

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра РС

ОТЧЕТ
по преддипломной практике
Тема: Алгоритм обработки сигнала стандарта DMR

Студент гр. 8182

Боржонов А.И.

Руководитель

Андреева О.М.

Санкт-Петербург

2024

ЗАДАНИЕ НА УЧЕБНУЮ ПРАКТИКУ

Студент Боржонов А.И.

Группа 8182

Тема практики: Алгоритм обработки сигнала стандарта DMR

Задание на практику:

Реализовать алгоритм обработки сигнала стандарта DMR. Требования: Язык программирования C++, реализация с использованием объектно-ориентированного стиля программирования, вероятность ложной тревоги при обнаружении сигнала не более 10^{-4} , быстродействие алгоритма не хуже чем 1:1.

Сроки прохождения практики: 14.01.2024 – 23.04.2024

Дата сдачи отчета: 24.04.2024

Дата защиты отчета: 24.04.2024

Студент

Боржонов А.И.

Руководитель

Андреева О.М.

АННОТАЦИЯ

В работе представлено подробное описание реализации алгоритма обработки сигнала стандарта DMR.

К результатам данной работы относится программное обеспечение высокой производительности, реализующее оптимальный алгоритм обработки сигнала устройств стандарта DMR в записи, полученной с эфира.

SUMMARY

The paper presents the main provisions of the DMR standard necessary for the implementation of the DMR signal processing algorithm.

The results of this work include high-performance software that implements an optimal algorithm for processing the signal of DMR devices in a recording received from the air.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	5
1.	Алгоритм обработки сигнала	6
1.1.	Устройство пеленгования	6
1.2.	Основные этапы алгоритма	7
1.3.	Обнаружение	10
1.4.	Демодуляция	13
1.5.	Декодирование	13
1.6.	Верификация и тестирование алгоритма	15
1.7.	Быстродействие алгоритма	17
1.8.	Помехоустойчивость алгоритма	18
	Заключение	19
	Список использованных источников	20

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является реализация алгоритма обработки сигнала стандарта DMR. Алгоритм выполняет обработку принятого сигнала с целью обнаружения и идентификации источников радиоизлучения (ИРИ).

Для достижения поставленной цели сформированы следующие задачи:

1. Изучение стандарта DMR Air Interface (AI) protocol;
2. Изучение основных этапов формирования сигнала физического уровня;
3. Исследование различных способов обнаружения сигнала;
4. Реализация алгоритма на языке программирования C++;
5. Внедрение реализованного алгоритма в программный модуль;
6. Тестирование программного модуля;

1. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

В этой главе описывается алгоритм обработки сигнала стандарта DMR, его основные этапы, реализация и результаты работы алгоритма.

1.1. Устройство пеленгования

В ходе выполнения ВКР основной целью является реализация программного модуля обработки сигнала стандарта DMR, программный модуль является частью ПО, используемого устройством пеленгования. На рисунке 1.1 приведена обобщенная структурная схема устройства пеленгования БС.

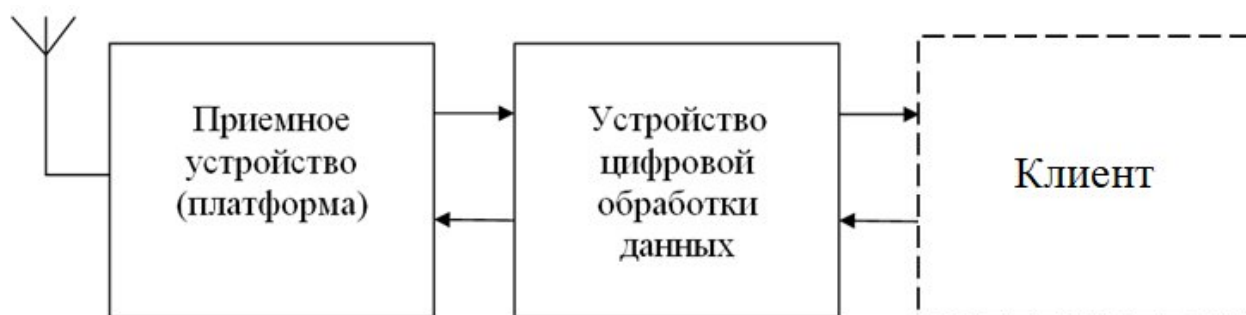


Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема устройства пеленгования.

Приемное устройство (ПУ) – в данной задаче включает в себя весь приемный тракт от антенны до выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На выходе ПУ – цифровой сигнал, принимаемый с некоторой несущей частоты и переносится на промежуточную частоту.

Блок цифровой обработки данных (УЦОД) – менеджер, выполняющий обработку запросов, ответов, заданий и т. д., – является основным звеном. Он также выполняет почти всю цифровую обработку сигнала. В УЦОД задействовано программное обеспечение, компонентом которого является программный модуль, реализованный в ВКР.

Клиент - этот модуль фактически не присутствует в устройстве, но он показан на схеме для иллюстрации работы алгоритма. Клиент напрямую связан с пользователем. Задания отправляются с клиента, на него же отправляются отчеты о ходе выполнения заданий и сообщения об ошибках.

Взаимодействие между описанными блоками осуществляется следующим образом:

- Клиент отправляет задание, включающее в себя диапазон сканирования, шаг сетки частот, длительность сканирования одной частоты и режим сканирования (непрерывный или одиночный), устройству цифровой обработки данных, оно в свою очередь формирует массив запрос к ПУ.
- Далее ПУ, в качестве ответа на полученные запросы, отправляет в УЦОД блоки данных, содержащие массивы синфазных (I) и квадратурных (Q) компонент, частоту, с которой производилась запись и номер ответа.
- Получив ответ от ПУ, УЦОД осуществляет, непосредственно обработку (обнаружение сигнала, синхронизацию и т. д.). После окончания обработки, УЦОД отправляет полученные результаты клиенту.

Далее будут рассмотрены основные этапы алгоритма обработки данных в УЦОД, реализованные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР).

Входными данными для алгоритма является запись сигнала, полученная от приемного устройства, которая представляет собой массив комплексных отсчетов сигнала.

Выходными данными должны быть статус декодирования и системная информация об устройстве.

1.2. Основные этапы алгоритма

На основе принципов построения сигнала базовой станции, описанных в главе 3, предложен и реализован следующий алгоритм обработки сигнала (рис 1.2):

- Первым этапом является накопление отсчетов сигнала до минимального количества необходимого для обработки. Входными и выходными данными являются комплексные отсчеты сигнала;
- Вторым этапом является коррекция частотной ошибки, вызванной эффектом Доплера и неточностью установки центральной частоты ПУ. Входными и выходными данными являются комплексные отсчеты сигнала;
- Третьим этапом является обнаружение синхропоследовательности сигнала DMR в потоке данных. Входными данными комплексные отсчеты сигнала, выходными – массив позиций синхропоследовательностей в наборе входных данных;
- Четвертым этапом является демодуляция сигнала. Входными данными являются комплексные отсчеты сигнала, выходными – набор демодулированных символов;
- Последним этапом является декодирование системной информации об устройстве. Входными данными является набор демодулированных символов и позиции синхропоследовательностей в этом наборе, выходными – массив, состоящий из пар: позиция синхропоследовательности и системная информация об устройстве;

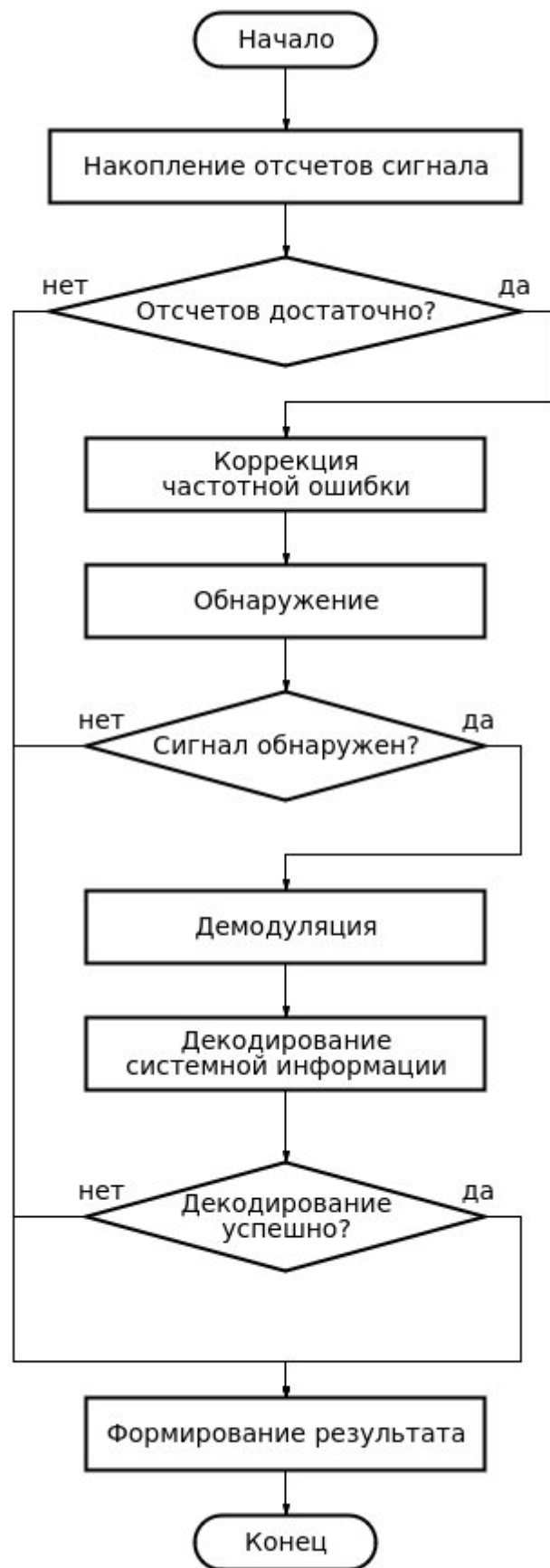


Рисунок 1.2 – Блок-схема алгоритма обработки сигнала.

1.3. Обнаружение

Изначально для реализации был предложен алгоритм обнаружения по демодулированным символам. Поскольку отчасти данный алгоритм уже был реализован в ООО «СТЦ», было предложено провести сравнительный анализ этого алгоритма с алгоритмами обнаружения по комплексным отсчетам и по демодулированным отсчетам частоты.

Для выбора оптимального алгоритма было проведено исследование характеристик обнаружения и быстродействия каждого из предложенных вариантов.

Для расчета порога обнаружения для каждого из представленных алгоритмов был выбран критерий Неймана-Пирсона, так как априорная вероятность наличия или отсутствия устройств в заданной области пространства и потери из-за ложной тревоги или пропуска целей неизвестны. Согласно представленным требованиям к программному модулю, максимальная вероятность ложной тревоги для алгоритма обнаружения не должна превышать 10^{-4} .

Моделью для выбора порога обнаружения служит выборка, состоящая из 10^6 независимых максимумов КФ сигнала синхропоследовательности с белым гауссовским шумом (рис. 1.3-1.5).



Рисунок 1.3 – Максимумы корреляции с шумом по комплексным отсчетам.

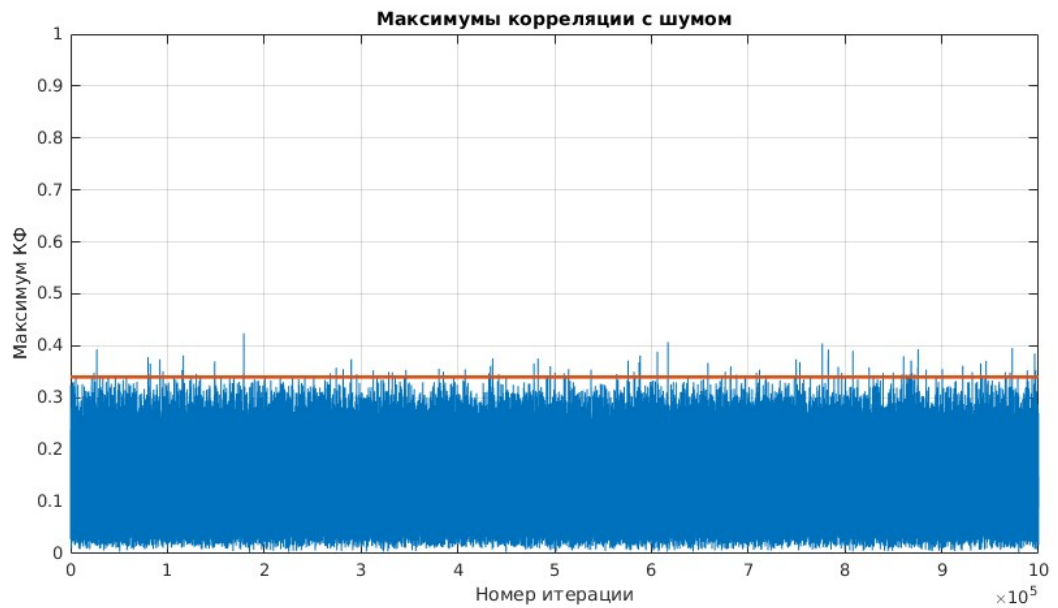


Рисунок 1.4 – Максимумы корреляции с шумом по демодулированным отсчетам частоты.

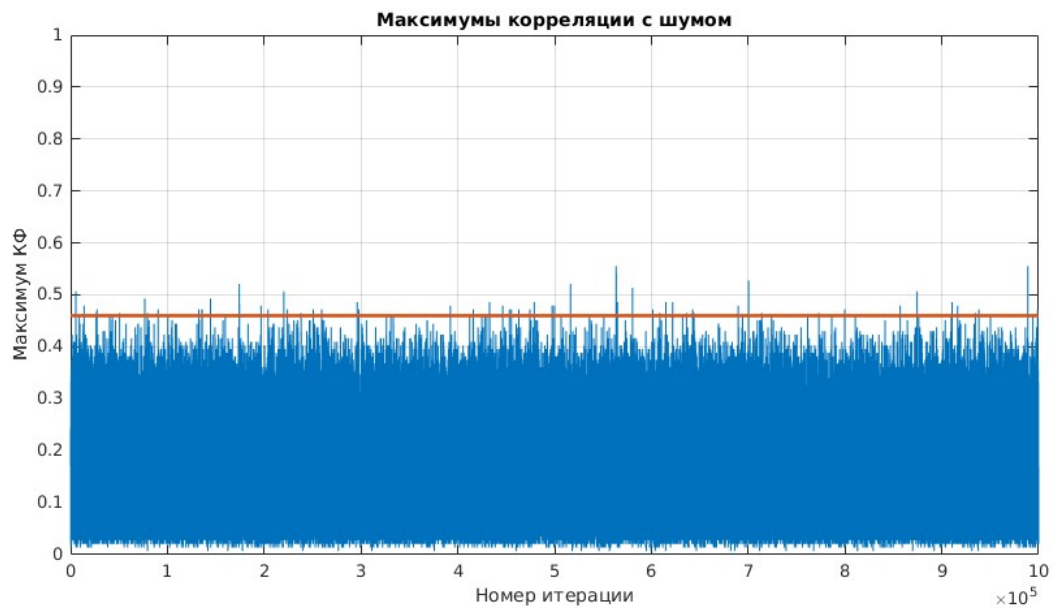


Рисунок 1.5 – Максимумы корреляции с шумом по демодулированным символам.

Значения порога, обеспечивающее заданную вероятность ложной тревоги представлены в таблице 1.1. Для каждого из алгоритмов была построена характеристика обнаружения – зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум (рис. 1.6).

Таблица 1.1 – Значения порога для различных методов обнаружения.

Метод обнаружения	По комплексным отсчетам	По демодулированным отсчетам частоты	По демодулированным символам
Порог	0.33	0.34	0.46

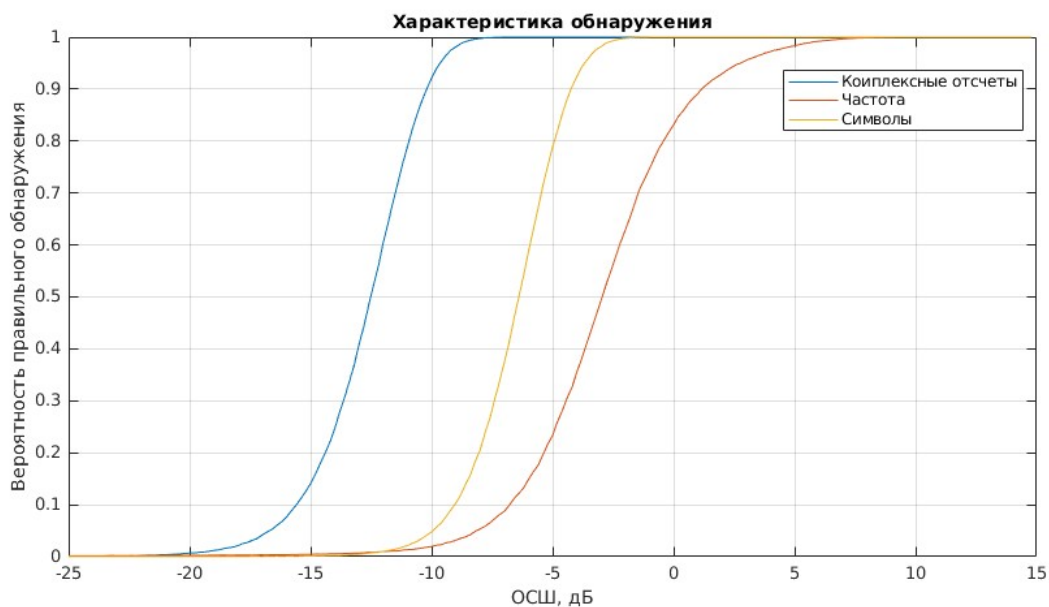


Рисунок 1.6 – Характеристики обнаружения для различных методов.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что обнаружение по комплексным отсчетам является оптимальным с точки зрения обнаружения. Для сравнения в таблице 1.2 приведены значения ОСШ для каждого из алгоритмов, при которых вероятность правильного обнаружения была равна 0.5.

Таблица 1.2 – Значения ОСШ для различных методов обнаружения.

Метод обнаружения	По комплексным отсчетам	По демодулированным отсчетам частоты	По демодулированным символам
ОСШ, дБ	-12.5	-2.9	-6.4

1.1. Демодуляция

Алгоритм демодуляции предполагает использование четырех полосовых фильтров с центральными частотами, которые соответствуют частотам представленным в таблице 3.7. Для каждого отсчета выбирается тот символ, фильтр которого дал наибольший выход. АЧХ фильтров представлена на рисунке 1.7.

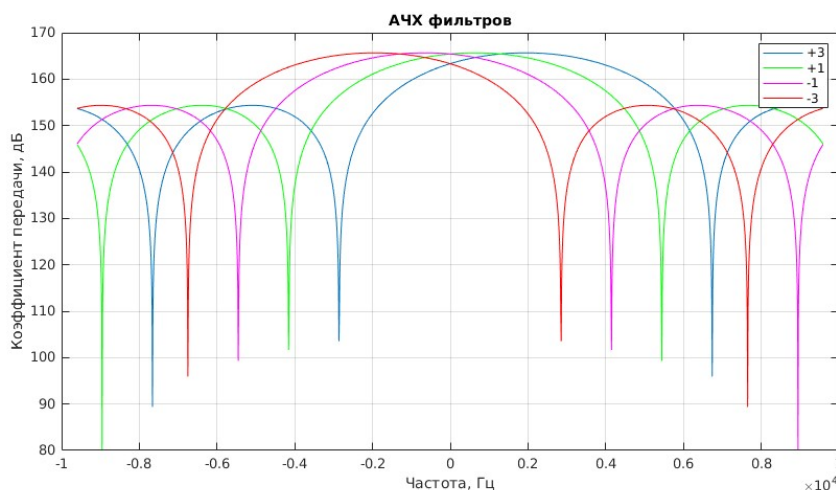


Рисунок 1.7 – АЧХ фильтров демодулятора.

1.5. Декодирование

Первым этапом процесса декодирования является преобразование демодулированных символов в биты. Далее на основе того, какой тип синхропоследовательности был обнаружен, выбирается соответствующий алгоритм декодирования.

Декодирование данных

Декодирование данных начинается с декодирования поля «Тип слота». Далее происходит деперемежение данных. Следующим этапом является декодирование кода ВРТС (196, 96). Затем на основе того, какое значение принимал информационный элемент «Тип данных» выбирается соответствующая CRC маска для проверки корректности полученных данных и соответствующий алгоритм декодирования.

Блок-схема алгоритма декодирования представлена на рисунке 1.8.

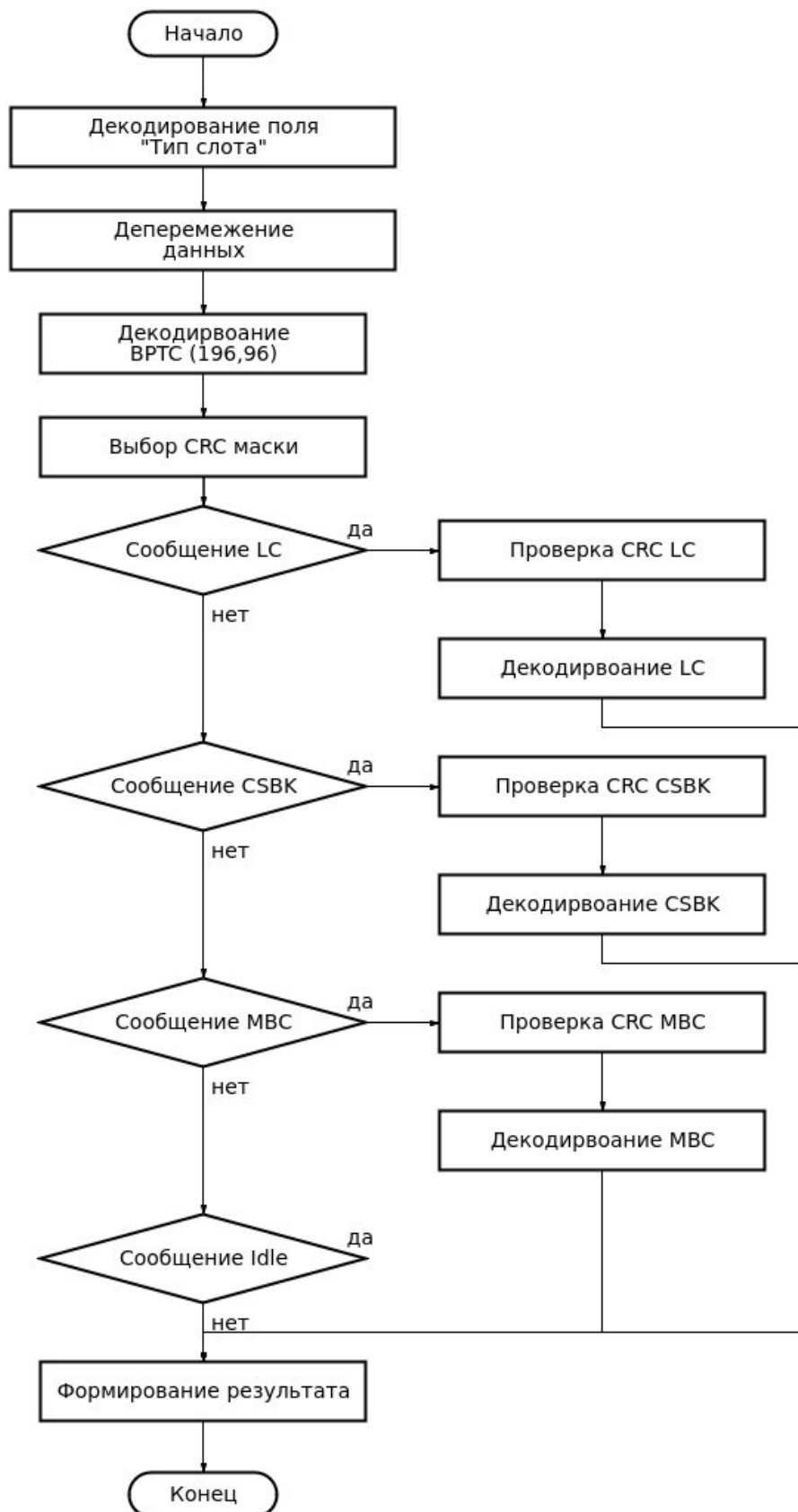


Рисунок 1.8 – Блок-схема алгоритма декодирования.

1.6. Верификация и тестирование алгоритма

Верификация алгоритмов обнаружения сигнала и декодирования, описанных в п. 1.3 и 1.5 соответственно, осуществлялась с использованием ПО MATLAB. Алгоритм декодирования и все функции, описанные в нем, были верифицированы ООО «СТЦ».

Для верификации алгоритма обнаружения в MATLAB был сгенерирован тестовый сигнал соответствующий одному сообщению LC.

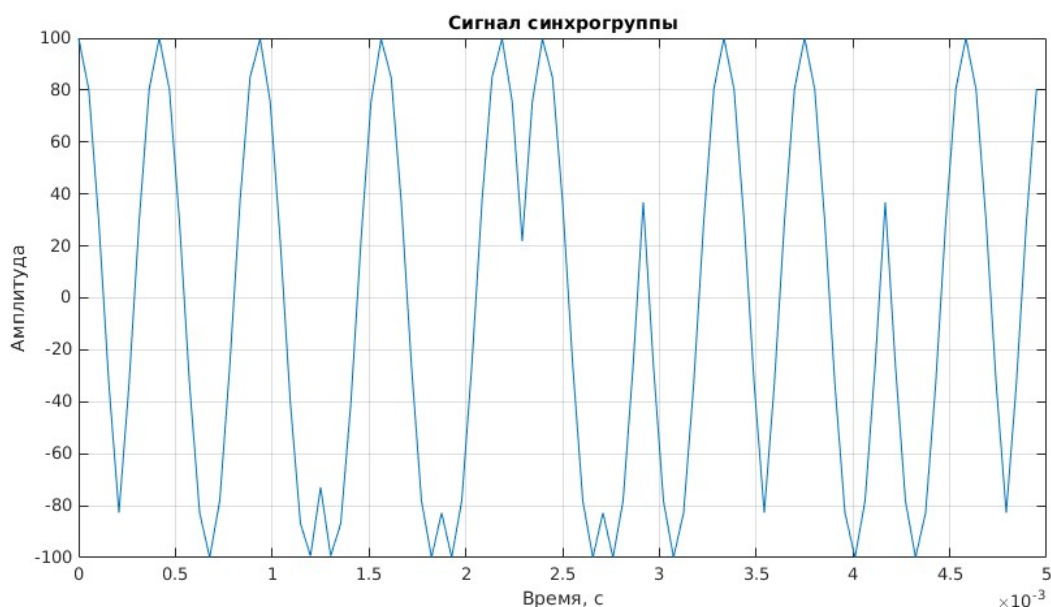


Рисунок 1.9 – Сигнал синхрогруппы (BS Data).

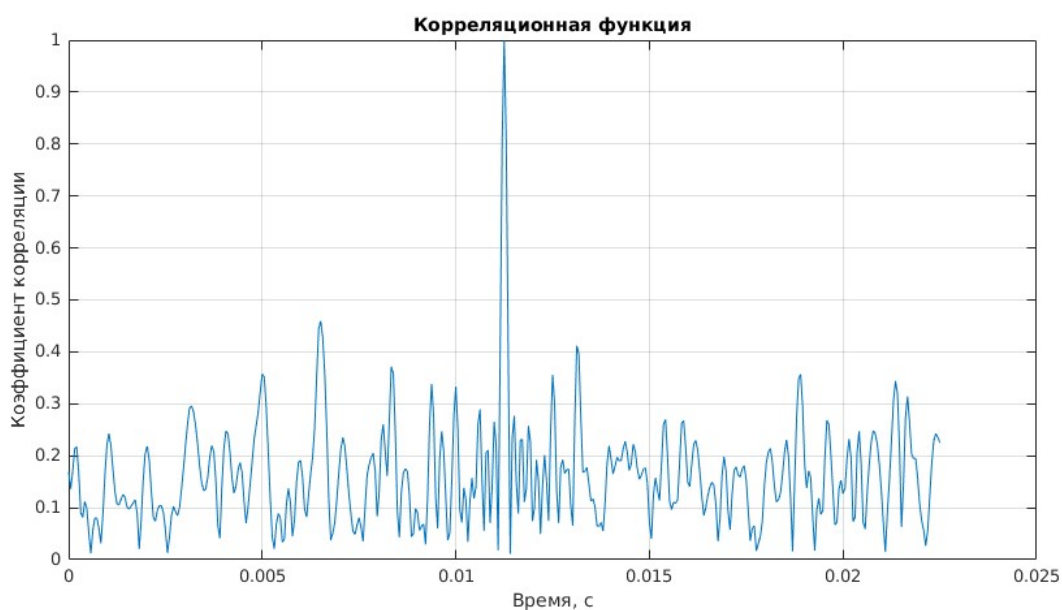


Рисунок 1.10 – Нормированная автокорреляционная функция сигнала синхрогруппы (BS Data).

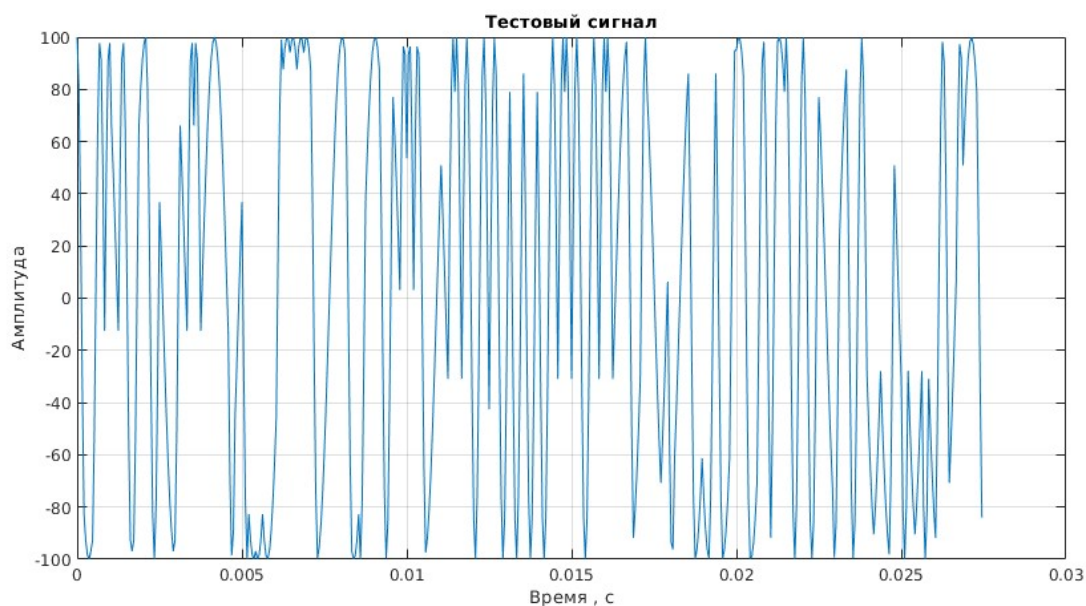


Рисунок 1.11 – Тестовый сигнал.

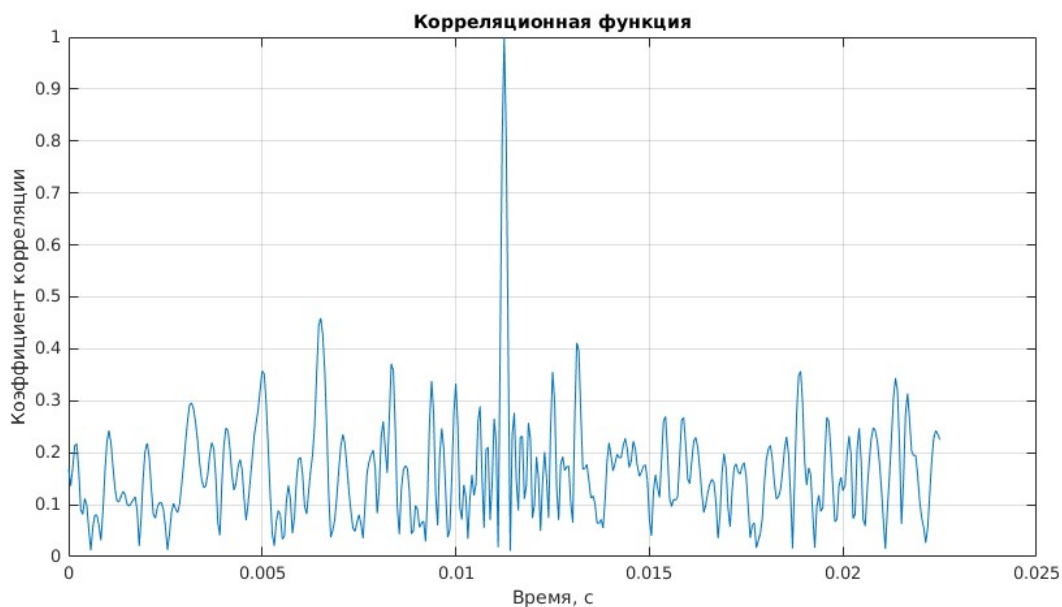


Рисунок 1.12 – Нормированная корреляционная функция тестового сигнала с сигналом синхрогруппы (BS Data).

Выше приведены рисунки сигнала синхрогруппы (BS Data) (рис. 1.9), нормированной автокорреляционной функции сигнала синхрогруппы (рис. 1.10), тестового сигнала сгенерированного в MATLAB (рис. 1.11) и нормированной корреляционной функции тестового сигнала и сигнала синхрогруппы (рис. 1.12), полученные в MATLAB.

Верификация демодуляции и алгоритма декодирования была произведена путем сравнения демодулированных и декодированных бит с соответствующими битами тестового сигнала. При верификации кода на С++ был использован аналогичный тестовый сигнал, в результате были получены аналогичные выходные данные.

Верификация алгоритмов демодуляции и декодирования проводилась путем сравнения символов и битов, полученных после демодуляции и декодирования с соответствующими символами и битами тестового сигнала. Аналогичные тестовые сигналы использовались при верификации кода на С++, в результате были получены аналогичные выходные данные.

1.7. Быстродействие алгоритма

Для оценки быстродействия быстродействия алгоритма на вход программного модуля был подан тестовый сигнал размером 5120 отсчетов с частотой дискретизации 19200 Гц, что составляет 267 мс. Требования к быстродействию алгоритма выражены следующим условием: отношение времени обработки подаваемого сигнала ко времени самого сигнала не должно превышать 1:1.

Длительность обработки и отдельных её этапов представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Быстродействие алгоритма.

Этап	Время, мкс
Коррекция частотной ошибки	19
Обнаружение	27
Демодуляция	21
Декодирование	5
Полный цикл	1725

Полученные результаты удовлетворяют заданным требованиям к быстродействию алгоритма, т.к. отношение времени обработки подаваемого сигнала ко времени самого сигнала равно 1:153.

1.8. Помехоустойчивость алгоритма

Оценка помехоустойчивости алгоритма производилась с помощью имеющегося тестового сигнала, к которому был добавлен аддитивный белый гауссовский шум. После обработки сигнала алгоритмом были собраны данные об обнаружении и декодировании сигнала. Для каждого значения ОСШ было произведено 10^5 итераций алгоритма, далее для оценки вероятности обнаружения сигнала при заданном ОСШ, суммарное количество обнаруженных сигналов, было разделено на количество итераций. График зависимости соответствующих оценочных вероятностей от отношения сигнал/шум приведен на рис. 1.13.

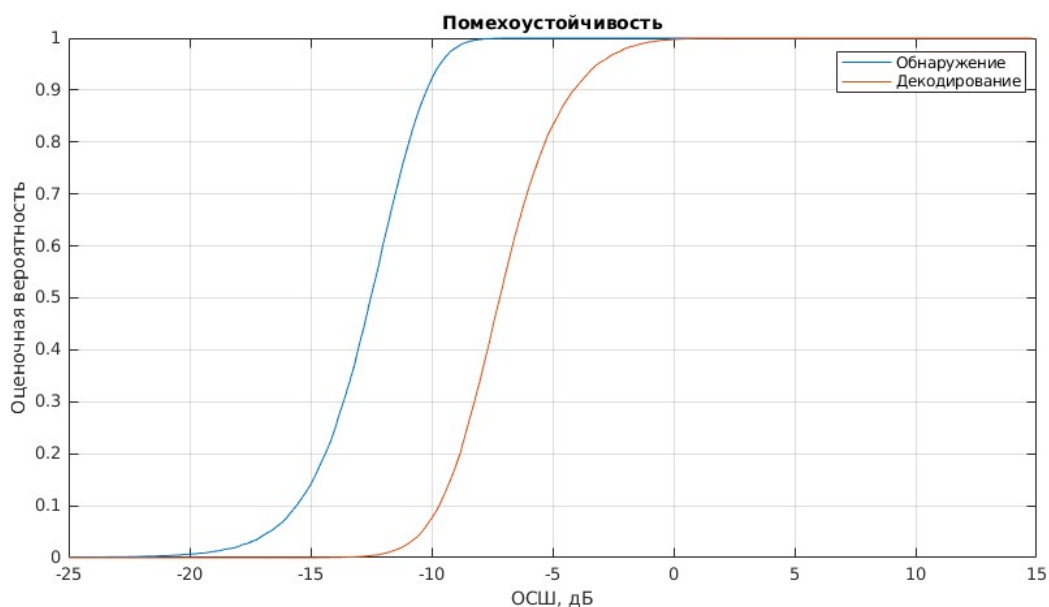


Рисунок 1.13 – Зависимость оценочных вероятностей от значения ОСШ

Данный график показывает, что реализованный алгоритм способен правильно декодировать исходные сообщения с вероятностью 0.9 при ОСШ не менее -4 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате прохождения практики был реализован алгоритм обработки сигнала стандарта DMR. Алгоритм был внедрен в программный модуль реализованный на языке программирования C++ с использованием объектно-ориентированного стиля программирования, представляющий собой высокопроизводительное, кроссплатформенное программное обеспечение, реализующее обнаружение, демодуляцию и идентификацию устройств стандарта DMR.

В ходе прохождения практики были решены следующие задачи:

- Изучение стандарта DMR Air Interface (AI) protocol;
- Изучение основных этапов формирования сигнала физического уровня;
- Исследование различных способов обнаружения сигнала;
- Реализация алгоритма на языке программирования C++;
- Внедрение реализованного алгоритма в программный модуль;
- Тестирование программного модуля;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон «О связи»: текст с изменениями на Ф32 2021 год. – Москва: Эксмо, 2021. – 112 с. – (Актуальное законодательство).
2. Сергиенко А.Б. Цифровая связь: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 164 с.
3. Прокис Дж. Цифровая связь / под ред. Д.Д. Кловского М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е / под ред. А.В. Назаренко М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. 1104 с.
5. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовского. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 624 с.: ил.
6. Справочник по радиоконтролю. МСЭ 2002. Женева. 2004. 584 с.
7. Проблемы поиска сигналов системами радиоэлектронной борьбы // Иностранная печать. Сер. ТСР. 1998. №9. С. 25-32.
8. Рембовский А.М. Задачи и структура средств автоматизированного радиоконтроля // Специальная техника. 2003. С. 2-7.
9. Алиев Д.С., Иванов А.В., Иванов А.В.,. Анализ конструкций современных пеленгаторных антенн. «Воздушно-космические силы. Теория и практика» № 1, март 2017.
10. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters; Digital Mobile Radio Systems; Part 1: DMR Air Interface protocol.
11. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. Москва: Техносфера, 2007. – 488с.
12. Волков В.Ю. Моделирование и обработка сигналов и полей в радиотехнических задачах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 122 с.