаздывают на такт, либо опережают его, следовательно, вероятность влияния помехи на эти биты меньше. На стороне приемника производится обратное смещение данных, полученных с трех линий канала передачи. Происходит сравнение по мажоритарному принципу трех бит входящей информации. Если при передаче один бит был искажен, то результат сравнения все равно будет правильным, так как искажения двух остальных бит не произошло.

Пример передачи данных по каналу связи согласно описанному методу приведен ниже.

**Пример.** Исходный пакет: 1110100101011000

В канал связи передаются данные со смещением на 1 бит относительно предыдущей линии.

Такт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Линия 1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
Линия 2	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
Линия 3	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0

Допустим, помеха влияет на данные во время 3, 7, 10, 15 тактов передачи. В результате искажения на приемник поступает следующий информационный пакет:

Линия 1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
Линия 2	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
Линия 3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

После обратного смещения данных на 1 бит данные на стороне приемника выглядят следующим образом:

Линия 1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
Линия 2	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
Линия 3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

Произведем сравнение бит по мажоритарному принципу:

Линия 1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
Линия 2	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
Линия 3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Результат	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0

Полученный пакет: 1110100101011000

Сравнение исходящего информационного пакета с полученным показывает, что эти пакеты одинаковы.

Для подтверждения описанного метода передачи данных, было смоделировано канал связи с помехами, через который пропущено три информационных пакета, смещенных один относительно другого на один бит. Вероятность искажения бита при передаче – 0,02%. При получении было произведено обратное смещение информационных пакетов на 1 бит и

поочередное сравнение по мажоритарному принципу соответствующих бит трех пакетов. Результат сравнения сохранен и сравнен с исходным информационным пакетом. Сравнение показало, что полученный и исходный информационные пакеты не имеют различий, то есть ошибки возникшие при передаче данных по каналу связи устранены.

**Устройство синхронизации.** Предназначено для синхронизации передающего и принимающего устройств при передаче информационного пакета. После формирования информационного пакета устройство синхронизации посылает по четвертой линии канала связи последовательность бит, которая служит для приемника сигналом для подготовки к приему пакета. Затем осуществляется передача информационного пакета. По окончании передачи устройство синхронизации посылает последовательность бит, которая оповещает приемник о завершении передачи текущего информационного пакета. Устройство синхронизации реализовано программно.

#### **Модулятор сигнала.**

Важной задачей передачи сигнала по каналу связи является выбор кода в линии связи. В разрабатываемом устройстве с этой целью применяется код Манчестер-II.

Он относится к самосинхронизирующимся кодам и обеспечивает хорошую помехозащищенность. Благодаря своим свойствам получил большое распространение в локальных сетях: самый распространенный протокол локальных сетей Ethernet использует именно этот тип модуляции.

Используемый для передачи по каналу связи код Манчестер по определению двухполярный (одну половину времени – положительный, другую половину времени отрицательный). Благодаря этому свойству данный код имеет большие преимущества. При этом не требуется дополнительного источника питания для линии связи, резко уменьшается влияние низкочастотных помех, которые не проходят через трансформатор, легко решается проблема согласования.

**Порт выдачи сигнала в канал связи.** Передача сигнала по каналу связи осуществляется через последовательный интерфейс передачи данных микроконтроллера.

**Преобразователь уровней.** Для передачи сигнала выбран балансный канал связи. Его особенность заключается в том, что этот канал является двухполярным, следовательно, необходимо преобразовывать сигнал, передаваемый микроконтроллером в виде логических нуля и единицы в двухполярный сигнал. Преобразователем уровней служит схема, которая превращает уровни логической единицы и логического нуля в положительный и отрицательный уровни соответственно. Главным преимуществом двухполярной передачи данных является устранение синфазных помех [6] .

Преобразованный сигнал передается в канал связи.

В состав приемника входят следующие функциональные блоки.

**Преобразователь уровней сигнала.** Задачей преобразователя уровня сигнала на стороне приемника является обратное преобразование положительного и отрицательного уровней сигнала в уровни логики, применяемой в микроконтроллере.

**Входной порт.** 16-разрядный порт микроконтроллера. Функцией входного порта является прием сигнала, который поступает с канала связи. Поступивший на порт сигнал передается на демодулятор сигнала.

**Демодулятор сигнала** осуществляет обратное преобразование кода линии связи Манчестер в логические уровни для обработки микроконтроллером. Реализован программно.

**Устройство задержки.** Информационные пакеты, поступив на приемник по трем линиям канала связи, являются смещенными один относительно другого на один такт. Устройство задержки производит обратное смещение на один такт поступающего по каждой из трех линий кода. Задержка осуществляется программно.

**Мажоритарный элемент.** При прохождении по каналу связи сигнал подвергается воздействию помех и происходит искажение информации. На стороне приемника производится сравнение по мажоритарному принципу поступающего по трем линиям канала связи соответственных бит кода. Так как суть мажоритарного принципа заключается в выборе «два из трех», то при искажении бита, поступившего по одной с линий связи, информация будет восстановлена с двух оставшихся бит в случае, если они не были искажены воздействием помехи. Мажоритарный принцип реализован программно.

**Устройство синхронизации** получает последовательность бит со стороны передатчика, которая сигнализирует о поступлении нового информационного пакета. После приема данной последовательности бит с четвертой линии канала связи устройство синхронизации выдает команду на устройство управления, которое начинает запись поступающего пакета в буфер памяти и дальнейшую его обработку.

**Буфер памяти** служит для записи поступающего информационного пакета, его временного хранения на время обработки. Буфер памяти находится в оперативной памяти микроконтроллера.

**Декодер помехоустойчивого кода** применяется для декодирования информационного пакета, закодированного с помощью метода помехоустойчивого кодирования Рида-Соломона.

Декодер реализован программно.

**Буфер памяти.** Предназначен для хранения декодированного информационного пакета с целью дальнейшей его передачи на порт вывода. Буфер памяти расположен в оперативной памяти микроконтроллера. Как и буфер хранения на стороне передатчика, он вмещает 16 каналов по 16 бит, следовательно, имеет размерность 256 бит, то есть 32 байта.

**Устройство выдачи в порт** по команде управляющего устройства обращается к буферу памяти, извлекает содержащийся в нем информационный пакет и формирует пакеты по 16 бит для выдачи их в порт



вывода, каждый бит соответствует одному каналу. Устройство выдачи в порт реализовано программно.

**Порт вывода** имеет 16 разрядов, предназначен для вывода сформированных устройством выдачи в порт 16-битных пакетов. По такту устройства управления осуществляется вывод следующего пакета в порт, таким образом, производится последовательная передача информационной последовательности на 16 каналов.

**Цифро-аналоговый преобразователь** по последовательному интерфейсу получает с порта вывода информационную последовательность. Цифро-аналоговый преобразователь должен иметь характеристики: разрядность 16 бит, частота преобразования 44100 Гц. Следовательно, скорость приема должна быть не менее 705600 бит/с.

### 3. Экспериментальная оценка помехоустойчивости

С целью определения наиболее эффективного метода кодирования, с помощью разработанного экспериментального устройства каждым из перечисленных в пункте 1.3. кодирующих алгоритмов было обработано три звуковых сигнала:

- 1) Синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц;
- 2) Аудиофайл 1;
- 3) Аудиофайл 2.

Выходные характеристики сигналов:

- частота дискретизации 48 кГц;
- разрядность 16 бит.

Алгоритм кодирования реализован программно с целью использования и исследования различных методов кодирования и моделирования различных видов ошибок. Закодированные информационные пакеты были пропущены через промоделированный канал связи с вероятностями искажения бита 0,001%, 0,01%, 0,1%, 1%, 5%. Искаженные пакеты были декодированы и сравнены с исходными. Результаты сравнения представлены в таблице 1.4.1.

На основании результатов эксперимента сделаны выводы о возможности применения кода при заданной вероятности ошибки.

Внесение помех в информационные пакеты было промоделировано программно. Листинг программы приведен в приложении 1.

Результаты проведенного эксперимента показали следующее:

- код с проверкой на четность не удовлетворяет требуемым условиям, так как способен только обнаруживать ошибки, но не исправлять их;
- код Хемминга не обеспечивает требуемой помехозащищенности, так как при малой вероятности ошибки 0,001% несоответствие между исходным и полученным пакетами составляет 0,0124%. При увеличении вероятности возникновения ошибки до 0,1% несоответствие составляет 0,51%;

- при вероятности возникновения ошибки 0,01% код БЧХ не обеспечивает полного восстановления информационного пакета;

- при высокой вероятности возникновения ошибки ( $P=5\%$ ) полное восстановление информационного пакета обеспечивает код Рида-Соломона.

Таблица 1.4.1. – Результаты сравнение декодированных пакетов

Инф. пакет	Проверка на четность	Код Хемминга	Код БЧХ	Код Рида-Соломона
<b>Вероятность искажения <math>P=0.001\%</math></b>				
1	Искажение	0,0124%	0%	0%
2	Искажение	0,00145%	0%	0%
3	Искажение	0,00201%	0%	0%
<b>Вероятность искажения <math>P=0.01\%</math></b>				
1	Искажение	0,224%	0%	0%
2	Искажение	0,15%	0%	0%
3	Искажение	0,352%	0%	0%
<b>Вероятность искажения <math>P=0.1\%</math></b>				
1	Искажение	0,51%	0%	0%
2	Искажение	0,45%	0,01%	0%
3	Искажение	0,452%	0,01%	0%
<b>Вероятность искажения <math>P=1\%</math></b>				
1	Искажение	0,99%	0,01%	0%
2	Искажение	1,4%	0,012%	0%
3	Искажение	1,31%	0,012%	0%
<b>Вероятность искажения <math>P=5\%</math></b>				
1	Искажение	11%	0,013%	0%
2	Искажение	10,7%	0,013%	0%
3	Искажение	10,1%	0,012%	0,01%

Сравнение результатов эксперимента показало, что код с проверкой на четность, код Хемминга, код БЧХ не удовлетворяют требованиям к помехозащищенности, так как не обеспечивают требуемой степени восстановления данных при заданной вероятности ошибки.

Код Рида-Соломона имеет наибольшую степень помехоустойчивости – при вероятности возникновения ошибки в канале связи  $P=5\%$  данный метод кодирования обеспечивает полное восстановление исходного информационного пакета.

## Выводы

В данной работе исследована математическая модель алгоритма передачи данных по каналу связи и применением помехоустойчивого кодирования. Рассмотрены основные помехи, возникающие в каналах связи, и методы их устранения. Совершен обзор и экспериментальный анализ методов помехоустойчивого кодирования.

На основании данной модели с учетом характеристик канала связи и требований к аппаратуре была спроектирована и разработана экспериментальная цифровая система многоканальной передачи аудиосигнала, задачей которой является передача по каналу связи в цифровом виде сигналов с нескольких источников.

С целью выбора наиболее эффективного помехоустойчивого кода каждым из кодирующих алгоритмов были закодированы три аудиосигнала. Сигналы пропущены через промоделированный канал связи с различными типами помехам и заданной вероятностью искажения бита: 0,001%, 0,01%, 0,1%, 1%, 5%. После было проведено декодирование и сравнение восстановленных информационных пакетов с исходными. Эксперимент показал, что наиболее эффективным с рассмотренных помехоустойчивых кодов является код Рида-Соломона, который при заданной вероятности ошибки  $P=5\%$  обеспечивает 100% вероятность исправления ошибки.

## Список использованных источников

1. Чернега В.С., Василенко В.А., Бондарев В.Н. Расчет и проектирование технических средств обмена и передачи информации. – Москва: Высшая школа, 1990. – 233 с.
2. К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева Теория электрической связи: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
3. В.М. Охорзин, Д.С. Кукунин, М.С. Новодворский Построение каскадных кодов на основе кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема и Рида-Соломона Методические указания по курсовому проектированию. – Санкт-Петербург, 2002
4. [http://pcbheaven.com/wikipages/manchester\\_coding/](http://pcbheaven.com/wikipages/manchester_coding/) - Giorgos Lazaridis, Manchester and Differential Manchester Code
5. [http://atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc9164.pdf](http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc9164.pdf) - Manchester Coding Basics
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т.1. Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотип.— М.: Мир, 1984. – 601 с.
7. В.Г.Пекелис, В.Я.Симхес Паразитные связи и наводки в быстродействующих ЭЦВМ. - Минск: Наука и техника, 1967 – 110 с.

## Приложение 1

```
program Project1;
{$APPTYPE CONSOLE}
uses
  SysUtils;
var
  numbit: integer;
  f_in, f_out: file of boolean;
  buf: boolean;
  float: single;
begin
  assignfile (f_in, 'c:\sound1.wav');
  assignfile (f_out, 'c:\sound2.wav');
  reset (f_in);
  rewrite (f_out);
  writeln('Processed...') ;
  while not eof(f_in) do
    begin
      blockread(f_in, buf, sizeof(buf));
      float:=Random;
      if float>0.9999 then
        buf:=not buf;
      blockwrite(f_out, buf, sizeof(buf));
    end;
  end.
```