

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО”

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Постановка лабораторной работы по цифровой обработке  
сигналов “Исследование распознавания зашумленных сигналов  
при помощи согласованного фильтра”**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 “Радиофизика”  
физического факультета

Шевцова Ивана Юрьевича

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_

А.В. Шабунин

Заведующий кафедрой

доктор физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_

В.С. Анищенко

Саратов, 2016 г.

## Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Теоретическая часть</b>	<b>5</b>
2.1	Физическое кодирование в цифровых сетях, решаемые задачи .	5
2.2	Виды кодирования . . . . .	6
2.3	Метод декодирования на основе согласованного фильтра . . . .	7
<b>3</b>	<b>Создание лабораторной установки</b>	<b>9</b>
3.1	Описание структуры и возможностей . . . . .	9
3.2	Экспериментальное исследование . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Выводы</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Список литературы</b>	<b>13</b>

## 1 Введение

Темой данной выпускной квалификационной работы является создание компьютерной лабораторной работы по имитационному моделированию работы согласованного фильтра как детектора импульсных радиосигналов в присутствии шума и при наличии частотных искажений. В ее теоретической части расписаны какие виды физического кодирования существуют и какие при этом решаются задачи. В практической же части разобрано строение созданной в LabVIEW лабораторной установки, произведены ее экспериментальные исследования и анализ полученных результатов.

В самом общем случае, под фильтром в электронике понимается некое устройство, предназначенное для выделения и/или подавления некоторых желательных и/или нежелательных спектральных компонент в электрическом сигнале. Они могут быть как аналоговыми, так и цифровыми; как пассивными, так и активными; как линейными, так и нелинейными; как рекурсивными, так и нерекурсивными.

В аналоговой электронике широко используются фильтры, которые выполняются как на пассивных элементах (конденсаторах, резисторах и индуктивностях), так и на активных (операционные усилители и специализированные микросхемы). Но в наш 21-й век настолько развита цифровая электроника, что аналоговая, по большей части, осталась только в некоторых специфических областях[8].

Массивы передаваемой и обрабатываемой цифровой информации на сегодняшний день огромны. Нас окружают локальные и беспроводные сети, оптоволоконные линии связи, сотовые телефонные сети различных стандартов. Все они работают на базе цифровой электроники, в которой, по очевидным причинам, аналоговые фильтры использовать не всегда возможно или удобно.

Базово, цифровой фильтр имеет те же цели, что и аналоговый, то есть, его задачами является подавление/выделение нежелательных/требуемых спектральных компонент сигнала. Однако, свойства такого фильтра дискретны и по факту он реализовывается в виде математической формулы, которая вычисляется программно (например, с помощью микропроцессора, ЭВМ) или аппаратно (например, ПЛИС)[7].

Такая реализация фильтра имеет как и преимущества, которые выражают-

ся высокой точностью и стабильностью (нет допусков и дрейфов компонентов), гибкостью и компактностью (не требуется громоздких элементов и их изменения для перенастройки). Но так же имеются и минусы: ограниченная применимость при высокочастотных сигналах (вследствии необходимости использования дорогих высокочастотных и точных ЦАП/АЦП), возможные трудности с работой в режиме реального времени (в силу затратности вычислительных операций, особенно, которые реализованы программным методом).

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Физическое кодирование в цифровых сетях, решаемые задачи

Под физическим кодированием в цифровых сетях понимается способ представления данных (кодирование), которое используется для передачи электрического сигнала по линии связи. Обычно сигнал представляется в виде некоторой волны, которая подобрана оптимально для конкретного физического канала и принимающего оборудования. Форма напряжения или тока, которая используется, входит в понятие кодирования[9].

При аналоговом сигнале модуляция происходит на основе некоторого синусоидального сигнала путем изменения его амплитуды, частоты или фазы. Цифровое же кодирование информации происходит на основе последовательности прямоугольных импульсов. Различие между ними в том, что кодируются различные виды сигналов (непрерывный или дискретный), используется различная ширина спектра при передаче, а так же требуется различные элементы для их реализации.

В цифровом кодировании сигнала используются потенциальные и импульсные коды. В первых для представления символов “0” и “1” используется только значение напряжения или тока сигнала, причем перепады, которые формируют законченные импульсы, никак не принимаются во внимание. Когда как вторые позволяют представлять дискретные символы или импульсами с определенной полярностью, или частью импульса, то есть, перепадом тока или напряжения с определенным направлением[2].

Способ кодирования для передачи информации с помощью прямоугольных импульсов необходимо выбирать из следующих соображений:

- Чтобы он при одном и том же битрейте занимал наименьшую ширину спектра. Так можно обеспечить более высокую скорость передачи при постоянной полосе пропускания канала связи. Так же к спектру можно предъявить требование отсутствия постоянной составляющей, чтобы была возможность гальванической развязки канала связи.
- Чтобы обеспечивалась синхронизация передатчика и приемника, чтобы последний знал в какой момент времени необходимо производить считывания сигнала с канала связи. Порой применяются методы кодирования, которые обладают свойством самосинхронизации.

- Чтобы была возможность детектирования ошибок передачи
- Чтобы был легок в реализации

Данные соображения в некотором смысле являются взаимно противоречивыми, так что любой метод физического кодирования обладает как преимуществами, так и недостатками.

## 2.2 Виды кодирования

Существует множество различных видов кодирования, причем дискретный сигнал может принимать более, чем два вида форм. Довольно часто используются униполярное, полярное, биполярное и манчестерское кодирование. Рассмотрим несколько популярных систем кодирования[2].

- **NRZ.** Является потенциальным кодированием без возврата к нулю. В прямом варианте для передачи символа “0” используется нулевое напряжение, а для символа “1” - некоторое напряжения. При обратном варианте (Рисунок 1) для кодирования “0” используется наличие напряжения, а для “1” - его отсутствие.

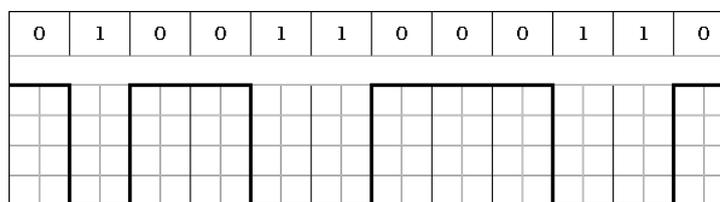


Рисунок 1 - осциллограмма обратного варианта NRZ кодирования

Хотя NRZ и является простым в реализации и имеет высокую скорость передачи, но у него есть и недостаток - наличие постоянной составляющей, что делает невозможным создание гальванической развязки канала связи. Так же можно отметить повышенные требования к синхронизации приемника и передатчика, которая выполняется стартовыми и стоповыми битами.

- **NRZI.** Смысл данного вида кодирования состоит в том, что при передаче символа “1” происходит смена логического уровня сигнала (между нулевым и некоторым напряжением). Когда как при передаче символа “0” изменения уровня сигнала не происходит. Графическое представление данного вида кодирования представлено на Рисунке 2.

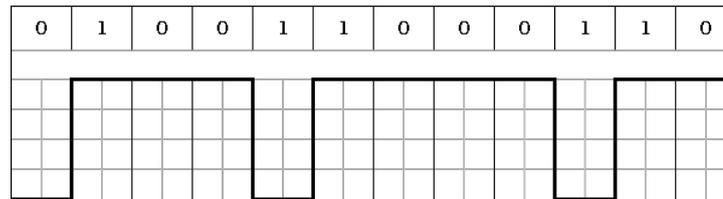


Рисунок 2 - осциллограмма NRZI кодирования

Благодаря своим особенностям, реализация детектирования ошибок передачи очень проста (как и реализация самого кодирования NRZI). Однако, данный вид кодирования не обладает самосинхронизацией. Гальваническая развязка канала связи хоть и возможна, но может затруднена из-за возможного появления постоянной составляющей в сигнале.

- **Манчестерский код.** При использовании данного кодирования, такт передачи разделяется на две части, причем символы кодируются перепадом на стыке этих частей. Так символ “1” кодируется перепадом от низкого логического уровня к высокому, а символ “0” - наоборот (однако, в некоторых стандартах это может быть инвертировано). Пример манчестерского кодирования представлен на Рисунке 3.

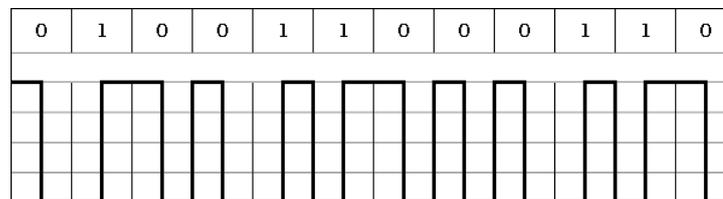


Рисунок 3 - осциллограмма Манчестерского кодирования

Важной особенностью данного кодирования является то, что в течении такта обязательно будет происходить изменение логического уровня сигнала. Из этого вытекает, что имеет место быть самосинхронизация сигнала, а так же отсутствие постоянной составляющей (что дает возможность сделать гальваническую развязку).

### 2.3 Метод декодирования на основе согласованного фильтра

Согласованным фильтром является оптимальный линейный фильтр, который строится на основе известной информации об характеристиках требуемого сигнала и присутствующего нежелательного шума. Именно для детектирования сигналов известной формы из шумоподобного сигнала и предназначены данный вид фильтров. В качестве оптимальности такого согласованного

фильтр понимается величина, которая определяется максимальным отношением сигнала к шуму на выходе фильтра, при котором форма сигнала не меняется при прохождении через фильтр[3].

Импульсная характеристика  $h(t)$  данного вида фильтра является зеркальным отражением формы сигнала  $s(t)$ . Выход такого фильтра во временной области можно описать как свертку сигнала  $r(t)$ , поданного на вход, с импульсной характеристикой фильтра.

Довольно часто согласованный фильтр называют коррелятором. Это происходит потому, что свертка в нем с обращенной во времени функцией дает еще одно обращение во времени, подавая на выход в конце интервала передачи символа то, что является корреляцией сигнала с собственной копией. Однако, выходные сигналы с согласованного фильтра и коррелятора одинаковы только при в определенный момент времени[1].

Алгоритм детектирования двух и более символов на фоне шума имеет ясный физический смысл: наиболее вероятным переданным символом считается тот сигнал, который меньше отличается от принятого смысла. Таким образом, если взять два цифровых фильтра, согласованных на различные сигналы, и подать на них сигнал, с которым согласован первый, то у него на выходе будет большая амплитуда, нежели у первого фильтра.

Математически это можно представить следующим образом[6]:

$$y(n) = b_0 \cdot x(n) + b_1 \cdot x(n - 1) + \dots + b_n \cdot x(n - N)$$

Где  $b_n$  - импульсная характеристика фильтра,  $x(n)$  - входной сигнал, а  $y(n)$  - выходной сигнал с согласованного цифрового фильтра.

## 3 Создание лабораторной установки

### 3.1 Описание структуры и возможностей

Для создания компьютерной лабораторной работы по имитационному моделированию работы согласованного фильтра в качестве детектора импульсных радиосигналов в присутствии шума и при наличии частотных искажений, была выбрана среда программирования LabVIEW версии 8.5[4]. Она специально была разработана для научных и производственных целей, позволяя легко строить удобные интерфейсы, а так же имеет мощные возможности по обработке различных данных, включая сигналы.

В лабораторную установку были заложены следующие возможности:

- Задание формы импульсных сигналов, которые используются для кодирования символов “0” и “1”
- Возможность задания определенного массива или генерация случайных бинарных данных
- Кодирование последовательности данных в последовательность импульсов заданной формы
- Моделирование прохождения полученного сигнала по зашумленному каналу связи в условиях ограниченной рабочей полосы частот
- Распознавание (определение какому символу соответствует) итогового сигнала при помощи согласованного фильтра  $N$ -го порядка
- Определение относительного числа ошибок в расчете на один переданный символ

Скриншот интерфейса созданной лабораторной установки приведен на Рисунке 4.

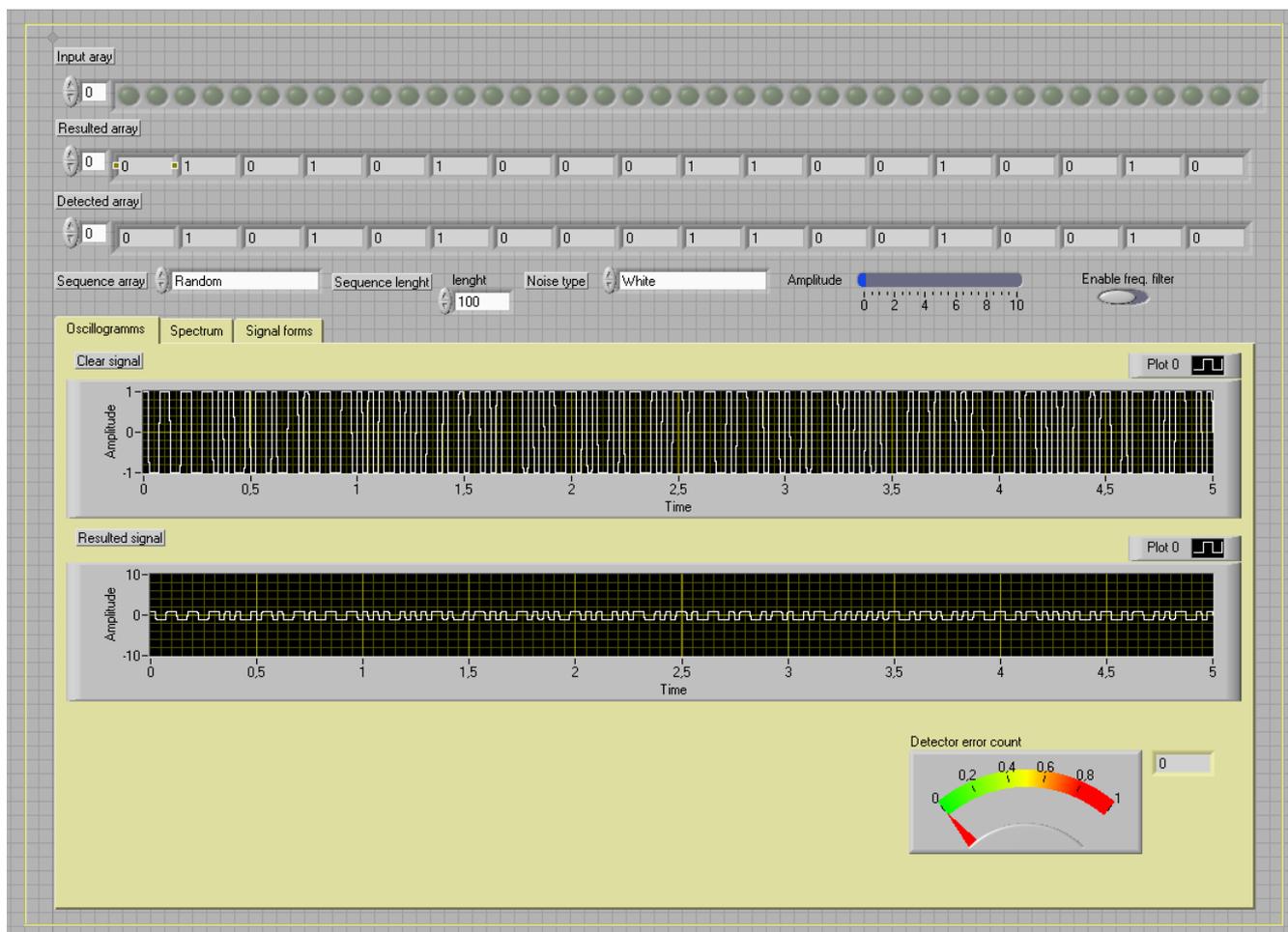


Рисунок 4 - общий вид созданной лабораторной установки

Что же касается исходного кода установки, то он “написан” на графическом языке G, который встроен в среду программирования LabVIEW. Для реализации последовательности действий по генерированию, моделированию прохождения сигнала через зашумленную линию связи с частотными искажениями, последующего детектирования сигнала и расчета относительного числа ошибок была выбрана структура Stacked Sequence.

### 3.2 Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования возможностей по детектированию сигнала согласованным цифровым фильтром, были взяты формы сигналов для кодирования символов “0” и “1”, показанные на Рисунке 7. В качестве кодируемых данных была взята случайная последовательность символов длиной в 100 элементов.

При отсутствии шумовых добавок и частотных искажений сигнала, цифровой согласованный фильтр детектирует закодированные символы полностью корректно (Рисунок 8). Соответственно, относительное число ошибок в пере-

счете на один символ равно нулю.

Произведем исследование возможностей по детектированию символов при наличии белого шума в линии передачи, но при отсутствии частотных искажений. При амплитуде шума до 3 единиц, цифровой фильтр детектирует сигнал без ошибок, затем их количество начинает постепенно нарастать, доходя до 0.1 (Рисунок 9) при амплитуде шума в 6 единиц (Рисунок 10).

Но даже, если шум превосходит сигнал на целый порядок и полезный сигнал невозможно выделить визуально (Рисунок 11), цифровой согласованный фильтр все еще способен выделить закодированную последовательность символов, хоть и количество ошибок достаточно велико и составляет 0.25.

Если производить те же исследования сигнала с добавлением белого шума различной амплитуды, но с частотными искажениями в канале связи, то количество ошибок детектирования увеличивается незначительно. На Рисунке 12 можно видеть, что полезный сигнал имеет частотные искажения с добавлением белого шума амплитуды в 3 единицы. Относительное число ошибок детектирования при этом составляет 0.03.

Теперь произведем исследование по возможностям детектирования согласованным цифровым фильтром последовательности в 100 символов, но уже с добавлением гауссова шума. Можно видеть, что до амплитуды шума в 1.67 единиц ошибки детектирования символов отсутствуют (Рисунок 13). При амплитуде шума в 3 единицы, относительное количество ошибок составляет уже 0.09 (Рисунок 14), хотя при такой же амплитуде белого шума ошибки детектирования сигнала цифровым фильтром отсутствовали.

Если амплитуда гауссова шума составляет 6 единиц, то число ошибок детектирования становится равным 0.27 (Рисунок 15). При амплитуде шума в 10 единиц - число ошибок составляет 0.37 (Рисунок 16). Из этого можно сделать вывод, что согласованный цифровой фильтр работает менее эффективно при наличии гауссова шума и такое число ошибок с точки зрения практического применения неприемлемо.

Если произвести те же исследования по декодированию последовательности импульсов цифровым фильтром с добавлением гауссова шума, но при наличии частотных искажений, то так же видно, что они не слишком сильно увеличивают количество ошибок детектирования сигнала.

## 4 Выводы

В данной выпускной квалификационной работе были рассмотрены различные виды физического кодирования в цифровых сетях, какие при этом решаются задачи. Был теоретически описан согласованный детектирующий цифровой фильтр и способы его применения.

В ходе практической части работы была разработана лабораторная установка в среде программирования LabVIEW, которая позволяет сгенерировать или задать последовательность случайных данных различной длины, которая будет закодирована с помощью задаваемых пользователем форм сигналов. Далее, в качестве моделирования прохождения через реальный канал передачи данных, можно наложить белый или гауссов шум различной амплитуды, а так же частотные искажения, которые вызваны ограниченной полосой пропускания линии. Затем этот сигнал пропускается через согласованный цифровой фильтр и целью исследования его возможностей по детектированию символов из зашумленного сигнала.

Исследования показали, что согласованный цифровой фильтр очень хорошо выделяет полезную информацию даже из очень зашумленного сигнала, причем частотные искажения лишь незначительно повышают относительный показатель ошибок. Однако, стоит отметить, что с детектированием сигнала с добавлением гауссова шума фильтр справляется хуже, нежели с добавлением белого шума.

В настоящее время цифровая электроника и цифровые линии связи в различных вариациях (локальные сети, сети мобильной связи, оптоволоконные линии, спутниковые каналы связи) очень распространены и цифровые согласованные фильтры в них имеют широкое применение. К примеру, сотовый стандарт связи CDMA[5] использует кодовое разделение каналов, при котором вещание абонентов в эфир происходит одновременно, без разделения по времени или другого вида разделения. Эфир при этом полностью заполняется шумоподобным сигналом. Однако, абонент и сотовая станция, зная секретный ключ, очень легко с помощью цифровых фильтров могут выделять полезную информацию даже из такого эфира. Из-за этого стандарт CDMA считается более безопасными, нежели GSM, где применяется разделение абонентов по времени.

## 5 Список литературы

1. Spread Spectrum and CDMA - Principles and Applications // Valery P. Ipatov // Издательство WILEY, 2004
2. Line code - Wikipedia // [https://en.wikipedia.org/wiki/Line\\_code](https://en.wikipedia.org/wiki/Line_code) [Электронный ресурс]
3. Matched filter - Wikipedia // [https://en.wikipedia.org/wiki/Matched\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Matched_filter) [Электронный ресурс]
4. Основы программирования в среде LabVIEW // А.С. Васильев, О.Ю. Лашманов // СПб: Университет ИТМО, 2015
5. CDMA - Википедия // <https://ru.wikipedia.org/wiki/CDMA> [Электронный ресурс]
6. Честно простой цифровой фильтр - Сообщество Easyelectronics // <http://we.easyelectronics.ru/Theory/chestno-prostoy-cifrovoy-filtr.html> [Электронный ресурс]
7. Digital filter - Wikipedia // [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_filter) [Электронный ресурс]
8. Analogue filter - Wikipedia // [https://en.wikipedia.org/wiki/Analogue\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Analogue_filter) [Электронный ресурс]
9. Физическое кодирование - ОН, MSBRO! // <http://msbro.ru/index.php/archives/1646> [Электронный ресурс]
10. Согласованный фильтр (коррелятор) // <http://thebard.narod.ru/TES/ekzamen/37.htm> [Электронный ресурс]