

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,  
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)**

---

**С. А. Владимиров**

**ТЕОРИЯ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

**Моделирование и исследование сигналов с  
многоуровневой модуляцией**

**Лабораторный практикум**

**СПбГУТ)))**

**Санкт-Петербург  
2024**

УДК 004:621.391 (076)

ББК 32.811

В 57

Рецензент

доцент кафедры сетей связи и передачи данных,

кандидат технических наук

*А. С. Викулов*

*Рекомендован к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ*

**Владимиров, С. А.**

В 57 Теория, системы и устройства передачи данных. Моделирование и исследование сигналов с многоуровневой модуляцией : лабораторный практикум / С. А. Владимиров ; СПбГУТ. — Санкт-Петербург, 2024. — 46 с.

Предназначен для обучения, приобретения практических навыков в применении моделей и методов расчета в системах и устройствах передачи данных. Представленные лабораторные работы дополняют и углубляют теоретические знания по их применению в отрасли телекоммуникаций, а приведенный материал служит справочным и методическим пособием при выполнении лабораторных работ в рамках дисциплины «Теория, системы и устройства передачи данных».

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника».

**УДК 004:621.391 (076)**

**ББК 32.811**

© Владимиров С. А., 2024

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2024

## Содержание

Лабораторная работа 1. Моделирование и исследование характеристик сигналов с многоуровневой амплитудной манипуляцией . . . . .	4
1.1. Цели работы . . . . .	4
1.2. Теоретические сведения . . . . .	4
1.3. Задание лабораторной работы . . . . .	8
1.4. Порядок выполнения задания. . . . .	10
1.5. Контрольные вопросы . . . . .	11
Лабораторная работа 2. Моделирование и исследование характеристик сигналов с многофазной манипуляцией . . . . .	12
2.1. Цели работы . . . . .	12
2.2. Теоретические сведения . . . . .	12
2.3. Задание лабораторной работы . . . . .	14
2.4. Порядок выполнения задания. . . . .	17
2.5. Контрольные вопросы . . . . .	18
Лабораторная работа 3. Моделирование и исследование мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов . . . . .	19
3.1. Цели работы . . . . .	19
3.2. Теоретические сведения . . . . .	19
3.3. Задание лабораторной работы . . . . .	30
3.4. Порядок выполнения задания. . . . .	32
3.5. Контрольные вопросы . . . . .	33
Лабораторная работа 4. Моделирование и исследование характеристик созвездий сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой модуляцией . . . . .	35
4.1. Цели работы . . . . .	35
4.2. Теоретические сведения . . . . .	35
4.3. Задание лабораторной работы . . . . .	40
4.4. Порядок выполнения задания. . . . .	42
4.5. Контрольные вопросы . . . . .	44

# Лабораторная работа 1

## Моделирование и исследование характеристик сигналов с многоуровневой амплитудной манипуляцией

### 1.1. Цели работы

Научиться моделировать и приобрести практический опыт исследования сигналов с М-ичной амплитудной манипуляцией. Научиться оценивать и анализировать параметры сигналов и характеристики каналов, исследовать амплитудные и частотные зависимости, включая ошибки передачи для сигналов с М-ичной амплитудной манипуляцией.

### 1.2. Теоретические сведения

#### 1.2.1. Сигналы для многоуровневой цифровой модуляции

Для обеспечения передачи данных по каналам с заданной полосой пропускания можно использовать сигнал несущей  $A_c \cos(2\pi f_c t)$  с частотой  $f_c$  и амплитудой  $A_c$ , который используется для кодирования входящего модулирующего информационного сигнала основной полосы частот  $s(t)$ , в требуемую полосу частот или модулированный сигнал канала связи. Такое кодирование называется модуляцией. Сигнал несущей  $A_c \cos(2\pi f_c t)$  обычно используется для сдвига спектра исходной формы информационного сигнала основной полосы частот на величину  $f_c$ . Такой сдвиг спектра в более высокий частотный диапазон позволяет передавать двоичные данные, например по радиоканалу с использованием антенны разумных размеров. Сдвиг спектра в оптический диапазон передачи позволяет использовать для передачи данных световоды волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).

Процесс модуляции заключается в изменении амплитуды, частоты или фазы синусоидальной несущей в соответствии с поступающими данными информационного сигнала  $s(t)$ . В соответствии с перечисленными сигнальными параметрами, существует три основных схемы цифровой модуляции:

- амплитудная манипуляция (ASK-amplitude shift keying),
- фазовая манипуляция (PSK-phase shift keying),
- частотная манипуляция (FSK-frequency shift keying).

Если несущая  $A_c \cos(2\pi f_c t)$  используется для модуляции (кодирования) М-арным (М-ичным) сигналом основной полосы частот, может возникнуть любой из следующих режимов полосовой передачи сигналов:

- многофазная манипуляция со сдвигом;
- многоуровневая амплитудная манипуляция со сдвигом;
- комбинированная многофазная многоуровневая амплитудная манипуляция сигнала.

### 1.2.2. Многоуровневая амплитудная манипуляция

Наиболее простой многоуровневой схемой передачи сигналов является М-арная (М-ичная) ASK, где информация кодируется несколькими заданными уровнями интенсивности. Эта линейная модуляционная схема еще может называться амплитудно-импульсной модуляцией (РАМ — pulse-amplitude modulation). Обычная цифровая базовая амплитудная модуляция, которая называется двоичной передачей данных — когда 0 и 1 представлены разными уровнями напряжения сигнала,— может быть представлена как бинарная ASK (2-ASK).

Форматы М-ASK или РАМ более высокого порядка представляют собой схему линейной модуляции, в которой заданная и сформированная последовательность  $\xi$  из К-двоичных исходных символов переносится сигналом

$$u_{\xi} = \sum_{k=0}^{K-1} \xi_k s(t - kT), \quad 0 \leq t < KT,$$

в котором уровни  $\xi_k$  принимают значения в наборе равноотстоящих амплитуд  $\{a_i\}_{i=1}^M$ , заданных как

$$a_i = (2i - 1 - M) \frac{d}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, M.$$

Следовательно, формы сигналов, используемые модулятором, представляют собой набор амплитуд, кратных одной форме сигнала:

$$\{s_i(t)\}_{i=1}^M = \{a_i\}_{i=1}^M \cdot s(t),$$

где  $s(t)$  — импульс единичной энергии, который играет роль базисного сигнала в ортонормированном разложении и показывает, что этот набор сигналов одномерный.

Для М-ASK или РАМ схема простого варианта оптимального демодулятора может иметь только один коррелятор или согласованный фильтр (с импульсной характеристикой  $s(T - t)$ ), сигнал с выхода которого дискретизируется и затем в схеме принятия решения сравнивается с набором порогов  $M - 1$ , расположенным в средних точках между соседними сигнальными точками. Результат этих сравнений дает с максимальной вероятностью решение о принятом сигнале (сигнальной точке) и, следовательно, о принятом символе  $\xi_k$ .

### 1.2.3. Вероятность ошибки М-ASK или РАМ

Вероятность символьной ошибки М-ASK или РАМ при когерентной демодуляции можно корректно оценить, взяв за основу вероятность пра-

вильного решения

$$P_c = \frac{1}{M} [2q_1 + (M-2)q_2],$$

где  $q_1$  — вероятность правильного решения для двух соседних точек созвездия;

$q_2$  — такая же вероятность для  $(M-2)$  внутренних точек.

Определив вероятность для каждой сигнальной точки как

$$p = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{d}{2\sqrt{N_0}} \right),$$

получим  $q_1 = 1 - p$  и  $q_2 = 1 - 2p$ , так что

$$P_c = 1 - 2p \frac{M-1}{M}$$

следовательно, вероятность ошибки будет

$$P_e = \frac{M-1}{M} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{d}{2\sqrt{N_0}} \right).$$

Чтобы выразить вероятности ошибки  $P_e$  как функцию отношения сигнал/шум  $\frac{E_s}{N_0}$ , запишем, что средняя энергия сигнала равна

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_i^2 = \frac{d^2}{4M} \sum_{i=1}^M (2i-1-M)^2 = \frac{M^2-1}{12} d^2.$$

Таким образом,

$$P_e = \frac{M-1}{M} \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M^2-1} \cdot \frac{E_s}{N_0}} \right).$$

При больших отношениях сигнал/шум  $\frac{E_s}{N_0}$  вероятность ошибки аппроксимируется дополнительной функцией ошибки  $\operatorname{erfc}$  (где  $\operatorname{erfc}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty e^{-t^2} dt$  — дополнительная функция ошибки) в сигнальной точке.

Асимптотическая эффективность мощности - это обобщенный показатель энергетической эффективности ( $\beta$ -эффективности) сигнального созвездия, который показывает насколько эффективно схема модуляции (сигнальное созвездие) использует доступную энергию передатчика с учетом

заданного минимального расстояния между сигнальными точками. Для этого вида модуляции асимптотическая эффективность мощности равна

$$\beta_{PAM, MASK} = \frac{B}{\frac{P}{SN_0}} = \frac{3 \log_2 M}{M^2 - 1},$$

которая уменьшается при увеличении  $M$ .

При М-ASK или PAM средняя энергия передаваемого сигнала отличается от пиковой энергии  $E_s = a_i^2 \cdot T_s$ , которая является энергией сигнала максимальной амплитуды. Если на пиковую передаваемую в канал мощность сверху накладываются ограничения, то можно выразить  $P_e$  через

$$E_s = (M^2 - 1)^2 d^2 / 4.$$

Тогда получаем

$$\frac{E_s}{N_0} = 3 \frac{M - 1}{M + 1}.$$

Например, для  $M = 4$  получаем, что  $E_s$  на 2,55 дБ больше  $E$ .

#### **1.2.4. Спектр мощности и эффективность полосы пропускания**

Спектральная плотность мощности сигнала М-ASK или PAM получается как

$$G(f) = \frac{E}{T} |S(f)|^2,$$

где  $S(f)$  — преобразование Фурье передаваемого сигнала  $s(t)$ .

Обратите внимание, что здесь и далее, когда имеем дело со спектральными плотностями мощности, производим расширение пределов суммирования от  $-\infty$  до  $\infty$ , чтобы избежать краевых эффектов и сделать сигнал периодическим и стационарным в широком смысле.

Ширина полосы Шеннона для этого типа модуляции равна  $W = \frac{1}{2T}$  и ее эффективность полосы пропускания (частотная эффективность) равна

$$\gamma_{PAM, MASK} = \left( \frac{B}{W} \right)_{PAM, MASK} = 2 \log_2 M,$$

которая возрастает с увеличением  $M$ .

В заключение можно сказать, что для М-ASK или PAM увеличение количества сигнальных точек  $M$  улучшает эффективность полосы пропускания, но снижает энергоэффективность этого способа модуляции.

### 1.3. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в два независимых этапа.

1. **Этап** моделирования созвездия, **исследования канала передачи**, оценки и анализа параметров, характеристик и ошибок передачи при заданных параметрах сигнальных созвездий в соответствии с заданием.

2. **Этап** моделирования и анализа **реальной передачи файлов** по каналу передачи данных с использованием заданного созвездия модуляции в соответствии с заданием.

#### **Задание первого этапа.**

1. Получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту.

2. По каждому сигнальному созвездию в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить сигнальные диаграммы в следующих точках:

- в граничных точках, соответствующих пределам заданного канального шума,
- в граничной точке появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ выше граничной точки появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ ниже граничной точки появления ошибок на приеме.

3. Получить **набор результатов первого этапа** в соответствии с перечнем:

- 1) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на выходе передатчика;
- 2) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на входе приемника в указанных заданием точках;
- 3) временную диаграмму сигнала на выходе передатчика;
- 4) временную диаграмму сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 5) временную диаграмму восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 6) мгновенный спектр сигнала на выходе передатчика;
- 7) мгновенный спектр сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 8) мгновенный спектр восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 9) спектр мощности сигнала на выходе передатчика;



10) спектр мощности сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;

11) спектр мощности восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;

12) график BER для заданных сигнальных созвездий в заданных пределах канального шума.

4. Оценить и записать количество появляющихся BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований.

5. Выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

#### **Задание второго этапа.**

1. Используя полученные параметры сигнального созвездия и пределы канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов для  $BER = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ .

2. Подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов.

3. Выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

#### **1.3.1. Варианты заданий лабораторной работы**

Вариант задания (табл. 1.1) выбирается по номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 1.1

Данные сигнального созвездия и канального шума

№	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$S_{pwr}$
1	4, 16, 1024	$\pi/4$	-8	24	-2,3
2	8, 64, 256	$-\pi/6$	-6	35	-1,5
3	2, 32, 512	$-\pi/4$	-5	28	-1,3
4	4, 64, 4096	$\pi/6$	-4	30	-2,3
5	2, 16, 256	$-\pi/12$	-10	22	-1,3
6	8, 64, 256	$\pi/21$	-8	32	-2,3
7	4, 32, 2048	$\pi/1.04$	-7	24	-1,3
8	4, 32, 512	$\pi/1.01$	-4	34	-1,5
9	16, 128, 1024	$-\pi/8$	-5	36	-1,5
10	2, 16, 512	$\pi/12$	-6	38	-2,3
11	8, 32, 256	$\pi/6$	-6	26	-1,3
12	16, 64, 512	$\pi/8$	-8	24	-1,5
13	4, 128, 4096	$\pi/3$	-6	32	-2,3
14	4, 16, 256	$-\pi/16$	-7	38	-1,3

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$S_{pwr}$
15	2,16,512	$-\pi/4$	-6	26	-2,3
16	2,8,128	$\pi/6$	-5	28	-3,3
17	2,16,64	$\pi/4$	-6	36	-2,4
18	4,8,256	$-\pi/12$	-12	34	-1,3
19	2,8,1024	$\pi/19$	-8	32	-2,3
20	2,16,128	$-\pi/14$	-6	38	-3,4
21	2,32,128	$-\pi/3$	-4	30	-1,5
22	4,32,256	$\pi/3$	-6	34	-2,5
23	2,16,64	$-\pi/6$	-8	36	-2,3
24	2,8,128	$\pi/3$	-6	32	-1,3
25	4,16,128	$\pi/4$	-4	28	-3,3
26	2,8,256	$-\pi/4$	-6	28	-1,5
27	2,16,2048	$-\pi/26$	-8	32	-1,3
28	4,8,64	$\pi/7$	-12	36	-2,4
29	2,8,128	$-\pi/6$	-10	30	-2,5
30	4,16,256	$\pi/6$	-6	32	-1,5

#### 1.4. Порядок выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме работы (лабораторный практикум, лекции, учебники).

2. Выписать согласно своему номеру варианта исходные данные для выполнения лабораторной работы.

3. Подготовить для расчетов систему вычислений Octave. Загрузить в рабочие каталоги системы Octave программы моделирования каналов и исследования сигналов созвездий: M-PAM-dat-Lab4.m — для первого этапа, M-PAM-file-Lab4.m — для второго этапа и файлы для передачи по каналу: A-Data-Var-11.txt — обычный текстовый файл с числовыми данными, NetWork.png — файл с графическим изображением схемы сети. Для передачи файлов допускается использовать другие файлы по желанию студента (обеспечивающие выполнение заданий лабораторной работы).

4. По заданию запускать программы на исполнение, вводить исходные данные своего варианта, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но необходимо помнить, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (формируются новые файлы). Параметрические результаты можно сохранять в текстовом (\*.txt), а графики — в pdf-формате (программами не предусмотрено).

5. Все необходимые расчеты выполнять в соответствии с заданием. Записывать и представлять в аналитическом виде необходимые выражения и в числовом виде результаты расчетов.

6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

7. Оформить отчет в печатном виде согласно рекомендациям преподавателя. В отчете должны быть подробно расписаны исходные данные лабораторной работы согласно номеру варианта, ход работы и полученные результаты по каждому пункту задания. В титульном листе отчета обязательно должны быть указаны наименование работы и учебной дисциплины, цель, номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента. Рекомендуется использовать утвержденные образцы титульных листов.

8. Защитить по отчету выполненную работу.

**Примечание.** Работа выполняется индивидуально. При проведении расчетов допускается использовать систему Octave. Тексты программ расчетов и моделирования сигналов, каналов и устройств в отчет включать **НЕ НУЖНО!** Допускается модификация текстов программ. Все результаты **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должны быть представлены преподавателю в документальном или письменном виде с обязательными атрибутами идентификации — номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента.

### 1.5. Контрольные вопросы

1. Что такое сигнальное созвездие?

2. Чем вызваны ошибки в канале передачи данных, перечислите и объясните причины их возникновения?

3. Что такое динамический и частотный диапазон сигнала? Как обеспечить наиболее эффективную работу канала связи для сигнальных созвездий?

4. Как осуществляется процедура восстановления исходных данных на приемной стороне канала системы передачи данных?

## Лабораторная работа 2

### **Моделирование и исследование характеристик сигналов с многофазной манипуляцией**

#### 2.1. Цели работы

Научиться моделировать и приобрести практический опыт исследования сигналов с М-ичной фазовой манипуляцией. Научиться оценивать и анализировать параметры сигналов и характеристики каналов, исследовать амплитудные и частотные зависимости, ошибки передачи для сигналов с М-ичной фазовой манипуляцией.

#### 2.2. Теоретические сведения

##### 2.2.1. Фазовая манипуляция (дискретная фазовая модуляция)

Фазовая манипуляция (PSK-phase shift keying) — это схема линейной модуляции, в которой информационные символы источника передаются сдвигом фазы сигнала несущей частоты. Последовательность из К-двоичных исходных символов представлена сигналом

$$u_{\xi} = \Re \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \xi_k s(t - kT) e^{j2\pi f_0 t} \right\}, \quad 0 \leq t < KT,$$

где  $\xi_k = e^{j\phi_k}$  и каждая дискретная фаза принимает значения на множестве

$$\left\{ \frac{2\pi}{M}(i-1) + \Phi \right\}_{i=1}^M,$$

с произвольной начальной фазой  $\Phi$ . Предполагаем, что напряжение информационного сигнала  $s(t)$  равно  $u_T(t)$  и представляет собой прямоугольный импульс с амплитудой  $A$  и длительностью  $T$  так, чтобы огибающая PSK-сигнала была постоянной (допускаются и другие формы сигнала). Тогда сигнал запишем как

$$u_{\xi} = A \sum_{k=0}^{K-1} u_T(t - kT) \cos(2\pi f_0 t + \phi_k) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t),$$

где можно определить синфазную и квадратурную составляющие сигнала PSK:

$$I(t) \triangleq A \sum_{k=0}^{K-1} \cos \phi_k u_T(t - kT),$$
$$Q(t) \triangleq A \sum_{k=0}^{K-1} \sin \phi_k u_T(t - kT).$$

### 2.2.2. Вероятность ошибки сигнала с M-PSK

Анализ ошибок проводим при условии когерентной демодуляции сигнала M-PSK.

#### *Двоичная фазовая манипуляция (Binary PSK (BPSK))*

Вероятность ошибки двоичной PSK определяется тем, что этот вид фазовой манипуляции (2-PSK) является схемой модуляции с противоположными сигналами. Следовательно, для двоичной схемы, когда  $E_b = E$ , получаем

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right).$$

#### *Квадратурная фазовая манипуляция (Quaternary PSK (4-PSK или QPSK))*

Чтобы выразить вероятности ошибки  $P_e$  как функцию отношения сигнал/шум  $\frac{E_s}{N_0}$ , определим, что энергия символа равна  $E_s = \frac{E}{2}$  и  $d_{\min} = \sqrt{2E} = 2E_s$  следовательно,

$$P_e = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right) - \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right) \right]^2.$$

#### *M-ичная фазовая манипуляция (MPSK)*

Для получения общей вероятности M-ичного PSK воспользуемся верхней и нижней оценкой  $P_e$ , при этом  $E_s = \frac{E}{\log_2 M}$ , и тогда получим

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{N_0} \log_2 M \cdot \sin \frac{\pi}{M}} \right) \leq P_e \leq \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{N_0} \log_2 M \cdot \sin \frac{\pi}{M}} \right).$$

Асимптотический КПД мощности PSK определяется выражением

$$\beta_{PSK} = \sin^2 \frac{\pi}{M} \log_2 M,$$

который уменьшается с увеличением M, когда  $M > 2$  (обратите внимание, что при  $M = 2$  и при  $M = 4$ , КПД будет  $\beta_{PSK} = 1$ ).

### 2.2.3. Спектр мощности и эффективность полосы пропускания

Спектральная плотность мощности сигнала M-PSK вычисляется как

$$G(f) = \frac{1}{4} [S(-f - f_0) + S(f - f_0)],$$

где преобразование Фурье передаваемого сигнала  $s(t)$

$$S(f) = A^2 T \left( \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right)^2.$$

Обратите внимание, что здесь и далее, когда имеем дело со спектральными плотностями мощности, производим расширение пределов суммирования от  $-\infty$  до  $\infty$ , чтобы избежать краевых эффектов и сделать сигнал периодическим и стационарным в широком смысле.

Полоса пропускания реального сигнала всегда учитывает только положительные частоты своего спектра и определяется:

- шириной главного или основного спектрального лепестка, который содержит большую часть мощности сигнала (примерно 99.9 % мощности сигнала);
- первым боковым лепестком, у которого примерно 0.1 % мощности выпадает из основной полосы и создает помехи для соседних каналов;
- вторым боковым лепестком, у которого спектральная плотность мощности не превышает определенного порога (например, на 50 дБ ниже своего максимального значения);
- третьим и следующими боковыми лепестками, уровень которых сопоставим с уровнем теплового шума.

Для большинства сигналов полоса пропускания Шеннона и полоса Фурье мало различаются, хотя есть примеры модулированных сигналов (например, сигналы с расширенным спектром), чья полоса по Фурье намного больше, чем их ширина полосы по Шеннону.

Ширина полосы Шеннона для М-PSK модуляции пропорциональна  $\frac{1}{T}$  и тогда ее частотная эффективность полосы пропускания будет

$$\gamma_{PSK} = \left( \frac{B}{W} \right)_{PSK} = \log_2 M,$$

которая растет с увеличением  $M$ .

В заключение можно сказать, что для М-PSK (как и для РАМ) увеличение  $M$  улучшает частотную эффективность полосы пропускания и почти не снижает энергоэффективность.

### 2.3. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в два независимых этапа.

1. **Этап** моделирования созвездия, **исследования канала передачи**, оценки и анализа параметров, характеристик и ошибок передачи при заданных параметрах сигнальных созвездий в соответствии с заданием.

2. **Этап** моделирования и анализа **реальной передачи файлов** по каналу передачи данных с использованием заданного созвездия модуляции в соответствии с заданием.

**Задание первого этапа.**

1. Получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту.

2. По каждому сигнальному созвездию в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить сигнальные диаграммы в следующих точках:

- в граничных точках, соответствующих пределам заданного канального шума,
- в граничной точке появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ выше граничной точки появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ ниже граничной точки появления ошибок на приеме.

3. Получить **набор результатов первого этапа** в соответствии с перечнем:

- 1) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на выходе передатчика;
- 2) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на входе приемника в указанных заданием точках;
- 3) временную диаграмму сигнала на выходе передатчика;
- 4) временную диаграмму сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 5) временную диаграмму восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 6) мгновенный спектр сигнала на выходе передатчика;
- 7) мгновенный спектр сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 8) мгновенный спектр восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 9) спектр мощности сигнала на выходе передатчика;
- 10) спектр мощности сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 11) спектр мощности восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 12) график BER для заданных сигнальных созвездий в заданных пределах канального шума.

4. Оценить и записать количество появляющихся BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований.

5. Выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

### **Задание второго этапа.**

1. Используя полученные параметры сигнального созвездия и пределы канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов для  $BER = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ .

2. Подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов.

3. Выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

### **2.3.1. Варианты заданий лабораторной работы**

Вариант задания (табл. 2.1) выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 2.1

Данные сигнального созвездия и канального шума

№	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$S_{pwr}$
1	4,16,64	$\pi/4$	-8	24	-2,3
2	8,64,128	$-\pi/6$	-6	35	-1,5
3	2,32,512	$-\pi/4$	-5	28	-1,3
4	4,16,64	$\pi/6$	-4	30	-2,3
5	2,16,256	$-\pi/12$	-10	22	-1,3
6	8,64,256	$\pi/21$	-8	32	-2,3
7	2,8,32	$\pi/1.04$	-7	24	-1,3
8	4,16,32	$\pi/1.01$	-4	34	-1,5
9	2,4,64	$-\pi/8$	-5	36	-1,5
10	2,16,32	$\pi/12$	-6	38	-2,3
11	8,16,32	$\pi/6$	-6	26	-1,3
12	2,16,32	$\pi/8$	-8	24	-1,5
13	4,16,64	$\pi/3$	-6	32	-2,3
14	4,16,256	$-\pi/16$	-7	38	-1,3
15	2,16,512	$-\pi/4$	-6	26	-2,3
16	2,8,32	$\pi/6$	-5	28	-3,3
17	2,16,64	$\pi/4$	-6	36	-2,4
18	4,8,64	$-\pi/6$	-12	34	-1,3
19	2,8,128	$\pi/19$	-8	32	-2,3
20	2,16,128	$-\pi/14$	-6	38	-3,4
21	2,32,128	$-\pi/3$	-4	30	-1,5



Данные сигнального созвездия и канального шума.

Nº	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$S_{pwr}$
22	4,8,32	$\pi/3$	-6	34	-2,5
23	2,16,32	$-\pi/6$	-8	36	-2,3
24	2,8,32	$\pi/6$	-6	32	-1,3
25	4,16,64	$\pi/4$	-4	28	-3,3
26	2,8,32	$-\pi/4$	-6	28	-1,5
27	2,16,32	$-\pi/26$	-8	32	-1,3
28	4,8,64	$\pi/7$	-12	36	-2,4
29	2,8,128	$-\pi/6$	-10	30	-2,5
30	4,16,32	$\pi/6$	-6	32	-1,5

## 2.4. Порядок выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме работы (лабораторный практикум, лекции, учебники).

2. Выписать согласно своему номеру варианта исходные данные для выполнения лабораторной работы.

3. Подготовить для расчетов систему вычислений Octave. Загрузить в рабочие каталоги системы Octave программы моделирования каналов и исследования сигналов созвездий: M-PSK-dat-Lab5.m — для первого этапа, M-PSK-file-Lab5.m — для второго этапа и файлы для передачи по каналу: A-Data-Var-11.txt — обычный текстовый файл с числовыми данными, NetWork.png — файл с графическим изображением схемы сети. Для передачи файлов допускается использовать другие файлы по желанию студента (допускающие выполнение заданий лабораторной работы).

4. По заданию запускать программы на исполнение, вводить исходные данные своего варианта, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но необходимо помнить, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (формируются новые файлы). Параметрические результаты можно сохранять в текстовом (\*.txt), а графики — в pdf-формате (программами не предусмотрено).

5. Все необходимые расчеты выполнять в соответствии с заданием. Записывать и представлять в аналитическом виде необходимые выражения и в числовом виде результаты расчетов.

6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

7. Оформить отчет в печатном виде согласно рекомендациям преподавателя. В отчете должны быть подробно расписаны исходные данные лабораторной работы согласно номеру варианта, ход работы и полученные результаты по каждому пункту задания. В титульном листе отчета обязательно должны быть указаны наименование работы и учебной дисципли-

ны, цель, номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента. Рекомендуется использовать утвержденные образцы титульных листов.

8. Защитить по отчету выполненную работу.

**Примечание.** Работа выполняется индивидуально. При проведении расчетов допускается использовать систему Octave. Тексты программ расчетов и моделирования сигналов, каналов и устройств в отчет включать **НЕ НУЖНО!** Допускается модификация текстов программ. Все результаты **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должны быть представлены преподавателю в документальном или письменном виде с обязательными атрибутами идентификации — номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента.

## 2.5. Контрольные вопросы

1. Что такое сигнальное созвездие со сферической упаковкой сигнала?
2. Что вызывает ошибки в канале передачи данных, перечислите и объясните причины их возникновения?
3. Что такое затухание сигнала в канале связи? Как обеспечить наиболее эффективную работу канала для сигнальных созвездий при изменениях затуханий?
4. Как происходит процедура восстановления исходных данных на приемной стороне канала системы передачи данных для сигналов со сферической упаковкой.
5. Как функционально связаны энергия информационного сигнала и энергия шума в канале передачи данных при восстановлении сигнала?

## **Лабораторная работа 3**

### ***Моделирование и исследование мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов***

#### **3.1. Цели работы**

Изучить особенности работы, научиться моделировать, приобрести практический опыт мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Научиться оценивать и анализировать параметры сигналов и характеристики мультиплексных каналов, исследовать амплитудные и частотные зависимости, ошибки передачи для сигналов в мультиплексных каналах с М-ичной квадратурной амплитудной манипуляцией и ортогональным частотным разделением.

#### **3.2. Теоретические сведения**

Системы OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) в последнее время находят все большее применение в целом ряде различных телекоммуникационных сетевых технологий, включая линии ADSL на основе существующих телефонных линий, системы цифрового аудио- и видеовещания, беспроводные локальные сети (WLAN) и оптические системы передачи данных. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (ОЧРК) — мощный метод передачи данных с высокой скоростью в каналах связи по разным средам передачи, включая каналы с замиранием сигнала на трассе распространения. Для эффективного развертывания OFDM в телекоммуникационной среде и для повышения пропускной способности каналов OFDM необходимо выполнять целый ряд технологических условий — поддерживать точную временную и частотную синхронизацию с обработкой сложных смещений частоты, соблюдать условия амплитудных и мощностных ограничений в условиях множественного доступа, управлять методом модуляции в канале, с привязкой к текущему отношению сигнал/шум.

##### ***3.2.1. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM)***

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) является методом модуляции с множеством носителей, который использует ортогональные функции — субносители или поднесущие для мультиплексирования нескольких низкоскоростных сигналов в один общий канал передачи. Первый патент на этот метод мультиплексирования был опубликован в 1966 г. Разница между ортогональным OFDM и обычным

мультиплексированием с частотным разделением (МЧР) состоит в том, что разные поднесущие в системе OFDM перекрываются по спектру и поэтому не могут быть разделены простой фильтрацией. Спектральный интервал между отдельными поднесущими определяется как

$$\Delta f = \frac{1}{T_S},$$

где  $T_S$  — длительность символа в OFDM.

Один символ OFDM состоит из нескольких разделенных на  $\Delta f$  модулированных колебаний, у каждого из которых свои амплитуда и фаза в соответствии с данными, закодированными в символе. Рассмотрим несколько таких символов OFDM, которые промодулированы отдельными колебаниями в каждом канале во временной области со скоростью передачи символов  $\Delta f$ . Чтобы разделить отдельные поднесущие, необходимо в процессе декодирования сдвинуть каждую поднесущую в основную полосу частот исходного сигнала, и далее выполнить детектирование с интегрированием по периоду символа OFDM. С одной стороны, это обеспечивает идеальное разделение поднесущих, а с другой — согласованную фильтрацию и, следовательно, максимизацию отношения сигнал/шум для каждой поднесущей. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) наиболее точно выполняет эту операцию для всех поднесущих одновременно. И поскольку ДПФ можно упростить, а сложность всего процесса можно существенно снизить за счет использования быстрого преобразования Фурье (БПФ), метод OFDM стал в последнее время очень популярным и исследования по его использованию продолжаются.

Более простым пояснением этого метода модуляции будет следующая идея — вместо последовательной передачи отдельных бит или символов, разные несущие частоты одновременно и параллельно могут нести разные биты или символы одного сообщения с более высокой скоростью. Источник данных может быть представлен в параллельном формате или последовательный источник может быть подвержен такому последовательно-параллельному преобразованию, выходной сигнал которого сразу подается на несколько несущих или сразу представляется в виде сигнала таких несущих.

OFDM является одним из наиболее часто используемых методов модуляции и мультиплексирования в радиосистемах, включая сотовые. На рисунке 3.1 показана блок-схема работы OFDM в передатчике и приемнике. Входные данные поступают на модулятор каналов, состоящий из последовательно работающих канальных модуляторов по числу задействованных каналов OFDM. После препроцессора OFDM, символы каждого канала подаются на соответствующие входы по числу задействованных субнесущих частот и модуляция этих поднесущих выполняется с использованием об-

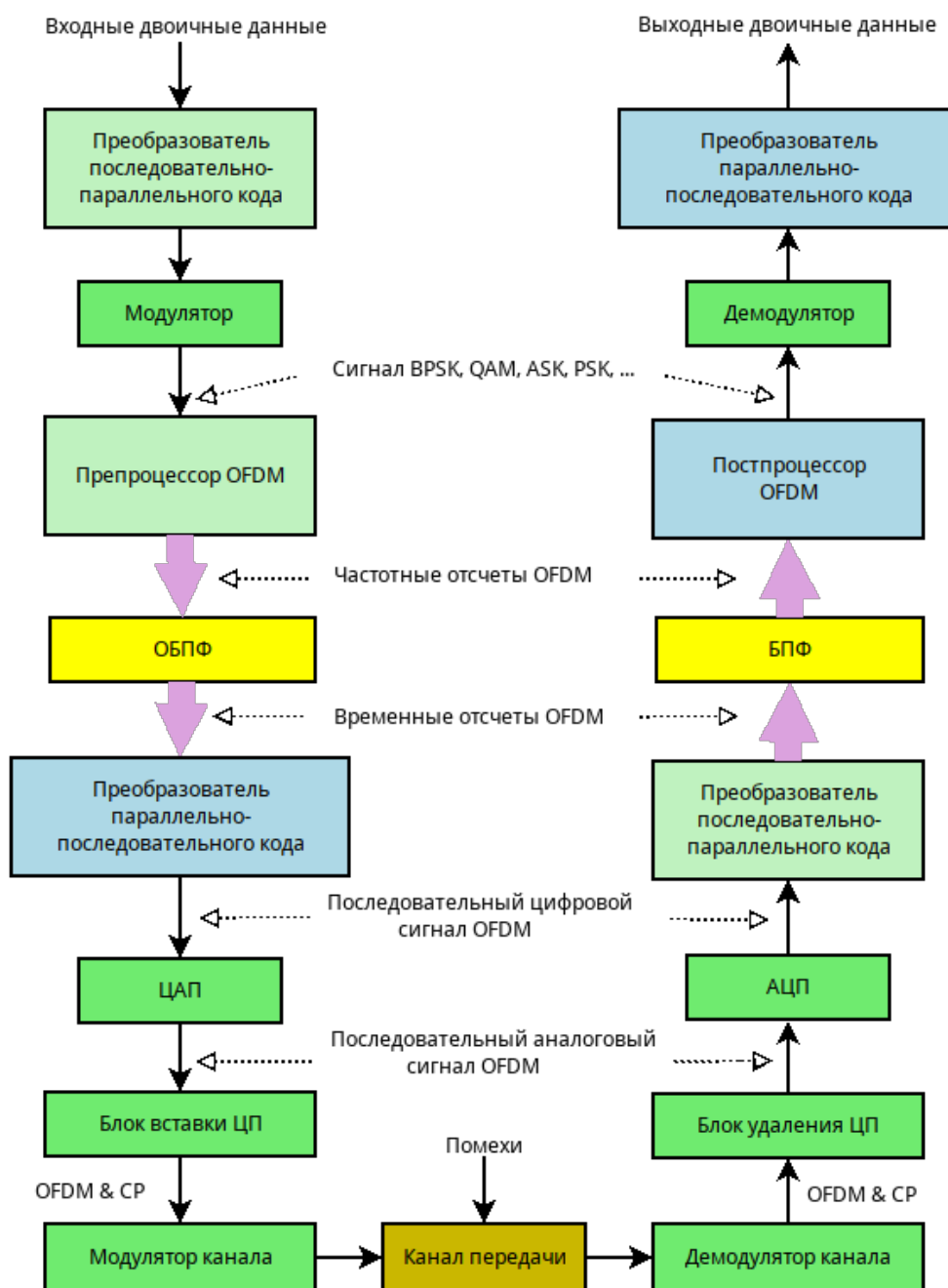


Рис. 3.1. Блок-схема работы OFDM в канале передачи

ратного БПФ (ОБПФ). Блок вставки циклического префикса используется для синхронизации общего кадра данных OFDM после параллельно-последовательного и цифро-аналогового преобразования (ЦАП), что превращает цифровой (и обычно сложный) сигнал во временной области в аналоговый. Затем этот сигнал исходного диапазона частот обычно преобразуется с повышением частоты в соответствующую радио- или оптическую полосу пропускания с использованием электрического или оптического модулятора соответственно.

В радио- или оптическом приемнике сигнал OFDM демодулируется с понижением частоты и восстановлением кадровой (фреймовой) структу-

ры канальных данных, оцифровывается аналого-цифровым преобразователем, а затем преобразуется с использованием прямого БПФ в множество канальных сигналов. Эти канальные сигналы подаются на постпроцессор OFDM и далее в демодулятор для последующей обработки сигнала в соответствии с канальной модуляцией. Для восстановления последовательности исходных данных после демодулятора используется параллельно-последовательный преобразователь.

Преимущество OFDM в радиосистемах заключается в его адаптивности: отдельные поднесущие в ограниченном диапазоне частот могут сохранять в себе разные режимы модуляции и/или уровни мощности и, следовательно, могут сами быть подстроены под условия распространения сигнала в канальной среде. Такая передача соседних символов в разных частотных параллельных ортогональных каналах позволяет избежать межсимвольной интерференции.

С недавнего времени этот способ модуляции и мультиплексирования находит свое применение и в оптических каналах передачи данных как метод спектрально-эффективной передачи с высоким битрейтом.

Для моделирования и исследования в лабораторной работе использован один из простых и достаточно экономичных способов модуляции и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, позволяющий получить спектрально прореженный кадр (фрейм) OFDM и снизить требования к волновой стабильности источника оптического излучения (лазера или светодиода).

### **3.2.2. Оптический OFDM с асимметричным ограничением (ACO-OFDM)**

В системах связи и передачи информации технологически удобнее использовать при передаче только реальные и положительные сигналы, то есть униполярные сигналы. Примерами таких систем связи могут быть оптическая связь как по оптоволокну, так и по свободному пространству, некогерентная беспроводная связь и различные формы цифровой связи в основной полосе частот по одной металлической (обычно медной) симметричной паре. Разная дисперсия каналов и замирания в них из-за многолучевого распространения могут вызывать межканальные и символьные помехи со значительным ухудшением характеристик таких униполярных систем связи.

Для компенсации этих эффектов в каналах связи можно использовать униполярное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Существуют три различных униполярных метода OFDM:

- метод OFDM с постоянным смещением (DC-offset, DCO-OFDM), известный как традиционный униполярный метод OFDM, который исполь-

зует свойство эрмитовой симметрии со смещением постоянного тока (напряжения) для генерации реального и положительного сигнала во временной области. При этом смещение постоянного тока зависит от отношения пиковой мощности к средней мощности (peak-to-average-power ratio, PAPR) символа OFDM, и поскольку OFDM имеет высокое PAPR, амплитуда такого смещения постоянного тока обычно значительная. Исследования показали, что требование большого постоянного смещения делает метод DCO-OFDM неэффективным для излучателей оптических передатчиков. Использование более низкого смещения постоянного тока приводит к частому ограничению отрицательных частей сигнала во временной области и вызывает интерференцию между несущими с созданием внеполосных оптических помех;

- оптический OFDM с асимметричным ограничением (asymmetrically clipped optical, ACO-OFDM) не требует смещения постоянного тока и использует только нечетные поднесущие для передачи информационных символов, а отрицательная часть сигнала во временной области ограничивается (обнуляются первые, вторые и последующие боковые каналные лестницы, т. е. частотные хвосты всех каналов). Такое ограничение не искажает информационные символы в нечетных поднесущих, хотя их амплитуды и масштабируются вдвойне. Сравнение энергоэффективности и производительности ACO-OFDM для одномодовых ВОЛС с другими схемами модуляции, такими как двухпозиционная манипуляция и базовый OFDM с постоянным смещением (DC-OFDM), показало, что ACO-OFDM имеет лучшую энергоэффективность в оптических каналах связи. А производительность ACO-OFDM может быть еще дополнительно улучшена за счет использования схем битовой загрузки и комбинирования разнесения каналов при мультиплексировании (разные схемы чередования каналов);

- однополярный метод OFDM с инвертированием отрицательных частей — метод Flip-OFDM, в котором положительные и отрицательные части отдельно извлекаются из реального биполярного символа OFDM, сгенерированного путем ОБПФ с сохранением свойства эрмитовой симметрии передаваемых информационных символов. Затем полярность отрицательных частей инвертируется перед передачей как положительных, так и отрицательных частей в двух последовательных символах OFDM. Поскольку передаваемый сигнал всегда положительный, Flip-OFDM также является однополярным методом OFDM, но является менее энергоэффективным, хотя и равным по производительности ACO-OFDM. По требованиям к аппаратному обеспечению этот метод сходен с методом базового OFDM.

Из рассмотренного перечня реализаций, оптический OFDM с асимметричным ограничением ACO-OFDM является одним из наиболее практических и эффективных способов повышения скоростей передачи метода-

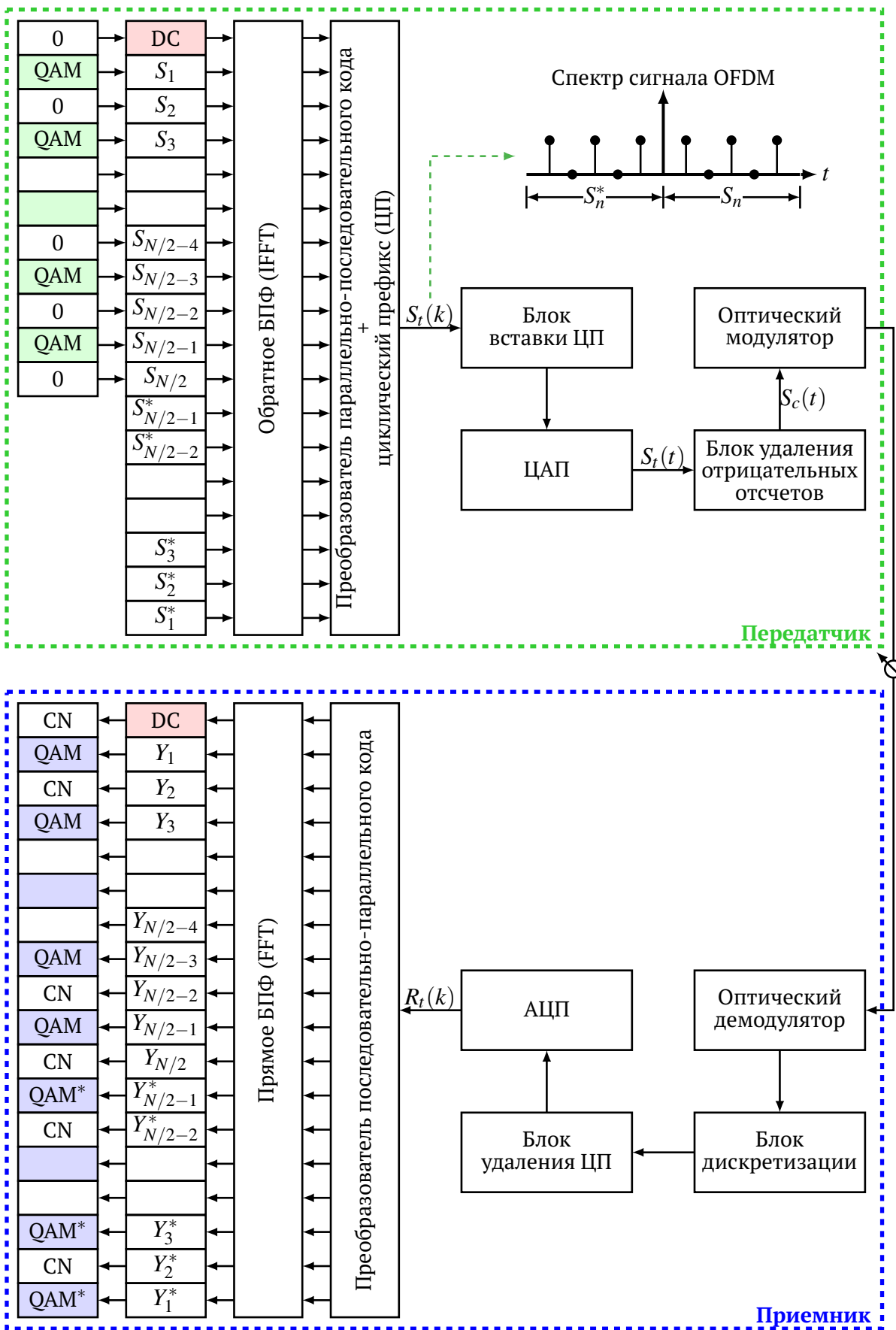


Рис. 3.2. Структурная схема системы передачи ACO-OFDM



ми многочастотного мультиплексирования. Такая система передачи может использоваться как система с бинарными входными сигналами ( $M = 2$ ), так и в качестве системы вторичной модуляции после  $M$ -ичной ASK, PSK, QAM и другими (с  $M \geq 4$ ). Структурная схема системы передачи АСО-OFDM представлена на рис. 3.2. В передатчике входящие информационные символы (сигналы), полученные после QAM, модулируют первую половину нечетных поднесущих  $S_{2n+1}$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots, N/4 - 1$ . На входах для всех четных поднесущих устанавливается нулевой сигнал  $S_{2n} = 0$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N/2$ . Поэтому, постоянная составляющая сигнала и четные символьные сигналы  $N/2$  поднесущих в спектре OFDM становятся равными нулю. Далее используем свойство эрмитовой симметрии и подаем на оставшиеся  $N/2$  входы комплексно сопряженные входным сигналами для построения реального сигнала.

После операции обратного БПФ (IFFT) символ  $S_t(k)$  OFDM, вычисленный во временной области в соответствии с формулой преобразования, имеет выраженное свойство нечетной симметрии  $S_t(k) = -S_t(k + N/2)$ . Это позволяет удалить отрицательные временные отсчеты  $S_t(t)$  сразу после цифроаналогового преобразования в передатчике без потери исходной информации. Полученный сигнал  $S_c(t)$  является унipoлярным сигналом и определяется как  $S_c(t) \geq 0$  в нечетных и нуль в четных каналах. Циклический префикс, определяющий начало нового OFDM-кадра (фрейма) к выходному сигналу OFDM добавляется либо в блоке преобразователя параллельно-последовательного кода, либо сразу после него на выходе. Оптический модулятор преобразует канальный электрический сигнал АСО-OFDM в оптический путем выбранной модуляции по интенсивности (чаще всего амплитудной или широтно-импульсной).

На выходе оптической линии связи, образованной одномодовым оптоволоконным световодом, OFDM сигнал  $R_c(t)$  принимается методом прямого обнаружения. После демодуляции принятый сигнал  $R_t(t)$  дискретизируется и подается на блок удаления циклического префикса, который одновременно выполняет функции блока синхронизации кадров OFDM. После удаления циклического префикса отсчеты OFDM сигнала оцифровываются в аналого-цифровом преобразователе  $R_t(k)$  и подаются на вход преобразователя последовательно-параллельного кода для формирования полного временного кадра OFDM. Затем выполняется операция прямого БПФ (FFT), по результатам которой могут быть обнаружены информационные символы (сигналы) QAM  $Y_n$ , содержащиеся в нечетных поднесущих.

В четных каналах после прямого БПФ обнаруживаются дискретизированные сигналы канального шума, обозначенные на схеме, как CN (clipping

noise). Эти данные можно использовать в качестве шумовых оценок для первой решающей схемы.

Вторая половина кадра OFDM на выходе системы передачи ACO-OFDM представлена зеркально расположенными, в соответствии с эрмитовой симметрией, комплексно-сопряженными значениями выходных сигналов М-ичной QAM. Эти выходные сигналы могут быть проигнорированы или задействованы в цифровой обработке при необходимости и по желанию разработчика системы передачи.

Для более плотной спектральной упаковки и увеличения скорости передачи применяется многоуровневая схема OFDM с асимметричным ограничением (the layered asymmetrically clipped OFDM, LACO-OFDM). В основе технологии LACO-OFDM лежит принцип суммирования параллельных каналов ACO-OFDM со смещением частоты. Для реализации систем передачи в соответствии с LACO-OFDM требуется выдерживать намного более жесткие требования с точки зрения стабильности рабочих характеристик блоков, параметров элементов и комплектующих. Принцип образования каналов и суммирование сигналов показаны на структурной схеме рис. 3.3.

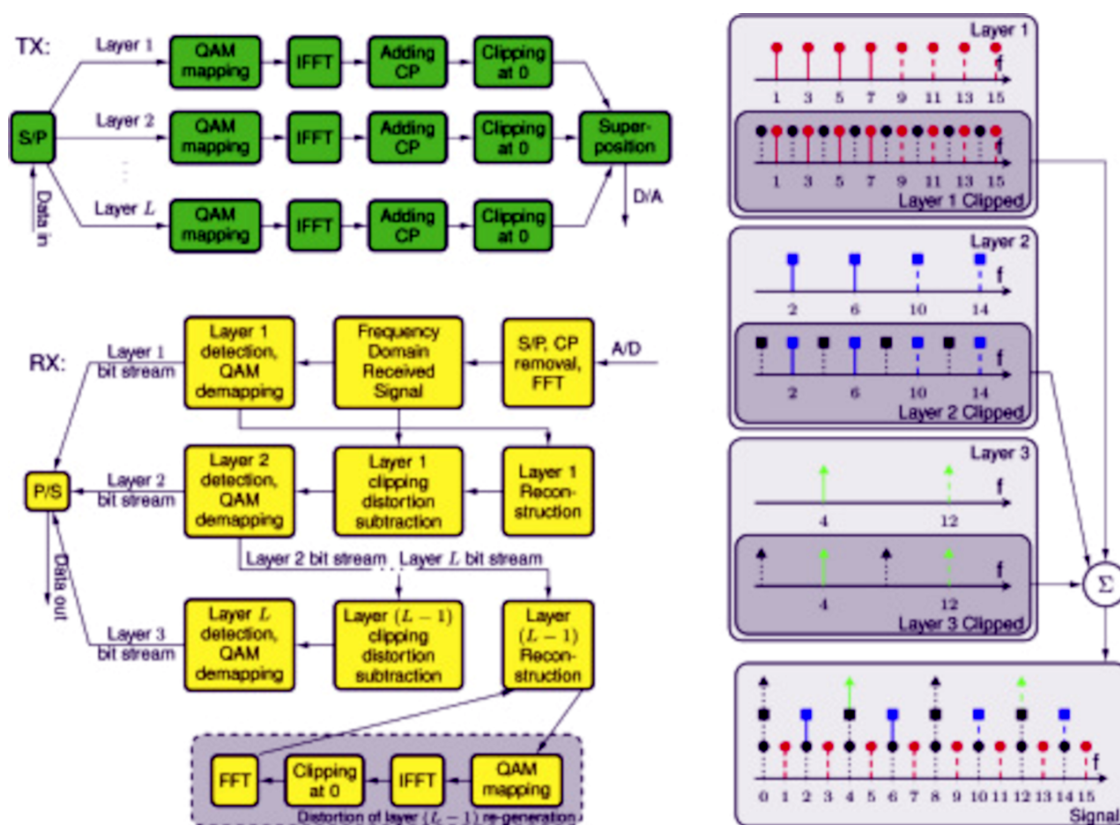


Рис. 3.3. Структурная схема LACO-OFDM (передатчик — блоки зеленого цвета, приемник — желтого, справа — принципы мультиплексирования каналов)

### 3.2.3. Квадратурная амплитудная модуляция

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ, англ. Quadrature amplitude modulation (QAM)) — это способ или схема линейной модуляции, при которой входные символы информационного сигнала источника определяют амплитуду и фазу несущего сигнала. В отличие от фазовой манипуляции (PSK), огибающая сигнала КАМ может быть непостоянна и изменять свою амплитуду в зависимости от расположения сигнальных точек созвездия и их количества. Последовательность из назначенных или определенных  $K$  входных информационных символов при КАМ может быть представлена сигналом

$$v_{\xi}(t) = \Re \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \xi_k s(t - kT) e^{j2\pi f_0 t} \right\}, \quad 0 \leq t \leq KT,$$

где дискреты  $\xi_k$  определяются как

$$\xi_k \equiv \xi'_k + j\xi''_k = A_k e^{j\phi_k},$$

а  $s(t)$  — комплексный информационный сигнал основной полосы частот длительностью  $T$ .

Если этот информационный сигнал представляет собой прямоугольный импульс единичной амплитуды  $s(t) = u_T(t)$ , как представлено на рисунке 3.4, то сигнал КАМ можно переписать в следующем виде

$$v_{\xi}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \xi'_k \cos 2\pi f_0 t - \xi''_k \sin 2\pi f_0 t \right\} u_T(t - kT),$$

который выражает передаваемый сигнал как пару ортогональных несущих, модулированных набором дискретных амплитуд. Полученное семейство сигнальных созвездий КАМ является двумерным и его модулятор и демодулятор имеют такую же структуру, как и при фазовой дискретной манипуляции (PSK), рис. 3.5 и 3.6.

Необходимое для представления входного информационного сигнала в векторном пространстве сигнальное созвездие  $M$ -арной квадратурной амплитудной модуляции выбирается при проектировании. Оно должно обеспечивать оптимальную реализацию структуры системы передачи данных с точки зрения динамического диапазона тракта передачи используемого канала связи, возможных помех в канале (отношений сигнал/помеха), необходимой пропускной способности канала и упрощения ее практической реализации.

Используя комбинацию множества амплитуд и фаз для передачи каждого из  $M$  символов, метод  $M$ -арной квадратурной амплитудной модуляции

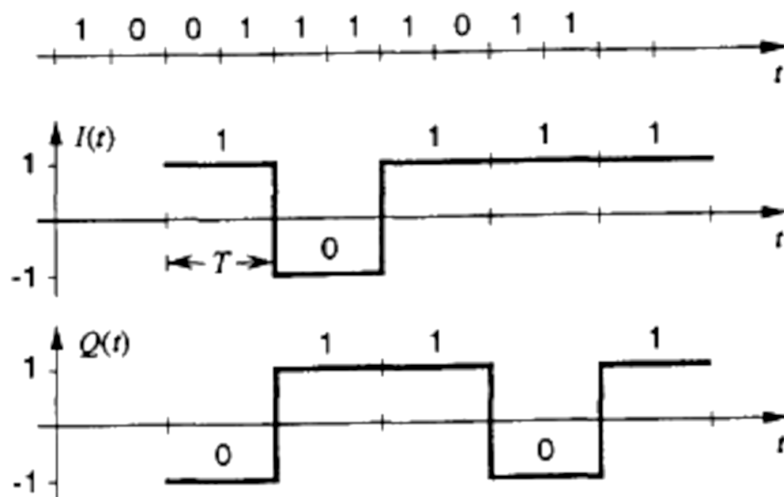


Рис. 3.4. Преобразование информационного сигнала основной полосы частот при КАМ

позволяет увеличить пропускную способность канала связи за счет уменьшения скорости (темпа) передачи входного информационного потока.

Эффективное заполнение пространства сигналов делает метод КАМ более эффективным, чем ASK и PSK, особенно с точки зрения зависимости вероятности битовой ошибки от скорости передачи. Это увеличение достигается большим расстоянием между символами созвездия. Для достижения еще более высокой пропускной способности каналы с КАМ мультиплексируются с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM).

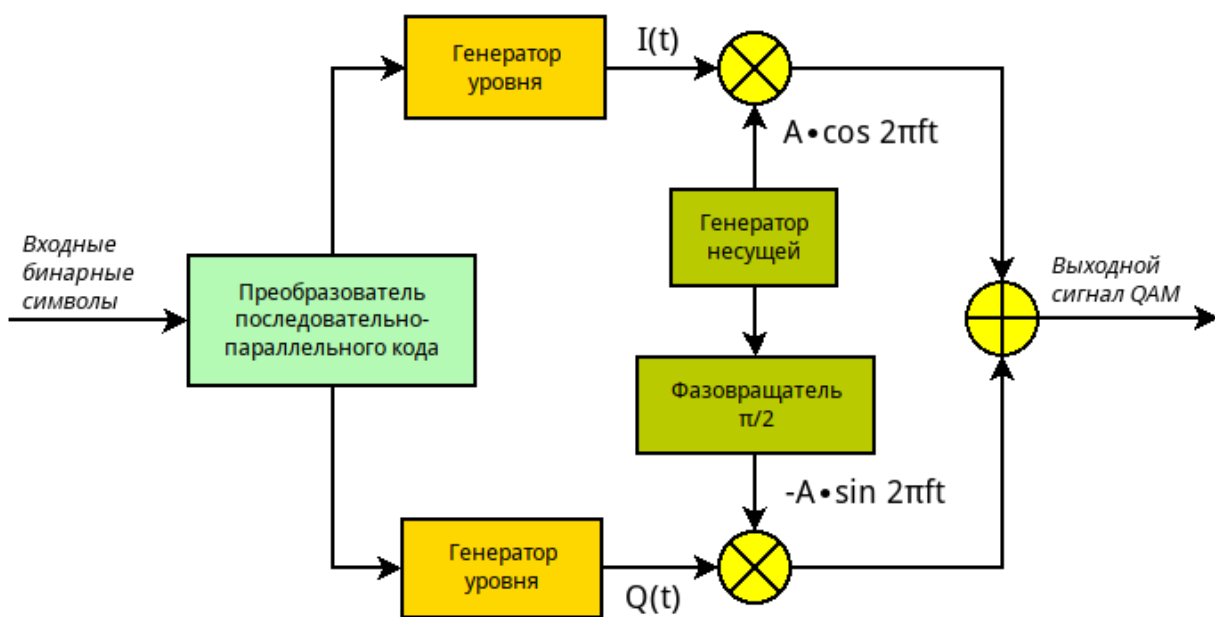


Рис. 3.5. Структурная схема модулятора сигнала КАМ

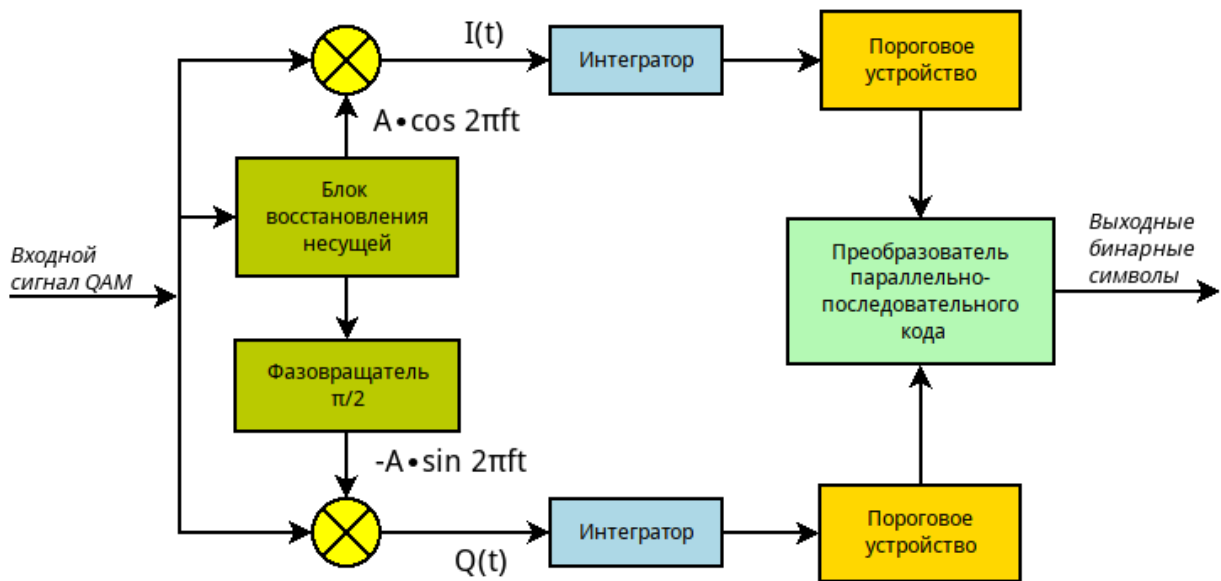


Рис. 3.6. Структурная схема демодулятора сигнала КАМ.

### Вероятность ошибок

Вероятность появления символьной ошибки для М-ичного квадратного КАМ-созвездия выводится из перекрестного произведения двух независимых комбинаций РАМ (ASK) созвездий с  $\sqrt{M}$  сигналами каждого и средней энергией, равной половине энергии КАМ созвездия (так что энергия бита  $E_b$  одинакова для обоих созвездий и РАМ, и КАМ). Это обосновано тем, что квадратное созвездие может быть демодулировано независимо по двум координатным осям, соответствующим синфазной и квадратурной составляющим.

Таким образом, вероятность правильного обнаружения для М-ичного КАМ сигнала в предложенном представлении равна квадрату вероятности правильного обнаружения РАМ (ASK) созвездия с  $\sqrt{M}$  сигналами, полученными путем проецирования первого на одну координатную ось. Если  $p$  обозначить как вероятность появления символьной ошибки в каждом созвездии РАМ, получим

$$P(e) = 1 - (1 - p)^2 = 2p - p^2.$$

Далее, с учетом влияния расстояния до соседних сигнальных точек определяем

$$p = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right).$$

Запишем среднюю сигнальную энергию КАМ для соседних точек, исходя из перекрестного произведения созвездий РАМ (ASK)

$$E = \frac{M-1}{6} \cdot d_{\min}^2.$$

И тогда простая верхняя оценка вероятности появления символьной ошибки будет

$$P(e) \leq 2\operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right).$$

С увеличением  $M$  средняя энергия созвездия будет равна

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |s_i|^2.$$

### 3.3. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в два независимых этапа.

1. **Этап моделирования АСО-OFDM** сигнала с одним из возможных вариантов КАМ созвездия от простого бинарного сигнала до  $M$ -ичного пространственного КАМ в качестве входного информационного сигнала в основной полосе частот, **исследования канала передачи**, оценки и анализа параметров, характеристик и ошибок передачи при заданных параметрах сигнального созвездия, количества поднесущих частот в соответствии с заданием.

2. **Этап моделирования и анализа реальной передачи файлов** по каналу передачи данных с использованием метода модуляции АСО-OFDM и заданного входного информационного сигнала, промодулированного созвездием КАМ в соответствии с заданием.

#### Задание первого этапа.

1. Получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту.

2. Для каждого количества поднесущих OFDM и каждого сигнального созвездия КАМ в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить сигнальные диаграммы в следующих точках:

- в граничных точках, которые соответствуют пределам заданного канального шума;
- в граничной точке появления ошибок на приеме;
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ выше граничной точки появления ошибок на приеме;
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ ниже граничной точки появления ошибок на приеме.

3. Получить **набор результатов первого этапа** в соответствии с перечнем:

- 1) геометрическое представление сигнального созвездия в  $I \times Q$  координатах на входе передатчика OFDM,

2) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на выходе приемника без использования циклового префикса в соответствии с правилами мультиплексирования частотных каналов OFDM, примененными в реализации по указанным заданием точкам,

3) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на выходе приемника с использованием циклового префикса в соответствии с правилами мультиплексирования частотных каналов OFDM, примененными в реализации по указанным заданием точкам,

4) временную диаграмму сигнала OFDM с включенным и выключенным циклическим префиксом на выходе передатчика,

5) временную диаграмму сигнала OFDM с включенным и выключенным циклическим префиксом на входе приемника в указанных заданием точках,

6) временную диаграмму восстановленного биполярного и униполярного сигнала на выходе приемника для указанных заданием точек,

7) мгновенный спектр сигнала на выходе передатчика,

8) накопленный спектр мощности сигнала на выходе передатчика,

9) график BER в заданных пределах канального шума, указанного количества поднесущих частот и определенных заданием сигнальных созвездий КАМ.

4. Оценить и записать количество BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований.

5. Выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек с разным количеством поднесущих и сигналов созвездий КАМ в письменном виде.

#### **Задание второго этапа:**

1. Используя полученные параметры по количеству поднесущих частот, точек сигнального созвездия КАМ и пределов канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов для  $BER = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ .

2. Подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов.

3. Выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

**Примечание!** Для получения графиков и задания нужных параметров моделирования необходимо **вручную** выполнить корректировку значений величин в программах моделирования лабораторной работы с учетом единиц измерения.

### 3.3.1. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания (табл. 3.1) выбирается индивидуально по номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 3.1

Данные сигнального созвездия QAM, порядка OFDM и канального шума.

№ варианта	$M$	$FM$	$P_{S/Nmin}$	$P_{S/Nmax}$
1	2,16,64	32,256	-2	44
2	2,4,32	64,128	-4	35
3	2,8,128	16,256	-5	48
4	2,16,256	64,256	4	40
5	2,4,256	32,128	-1	42
6	2,16,128	16,64	-8	42
7	2,4,32	32,256	-7	44
8	2,8,64	16,128	-4	44
9	2,16,128	32,256	-5	36
10	2,16,512	32,128	-6	38
11	2,8,256	64,256	-6	46
12	2,4,128	16,128	-8	44
13	2,8,32	32,64	-6	42
14	2,16,256	32,256	-7	38
15	2,16,512	32,256	-6	46
16	2,8,128	64,128	-5	38
17	2,16,64	64,128	-6	36
18	2,8,256	16,128	-2	34
19	2,4,128	16,128	-8	37
20	2,16,128	32,256	-6	38
21	2,32,128	32,256	-4	40
22	2,32,256	32,128	-6	34
23	2,16,64	32,128	-8	36
24	2,8,128	64,256	-6	32
25	2,16,128	64,256	-4	48
26	2,8,256	64,256	-6	48
27	2,16,256	32,256	-8	42
28	2,4,64	32,256	-2	36
29	2,8,128	16,256	-1	40
30	2,16,256	64,256	-6	42

### 3.4. Порядок выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме работы (лабораторный практикум, лекции, учебники).
2. Выписать согласно своему номеру варианта исходные данные для выполнения лабораторной работы.
3. Подготовить для расчетов систему вычислений Octave. Загрузить в рабочие каталоги системы Octave программы моделирования каналов и



исследования сигналов созвездий: *OFDM – dat – FR – CP – Lab6.m* — для первого этапа, *OFDM – file – FR – CP – Lab6.m* — для второго этапа и файлы для передачи по каналу: *A – Data – Var – 11.txt* — обычный текстовый файл с числовыми данными, *NetWork.png* — файл с графическим изображением схемы сети. Для передачи файлов допускается использовать другие файлы по желанию студента (обеспечивающие выполнение заданий лабораторной работы).

4. По заданию запускать программы на исполнение, вводить исходные данные своего варианта, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но необходимо помнить, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (формируются новые файлы). Параметрические результаты можно сохранять в текстовом (\*.txt), а графики — в pdf-формате (программами не предусмотрено).

5. Все необходимые расчеты выполнять в соответствии с заданием. Записывать и представлять в аналитическом виде необходимые выражения и в числовом виде результаты расчетов и полученные значения параметров.

6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

7. Оформить отчет в печатном виде согласно рекомендациям преподавателя. В отчете должны быть подробно расписаны исходные данные лабораторной работы согласно номеру варианта, ход работы и полученные результаты по каждому пункту задания. В титульном листе отчета обязательно должны быть указаны наименование работы и учебной дисциплины, цель, номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента. Рекомендуется использовать утвержденные образцы титульных листов.

8. Защитить по отчету выполненную работу.

**Примечание.** Работа выполняется индивидуально. При проведении расчетов допускается использовать систему Octave. Тексты программ расчетов и моделирования сигналов, каналов и устройств в отчет включать **НЕ НУЖНО!** Допускается модификация текстов программ. Все результаты **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должны быть представлены преподавателю в документальном или письменном виде с обязательными атрибутами идентификации — номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента.

### 3.5. Контрольные вопросы

1. Что такое ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов?

2. Какие причины приводят к ошибкам в каналах OFDM, перечислите и объясните их возникновение?

3. Что такое динамический диапазон сигнальных созвездий КАМ? Как обеспечить наиболее эффективную работу оптических каналов OFDM применительно к сигнальным созвездиям КАМ?

4. Как реализуется процедура восстановления исходных данных на приемной стороне канала системы передачи данных с OFDM и информационным входным сигналом основной полосы частот промодулированным созвездием КАМ.

5. Как функционально связаны динамический диапазон канала передачи данных и разрядность АЦП-ЦАП при генерации выходного сигнала и восстановлении сигнала OFDM в приемнике с входным сигналом КАМ?

## **Лабораторная работа 4**

### ***Моделирование и исследование характеристик созвездий сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой модуляцией***

#### **4.1. Цели работы**

Научиться разрабатывать, моделировать, приобрести практический опыт создания и исследования созвездий сигналов с М-ичной амплитудно-фазовой модуляцией. Научиться оценивать и анализировать параметры сигналов и характеристики каналов, исследовать амплитудные и частотные зависимости, ошибки передачи для созвездий сигналов с разными типами М-ичной амплитудно-фазовой модуляции.

#### **4.2. Теоретические сведения**

Для кодирования передаваемой информации в канале связи можно использовать не один параметр несущего колебания, а два одновременно. Модуляция при этом, может быть линейной или нелинейной. Для линейных типов модуляции справедливо линейное соотношение между спектром модулирующего сигнала и спектром модулированного колебания. Соотношения между амплитудой модулированного сигнала и исходным информационным сигналом, полной фазой модулированного сигнала и информационным сигналом также линейны. К линейным видам модуляции относится амплитудная и фазовая. Частотная модуляция является нелинейной. При реализации линейных процессов справедлив принцип суперпозиции, поэтому для таких способов модуляции можно параллельно изменять сразу два параметра несущего колебания. Модуляция, при которой происходит одновременное изменение двух параметров несущего колебания – амплитуды и фазы – называется амплитудно-фазовой модуляцией и при помощи этого способа модуляции можно одновременно модулировать одну несущую сразу двумя сигналами, например  $b(t)$  и  $d(t)$ .

Эта схема модуляции получила наименование квадратурной (КАМ), потому, что она использует свойства ортогональности функций синуса и косинуса, чтобы обеспечить передачу двух разных сигналов на одной и той же несущей, которая занимает полосу пропускания, эквивалентную сигналу амплитудной модуляции (АМ). Так как информация передается одновременно по амплитуде и по фазе несущей, квадратурно-модулированный сигнал  $s(t)$  можно записать в следующем виде

$$s(t) = b(t)\cos(\omega_0 t + \phi_0) + d(t)\sin(\omega_0 t + \phi_0),$$

где  $b(t)$  и  $d(t)$  — информационные сигналы передаваемых данных,  $\omega_0$  и  $\phi_0$  — частота и начальная фаза несущего колебания.

Этот сигнал можно записать и так

$$s(t) = \sqrt{b^2(t) + d^2(t)} \cos(\omega_0 t - \tan^{-1} \frac{d(t)}{b(t)} + \phi_0) = a(t) \cos(\omega_0 t - \Theta(t) + \phi_0),$$

где промодулированная амплитуда представлена результирующей функцией  $a(t) = \sqrt{b^2(t) + d^2(t)}$  и промодулированная фаза

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\tan\left(\frac{d(t)}{b(t)}\right)}.$$

#### 4.2.1. Сигнальные созвездия для многопозиционной цифровой модуляции

Применяя в качестве информационных дискретные сигналы передаваемых данных, где  $I$  соответствует  $b(t)$  и  $Q$  соответствует  $d(t)$ , будем получать на плоскости модуляции сигнальные созвездия решетчатого вида — сигнальные решетки квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Полученная модель представления, говорит о том, что в общем виде КАМ является многопозиционной модуляцией. При количестве уровней  $M = 4$  она соответствует QPSK и формально считается, что для любой КАМ с уровнями  $M \geq 8$ , когда число бит на символ  $k = \log_2 M$ ,  $k \in N$ ,  $M$  может принимать только значения четных степеней двойки: 4, 16, 64, 256 и далее, для удобства однозначного разбиения и представления двоичных сигналов созвездиями квадратного типа. На рис. 4.1 приведено сигнальное созвездие 16-QAM с кодированием Грея.

При разработке оборудования могут использоваться большие значения, вплоть до 4096-QAM. Эти виды модуляции позволяют достичь исключительно высокой спектральной эффективности. Однако, как видно из сигнального созвездия, так как информация кодируется в том числе амплитудой и изменения амплитуды достаточно велики, то КАМ предъявляет высокие требования к линейности усилительных каскадов оборудования систем передачи и обеспечению на входе приемника соответствующего модуляции динамического диапазона, особенно для больших  $M$ . Вторым фактором, значительно влияющим на количество дискретных уровней модуляции, является отношение сигнал/шум в канале передачи данных, которое при аддитивном характере влияния шумов ограничивает различимость дискретных сигналов на плоскости модуляции.

Практическая реализация КАМ-модуляции может быть выполнена следующим образом. В памяти устройства хранится таблица значений дискрет-

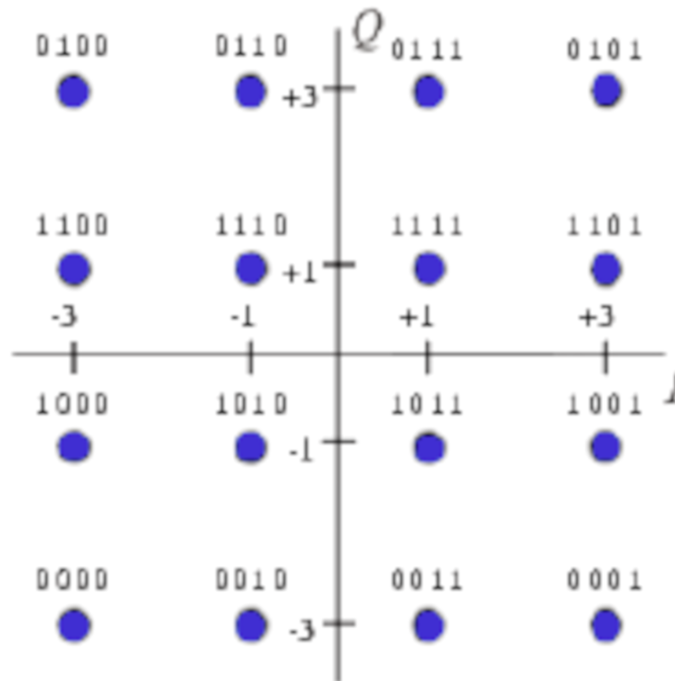


Рис. 4.1. Сигнальное созвездие 16-QAM

ных квадратурных компонент  $I(t)$  и  $Q(t)$ , имеющих в сигнальном созвездии и расположенных в порядке возрастания значений соответствующих символов. Устройство анализирует входную последовательность бит, разбивает ее на символы и для каждого символа выбирает соответствующие значения квадратурных компонент из таблицы. Затем выполняется модуляция сигналов  $I(t)$  и  $Q(t)$  в квадратурном модуляторе.

$$s(t) = I(t)\cos(\omega_0 t + \phi_0) + Q(t)\sin(\omega_0 t + \phi_0).$$

В пространственном созвездии сигналов стабильный минимальный уровень символьных ошибок достигается тогда, когда расстояние между соседними сигнальными точками в созвездии будет одинаковым. Значит, распределение точек созвездия будет относительно равномерным на плоскости.

Одна из первых схем КАМ была предложена в 1960 г. Она предполагала расширение фазовой модуляции до многоамплитудной фазовой модуляции и показала, что дискретные сигналы с фиксированной фазой могут иметь несколько уровней разных амплитуд. В таком созвездии фиксированное количество сигнальных точек (или векторов) равномерно разнесено на каждом из  $N$ -кругов, где  $N$  — количество уровней амплитуды (рис. 4.2, а). В литературе это называется созвездием типа I. В созвездии типа I точки на внутреннем кольце по расстоянию находятся ближе всего друг к другу и наиболее уязвимы для ошибок из-за шума. Чтобы устранить эту проблему,

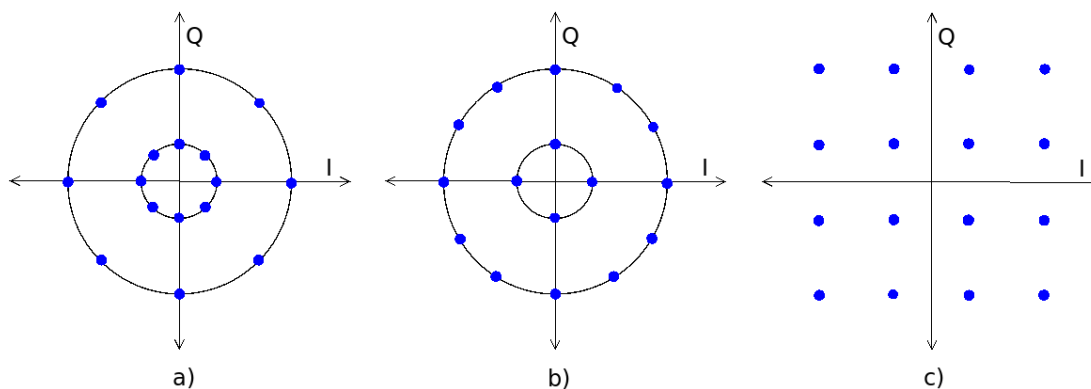


Рис. 4.2. Примеры сигнальных созвездий QAM I, II, III типов

разработчики через несколько месяцев предложили созвездие типа II (рис. 4.2, b).

В созвездии типа II сигнальные точки также находятся на кругах, но их количество на внутреннем круге меньше количества точек на внешнем круге, поэтому расстояние между двумя соседними точками на внутреннем круге примерно равно расстоянию между точками внешнего круга.

Созвездие типа III — это квадратное созвездие КАМ, показанное на (рис. 4.2, c), которое было предложено разработчиками в 1962 году. Его анализ показал, что система типа III предлагает очень небольшое улучшение эксплуатационных характеристик каналов связи по сравнению с системой типа II, но ее техническая реализация значительно проще, чем у систем типа I и II. По этой причине созвездие типа III стало наиболее широко используемым в системах передачи данных.

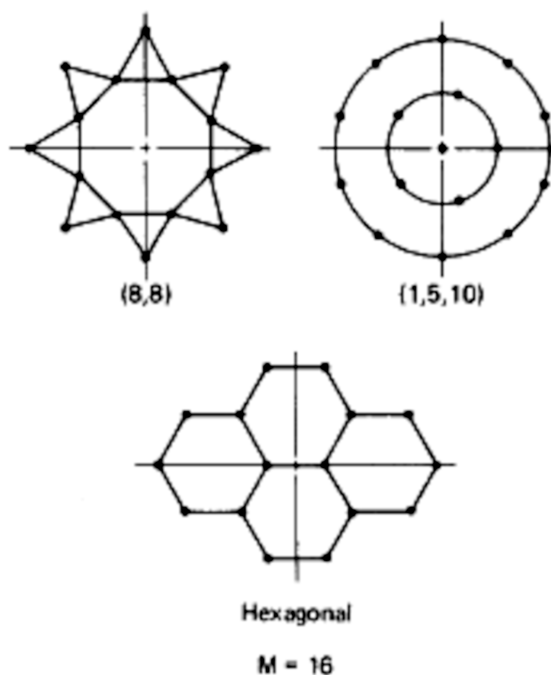


Рис. 4.3. Варианты QAM созвездий

Разные другие двумерные возможные созвездия для практического использования представлены на рис. 4.3. При проектировании созвездий необходимо учитывать следующие их параметры, которые непосредственно влияют на свойства сигналов при модуляции.

1. Минимальное евклидово расстояние  $d_{min}$  между векторами (сигнальными точками). Оно должно быть как можно большим при разных других ограничениях, поскольку определяет вероятность ошибки символа в схеме модуляции.

2. Разность фаз между векторами. Она должна быть как можно больше при прочих ограничениях, поскольку это определяет устойчивость сигнала к фазовому дрожанию и, следовательно, устойчивость всей схемы тракта передачи к дефектам восстановления несущей и тактовой частоты, включая поворот фазы в канале распространения.

3. Средняя мощность всех векторов. Она должна быть как можно больше при других ограничениях.

4. Отношение пиковой мощности вектора к средней является мерой устойчивости к нелинейным искажениям, которые возможны в усилителях мощности сигнала. Оно должно быть как можно ближе к единице при других ограничениях.

5. Сложность практической реализации.

6. Другие свойства, характеризующие устойчивость сигнала к замираниям на трассе распространения.

Практические результаты программно-аппаратных реализаций оборудования показали, что квадратное созвездие (тип III) является наиболее подходящим выбором для каналов с AWGN. Его можно легко сгенерировать как два сигнала M-ASK, наложенных на две фазово-квадратурные несущие (смотри рис. 3.5). Его можно также легко демодулировать, чтобы получить две квадратурные составляющие (смотри рисунок 3.6). Каждый компонент можно обнаружить индивидуально, сравнив его с набором пороговых значений. Разные другие комбинации программно-аппаратных реализаций модулятора-демодулятора предлагают немного лучшие показатели производительности и ошибок, но гораздо более сложную системную реализацию.

Созвездие типа I (также называемое звездным созвездием) не является оптимальным с точки зрения помехоустойчивости, определяемой  $d_{min}$ , при неплохих показателях энергоэффективности с учетом ограничения средней векторной мощности, но при этом позволяет использовать эффективные методы дифференциальной модуляции и кодирования. Эти свойства делают такое созвездие более подходящим для каналов с замираниями и значительным затуханием.

### 4.3. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в два независимых этапа.

1. **Этап** моделирования созвездия, **исследования канала передачи**, оценки и анализа параметров, характеристик и ошибок передачи при заданных параметрах сигнальных созвездий в соответствии с заданием.

2. **Этап** моделирования и анализа **реальной передачи файлов** по каналу передачи данных с использованием заданного созвездия модуляции в соответствии с заданием.

#### **Задание первого этапа.**

1. Получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту.

2. По каждому сигнальному созвездию в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить сигнальные диаграммы в следующих точках:

- в граничных точках, соответствующих пределам заданного канального шума,
- в граничной точке появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ выше граничной точки появления ошибок на приеме,
- в точке с параметрами канального шума на 2дБ ниже граничной точки появления ошибок на приеме.

3. Получить **набор результатов первого этапа** в соответствии с перечнем:

- 1) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на выходе передатчика;
- 2) геометрическое представление сигнального созвездия в  $IxQ$  координатах на входе приемника в указанных заданием точках;
- 3) временную диаграмму сигнала на выходе передатчика;
- 4) временную диаграмму сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 5) временную диаграмму восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 6) мгновенный спектр сигнала на выходе передатчика;
- 7) мгновенный спектр сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;
- 8) мгновенный спектр восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;
- 9) спектр мощности сигнала на выходе передатчика;



10) спектр мощности сигнала на входе приемника в указанных заданием точках;

11) спектр мощности восстановленного сигнала на выходе приемника в указанных заданием точках;

12) график BER для заданных сигнальных созвездий в заданных пределах канального шума.

4. Оценить и записать количество появляющихся BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований.

5. Выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

#### **Задание второго этапа.**

1. Используя полученные параметры сигнального созвездия и пределы канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов для  $BER = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ .

2. Подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов.

3. Выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

#### **4.3.1. Варианты заданий лабораторной работы**

Вариант задания (табл. 4.1) выбирается по номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 4.1

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№ варианта	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$rd$
1	16,128	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-8	24	4
2	32,64	$0; -2\pi/M; \pi/M$	-6	33	5
3	16,32	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-5	28	3
4	32,128	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-4	30	5
5	16,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-10	22	4
6	32,64	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-8	32	3
7	32,64	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-7	24	6
8	16,32	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-4	34	5
9	16,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-5	36	5
10	16,128	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-6	38	6
11	32,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	26	3
12	16,32	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-8	24	5
13	32,64	$0; -2\pi/M; \pi/M$	-6	32	4
14	16,128	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-7	32	6

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№ варианта	$M$	$N_{faza}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$rd$
15	16,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	26	4
16	32,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-5	28	3
17	16,64	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-6	31	4
18	32,64	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-12	34	3
19	32,128	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-8	32	6
20	16,128	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	31	4
21	32,128	$0; -2\pi/M; \pi/M$	-4	30	5
22	32,64	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	34	5
23	16,64	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-8	32	3
24	32,128	$0; 2\pi/M; \pi/M$	-6	32	5
25	16,128	$0; -2\pi/M; \pi/M$	-4	28	4
26	32,64	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	28	3
27	16,32	$0; -\pi/M; -2\pi/M$	-8	32	3
28	32,64	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-12	31	4
29	32,128	$0; -2\pi/M; \pi/M$	-10	30	5
30	16,64	$0; -\pi/M; 2\pi/M$	-6	32	5

#### 4.4. Порядок выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме работы (лабораторный практикум, лекции, учебники).

2. Выписать согласно своему номеру варианта исходные данные для выполнения лабораторной работы.

3. Подготовить для расчетов систему вычислений Octave. Загрузить в рабочие каталоги системы Octave программы моделирования каналов и исследования сигналов созвездий:

а) для первого этапа:

- $M - vAvPSK - dat - lab7.m$  — моделирует квадратурные  $M$ -арные амплитудно-фазовые созвездия I и II типа с диаметрально-точечным построением созвездия на базе  $nPSK$ ;

- $M - QvASK - dat - lab7.m$  — моделирует квадратурные  $M$ -арные амплитудно-фазовые созвездия III типа с квадратным (прямоугольным) построением на базе  $nASK$ ;

- $M - variant - QAM - dat - lab7.m$  — моделирует квадратурные  $M$ -арные амплитудно-фазовые созвездия произвольного типа с ручным вводом точек созвездия для плоскости  $I - Q$  и координатами сигнальной точки в виде комплексного числа  $a + bi$ , где  $a$  — координата точки по оси  $I$ ,  $b$  — координата точки по оси  $Q$ ;

б) для второго этапа:

- $M - vAvPSK - file - lab7.m$  — моделирует передачу указанного в программе файла с использованием квадратурных  $M$ -арных амплитудно-

фазовых созвездий I и II типа с диаметрально-точечным построением созвездий на базе nPSK;

- $M - QvASK - file - lab7.m$  — моделирует передачу указанного в программе файла с использованием квадратурных  $M$ -арных амплитудно-фазовых созвездий III типа с квадратным (прямоугольным) построением на базе nASK;

- $M - variant - QAM - file - lab7.m$  — моделирует передачу указанного в программе файла с использованием квадратурных  $M$ -арных амплитудно-фазовых созвездий произвольного типа с ручным вводом точек созвездия для плоскости  $I - Q$ ;

- **файлы данных для второго этапа:**  $A - Data - Var - 11.txt$  — обычный текстовый файл с числовыми данными,  $NetWork.png$  — файл с графическим изображением схемы сети.

Для передачи файлов допускается использовать другие файлы по желанию студента (обеспечивающие выполнение заданий лабораторной работы).

**Внимание!** Допускается моделирование созвездия произвольного типа с ручным вводом точек только для минимального значения  $M$ . Начальное фазирование точек созвездия необходимо производить самостоятельно с целью увеличения  $d_{min}$  для диаметрально-точечных созвездий на базе nPSK.

4. По заданию запускать программы на исполнение, вводить исходные данные своего варианта, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но необходимо помнить, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (формируются новые файлы). Параметрические результаты можно сохранять в текстовом (\*.txt), а графики — в pdf-формате (программами не предусмотрено, формировать команды и дополнения в программы самостоятельно, примеры можно посмотреть в программах  $Lab - 1$ ,  $Lab - 2 - 3$ ).

5. Все необходимые расчеты выполнять в соответствии с заданием. Записывать и представлять в аналитическом виде необходимые выражения и в числовом виде результаты расчетов и полученные параметры сигналов и каналов.

6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

7. Оформить отчет в печатном виде согласно рекомендациям преподавателя. В отчете должны быть подробно расписаны исходные данные лабораторной работы согласно номеру варианта, ход работы и полученные результаты по каждому пункту задания. В титульном листе отчета обязательно должны быть указаны наименование работы и учебной дисциплины, цель, номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента. Рекомендуется использовать утвержденные образцы титульных листов.

8. Защитить по отчету выполненную работу.

**Примечание.** Работа выполняется индивидуально. При проведении расчетов допускается использовать систему Octave. Тексты программ расчетов и моделирования сигналов, каналов и устройств в отчет включать **НЕ НУЖНО!** Допускается модификация текстов программ. Все результаты **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должны быть представлены преподавателю в документальном или письменном виде с обязательными атрибутами идентификации — номер варианта задания, номер группы и Ф.И.О. студента.

#### 4.5. Контрольные вопросы

1. Что такое сигнальное созвездие квадратурной амплитудной модуляции?
2. Какой параметр созвездия характеризует ошибки в канале передачи данных? Что является причиной их возникновения?
3. Какой динамический диапазон сигнала должен обеспечиваться в приемнике для эффективной работы канала с использованием сигнальных созвездий квадратурной амплитудной модуляции?
4. Как осуществляется процедура восстановления исходных данных на приемной стороне канала системы передачи данных для случаев когерентного и некогерентного приема.
5. Как функционально связаны динамический диапазон сигнала квадратурной амплитудной модуляции и разрядность АЦП-ЦАП при восстановлении сигнала, полученного приемником?

### **Список рекомендуемых источников**

1. Скляр, Б. Цифровая связь : теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр — Москва : Вильямс, 2016. — 1099 с.
2. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис — Москва : Радио и связь, 2000. — 800 с.

**Владимиров Сергей Александрович**

**ТЕОРИЯ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ  
МОДУЛЯЦИЕЙ**

**Лабораторный практикум**

Редактор *В. А. Соловьева*

План изданий 2024 г., п. 26

Подписано к печати ХХ.ХХ.ХХХХ  
Объем 2,75 печ. л. Тираж 9 экз. Заказ ХХХХ

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, 22  
Отпечатано в СПбГУТ