Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

09.03.01 Информатика и вычислительная техника
(направление подготовки/специальность)
Программное обеспечение мобильных систем
(профиль/специализация)
Очная
(форма обучения)

ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ

(*вид практики)*

Тип практики Технологическая (проектно-технологическая) практика
на предприятии ООО «Бюро 1440»
(наименование профильной организации/структурного подразделения СибГУТИ)

ТЕМА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Разработка ПО для OFDM приемопередатчика на базе программно-конфигурируемого радио (SDR)

Примечание [КБ1]: Тему спросить у меня в тг, она написана в дневнике, у некоторых разная

Выполнил:
студент института информатики и вычислительной техники Иванов Иван Алексеевич
группа ИА-331

_____/_____/
«____» _____ 202__г. *(подпись)* *(ФИО)*

Проверил[1]
Руководитель практики от профильной организации _____/ Андреев А. В. /
(подпись) *(ФИО)*
«____» _____ 202__г.

Проверил:
Руководитель практики от СибГУТИ _____/ Брагин К. И. /
(подпись) *(ФИО)*

«____» _____ 202__г.

отметка [2]_____ _____«____» _____ 202__г.

Новосибирск 2025

[1] В случае прохождения практики в профильной организации
[2] Заполняется во время промежуточной аттестации

План-график проведения
Производственной практики
вид практики
Иванов Иван Алексеевич
Фамилия Имя Отчество студента

института ИВТ, курса 3, гр. ИА-331
Направление: 09.03.01 Информатика и вычислительная техника
Код – Наименование направления (специальности)
Направленность (профиль)/ специализация: Программное обеспечение мобильных систем
Место прохождения практики: г. Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, д. 51, ауд. 469
Объем практики: 360/10 часов/ЗЕ
Тип практики: Технологическая (проектно-технологическая) практика
Срок практики:с 29.01.2025 по 27.05.2025 (раз в неделю) и с 17.06.2025 по 13.07.2025 (ежедневно);

Содержание практики[3]:
Тема индивидуального задания практики Разработка ПО для OFDM приемопередатчика на базе программно-конфигурируемого радио (SDR)

Наименование видов деятельности	Дата (начало – окончание)
Прохождение инструктажей ОТ, ПБ, знакомство с структурой предприятия и его деятельностью	01.02
Временная и частотная область обработки, сигналы Формирование сигналов, визуализация в Python	08.02
Дискретизация сигналов. Спектр дискретных отсчетов сигналов. ДПФ Изучение основных параметров библиотеки PyAdi для Adalm Pluto SDR	15.02
Вычисление ДПФ, свойства ДПФ Изучение основных свойств ДПФ с помощью моделирования в Python/Spyder	22.02
Амплитудная модуляция Изучение свойств АМ-сигналов с помощью моделирования в Python/Spyder	29.02
Амплитудная модуляция. Передача\прием прямоугольного сигнала	07.03
Комплексное НЧ представление сигналов. Квадратурное представление сигналов. Цифровая квадратурная модуляция	14.03
Разработка кам модулятора, контроль на анализаторе спектра с разными параметрами сигнала. Разработка КАм демодулятора – символьная синхронизация, посимвольный прием, получение точек созвездия, визуализация. Изучение квадратурных искажений	21.03
КАМ-модулятор, демодулятор, синхронизация приемника и передатчика	28.03
Выполнение первой части отчета, подготовка и заполнение дневника	04.04
Квадратурная IQ модуляция. Общая схема формирования и приема сигналов с дискретной модуляцией. Дискретная АМ, формирование символов в формирующем фильтре, прием сигналов. коды Баркера	11.04
Дискретная АМ, формирование символов в формирующем фильтре, прием сигналов на согласованный фильтр. Формирование QPSK. Передача и прием QPSK-сигналов, синхронизация и фазовая коррекция	18.04

[3] В случае прохождения практики в профильной организации

Частотная синхронизация с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ)	25.04, 02.05
GNU Radio. Реализация FM-приемника, воспроизведение звука в real-time.	08.05, 16.05, 23.05
Работа по заданию над проектом. Стандарты для Python	17.06
Прием сигналов на согласованный фильтр, глазковая диаграмма, символьная синхронизация	18.06
Введение в OFDM, идея параллельной передачи. Понятие поднесущей. Частотный разнос между поднесущими	19.06
Синхронизация OFDM-сигналов во времени, циклический префикс	20.06
Баллистика. Эффект Доплера	21.06
Самостоятельная работа	22-23.06
Прием OFDM. Символьная синхронизация, частотная синхронизация, оценка канала и коррекция	24.06
Оценка канала по пилотным RS-сигналам при OFDM-приеме и коррекция принимаемого сигнала	24.06, 25.06
Измерения радиосигналов с помощью анализатора спектра R&S FSH4	26.06
Open source проекты для сетей мобильной связи. LTE srsRAN. настройка сети без радиомодуля	27.06
Open Source проект LTE srsRan. Подключение радиомодуля на базе SDR USRP N310. Настройка БС и UE srsRan	28.06
LTE. Архитектура построения сетей. Сетевые элементы, интерфейсы и их функции. Протоколы взаимодействия между сетевми элементами	28.06 – 30.07
LTE. Радиоподсистема. eNB. стек протоколов радиоинтерфейса. Логические, транспортные, физические каналы и сигналы. Структурная схема приемо-передатчика OFDM. MIMO	01.07 – 07.07
Open Source проект LTE srsRan. Анализ системных параметров из блоков SIB, конфигурация случайного доступа, настройки логгирования	08.07 – 11.07
Конкурс лучших SDR-проектов. Защита работ. Заполнение дневника и сдача отчетов.	12.07 – 13.07

В соответствии с рабочей программой практики

Руководитель практики от профильной организации* _____/ Андреев А. В. /

« 29 » января 2025 г. *(подпись)* *(ФИО)*

Руководитель практики от СибГУТИ _____/ Брагин К. И. /

« 29 » января 2025 г. *(подпись)* *(ФИО)*

Отзыв о работе студента

Примечание [КБ2]: Этот лист не трогать!

_____

(ФИО студента)

Уровень освоения компетенций

Компетенции	Уровень сформированности компетенций
ПК-1 Способен разрабатывать требования и проектировать программное обеспечение	
ПК-3 Способен осуществлять эксплуатацию и развитие транспортных сетей и сетей передачи данных, включая спутниковые системы	

Уровень компетенций: высокий, средний, низкий, не сформирована

Руководитель практики от СибГУТИ:

Старший преподаватель
Кафедры ТС и ВС _____ Брагин К.И.
должность руководителя практики *подпись* *ФИО руководителя практики*

« 13 » июля 2025 г.

Практика 1
Архитектура Adalm Pluto SDR.
GNU Radio. Построение радио-приёмника

Цель практики:

Знакомство с программой GNU Radio и построение радиоприемника с помощью блоков программы.

Краткие теоретические сведения

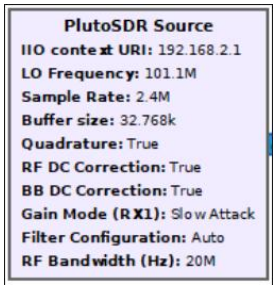
GNU Radio — это свободный набор инструментов для построения программно-определяемых радиосистем (**SDR**), который использует подход "потокового графа" для обработки сигналов. Этот подход позволяет пользователям, используя готовые блоки (например, фильтры, детекторы, преобразователи частоты), создавать радиосистемы для различных целей — как для работы с реальным оборудованием, так и для симуляции. Разработка может вестись в визуальной среде (**GNU Radio Companion**) или с помощью языков программирования, таких как **Python** и **C++.**

Выполнение

Для построения приемника мы используем следующие блоки:

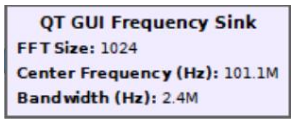
1. **PlutoSDR Source**

Этот блок необходимо привязать к реальному устройству с помощью переменной **IIO context URI**. Блок будет настроен не несущую частоту реального радио-передатчика. Зададим **Sample Rate** при помощи внешней переменной (Variable). Получим следующее:



2. **QT GUI Frequency Sink**

Этот блок необходим для отображения спектральной плотности мощности относительно несущей частоты и для более точного визуального поиска FM-частоты.



3. **Low Pass Filter**

Фильтр низких частот позволяет избавиться (подавить) от “лишнего” сигнала на частотах, отличных от среза искомой полосы FM-станции.

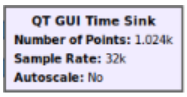
Важным параметром является **Cutoff Freq**, которая определяет половину ширины полосы искомого сигнала по обе стороны от несущей частоты. Известно, что FM-станции вещают в ширине полосы равной 200 [kHz].

Так как мы на выходе всей программы должны получить аудио-сигнал, который можно будет услышать, нам необходимо снизить частоту дискретизации примерно до 48 [kHz]. Для этого используется параметра **Decimation**. В фильтре низких частот можем избавиться от каждого пятого сэмпла

После **LPF** также необходимо визуально посмотреть на результат, добавляем **QT GUI Freq. Sink**.

4. **QT GUI Time Sink**

   Позволит отобразить сигнал во временной шкале.



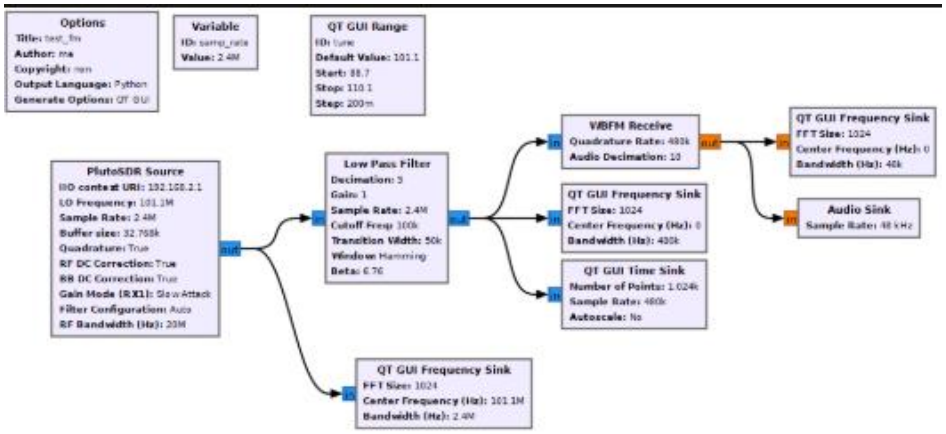
5. **WBFM Receive**

   Блок, позволяющий демодулировать широковещательный FM-сигнал. Важным параметром является **Decimation**, который необходимо настроить под sample rate аудио-потока для прослушивания.

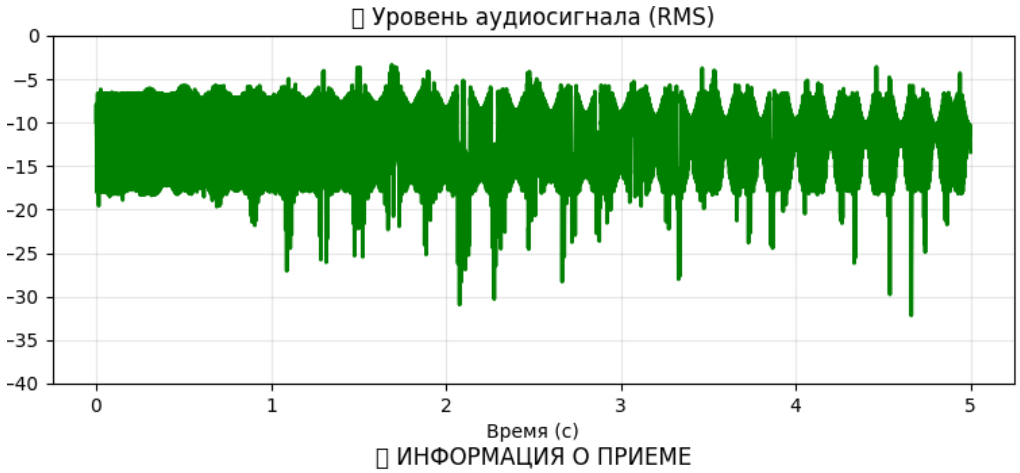
6. **Audio Sink**

   Воспроизведение аудио-потока в динамиках\наушниках компьютера.

Итоговая схема выглядит след. образом:



Результат работы:



Практика 2

Знакомство с библиотеками Soapy SDR,
Libio для работы с Adalm Pluto SDR.
Инициализация SDR-устройства.
Работа с буфером: получение цифровых IQ-отсчетов.

Цель практики:

Изучить основы работы с библиотеками SoapySDR и Libiio для взаимодействия с Adalm Pluto SDR. Освоить инициализацию устройства, настройку параметров и получение цифровых IQ-отсчетов.

Основные теоретические сведения:

Библиотека SoapySDR предоставляет кроссплатформенный API для работы с SDR-оборудованием, абстрагируя особенности конкретных устройств. Libiio (Industrial I/O) является низкоуровневым фреймворком ядра Linux для управления аналогово-цифровыми преобразователями и периферийными устройствами.

ADALM Pluto SDR использует чип AD9363 с 12-битными ЦАП/АЦП, поддерживающий работу в диапазоне частот 325 МГц - 3.8 ГГц. Для представления сигналов используется IQ-формат, где I (in-phase) - синфазная компонента, Q (quadrature) - квадратурная компонента, вместе образующие комплексный сигнал.

Выполнение

Инициализация устройства и базовой конфигурации

```
SoapySDRKwargs args = {};
SoapySDRKwargs_set(&args, "driver", "plutosdr");
SoapySDRKwargs_set(&args, "uri", "ip:192.168.2.1");
SoapySDRDevice *sdr = SoapySDRDevice_make(&args);

// Базовая конфигурация приемника
SoapySDRDevice_setSampleRate(sdr, SOAPY_SDR_RX, 0, 1e6);
SoapySDRDevice_setFrequency(sdr, SOAPY_SDR_RX, 0, 800e6, NULL);
SoapySDRDevice_setGain(sdr, SOAPY_SDR_RX, 0, 10.0);
```

Код инициализирует PlutoSDR через сетевой интерфейс с частотой дискретизации 1 МГц, несущей частотой 800 МГц и усилением 10 дБ.

Создание и активация потока приема

```
size_t channel = 0;
SoapySDRStream *rxStream;
SoapySDRDevice_setupStream(sdr, &rxStream, SOAPY_SDR_RX, SOAPY_SDR_CS16,
&channel, 1, NULL);
SoapySDRDevice_activateStream(sdr, rxStream, 0, 0, 0);
```

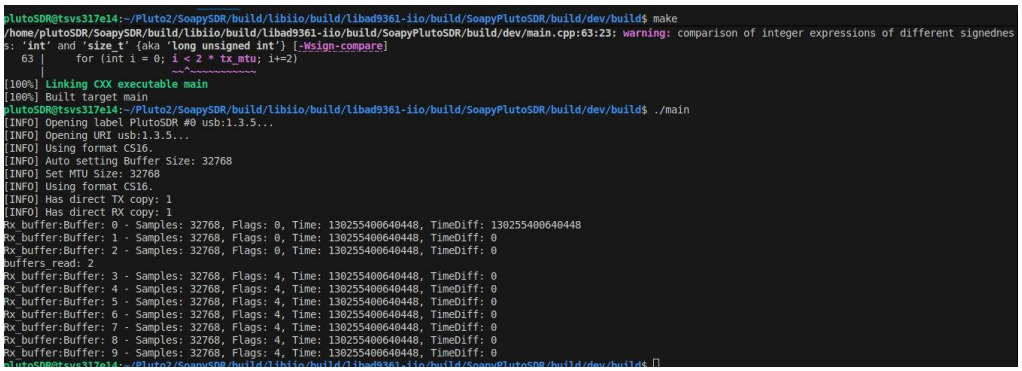
Создается RX-поток с форматом CS16 (16-битные целочисленные I/Q samples) и активируется для работы.

Организация буфера приема и чтение данных

```
size_t mtu = SoapySDRDevice_getStreamMTU(sdr, rxStream);
int16_t *rx_buffer = malloc(2 * mtu * sizeof(int16_t));

// Цикл приема данных
void *buffs[] = {rx_buffer};
int samples_read = SoapySDRDevice_readStream(sdr, rxStream, buffs, mtu, &flags,
&timeNs, timeoutUs);
```

=

Получим следующий вывод отсчетов



Для визуализации отсчетов используем простую программу на Python

```python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметры сигнала
A = 2.0  # Амплитуда
f0 = 5.0  # Частота (Гц)
phi = -0.3  # Начальная фаза (рад)
T = 1 / f0  # Период
Ts = 0.001  # Шаг дискретизации

# Вектор времени (несколько периодов)
t = np.arange(-2 * T, 2 * T, Ts)

# Гармоническое колебание
x = A * np.cos(2 * np.pi * f0 * t + phi)

# Вычисление коэффициентов Фурье для n = 0,1,2,3,4
n_max = 4
a_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
b_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
A_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
phi_coeffs = np.zeros(n_max + 1)

for n in range(n_max + 1):
    # Опорные колебания
    cos_n = np.cos(2 * np.pi * n * f0 * t)
    sin_n = np.sin(2 * np.pi * n * f0 * t)

    # Интегрирование произведений
    a_n = (2 / T) * np.sum(x * cos_n) * Ts
    b_n = (2 / T) * np.sum(x * sin_n) * Ts

    a_coeffs[n] = a_n
    b_coeffs[n] = b_n

    # Амплитуда и фаза гармоники
    A_coeffs[n] = np.sqrt(a_n + b_n)
    phi_coeffs[n] =  - np.arctan2(b_n, a_n)
```

```
print("Коэффициенты для гармонического колебания (φ = 0):")
print("n\t a_n\t\t b_n\t\t A_n\t\t φ_n")
for n in range(n_max + 1):
    print(f"{n}\t {a_coeffs[n]:.4f}\t {b_coeffs[n]:.4f}\t {A_coeffs[n]:.4f}\t
{phi_coeffs[n]:.4f}")

# Графики для гармонического колебания
plt.figure(figsize=(12, 8))

# Сигнал и его спектр
plt.subplot(2, 2, 1)
plt.plot(t, x)
plt.title('Гармоническое колебание')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Амплитуда')
plt.grid(True)

# Амплитудный спектр
plt.subplot(2, 2, 2)
n_values = np.arange(0, n_max + 1)
plt.stem(n_values, A_coeffs)
plt.title('Амплитудный спектр (An)')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Амплитуда')
plt.grid(True)

# Фазовый спектр
plt.subplot(2, 2, 3)
plt.stem(n_values, phi_coeffs)
plt.title('Фазовый спектр (φn)')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Фаза (рад)')
plt.grid(True)

# Коэффициенты a_n и b_n
plt.subplot(2, 2, 4)
plt.stem(n_values, a_coeffs, 'b', markerfmt='bo', label='a_n')
plt.stem(n_values, b_coeffs, 'r', markerfmt='ro', label='b_n')
plt.title('Коэффициенты a_n и b_n')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Значение')
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Вывод такой:

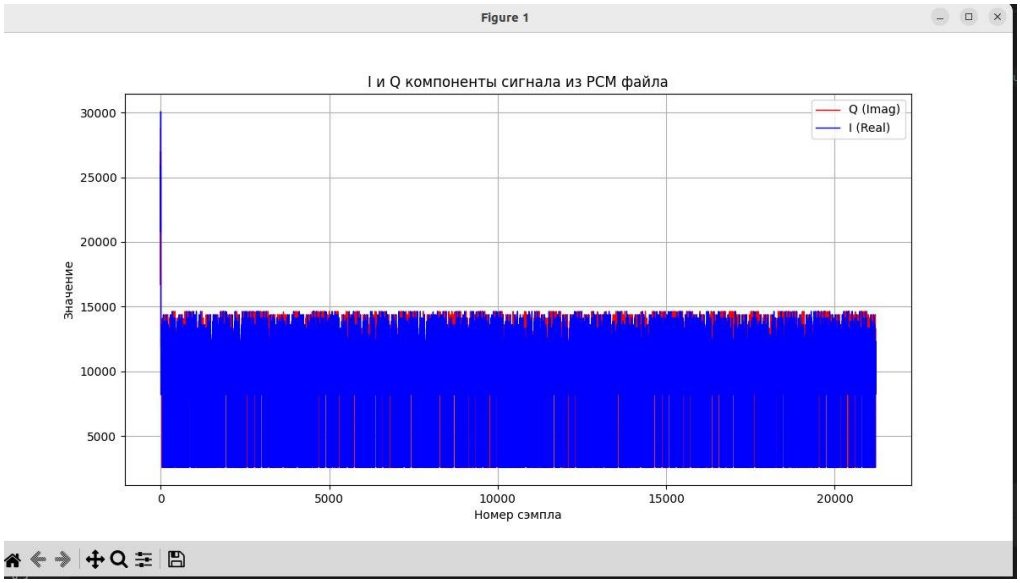


Figure 1
I и Q компоненты сигнала из PCM файла
Q (Imag)
I (Real)
Значение
Номер сэмпла
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
5000
10000
15000
20000

Практика 3

Работа с библиотеками Soapy SDR, Libio .

Формирование и передача с SDR сигналов произвольной формы

Цель работы:

Освоить формирование комплексных сигналов произвольной формы и их передачу через PlutoSDR.

Краткие теоретические сведения

Комплексный сигнал представляется как I + jQ. Для PlutoSDR требуется сдвиг на 4 бита влево при формировании samples.

Выполнение

Генерация тонального сигнала

```
void generate_complex_tone(int16_t *buffer, size_t num_samples,
                           double amplitude, double frequency, double sample_rate)
{
    for (size_t i = 0; i < num_samples; i++) {
        double t = (double)i / sample_rate;
        double i_val = amplitude * cos(2 * M_PI * frequency * t);
        double q_val = amplitude * sin(2 * M_PI * frequency * t);

        buffer[2*i] = (int16_t)i_val << 4;
        buffer[2*i + 1] = (int16_t)q_val << 4;
    }
}
```

Функция генерирует комплексный тональный сигнал с заданной амплитудой и частотой, применяя сдвиг на 4 бита.

Настройка передатчика и передача

```
SoapySDRDevice_setSampleRate(sdr, SOAPY_SDR_TX, 0, 1e6);
SoapySDRDevice_setFrequency(sdr, SOAPY_SDR_TX, 0, 800e6, NULL);
SoapySDRDevice_setGain(sdr, SOAPY_SDR_TX, 0, -50.0);
SoapySDRStream *txStream;
SoapySDRDevice_setupStream(sdr, &txStream, SOAPY_SDR_TX, SOAPY_SDR_CS16,
&channel, 1, NULL);
SoapySDRDevice_activateStream(sdr, txStream, 0, 0, 0);

// Включение циклического режима
SoapySDRDevice_setTxCyclic(sdr, true);
void *tx_buffs[] = {tx_buffer};
int tx_result = SoapySDRDevice_writeStream(sdr, txStream, tx_buffs, mtu, &flags,
timeNs, 1000000);
```

Настраивается передатчик с минимальным усилением для безопасности, создается TX-поток и запускается циклическая передача.

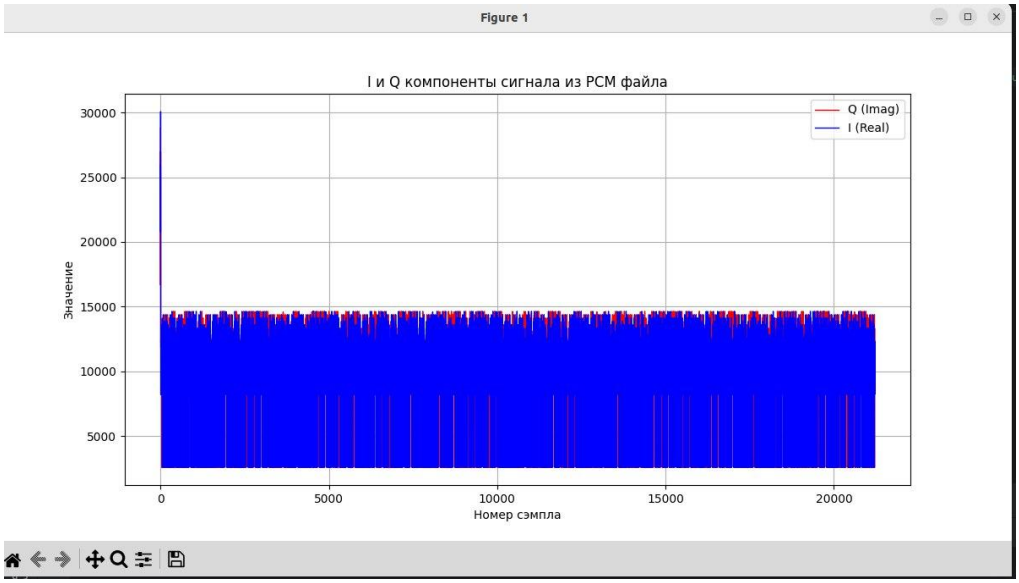
Для визуализации отсчетов используем простую программу на Python

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметры сигнала
A = 2.0  # Амплитуда
f0 = 5.0  # Частота (Гц)
phi = -0.3  # Начальная фаза (рад)
T = 1 / f0  # Период
Ts = 0.001  # Шаг дискретизации

# Вектор времени (несколько периодов)
t = np.arange(-2 * T, 2 * T, Ts)

# Гармоническое колебание
x = A * np.cos(2 * np.pi * f0 * t + phi)

# Вычисление коэффициентов Фурье для n = 0,1,2,3,4
```

```
n_max = 4
a_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
b_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
A_coeffs = np.zeros(n_max + 1)
phi_coeffs = np.zeros(n_max + 1)

for n in range(n_max + 1):
    # Опорные колебания
    cos_n = np.cos(2 * np.pi * n * f0 * t)
    sin_n = np.sin(2 * np.pi * n * f0 * t)

    # Интегрирование произведений
    a_n = (2 / T) * np.sum(x * cos_n) * Ts
    b_n = (2 / T) * np.sum(x * sin_n) * Ts

    a_coeffs[n] = a_n
    b_coeffs[n] = b_n

    # Амплитуда и фаза гармоники
    A_coeffs[n] = np.sqrt(a_n + b_n)
    phi_coeffs[n] =  - np.arctan2(b_n, a_n)

print("Коэффициенты для гармонического колебания (φ = 0):")
print("n\t a_n\t\t b_n\t\t A_n\t\t φ_n")
for n in range(n_max + 1):
    print(f"{n}\t {a_coeffs[n]:.4f}\t {b_coeffs[n]:.4f}\t {A_coeffs[n]:.4f}\t
{phi_coeffs[n]:.4f}")

# Графики для гармонического колебания
plt.figure(figsize=(12, 8))

# Сигнал и его спектр
plt.subplot(2, 2, 1)
plt.plot(t, x)
plt.title('Гармоническое колебание')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Амплитуда')
plt.grid(True)

# Амплитудный спектр
plt.subplot(2, 2, 2)
n_values = np.arange(0, n_max + 1)
plt.stem(n_values, A_coeffs)
plt.title('Амплитудный спектр (An)')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Амплитуда')
plt.grid(True)

# Фазовый спектр
plt.subplot(2, 2, 3)
plt.stem(n_values, phi_coeffs)
plt.title('Фазовый спектр (φn)')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Фаза (рад)')
plt.grid(True)

# Коэффициенты a_n и b_n
plt.subplot(2, 2, 4)
plt.stem(n_values, a_coeffs, 'b', markerfmt='bo', label='a_n')
plt.stem(n_values, b_coeffs, 'r', markerfmt='ro', label='b_n')
plt.title('Коэффициенты a_n и b_n')
plt.xlabel('Номер гармоники (n)')
plt.ylabel('Значение')
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Вывод такой:



Практика 4

Примеры формирования I/Q-сэмплов произвольной формы.

Работа с буфером приема SDR

Цель работы

Освоить технику формирования сложных сигналов и организацию одновременного приема/передачи.

Краткие теоретические сведения

Full-duplex режим позволяет одновременно передавать и принимать данные. MTU определяет оптимальный размер блоков данных.

Выполнение

Генерация многотонального сигнала

```
void generate_multitone_signal(int16_t *buffer, size_t num_samples, double
sample_rate) {
    double frequencies[] = {1000.0, 5000.0, 15000.0};
    double amplitudes[] = {800.0, 1200.0, 600.0};

    for (size_t i = 0; i < num_samples; i++) {
        double t = (double)i / sample_rate;
        double i_val = 0.0, q_val = 0.0;

        for (int j = 0; j < 3; j++) {
            i_val += amplitudes[j] * cos(2 * M_PI * frequencies[j] * t);
            q_val += amplitudes[j] * sin(2 * M_PI * frequencies[j] * t);
        }

        buffer[2*i] = (int16_t)i_val << 4;
        buffer[2*i + 1] = (int16_t)q_val << 4;
    }
}
```

Функция создает сигнал из суммы трех тонов с разными частотами и амплитудами.

Организация полного дуплекса

```
// Создание обоих потоков
SoapySDRStream *rxStream, *txStream;
SoapySDRDevice_setupStream(sdr, &rxStream, SOAPY_SDR_RX, SOAPY_SDR_CS16,
&channel, 1, NULL);
SoapySDRDevice_setupStream(sdr, &txStream, SOAPY_SDR_TX, SOAPY_SDR_CS16,
&channel, 1, NULL);

// Активация потоков
SoapySDRDevice_activateStream(sdr, rxStream, 0, 0, 0);
SoapySDRDevice_activateStream(sdr, txStream, 0, 0, 0);

// Цикл полного дуплекса
void *tx_buffs[] = {tx_buffer};
void *rx_buffs[] = {rx_buffer};

int tx_result = SoapySDRDevice_writeStream(sdr, txStream, tx_buffs, mtu, &flags,
timeNs, 100000);
int rx_result = SoapySDRDevice_readStream(sdr, rxStream, rx_buffs, mtu, &flags,
&timeNs, 100000);
```

Создаются и активируются одновременно RX и TX потоки, организуется цикл одновременной передачи и приема.

Вывод будет следующим

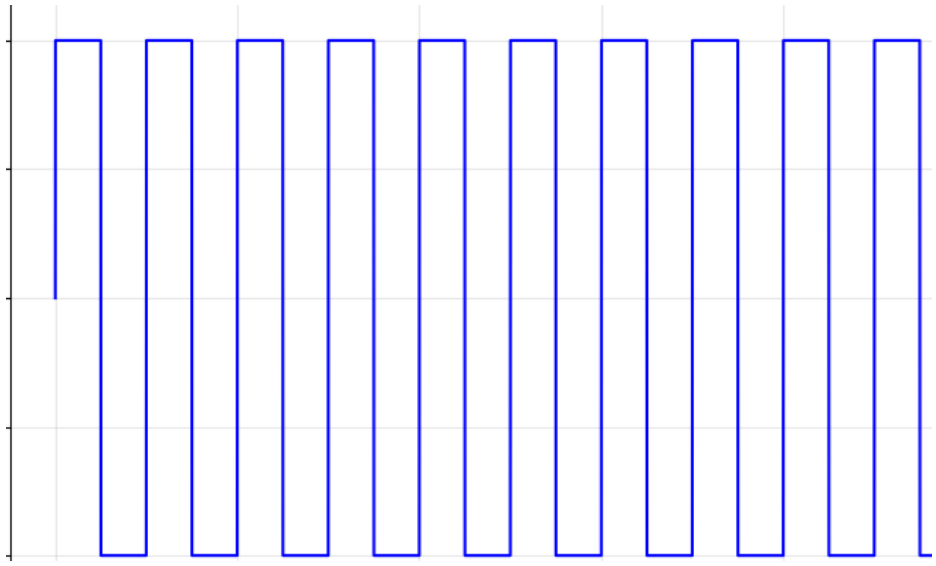
```
plutoSDR@tsvs317e14:~/SoapySDR/build/libiio/build/libad9361-iio/build/SoapyPlutoSDR/build/dev/build$ ./main
  Записано в файл: 1920 samples (7680 байт)
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
Buffer: 10 - Samples: 1920
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
Buffer: 20 - Samples: 1920
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
Buffer: 30 - Samples: 1920
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
Buffer: 40 - Samples: 1920
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
[WARNING] Backwards timestamp step!
Данные записаны в файл txdata.pcm
Программа завершена. Размер файла: 384000 байт
```

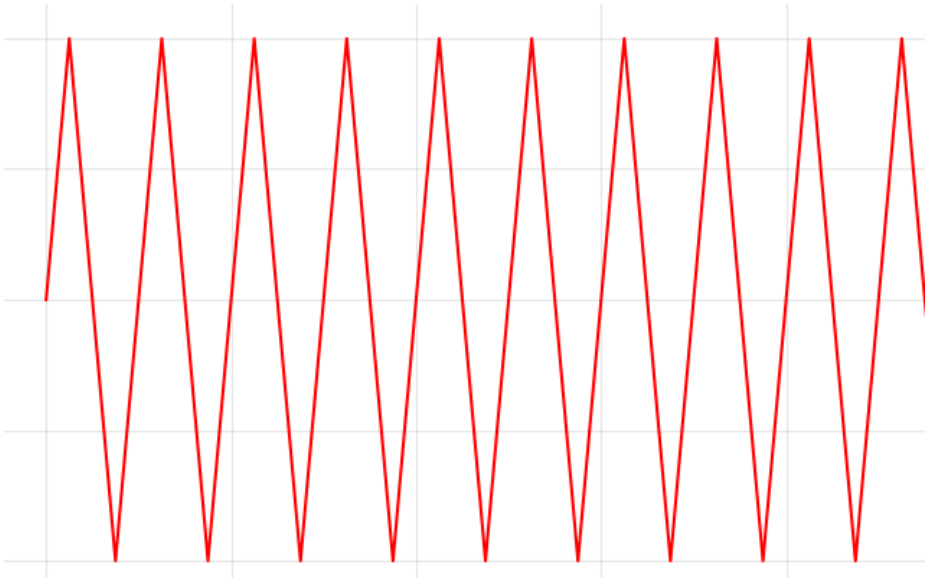
Генерация треугольных и квадратных сигналов

```c
#include <math.h>
#include <stdint.h>

// Генерация прямоугольного сигнала
void generate_square_wave(int16_t *buffer, size_t num_samples,
                          double amplitude, double frequency, double sample_rate)
{
    size_t samples_per_period = sample_rate / frequency;

    for (size_t i = 0; i < num_samples; i++) {
        int phase = (i / samples_per_period) % 2;
        int16_t value = (phase == 0) ? amplitude : -amplitude;

        buffer[2*i] = value << 4;       // I компонента
        buffer[2*i + 1] = 0 << 4;       // Q компонента = 0
    }
}
```

```c
// Генерация треугольного сигнала
void generate_triangle_wave(int16_t *buffer, size_t num_samples,
                            double amplitude, double frequency, double
sample_rate) {
    size_t samples_per_period = sample_rate / frequency;
    double step = (2.0 * amplitude) / (samples_per_period / 2);

    for (size_t i = 0; i < num_samples; i++) {
        size_t position_in_period = i % samples_per_period;
        int16_t value;

        if (position_in_period < samples_per_period / 2) {
            // Восходящий фронт
            value = -amplitude + (step * position_in_period);
        } else {
            // Нисходящий фронт
            size_t descending_pos = position_in_period - samples_per_period / 2;
            value = amplitude - (step * descending_pos);
        }

        buffer[2*i] = value << 4;       // I компонента
        buffer[2*i + 1] = 0 << 4;       // Q компонента = 0
    }
}
```

Графики выведем с помощью той же программы, что и для вывода обычных сэмплов





Практика 5
Имитация аналоговой передачи звука и его прием с использованием SDR. Анализ влияния чувствительности приемника и усиления передатчика на качество принятых отсчетов сигнала (семплов)

Цель работы

Реализовать имитацию аналоговой передачи аудиосигнала через SDR и исследовать влияние параметров усиления.

Основные теоретические сведения

Имитация аналоговой передачи звука с использованием SDR включает в себя модулирование аналогового звука, его передачу в радиоэфир и последующий приём с помощью SDR-приёмника. Чувствительность приёмника и усиление передатчика критически важны: низкая чувствительность или слишком низкое усиление могут привести к появлению помех и потере полезного сигнала, а излишне высокое усиление может вызвать перегрузку приёмника и искажение сигнала.

PCM (Pulse Code Modulation) - импульсно-кодовая модуляция, raw данные без сжатия
MP3 - формат сжатия аудио с потерями по стандарту MPEG-1/2 Layer 3
I/Q компоненты - синфазная и квадратурная составляющие комплексного сигнала
Частота дискретизации - определяет полосу частот сигнала (1 МГц для SDR)

Выполнение

Чтение PCM файла и разделение на I/Q компоненты

```
def read_pcm_file(filename):
"""Чтение PCM файла и разделение на I/Q компоненты"""
data = []
imag = []
real = []
count = []
counter = 0

print(f"Чтение PCM файла: {filename}")

with open(filename, "rb") as f:
index = 0
while (byte := f.read(2)):
if index % 2 == 0:
# I компонента (Real)
real_val = int.from_bytes(byte, byteorder='little', signed=True)
real.append(real_val)
counter += 1
count.append(counter)
else:
# Q компонента (Imaginary)
imag_val = int.from_bytes(byte, byteorder='little', signed=True)
imag.append(imag_val)
index += 1

print(f"Прочитано {len(real)} I/Q пар")
return np.array(real), np.array(imag), np.array(count)
```

Функция открывает бинарный PCM файл и читает данные по 2 байта за раз

```
index % 2 == 0 - четные байты относятся к I-компоненте (синфазной)

index % 2 == 1 - нечетные байты относятся к Q-компоненте (квадратурной)

int.from_bytes(byte, byteorder='little', signed=True) - преобразует 2 байта в 16-
битное целое число со знаком в little-endian формате
```

count - массив номеров samples для построения графиков

Возвращает три массива: real (I), imag (Q) и count (номера samples)

Анализ характеристик сигнала

```
def analyze_signal_characteristics(real, imag):
    """Анализ характеристик сигнала"""
    # Создаем комплексный сигнал
    complex_signal = real + 1j * imag

    print("\n=== АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА ===")
    print(f"Общее количество samples: {len(complex_signal)}")
    print(f"Длительность (при 1 МГц): {len(complex_signal)/1e6:.3f} секунд")

    # Статистика
    print(f"\nСТАТИСТИКА I КОМПОНЕНТЫ:")
    print(f"  Среднее: {np.mean(real):.2f}")
    print(f"  СКО: {np.std(real):.2f}")
    print(f"  Максимум: {np.max(real)}")
    print(f"  Минимум: {np.min(real)}")

    # Мощность сигнала
    power = np.mean(np.abs(complex_signal)**2)
```

```
    print(f"\nМощность сигнала: {power:.2f}")

    return complex_signal
```

complex_signal = real + 1j * imag - создает комплексный сигнал из I и Q компонент

np.mean(real) - вычисляет среднее значение I-компоненты (показывает наличие DC смещения)

np.std(real) - стандартное отклонение (показывает разброс значений)

np.abs(complex_signal) - вычисляет амплитуду комплексного сигнала

Мощность сигнала - средний квадрат амплитуды, важный параметр для оценки уровня сигнала
Преобразование PCM в MP3

```
def pcm_to_mp3_conversion(real, imag, output_filename, original_sample_rate=1e6,
audio_sample_rate=48000):
    """Преобразование PCM в MP3 с ресемплингом"""

    # Используем только I компоненту для аудио
    audio_samples = real.astype(np.float32)

    # Нормализация к диапазону [-1, 1]
    max_val = np.max(np.abs(audio_samples))
    if max_val > 0:
        audio_samples = audio_samples / max_val
```

PCM данные имеют диапазон ±32767 (16-бит)
Для аудио обработки нужно нормализовать к ±1.0
audio_samples / max_val - масштабирует значения к диапазону [-1, 1]

Практика 7.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ BPSK-СИГНАЛОВ и QPSK-сигналов

BPSK сигналы

BPSK (Binary Phase Shift Keying) — это вид фазовой манипуляции, один из самых простых и надежных методов цифровой модуляции.

Суть BPSK заключается в том, чтобы кодировать цифровые данные (биты 0 и 1) изменением фазы несущей синусоидальной волны.

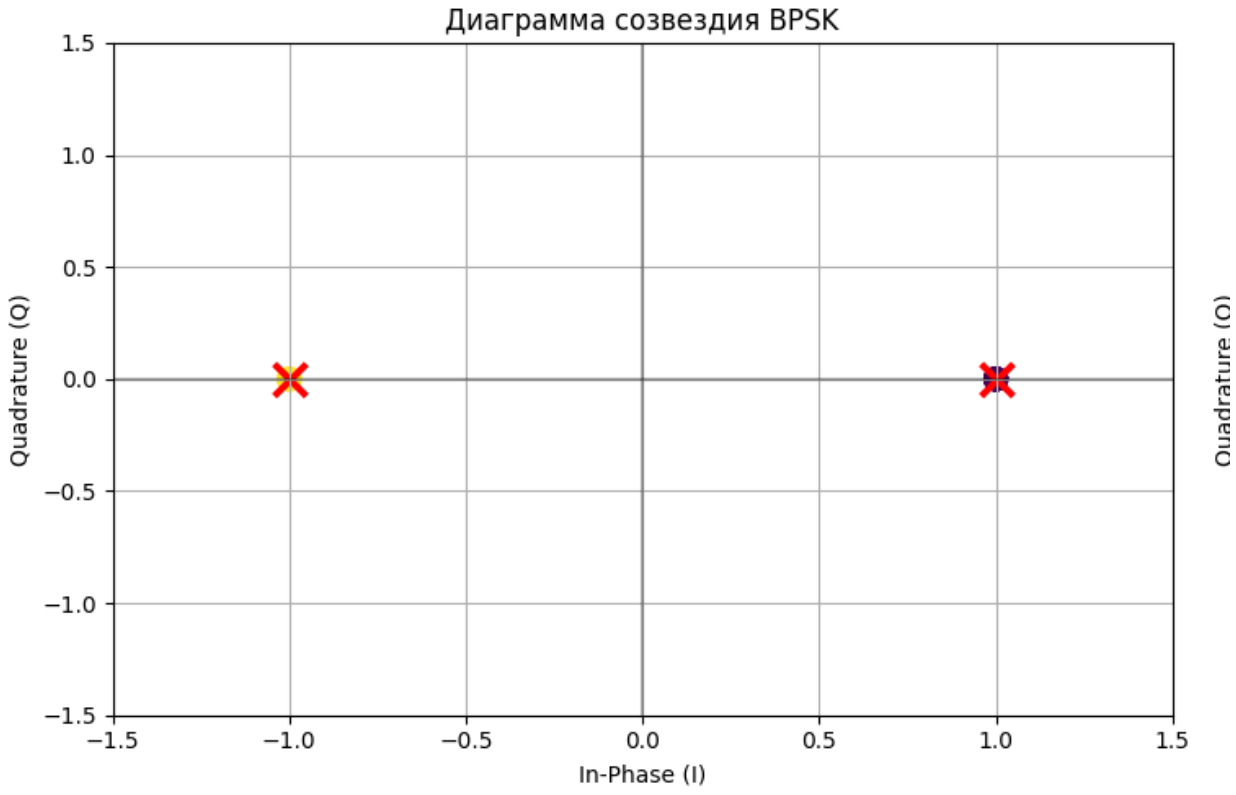
Биту '0' соответствует одна фаза несущей (например, 0°).

Биту '1' соответствует противоположная фаза (например, 180°).

Разность фаз между двумя состояниями составляет 180 градусов, что является максимально возможной, что делает BPSK очень помехоустойчивой.

Диаграмма созвездия - это очень важный инструмент для понимания цифровых видов модуляции. Она отображает сигналы в виде точек на плоскости (In-Phase / Quadrature).

Для BPSK диаграмма созвездия состоит всего из двух точек:

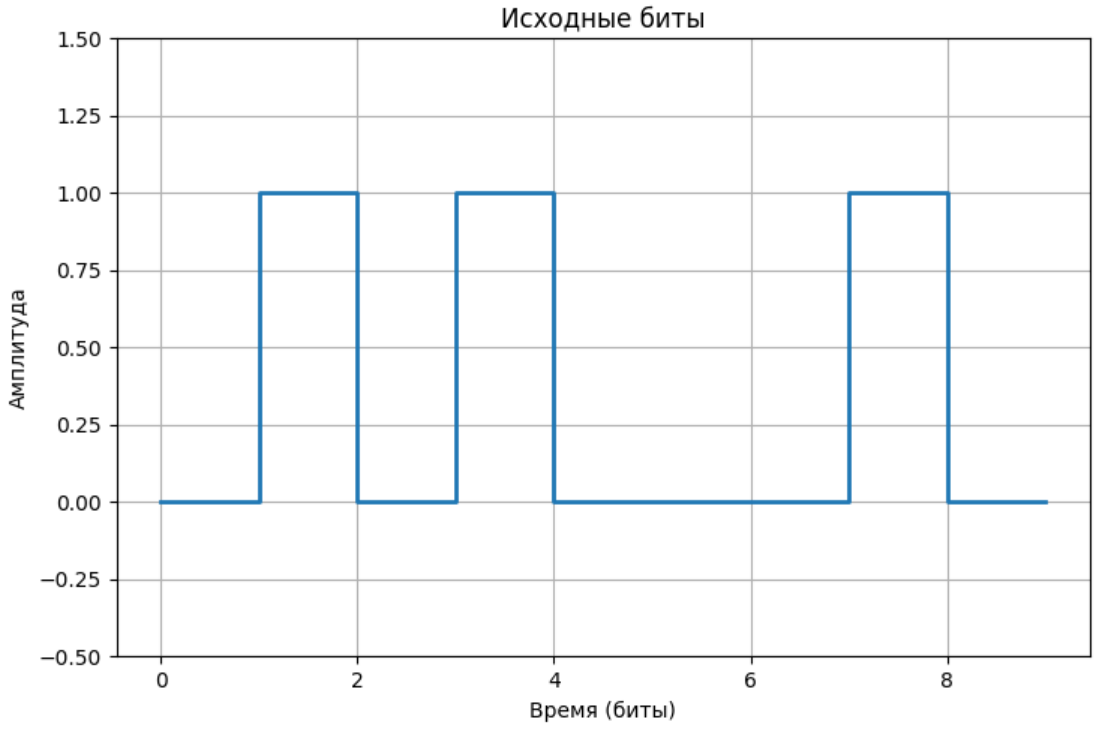


Так мы можем четко понять, какой именно стороне созвездия какая фаза соответствует, т.е. все , что слева – одна фаза, а то, что справа – другая.

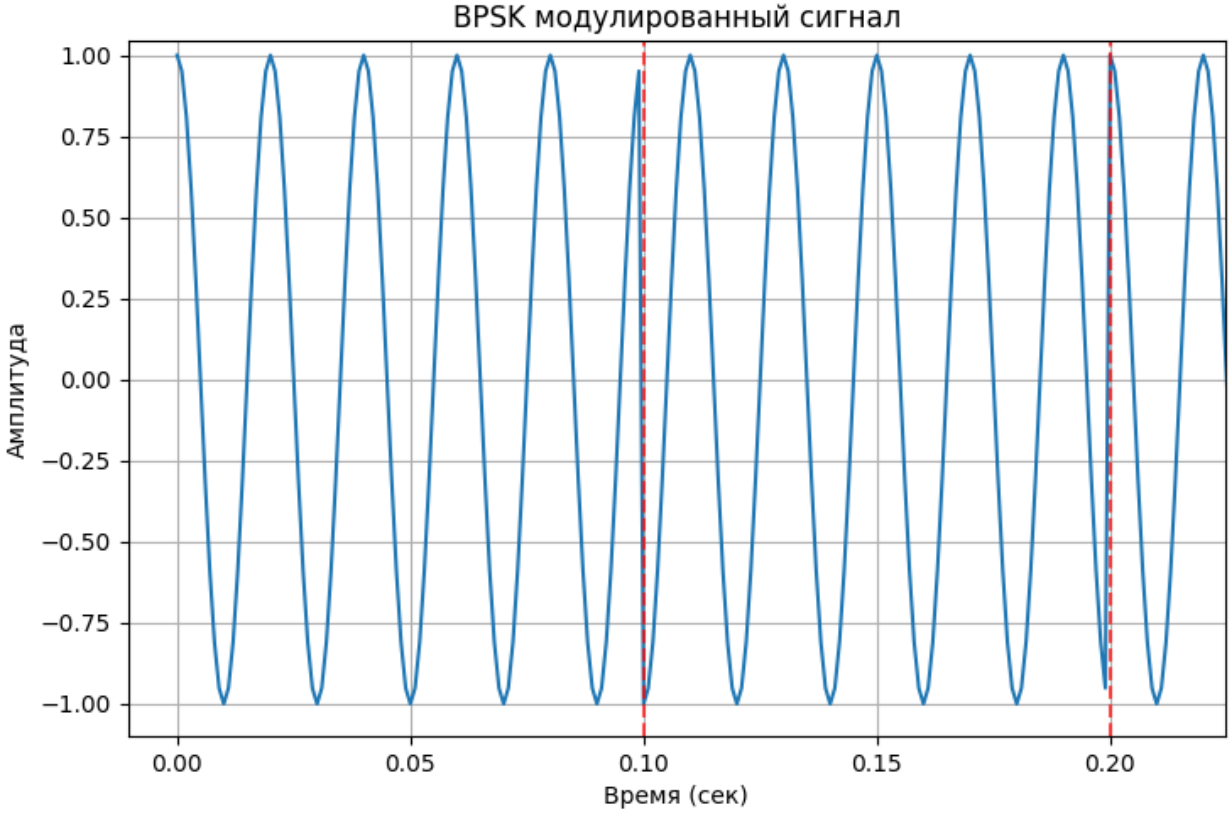
Реализация BPSK

```
vector<complex<double>> bpsk_modulation(const vector<int>& bits, int
upsample_factor = 10) {
    vector<complex<double>> iq_samples(bits.size() * upsample_factor);

    for (size_t i = 0; i < bits.size(); i++) {
        double symbol = bits[i] == 0 ? 1.0 : -1.0;
        iq_samples[i * upsample_factor] = complex<double>(symbol, 0.0);

        for (int j = 1; j < upsample_factor; j++) {
            iq_samples[i * upsample_factor + j] = complex<double>(0.0, 0.0);
        }
    }

    return iq_samples;
}
```

Входные сэмплы



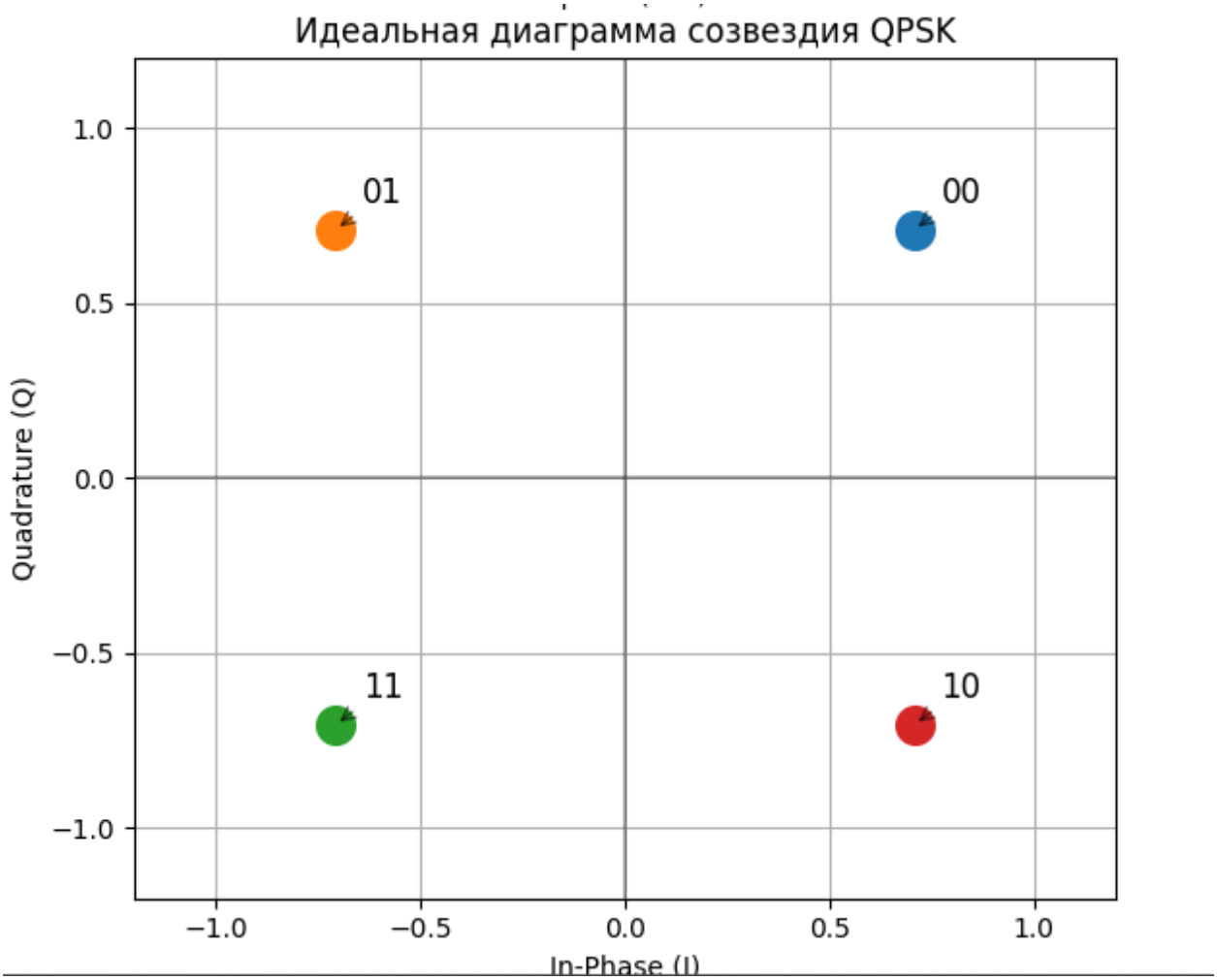
Выходные биты


BPSK модулированный сигнал
Амплитуда
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
−0.25
−0.50
−0.75
−1.00
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
Время (сек)

QPSK-сигналы

QPSK - это вид фазовой манипуляции, который передает 2 бита на один символ, что делает его в два раза более спектрально эффективным по сравнению с BPSK.

В QPSK фаза несущего сигнала может принимать 4 различных значения, каждое из которых кодирует 2 бита.



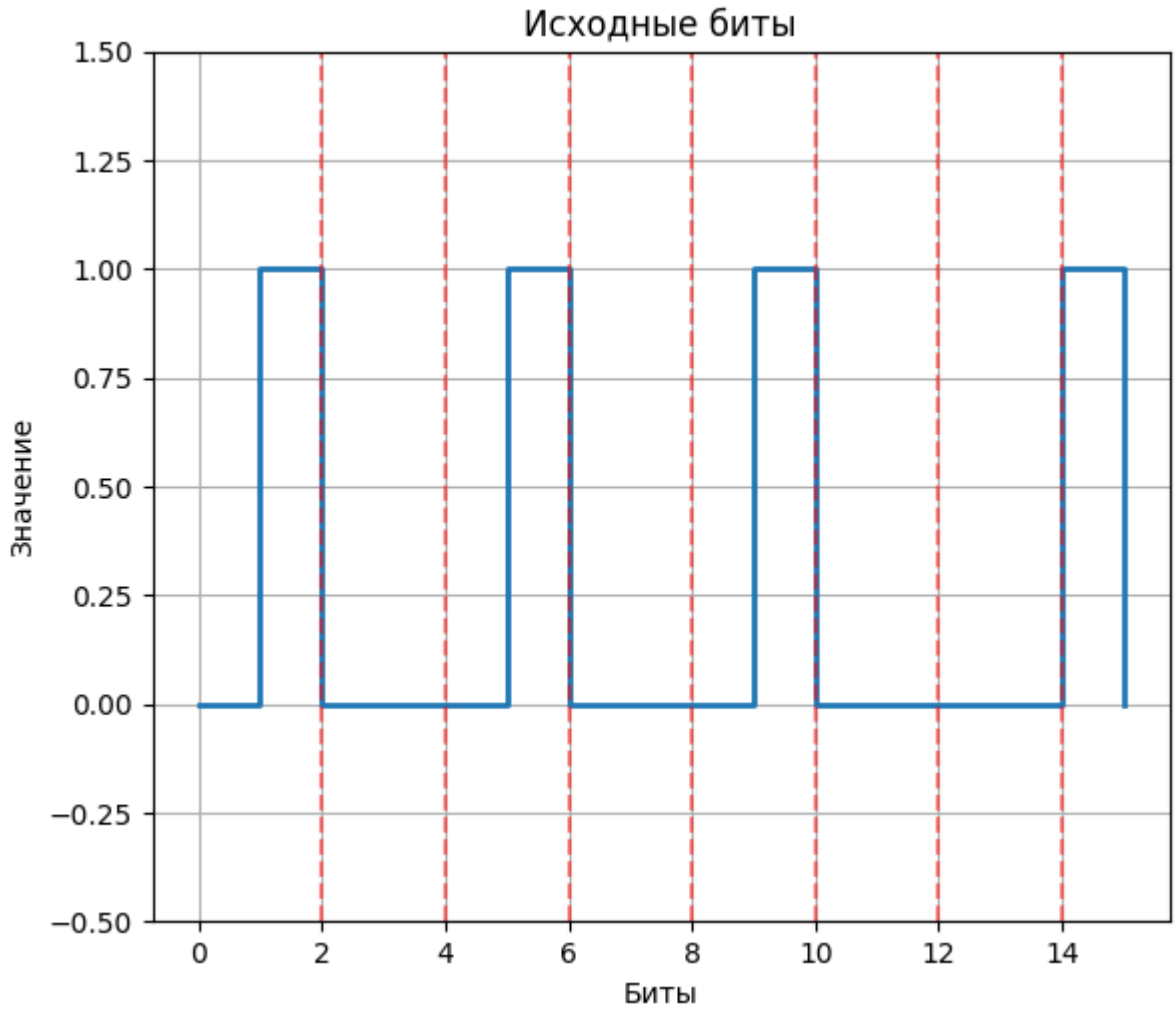
Реализация QPSK

```
vector<complex<double>> qpsk_modulation(const vector<int>& bits, int
upsample_factor = 10) {
    if (bits.size() % 2 != 0) {
        throw invalid_argument("Для QPSK количество битов должно быть
четным");
    }

    vector<complex<double>> iq_samples((bits.size() / 2) * upsample_factor);
```

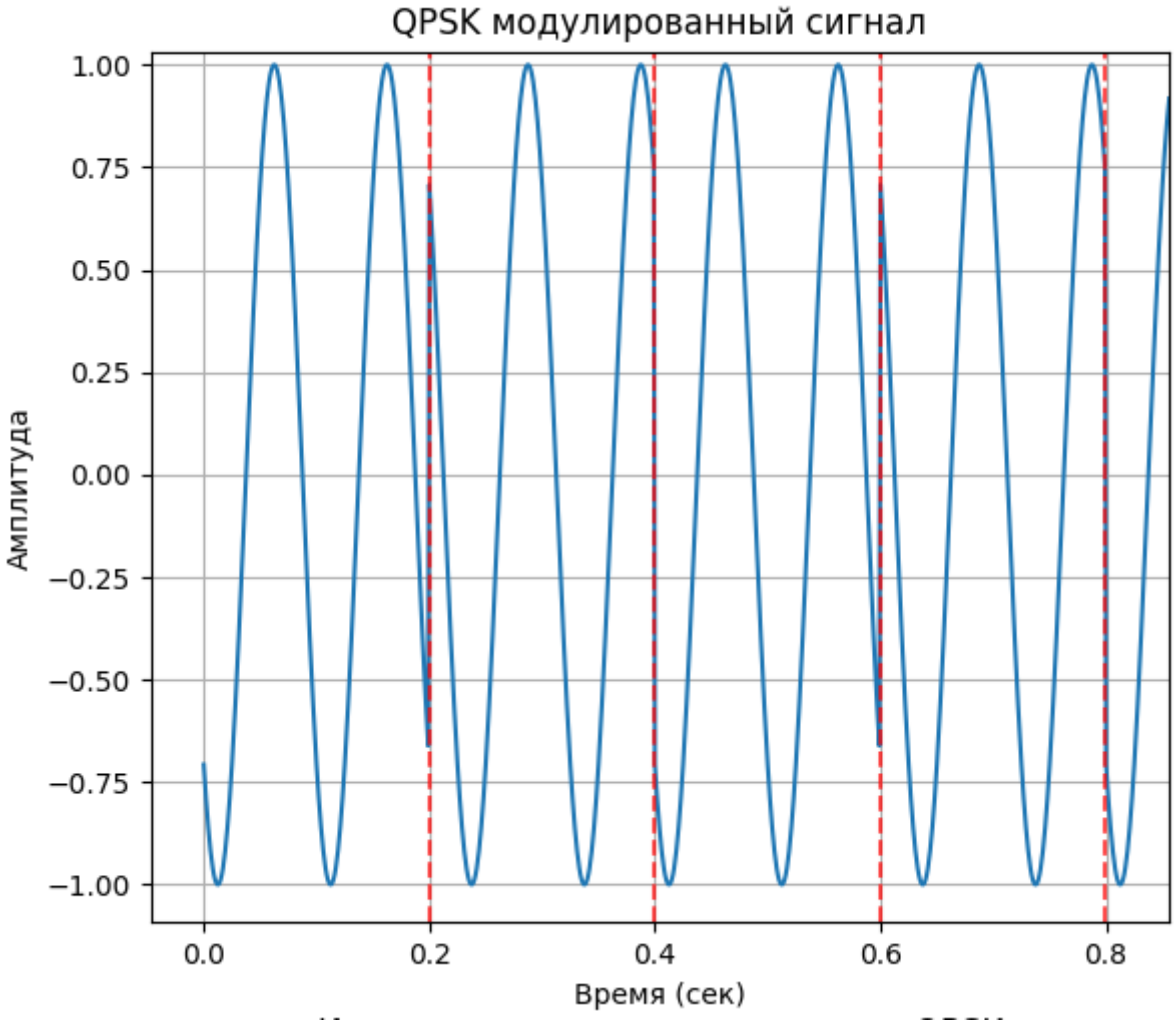
```
    for (size_t i = 0; i < bits.size(); i += 2) {
        int bit_i = bits[i];
        int bit_q = bits[i + 1];

        double i_component = bit_i == 0 ? 1.0 : -1.0;
        double q_component = bit_q == 0 ? 1.0 : -1.0;

        size_t symbol_index = (i / 2) * upsample_factor;
        iq_samples[symbol_index] = complex<double>(i_component, q_component);

        for (int j = 1; j < upsample_factor; j++) {
            iq_samples[symbol_index + j] = complex<double>(0.0, 0.0);
        }
    }

    return iq_samples;
}
```

```
vector<complex<double>> qpsk_modulation(const vector<int>& bits, int
upsample_factor = 10) {
    if (bits.size() % 2 != 0) {
        throw invalid_argument("Для QPSK количество битов должно быть
четным");
    }

    vector<complex<double>> iq_samples((bits.size() / 2) * upsample_factor);

    for (size_t i = 0; i < bits.size(); i += 2) {
        int bit_i = bits[i];
        int bit_q = bits[i + 1];

        double i_component = bit_i == 0 ? 1.0 : -1.0;
        double q_component = bit_q == 0 ? 1.0 : -1.0;

        size_t symbol_index = (i / 2) * upsample_factor;
        iq_samples[symbol_index] = complex<double>(i_component, q_component);

        for (int j = 1; j < upsample_factor; j++) {
            iq_samples[symbol_index + j] = complex<double>(0.0, 0.0);
        }
    }

    return iq_samples;
}
```

Входные биты



Выходной сигнал


QPSK модулированный сигнал
Амплитуда
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
−0.25
−0.50
−0.75
−1.00
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
Время (сек)

Вывод

В ходе данной работы была успешно исследована теория и практическая реализация цифровых видов модуляции, в частности BPSK и QPSK.

Практика 8.

ДИСКРЕТНАЯ СВЕРТКА. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ BPSK-СИМВОЛОВ

На прошлом занятии мы формировали семплы, используя BPSK/QPSK модуляцию. Мы использовали формирующий фильтр, имеющий импульсную характеристику прямоугольной формы. Прямоугольная импульсная характеристика не используется в реальном оборудовании, потому что прямоугольный сигнал будет занимать слишком много спектра. На этом занятии зададим для формирующего фильтра импульсную характеристику с формой приподнятого косинуса. Такая форма может использоваться в реальном оборудовании.

Теория

Импульсная характеристика формирующего фильтра в форме приподнятого косинуса описывается следующей формулой:

$h(t) = \cos(\pi\alpha t/T) / [1 - (2\alpha t/T)^2]$

где:

- t - временной отсчет
- T - период символа
- $\alpha \in [0; 1]$ - коэффициент скругления (roll-off factor)

  Свойства параметра α:
  α = 0 - минимальная полоса пропускания, медленное затухание хвостов

  α = 1 - максимальная полоса пропускания, быстрое затухание хвостов

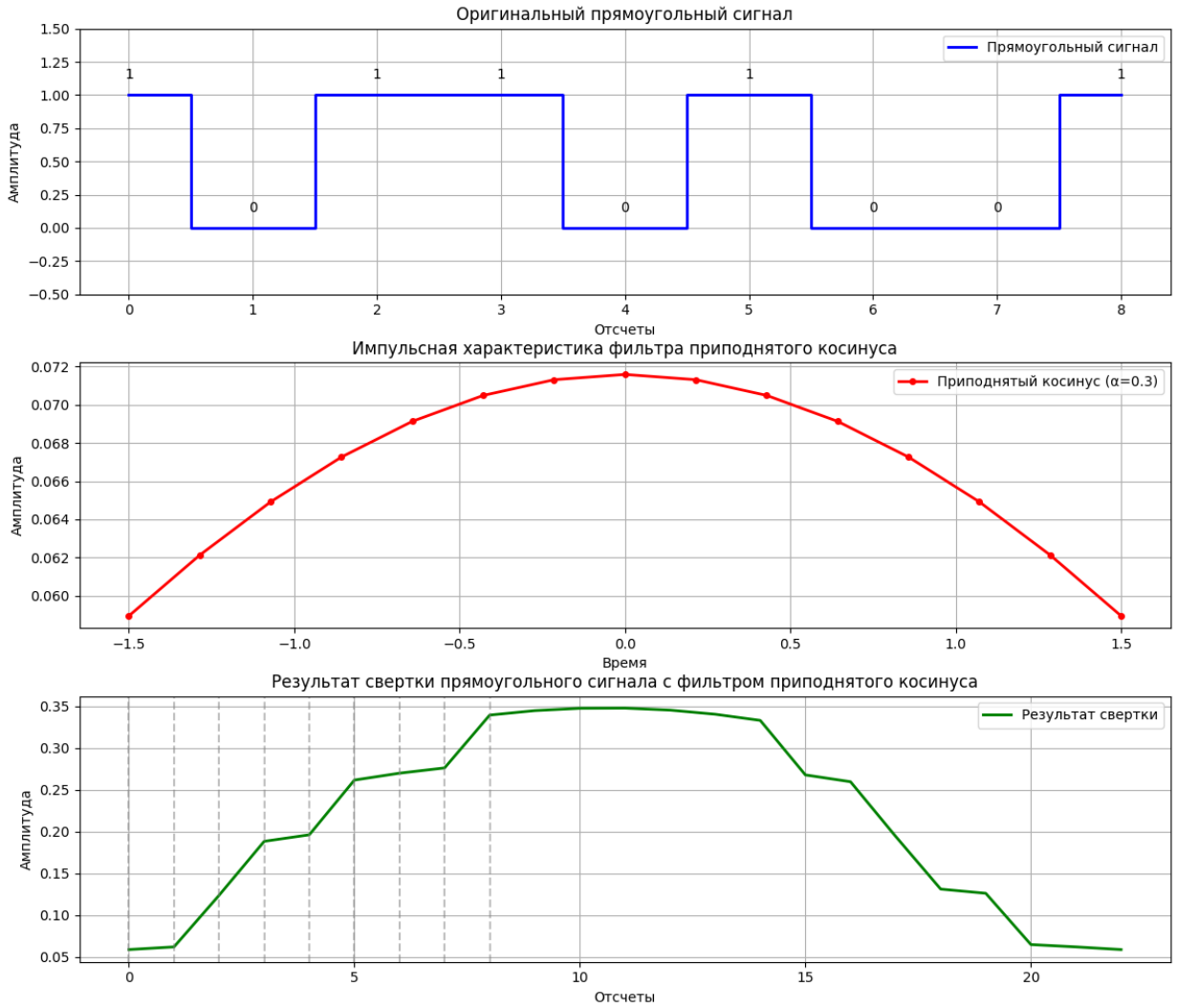
  Оптимальный диапазон для беспроводной связи: $0.2 \leq \alpha \leq 0.3$

  Компромиссы выбора α:
  Меньше α → уменьшение межсимвольной интерференции, но повышение чувствительности к джиттеру

  Больше α → улучшение устойчивости к джиттеру, но увеличение полосы частот

Практическая реализация на Python

Создадим скрипт для визуализации характеристики приподнятого косинуса и выполнения операции свертки с прямоугольным сигналом:



Видим, что после операции свертки получили новый сигнал, который имеет свойства обоих: он имеет форму приподнятого косинуса, но в то же время растянут, как прямоугольный.

Импульсная характеристика

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdint.h>
#include <math.h>

#define T 0.25
#define ALPHA 0.25
#define SAMPLES_PER_SYMBOL 10
#define M_PI 3.14159265358979323846

// Функция для перевода строки в биты
uint8_t* stob(const char* message, int* bits_count) {
    int len = strlen(message);
    *bits_count = len * 8;
    uint8_t* bits = (uint8_t*)malloc(*bits_count * sizeof(uint8_t));

    for(int i = 0; i < len; ++i) {
        uint8_t byte = message[i];
        for(int j = 0; j < 8; ++j) {
            bits[i * 8 + j] = (byte >> (7 - j)) & 1;
        }
    }
    return bits;
}

// Функция QPSK модуляции
int* QPSK_modulation(uint8_t* bits, int bits_count, int* symbols_count) {
    // QPSK использует 2 бита на символ
    *symbols_count = (bits_count + 1) / 2 * 2; // Четное количество
    int* symbols = (int*)malloc(*symbols_count * sizeof(int));

    for(int i = 0; i < bits_count; i += 2) {
        uint8_t bit1 = bits[i];
        uint8_t bit2 = (i + 1 < bits_count) ? bits[i + 1] : 0; // Дополняем 0
если нечетно

        // QPSK mapping (Gray coding)
        if(bit1 == 0 && bit2 == 0) {       // 00 -> (+1, +1)
            symbols[i] = 1;    // I
            symbols[i + 1] = 1;  // Q
        }
        else if(bit1 == 0 && bit2 == 1) {  // 01 -> (-1, +1)
            symbols[i] = -1;   // I
            symbols[i + 1] = 1;  // Q
        }
```

```
        else if(bit1 == 1 && bit2 == 1) {  // 11 -> (-1, -1)
            symbols[i] = -1;   // I
            symbols[i + 1] = -1; // Q
        }
        else if(bit1 == 1 && bit2 == 0) {  // 10 -> (+1, -1)
            symbols[i] = 1;    // I
            symbols[i + 1] = -1; // Q
        }
    }
    return symbols;
}

// Функция апсемплинга
int* upsampling(int* symbols, int symbols_count, int samples_per_symbol, int*
ups_symbols_count) {
    *ups_symbols_count = symbols_count * samples_per_symbol;
    int* ups_symbols = (int*)malloc(*ups_symbols_count * sizeof(int));

    for(int i = 0; i < symbols_count; ++i) {
        for(int j = 0; j < samples_per_symbol; ++j) {
            ups_symbols[i * samples_per_symbol + j] = symbols[i];
        }
    }
    return ups_symbols;
}

// Функция согласованного фильтра
int16_t* ps_filter(int* ups_symbols, int ups_symbols_count, int
samples_per_symbol,
                   double* g, int* samples_count) {
    // Разделяем I и Q компоненты
    int symbol_count = ups_symbols_count / samples_per_symbol;
    double* I_components = (double*)malloc(symbol_count * sizeof(double));
    double* Q_components = (double*)malloc(symbol_count * sizeof(double));

    for(int i = 0; i < symbol_count; ++i) {
        I_components[i] = ups_symbols[i * 2 * samples_per_symbol]; // I
компоненты
        Q_components[i] = ups_symbols[i * 2 * samples_per_symbol +
samples_per_symbol]; // Q компоненты
    }

    // Применяем свертку к каждой компоненте
    int filtered_length = symbol_count + samples_per_symbol - 1;
    double* I_filtered = (double*)calloc(filtered_length, sizeof(double));
    double* Q_filtered = (double*)calloc(filtered_length, sizeof(double));

    for(int i = 0; i < symbol_count; ++i) {
```

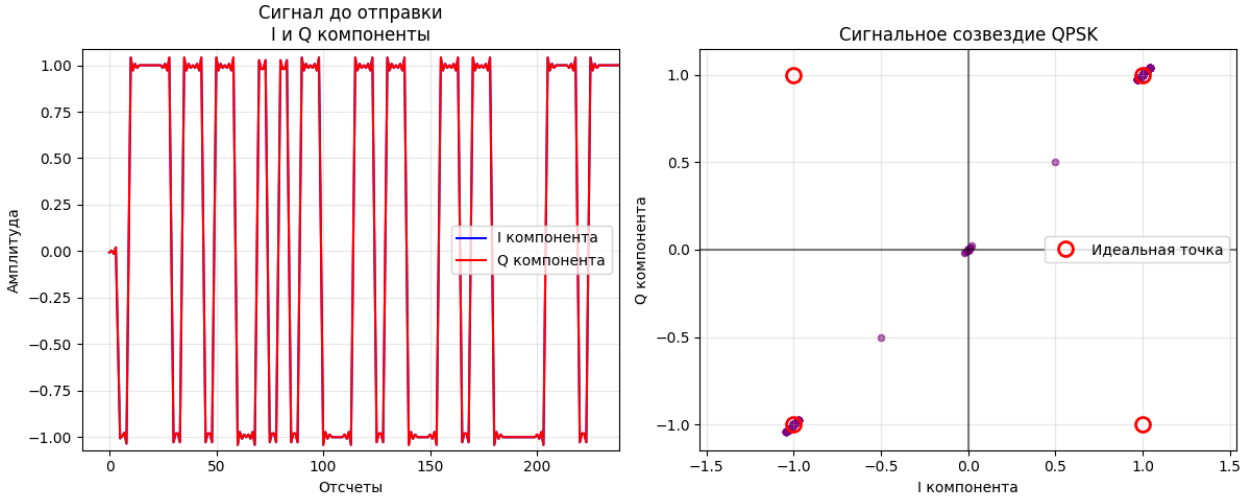
```
        for(int j = 0; j < samples_per_symbol; ++j) {
            I_filtered[i + j] += I_components[i] * g[j];
            Q_filtered[i + j] += Q_components[i] * g[j];
        }
    }

    // Объединяем I и Q компоненты и конвертируем в int16_t
    *samples_count = filtered_length * 2;
    int16_t* samples = (int16_t*)malloc(*samples_count * sizeof(int16_t));

    for(int i = 0; i < filtered_length; ++i) {
        samples[i * 2] = (int16_t)(I_filtered[i] * 16384);     // I
        samples[i * 2 + 1] = (int16_t)(Q_filtered[i] * 16384); // Q
    }

    free(I_components);
    free(Q_components);
    free(I_filtered);
    free(Q_filtered);

    return samples;
}

int main() {
    printf("=== QPSK МОДУЛЯЦИЯ С ФИЛЬТРОМ ПРИПОДНЯТОГО КОСИНУСА ===\n");

    FILE* qpsk_samples = fopen("qpsk_samples.pcm", "wb");
    if(!qpsk_samples) {
        printf("Ошибка открытия файла!\n");
        return 1;
    }

    // 1. Импульсная характеристика фильтра приподнятого косинуса
    double g[SAMPLES_PER_SYMBOL];
    printf("Импульсная характеристика фильтра:\n");
    for(int i = 0; i < SAMPLES_PER_SYMBOL; ++i) {
        double t = i - SAMPLES_PER_SYMBOL / 2; // Симметрично относительно
оси Y
        double denominator = 1 - pow((2 * ALPHA * t / T), 2);

        // Избегаем деления на ноль
        if(fabs(denominator) < 1e-10) {
            // Используем предел при denominator -> 0
            g[i] = (M_PI / 4) * sinc(M_PI * t / (2 * T));
        } else {
            g[i] = cos((M_PI * ALPHA * t) / T) / denominator;
        }
        printf("g[%d] = %.6f\n", i, g[i]);
```

```
    }

    // 2. Перевод строки в биты
    int bits_count = 0;
    uint8_t* bits = stob("Hello QPSK!", &bits_count);
    printf("\nБиты сообщения (%d бит):\n", bits_count);
    for(int i = 0; i < bits_count; ++i) {
        printf("%d", bits[i]);
        if((i + 1) % 8 == 0) printf(" ");
    }
    printf("\n");

    // 3. QPSK модуляция
    int symbols_count = 0;
    int* symbols = QPSK_modulation(bits, bits_count, &symbols_count);
    printf("\nQPSK символы (%d символов):\n", symbols_count / 2);
    for(int i = 0; i < symbols_count; i += 2) {
        printf("(%+2d, %+2d) ", symbols[i], symbols[i + 1]);
    }
    printf("\n");

    // 4. Апсемплинг
    int ups_symbols_count = 0;
    int* ups_symbols = upsampling(symbols, symbols_count, SAMPLES_PER_SYMBOL,
&ups_symbols_count);
    printf("\nАпсемплинг: %d отсчетов\n", ups_symbols_count);

    // 5. Применение фильтра
    int samples_count = 0;
    int16_t* samples = ps_filter(ups_symbols, ups_symbols_count,
SAMPLES_PER_SYMBOL, g, &samples_count);
    printf("Сгенерировано %d семплов\n", samples_count);

    // 6. Запись в файл
    fwrite(samples, sizeof(int16_t), samples_count, qpsk_samples);

    // Очистка памяти
    free(bits);
    free(symbols);
    free(ups_symbols);
    free(samples);
    fclose(qpsk_samples);

    printf("\nФайл 'qpsk_samples.pcm' успешно создан!\n");

    return 0;
}
```

```
// Вспомогательная функция sinc
double sinc(double x) {
    if(fabs(x) < 1e-10) {
        return 1.0;
    }
    return sin(x) / x;
}
```

Результат работы

Сигнал до отправки



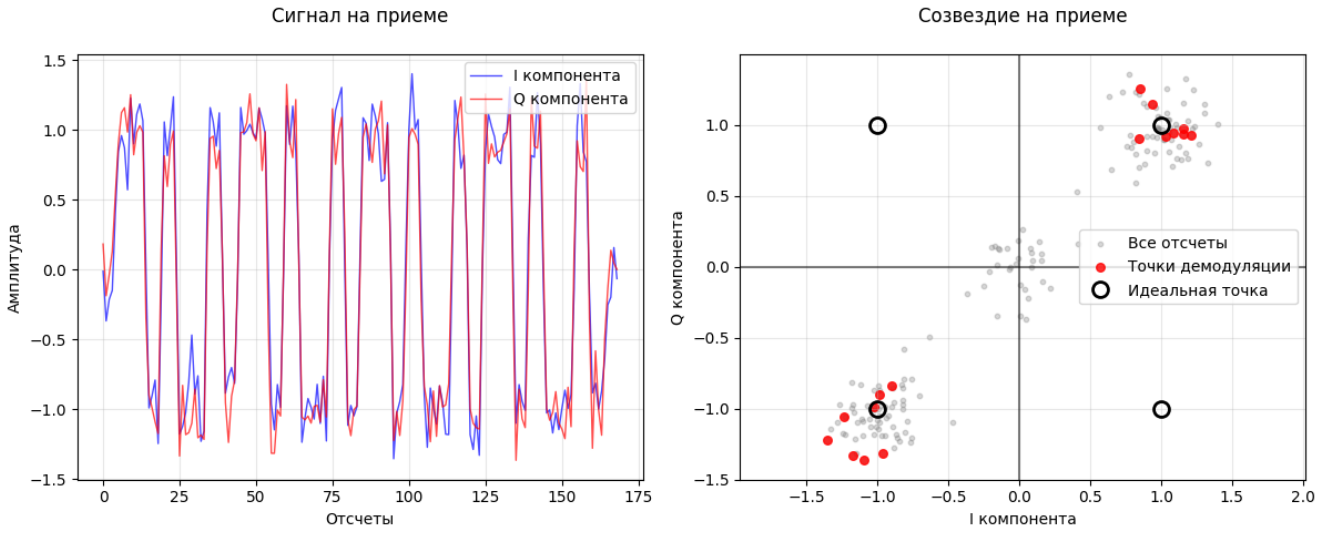
Можем заметить, что сигнал больше не имеет прямоугольную форму,а имеет сглаженную форму благодаря фильтру приподнятого косинуса.

Однако из-за малого количества отсчетов (10 семплов на символ) импульсная характеристика имеет ограниченное разрешение, что приводит к несколько "ломанной" форме сигнала.

Также можно заметить изменения в сигнальном созвездии - теперь точки не сосредоточены строго в позициях [-1, 1], а размыты вокруг идеальных QPSK позиций. Это объясняется тем, что после фильтрации сигнал принимает непрерывные значения в окрестности идеальных точек созвездия.

Несмотря на это, сигнальное созвездие сохраняет общую структуру QPSK модуляции с четырьмя основными кластерами, что подтверждает корректность работы модулятора и фильтра.

Сигнал после отправки (на приеме)



Сигнал сохранил общую форму приподнятого косинуса, несмотря на заметные искажения, внесенные каналом связи. Хотя шум исказил плавные огибающие, характерная сглаженная форма импульсов все еще хорошо различима.

Сигнальное созвездие также претерпело изменения - точки размылись и образовали четыре отчетливых кластера вокруг идеальных позиций QPSK. Несмотря на воздействие шума, общая структура созвездия сохранилась, что позволяет корректно демодулировать сигнал.

Вывод

В рамках проведенной работы осуществлено формирование и передача сигналов с QPSK модуляцией, где в качестве формирующего фильтра использовался фильтр с импульсной характеристикой в виде приподнятого косинуса.

Практика 9

ПРИЕМ QPSK BKSK, ПРИЕМ НА СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР, ГЛАЗКОВАЯ ДИАГРАММА, ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ОТСЧЕТНОГО ЗНАЧЕНИЯ И НЕОБХОДИМОСТЬ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ. ПРИЕМ И ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ И ПРИПОДНЯТЫЙ КОСИНУС

Теория

Согласованный фильтр

Согласованный фильтр - оптимальный линейный фильтр для максимизации отношения сигнал/шум. Импульсная характеристика является зеркальной копией ожидаемого сигнала. Для приподнятого косинуса согласованный фильтр имеет ту же форму, что и формирующий фильтр

Глазковая диаграмма

Глазковая диаграмма - визуальный инструмент для анализа качества цифрового сигнала

Строится путем наложения множественных сегментов сигнала длительностью в 1-2 символа

Позволяет оценить:

- Уровень шума
- Межсимвольную интерференцию
- Оптимальный момент отсчета
- Запас по шуму

Интерпретация параметров:

- Открытость глаза - показатель качества связи
- Ширина глаза - допустимая погрешность синхронизации
- Высота глаза - запас по шуму

Необходимость символьной синхронизации

Проблемы без синхронизации:

- Дрейф тактовой частоты передатчика и приемника
- Накопление фазовой ошибки
- Увеличение вероятности битовых ошибок

Методы синхронизации:

- PLL (Phase-Locked Loop) - система фазовой автоподстройки частоты
- Схема ранний-поздний (early-late gate) - корреляционный метод

- Алгоритм Гарднера - для цифровой реализации

Практика

Match filter

```
int16_t* apply_matched_filter(int16_t* input_samples, int input_length,
                              int filter_length, double* impulse_response,
                              int* output_length) {
    *output_length = input_length;
    int16_t* filtered_samples = (int16_t*)malloc(input_length *
sizeof(int16_t));

    if (filtered_samples == NULL) {
        return NULL;
    }

    // Выполнение операции свертки
    for (int output_index = 0; output_index < input_length; ++output_index) {
        int32_t accumulator = 0;  // Используем int32_t для предотвращения
переполнения

        for (int filter_index = 0; filter_index < filter_length;
++filter_index) {
            int input_index = output_index - filter_index;

            if (input_index >= 0) {
                accumulator += input_samples[input_index] *
impulse_response[filter_index];
            }
        }

        filtered_samples[output_index] = (int16_t)accumulator;
    }

    return filtered_samples;
}
```

Функция выполняет дискретную свертку входного сигнала с импульсной характеристикой.

Входные параметры:

- массив семплов сигнала и его размер

- параметр L (количество семплов на бит)

- импульсная характеристика фильтра

- указатель для возврата размера выходного массива

Результат - отфильтрованный сигнал с размером, возвращаемым через параметр size.

Downsampling

```
int16_t* perform_downsampling(int16_t* input_samples, int input_length,
                              int decimation_factor, int start_index) {
    int output_size = input_length / decimation_factor - start_index + 1;
    int16_t* decimated_samples = (int16_t*)malloc(output_size *
sizeof(int16_t));

    if (decimated_samples == NULL) {
        return NULL;
    }

    for (int output_index = start_index; output_index < output_size;
++output_index) {
        int input_index = output_index * decimation_factor;
        decimated_samples[output_index] = input_samples[input_index];
    }

    return decimated_samples;
}
```

Функция осуществляет децимацию сигнала путем выбора каждого L-ого отсчета, начиная с указанной позиции start. Создается результирующий массив уменьшенного размера, содержащий прореженные отсчеты исходного сигнала.

Downscale

```
double find_max_value(int16_t* array, int array_size) {
    double maximum = -DBL_MAX;

    for (int i = 0; i < array_size; ++i) {
        if (array[i] > maximum) {
            maximum = array[i];
        }
    }
```

```
    return maximum;
}

double* normalize_samples(int16_t* input_samples, int sample_count) {
    double* normalized_samples = (double*)malloc(sample_count *
sizeof(double));

    if (normalized_samples == NULL) {
        return NULL;
    }

    double max_value = find_max_value(input_samples, sample_count);

    for (int i = 0; i < sample_count; i += 2) {
        normalized_samples[i] = input_samples[i] / max_value;
    }

    return normalized_samples;
}
```

Нормализация символов выполняется для приведения их значений к диапазону [-1; 1].

Сначала определяется максимальное значение в массиве символов, затем каждый символ делится на это значение. Полученные нормализованные значения готовы для дальнейшего анализа и обработки в системе.

Quantization

```
int16_t* bpsk_quantization(double* symbols, int symbol_count) {
    int16_t* quantized_symbols = (int16_t*)malloc(symbol_count *
sizeof(int16_t));

    if (quantized_symbols == NULL) {
        return NULL;
    }

    // Идеальные точки BPSK созвездия
    int bpsk_point0[] = {-1, 0};  // Бит 0
    int bpsk_point1[] = {1, 0};   // Бит 1

    for (int i = 0; i < symbol_count; i += 2) {
        // Вычисляем расстояние до первой точки созвездия (бит 0)
        double dx0 = bpsk_point0[0] - symbols[i];
        double dy0 = bpsk_point0[1] - symbols[i + 1];
        double distance0 = sqrt(dx0 * dx0 + dy0 * dy0);
```

```
        // Вычисляем расстояние до второй точки созвездия (бит 1)
        double dx1 = bpsk_point1[0] - symbols[i];
        double dy1 = bpsk_point1[1] - symbols[i + 1];
        double distance1 = sqrt(dx1 * dx1 + dy1 * dy1);

        // Принимаем решение на основе минимального расстояния
        if (distance0 > distance1) {
            quantized_symbols[i] = 1;      // I компонента
            quantized_symbols[i + 1] = 0;  // Q компонента
        } else {
            quantized_symbols[i] = -1;     // I компонента
            quantized_symbols[i + 1] = 0;  // Q компонента
        }
    }

    return quantized_symbols;
}
```

Функция реализует алгоритм квантования для демодуляции BPSK сигнала:

Входные данные:

- Массив искаженных символов (I/Q компоненты)

- Размер массива символов

Процесс обработки:

- Определение эталонных точек BPSK созвездия

- Последовательный анализ пар символов (I и Q компонент)

- Вычисление евклидовых расстояний до эталонных точек

- Выбор ближайшей эталонной точки для каждого искаженного символа

Выходные данные:

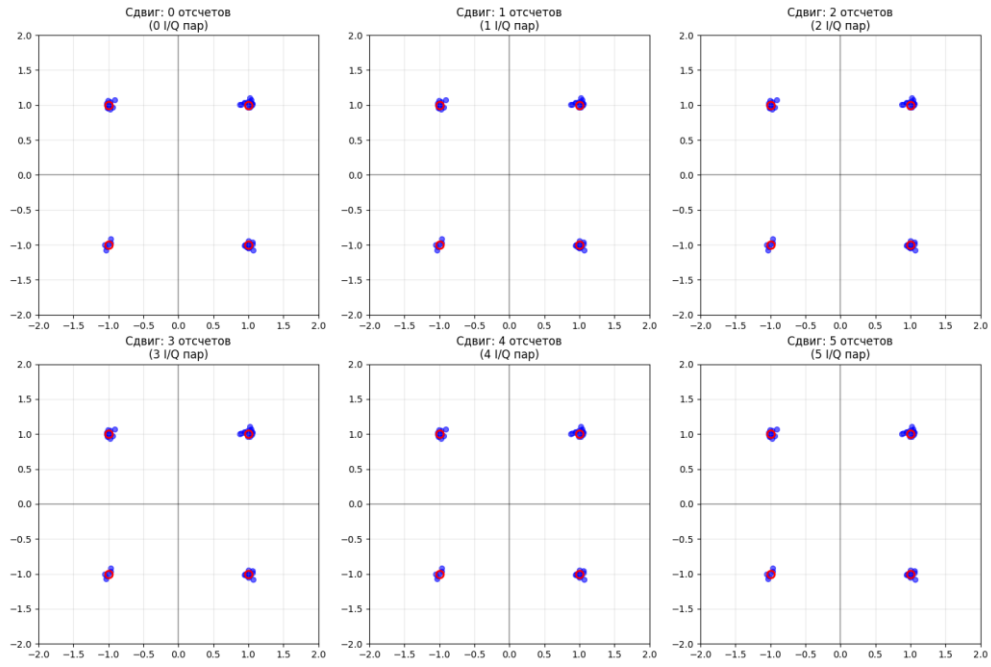
- Массив с координатами восстановленных символов BPSK

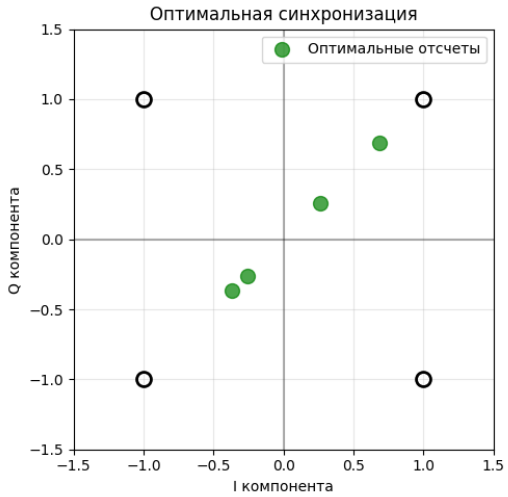
- Каждый символ приводится к ближайшей эталонной точке созвездия

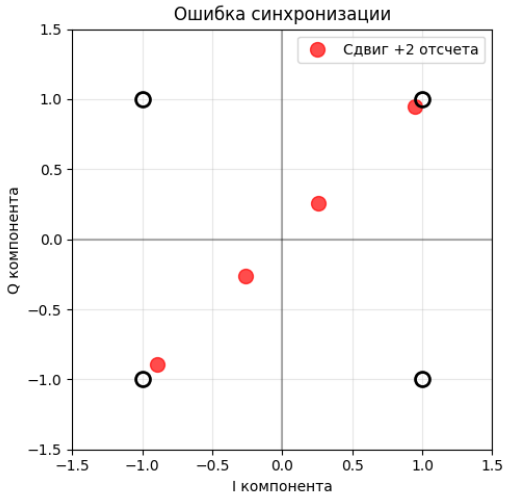
Demapper

```
int8_t* bpsk_demodulation(int16_t* symbols, int symbol_count) {
    int bit_count = symbol_count / 2;
    int8_t* demodulated_bits = (int8_t*)malloc(bit_count * sizeof(int8_t));

    if (demodulated_bits == NULL) {
        return NULL;
    }

    int bit_index = 0;

    for (int symbol_index = 0; symbol_index < symbol_count; symbol_index +=
2) {
        if (symbols[symbol_index] == 1) {
            demodulated_bits[bit_index++] = 1;  // Бит 1 соответствует точке
(1, 0)
        } else {
            demodulated_bits[bit_index++] = 0;  // Бит 0 соответствует точке
(-1, 0)
        }
    }

    return demodulated_bits;
}
```

Функция принимает массив округленных символов и размер массива. Функция итерируется по массиву и с помощью условий выбирает, какой бит сопоставить символу.







Анализ выявил периодическую зависимость качества созвездия от сдвига отсчетов:

- Сдвиг 0: "распад" созвездия - неверные моменты выборки

- Сдвиг 1: начало формирования QPSK структуры

- Сдвиг 5: оптимальное созвездие с четкими кластерами

- Сдвиг 10: повторный "распад" созвездия

Данный циклический паттерн повторяется на каждом символе, что подтверждает необходимость автоматической символьной синхронизации для определения оптимального момента взятия отсчетов.

Вывод

В рамках выполненной работы была успешно реализована логика приемной стороны системы цифровой связи на языке C/C++.

В процессе исследования было проведено детальное изучение влияния выбора момента взятия отсчетов на форму сигнального созвездия. Экспериментальным путем установлено, что неправильный выбор временных точек для семплирования приводит к значительному ухудшению качества созвездия и увеличению вероятности ошибок демодуляции.

Практические эксперименты наглядно продемонстрировали критическую важность точной символьной синхронизации для обеспечения надежной работы системы связи. Было подтверждено, что только при правильном выборе моментов взятия отсчетов возможно достижение оптимального качества демодуляции и минимизация межсимвольной интерференции.