

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.032.26

День

Вьет Фьонг

Анализ эффективности многоканальной системы передачи информации с  
кодовым комбинационным уплотнением каналов

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и устройства  
радионавигации, радиолокации и телевидения»

Научный руководитель

Карпушкин Эдуард Михайлович

Доцент; кандидат технических наук

Доцент кафедры ИРТ

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Исторически электросвязь зарождалась как средство общения между собой вначале лишь нескольких близкоживущих абонентов. На расстоянии десятки-сотни километров связь осуществлялась по воздушным проводам в виде телеграфной, а постепенно и телефонной связи. Потребности человека в связи росли и растут сейчас весьма стремительными темпами. Потребовалась связь между населёнными пунктами, между городами, регионами и наконец между странами и континентами. Появились новые виды связи: телевидение, факсимильная передача, радиовещание, цифровая связь и многое другое. На пути технического осуществления потребностей в связи возникает множество проблем. Каждого абонента с любым другим постоянно проводниками не свяжешь. Поэтому важно собирать множество проводников в пучки – кабели, которые прокладывают под землёй, по воздуху, под водой и т.п. от одного места до другого. Это весьма дорогостоящая работа.

В практике организации связи часто возникает необходимость одновременной передачи большого количества сообщений из одного пункта в другой. Такую задачу приходится решать при больших объемах обмена информацией. Любая информация передается от передатчика к приемнику через физическую среду, в качестве которой в системах связи используются радиолинии и кабельные линии связи (ЛС). Высокая стоимость кабельных ЛС и перегруженность радиолиний обуславливает необходимость их наиболее эффективного использования. Поэтому в настоящее время получили широкое применение многоканальные системы связи (МКС), обеспечивающие одновременную и независимую передачу большого числа сообщений с использованием одной ЛС.

Диссертационная работа посвящена анализ эффективности многоканальных систем с кодовым комбинационным уплотнением канальных сигналов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации** посвящена анализ эффективности многоканальных систем с кодовым комбинационным уплотнением канальных сигналов по сравнению с другими методами уплотнения, для более рационального использования частотного пространства и предложения альтернативных методов защиты передаваемой информации.

**Цель данной работы.** Целью диссертационной работы является:

- Классификация многоканальной системы с кодовым уплотнением канальных сигналов.
- Анализ особенностей системы с кодовым комбинационным уплотнением канальных сигналов.
- Требование к сигналам системы с кодовым комбинационным уплотнением канальных сигналов.
- Анализ потенциальной помехоустойчивости.
- Моделирование системы с кодовым комбинационным уплотнением канальных сигналов.

**Объект исследования** – многоканальная система связи с комбинационным уплотнением канальных сигналов.

**Область исследования** – Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй степени (магистратуры) специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения»

**Теоретико-методологическую основу исследования** составили труды отечественных и зарубежных ученых, занимающиеся теоретическими и практическими вопросами.

**Эмпирическую базу исследования** составили полученные в результате измерения зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум а также в результате измерения автокорреляционной функции и спектральных плотностей при моделировании в среде *Simulink*.

### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 2 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 4 страниц.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения.

Общий объем диссертационной работы составляет 58 страниц включая 41 иллюстраций, 3 таблицы, библиографический список источников литературы из 29 наименований, список собственных публикаций соискателя из 2 наименования и приложение.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Классификация.** Все используемые методы уплотнения и разделения каналов можно классифицировать на линейные и нелинейные. К линейным относятся такие, при которых операция уплотнения (разделения) осуществляется линейными устройствами с постоянными или переменными во времени параметрами. В противном случае метод уплотнения (разделения) будет нелинейным.

В большинстве случаев для осуществления операции уплотнения каналов уплотняемому источнику сообщений выделяется специальный сигнал, называемый канальным сигналом или поднесущим колебанием. Последнее название используется в тех случаях, когда хотят подчеркнуть наличие в радиосистеме передачи информации несущей, общей для всех уплотняемых источников. Сообщения, поступающие от уплотняемых источников, сначала модулируют по какому-либо параметру выделенные источникам канальные сигналы, а затем промодулированные канальные сигналы объединяются, в результате чего устройством уплотнения формируется групповой сигнал. Если операция уплотнения линейна, то этот сигнал будет линейным групповым сигналом. Он в большинстве случаев образуется посредством линейного суммирования промодулированных канальных сигналов.

На рисунке 1 представлены методы уплотнения. Условные обозначения на рисунке: ЧУК – частотное уплотнение каналов, ВУК – временное уплотнение каналов, КУК – кодовое уплотнение каналов, КМУ – кодовое мажоритарное уплотнения, а ККУ – кодовое комбинационное уплотнение каналов.



Рисунок 1 – Методы уплотнения каналов

На рисунке 2 и 3 приведены структурные схемы передающей и приёмной частей многоканальной системы с кодовым комбинационным уплотнением.

На вход комбинационного устройства (КУ), выполняющего функции устройства уплотнения, от  $n$  источников информации (ИИ) поступают биты цифровой информации, которые образуют параллельный четырехразрядный

двоичный код. В соответствии с комбинацией кода на входе устройства уплотнения (УУ) появляется одна из  $N$  ортогональных функций, поступающих из генератора опорных функций (ГОФ). Обязанности опорных функций выполняют ЧКП. Следовательно, длительность ортогональной функции равна длительности информационного бита, а минимальное количество дискретов (база) функции равно  $N$  (в соответствии со свойством ЧКП).

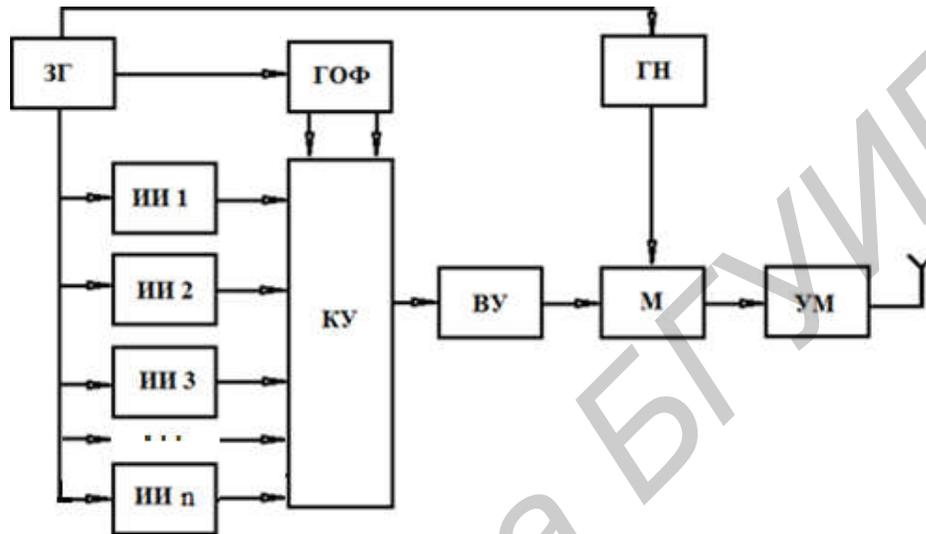


Рисунок 2 – Структурная схема передающей части системы

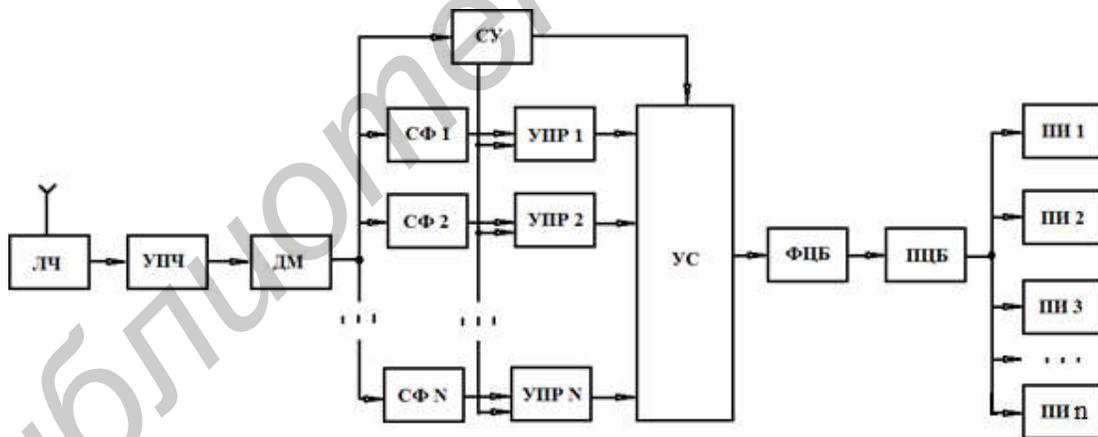


Рисунок 3 – Структурная схема приёмной части системы

Таким образом, групповой сигнал представляет последовательность ортогональных функций с полосой частот, в  $N$  раз превосходящих полосу частот информационных бит. Далее он модулирует один из параметров несущего колебания (в лабораторной установке – фазу).

На приемной стороне после прохождения усилителя промежуточной частоты (УПЧ) и демодулятора (ДМ) сигнал попадает на согласованные фильтры (СФ), число которых равно количеству ортогональных функций. Устройства принятия решений (УПР) подают сигналы о выделении определенной функции в устройство сравнения (УС). По максимальному сигналу формирователь и

преобразователь цифровых бит (ФЦБ, ПЦБ) генерируют соответствующий код для потребителей информации (ПИ).

**Основное требование к опорным функциям** – их линейная взаимная независимость. Этому требованию лучше всего удовлетворяют ансамбли ортогональных цифровых последовательностей. Такие ансамбли могут формироваться с помощью матрицы Адамара. Так как оптимальный прием предусматривает корреляционную обработку информационных сигналов, то желательно, чтобы автокорреляционные и взаимно корреляционные функции ортогональных последовательностей имели малый уровень боковых остатков. Поэтому предпочтение отдают ансамблям ортогональных псевдослучайных последовательностей. В нашей системе используется ансамбль четверично-кодированных бинарных последовательностей.

**Анализ потенциальной помехоустойчивости.** Широкополосные системы передачи информации с ПС-сигналами имеют следующие достоинства:

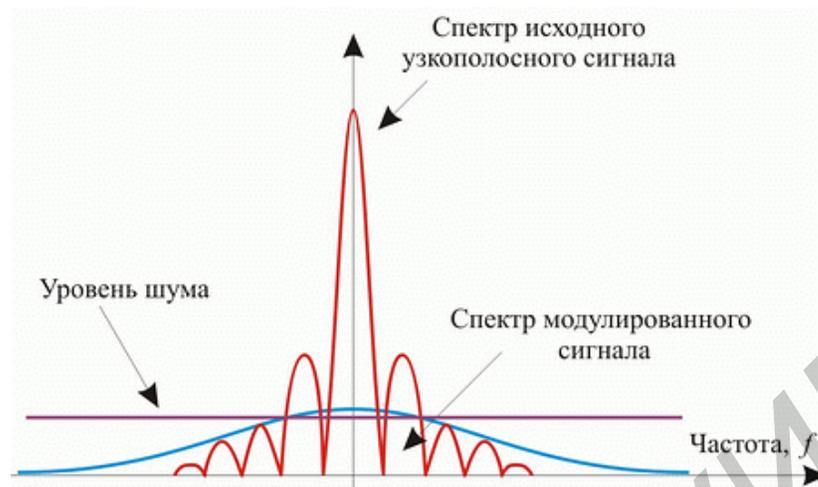
1 Возможность эффективного подавления негауссовой помехи за счет сжатия по времени или частоте. При наличии узкополосной помехи ее режектируют, импульсной – селектируют, структурной – подвергают кодовой фильтрации и т. д.

2 Возможность эффективной борьбы с явлениями замирания и многолучевости (обеспечивается время корреляции ПСП, меньшее времени задержки лучей).

3 Возможность обеспечения энергетической скрытности передаваемого сообщения. Если средняя спектральная плотность информационного сигнала  $N_c$  меньше средней спектральной плотности шума  $N_n$ , то реализуется энергетическая скрытность передаваемого сообщения.

4 Возможность обеспечения структурной скрытности передаваемого сообщения за счет применения сложных, нелинейных алгоритмов формирования ПСП и программной смены форм ПСП.

5 Возможность повышения потенциальной помехоустойчивости системы без снижения скорости передачи информации или наоборот. Данная возможность реализуется при посимвольной передаче цифровой информации, когда каждой комбинации из  $n$  бит присваивается своя ПСП из заданного ансамбля  $m$  ортогональных ПСП. При этом ввиду увеличения времени анализа ( $T_{ан} = nT_б$ ) возрастает в  $n$  раз энергия информационного сигнала (ПС-сигнала), а следовательно, при оптимальной обработке во столько же раз возрастет отношение сигнал/шум и уменьшится вероятность ошибочного приема цифрового бита ( $P_{ош}$ ). Нетрудно заметить, что сохраняя вероятность ошибочного приема не выше заданной, можно увеличить скорость передачи информации.



**Рисунок 4 – Использование технологии уширения спектра позволяет предавать данные на уровне естественного шума.**

6 Возможность построения многостанционных систем (систем множественного доступа), в которых реализуется кодовое уплотнение каналов (*CDMA*). Одной из особенностей таких систем является сохранение конфиденциальности связи между пользователями, имеющими разные сигналы расширенного спектра. Отследить эти сигналы пользователю, не имеющему к ним доступа, – сложная задача.

Групповой сигнал, сформированный на основе ансамбля ортогональных ЧКП в базу, расширяет спектр информационного сообщения, поэтому излучаемый передатчиком сигнал будет широкополосным и все достоинства широкополосной системы реализуются и в многоканальной системе.

В системах с кодовым уплотнением сообщения в каналах представляются в бинарном (цифровом) виде. Каждый бит такого сообщения при линейном уплотнении после канального модулятора заполняется своей опорной функцией (канальным сигналом). Количество опорных функций равно количеству каналов и все они взаимно ортогональны. Если опорные функции бинарные, то устройство уплотнения – алгебраический сумматор и групповой сигнал будет дискретным многоуровневым с эффективной полосой частот такой же, что и канальные сигналы. Радиосигнал на выходе модулятора обычно или многофазный (1), или многочастотный (2). При оптимальной обработке такого сигнала, вероятности ошибочного приема бита цифровой информации оцениваются следующими выражениями:

$$P_{ош} = 1 - \Phi(\sqrt{qB \cos \Delta \varphi}) \quad (1)$$

$$P_{ош} = 0,5m \exp(-qB / 4) \quad (2)$$

При нелинейном кодовом уплотнении канальных сигналов групповой сигнал, как и канальные сигналы, бинарный, что позволяет использовать наиболее помехоустойчивую модуляцию несущего колебания – бифазную.

Наиболее популярные методы кодового нелинейного уплотнения – мажоритарный и комбинационный. В системах с мажоритарным уплотнением вместо алгебраического сумматора используется логический мажоритарный элемент, а все остальные узлы и блоки не отличаются от многоканальной системы с кодовым линейным уплотнением. Групповой сигнал при мажоритарном уплотнении в спектрально-временном пространстве подобен каналному сигналу и уплотнение каналных сигналов линейное. Потенциальная помехоустойчивость такой системы при оптимальной когерентной обработке оценивается следующим выражением:

$$P_{ош} = 1 - \Phi \left( \sqrt{2qB \cdot \frac{2}{\pi m}} \right) \quad (3)$$

В системах с комбинационным уплотнением каналных сигналов групповой сигнал формируется из последовательности ортогональных функций, каждая из которых привязана к комбинации  $m$  бит каналов. Следовательно, количество ортогональных функций должно быть  $N = 2^m$ . Функции разделителя каналных сигналов в такой системе выполняют  $N$  оптимальных различителей ортогональных сигналов и логический дешифратор. Потенциальную помехоустойчивость выделения бита цифровой информации в системе с комбинационным уплотнением при оптимальной когерентной обработке можно оценить выражением:

$$P_{ош} = \frac{(N-1)}{m} \left( 1 - \Phi(\sqrt{qB}) \right) \quad (4)$$

где  $q$  – входное отношение сигнал/шум;  
 $B$  – база ортогональной функции;  
 $\Delta\varphi$  – минимальный шаг по фазе ( $\Delta\varphi = 2\pi/(m+1)$ );  
 $m$  – количество каналов.

Построим график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум многоканальной системы передачи информации из этих формул:

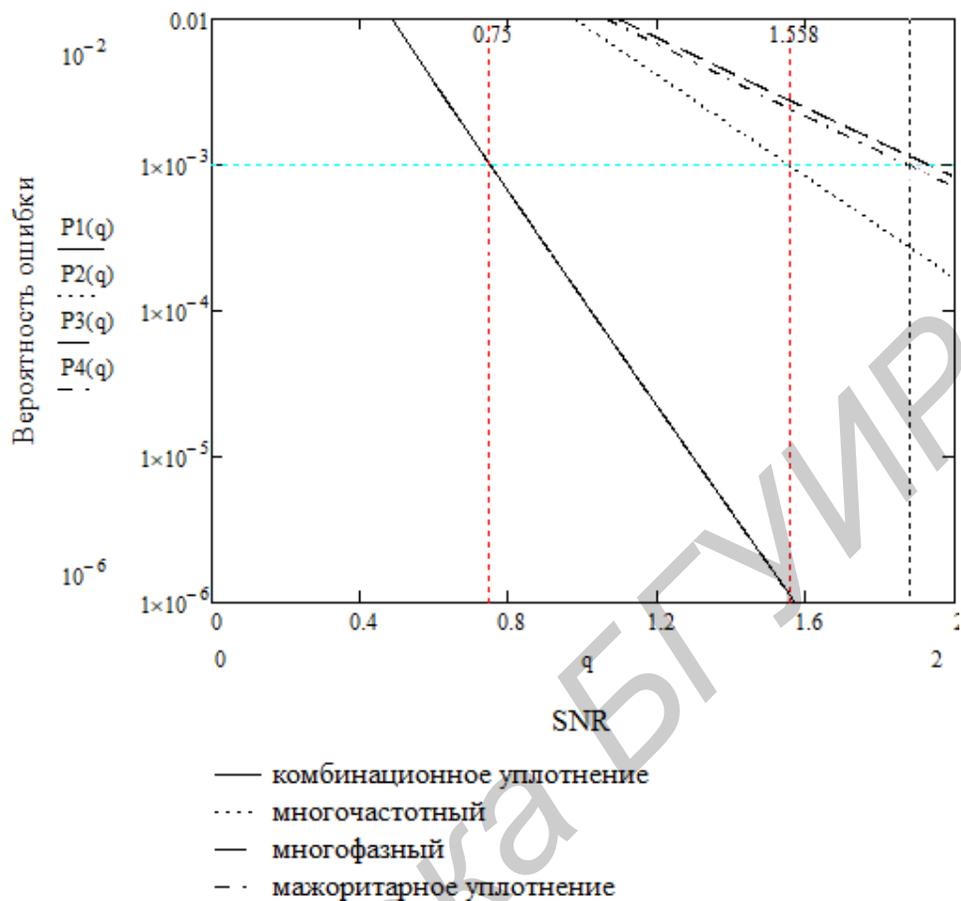


Рисунок 5 – График зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

Исходя из рисунка 5, применение комбинационное уплотнение в многоканальных системах обеспечивает повышение потенциальной помехоустойчивости системы без снижения скорости передачи информации.

**Компьютерное моделирование.** Построим макет для исследования РС ПИ с кодовым уплотнением выполнен в виде компьютерной модели в среде динамического моделирования *Simulink* (рисунок 6).

Длительность бита информационного сообщения  $N$  задается в основном окне *MATLAB*. Рекомендуется установить  $N = 0,1$  с. Длительность дискрета псевдопоследовательности, имеющей вид ЧКП, равна  $N/16$ . В качестве источника аддитивной помехи используется генератор гауссова шума. Для управления мощностью помехи установлен усилитель *Gain* (на схеме *Noise-To-Signal*). При коэффициенте усиления, равном единице, отношение сигнал/шум равно единице. Все блоки настроены так, что не требуют никакой перестройки, единственным перестраиваемым параметром является мощность помехи.

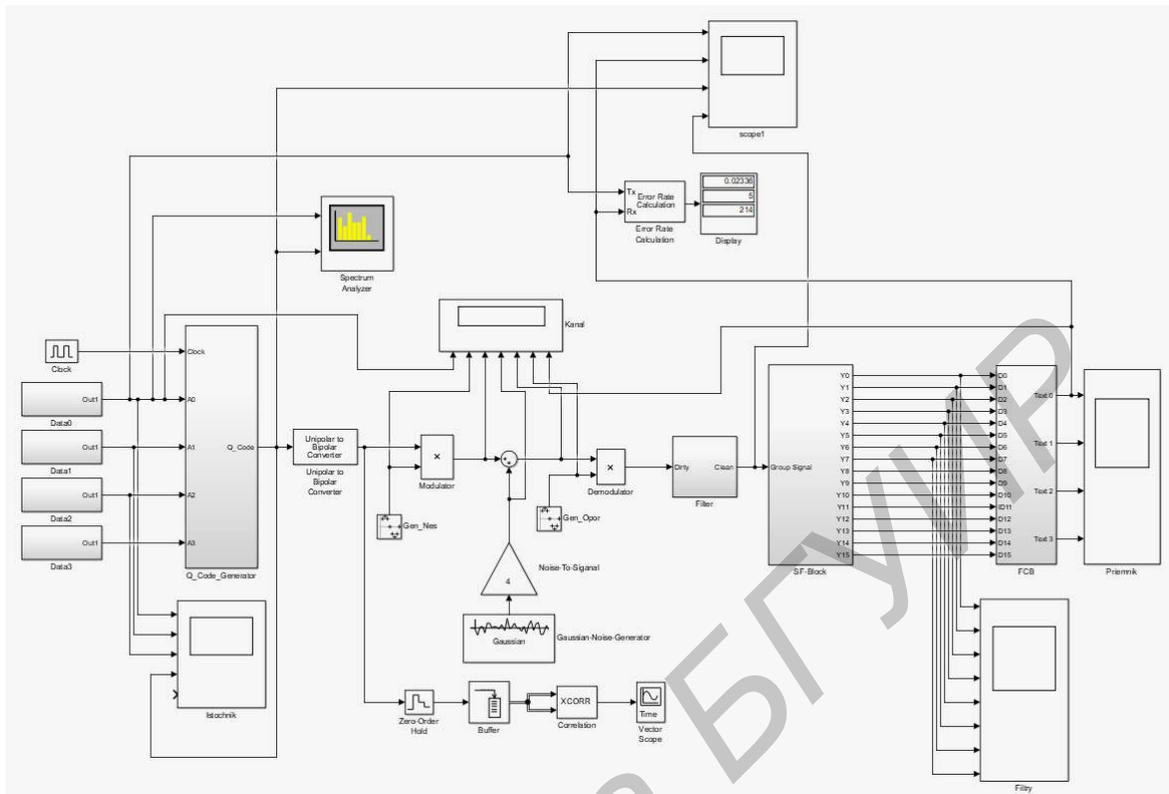


Рисунок 6 – Структурная схема моделирующей установки

В таблице 1 приведены результаты измерения вероятности ошибки на входе приёмнике при изменении коэффициента усиления мощности помехи (блок *Gain*) блока *Noise-To-Signal*.

Таблица 1 – Результаты измерения

| <i>Gain</i>                | 10    | 9      | 8          | 7      | 6     | 5     | 4     | 3.3   | 3      | 2          |
|----------------------------|-------|--------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|
| $P_{\text{ош}}$<br>(экс.)  | 0,5   | 0,3548 | 0,19<br>35 | 0,1613 | 0,129 | 0,097 | 0,032 | 0,013 | 0,005  | 0,0<br>001 |
| $P_{\text{ош}}$<br>(теор.) | 0,342 | 0,295  | 0,245      | 0,192  | 0,138 | 0,085 | 0,061 | 0,039 | 0,0087 | 0,00<br>24 |

Построим график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

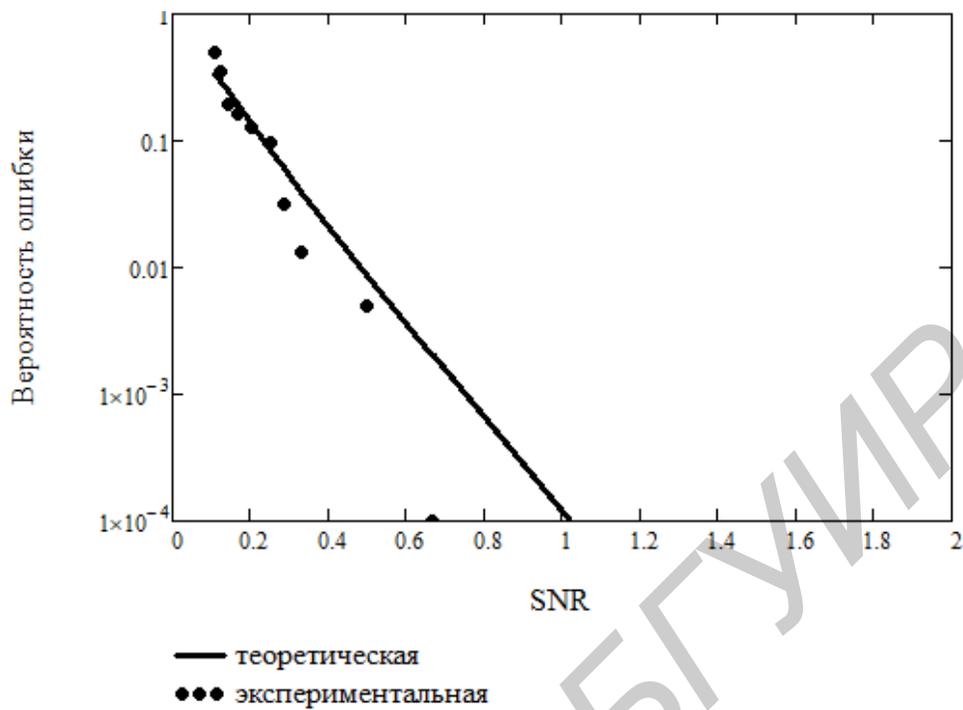


Рисунок 7 – Зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

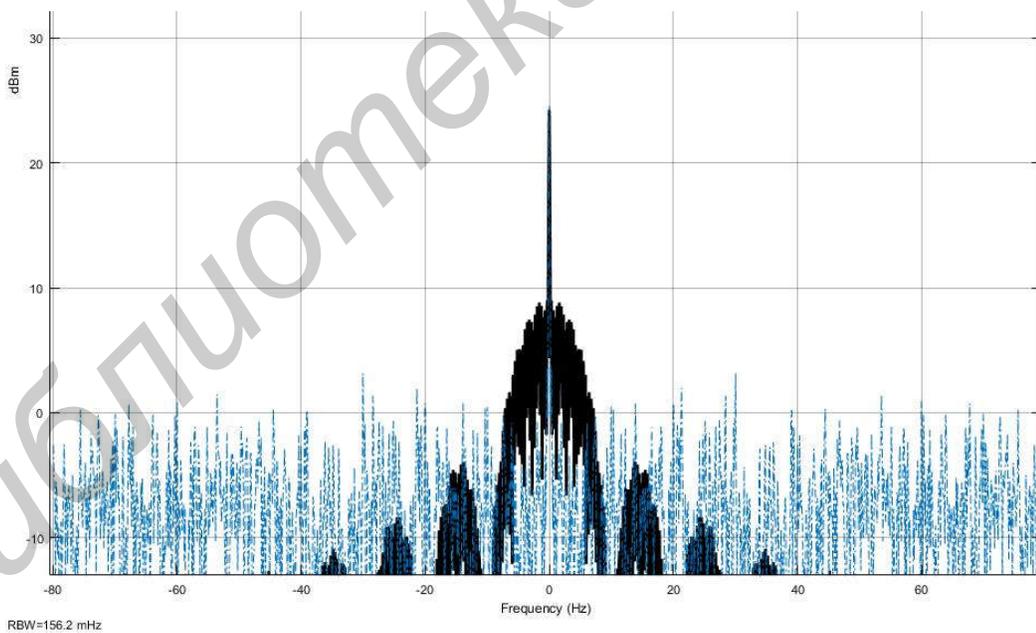
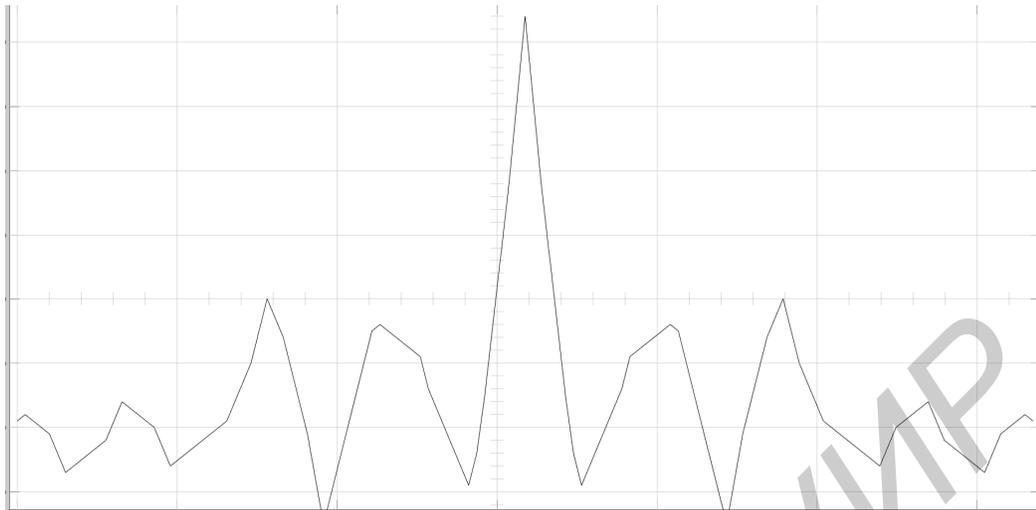


Рисунок 8 – Спектральные плотности входного сигнала и кодового сигнала

На рисунки 8 и 9 приведены спектр и автокорреляционную функцию (АКФ) и спектр сигналов



**Рисунок 9 – Автокорреляционная функция**

Результат измерения спектральных плотностей входного сигнала и сигнала после кодирования показаны на рисунке 4. Видно из рисунка, что результат измерения совпадает с теоритическим, спектр кодового сигнала измеряется похоже на спектр шумоподобного сигнала, то есть моделирование успешно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации анализировали особенности структурной и функциональной схемы многоканальной системы передачи информации с кодовым комбинационным уплотнением, классифицировали и сравнивали достоинства и недостатки с другими методами уплотнения путем анализа их потенциальной помехоустойчивости. Кроме того, компьютерное моделирование модели многоканальной системы передачи информации с кодовым комбинационным уплотнением в среде *Simulink* позволили экспериментально оценить помехозащищенность системы.

Многоканальные системы с кодовым комбинационным уплотнением позволяют реализовать следующие преимущества:

- Гибкое распределение ресурсов. При кодовом разделении нет строгого ограничения на число источников.
- Более высокая помехозащищенность и скрытность передаваемой информации. За счет использования ансамбля ортогональных шумоподобных сигналов.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А.] Динь В.Ф., Классификация систем передачи информации, использующих единый ресурс // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22-26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. – Мн. – 2019. – 170 с.; ил. С 57-58.

[2-А.] Динь В.Ф., Потенциальные возможности многоканальной системы с комбинационным уплотнением // 56-я конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», апрель, май 2020 г., БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. – Мн. – 2020. – 253 с.; ил. С 142-143.