

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**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**

Лабораторный практикум

СПб ГУТ)))

**Санкт-Петербург
2021**

УДК XXX.XXX.X (XXX)

ББК XX.XXX.X хХХ

В 57

Рецензент

— —

Рекомендован к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ

Владимиров, С. А.

В 57 Теория, системы и устройства передачи данных : лабораторный практикум / С. А. Владимиров ; СПбГУТ. — СПб, 2021. — 42 с.

Предназначен для обучения и 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 учебного курса по дисциплине «Теория, системы и устройства передачи данных».

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

УДК XXX.XXX.X (XXX)

ББК XX.XXX.X хХХ

© Владимиров С. А., 2021

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2021

Содержание

Лабораторная работа 1. Исследование характеристик и ошибок дискретизации и квантования детерминированных сигналов	4
Лабораторная работа 2. Исследование амплитудной модуляции и влияния аддитивного шума на сигнал в канале передачи данных	11
Лабораторная работа 3. Исследование влияния перекрестной помехи на сигнал с амплитудной модуляцией в канале передачи данных	22
Лабораторная работа 4. Моделирование и исследование характеристик сигналов с многоуровневой амплитудной манипуляцией.....	27
Лабораторная работа 5. Моделирование и исследование характеристик сигналов с многофазной манипуляцией	35

Лабораторная работа 1

Исследование характеристик и ошибок дискретизации и квантования детерминированных сигналов

1.1. Цели работы

Научиться и приобрести практический опыт дискретизации и квантования детерминированных сигналов различной формы. Научиться получать и анализировать калибровочные характеристики устройств аналого-цифрового преобразования. Исследовать амплитудные и частотные зависимости, включая ошибки дискретизации и квантования для сигналов различной формы, получить и проанализировать полученные зависимости и характеристики.

1.2. Теоретические сведения

1.2.1. Дискретизация и квантование сигналов

Рассматривая различные источники сигналов для систем передачи данных, можно заметить, что значительная часть из них в качестве исходного сигнала имеет *аналоговый сигнал*, который является непрерывной функцией времени. Оцифровка и первичное преобразование аналоговых непрерывных сигналов должно производиться в соответствии с теоремой Котельникова. Исходный аналоговый сигнал с ограниченным частотным спектром может быть точно восстановлен из дискретных во времени значений на приемном конце системы передачи данных методом интерполяции полученного сигнала. Точность такого восстановления ограничивается ошибками дискретизации и квантования. Рассмотрим параметры сигналов и преобразований, влияющих на точность восстановления сигнала в процессе первичного аналого-цифрового преобразования (АЦП).

Частота дискретизации сигнала

Исходный непрерывный аналоговый сигнал $x(t)$ от источника сообщений характеризуется заданной ограниченной спектральной полосой или наибольшей (максимальной) частотой синусоидального гармонического сигнала f_{max} . В соответствии с теоремой Котельникова частота дискретизации должна быть выбрана не менее удвоенной f_{max}

$$f_{\text{дискр}} = f_d \geq 2 * f_{max}.$$

Сама операция дискретизации, то есть переход от аналогового сигнала $x(t)$ к дискретному сигналу $x_d(t)$, заключается в том, что отсчеты дискретного сигнала берут через равный во времени промежуток Δ , называемый *интервалом* (шагом, периодом) *дискретизации* $\Delta = t_i - t_{i-1} = t_{i-1} - t_{i-2} = \dots$ и его

можно описать, используя обобщенную функцию, называемую *дискретизирующей последовательностью* $\eta(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i\Delta)$, как скалярное произведение $x(t)$ и $\eta(t)$

$$x_d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i\Delta) dt = [\dots, x_d(i-1), x_d(i), x_d(i+1), \dots].$$

Работа дискретизатора заключается в стробировании сигнала $x(t)$ дискретизирующей последовательностью $\eta(t)$.

Если входной сигнал меняется быстрее, чем производится дискретизация, то точное восстановление сигнала невозможно, и на выходе обратного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) будет присутствовать не исходный, а ложный сигнал. Ложные частотные компоненты сигнала (отсутствующие в спектре исходного сигнала) получили название *alias* (ложная, побочная частота). Частота таких ложных компонент зависит от разницы между частотой сигнала и частотой дискретизации. Этот эффект получил название *наложение частот (aliasing)*.

Для борьбы с эффектом наложения спектров сигнал, подаваемый на вход АЦП, пропускают через фильтр нижних частот для подавления спектральных составляющих, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Такой фильтр еще называют *anti-aliasing (антиалиасинговый)* и его применение обычно обязательно при построении реальных АЦП.

Применение аналогового входного фильтра интересно не только по этой причине. Если в сигнале присутствуют шумовые компоненты, значительно более мощные, чем полезный сигнал, и достаточно далеко отстоящие от него по частоте, то и они должны быть эффективно подавлены этим входным фильтром. Это позволяет сохранять динамический диапазон АЦП: например, если помеха на 10 дБ сильнее сигнала, на неё впустую будет тратиться, в среднем, два бита разрядности (каждые 2 раза, это 1 разряд АЦП, и это примерно 6 дБ).

Квантование сигналов

Любое цифровое устройство представляет сигналы (или значения параметров) в виде последовательности чисел с ограниченной разрядностью. Это значит, что мгновенные значения сигнала дискретизируются не только по времени, а и по уровню, таким образом, что интервалом квантования (дискретизации по уровню - минимальной разницей между двумя соседними уровнями) служит единица младшего двоичного разряда. Точное двоичное значение дискрета на бесконечном интервале будет

$$x = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n 2^{-n},$$

где $\alpha_n = 0$ или 1.

В случае ограничения длины числа x заданным количеством разрядов N , значение x образуется его округленным (технически округленным) или машинным представлением

$$\tilde{x} = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n 2^{-n} + \beta_N 2^{-N},$$

при этом коэффициент β_N равен либо α_n , либо $\alpha_n + 1$ в зависимости от того, нуль или единица содержится в $(N + 1)$ -м разряде.

В технике связи и радиотехнике дискретные сигналы, уровни которых могут принимать лишь счетное множество значений, называют *квантованными сигналами*. Квантование сигналов приводит к специфической погрешности при обработке, которая имеет название *шум квантования*. Прямой путь снижения этой погрешности — использование двоичных чисел с большим количеством разрядов, при этом неизбежно снижается быстродействие устройств из-за увеличения времени выполнения операций.

При техническом проектировании устройств, в случае линейного АЦП и заданных параметрах:

- максимальном значении параметра или амплитуды A_{Max} ;
- минимальном значении параметра или амплитуды A_{Min} ;
- заданном значении интервала квантования параметра или амплитуды ΔA (может быть выражен параметром - чувствительность (минимальная или максимальная), точность преобразования АЦП, допустимый интервал нечувствительности, ...),

разрядность АЦП рассчитывается по формуле

$$N = \left\lceil \log_2 \frac{|A_{Max} - A_{Min}|}{|\Delta A|} \right\rceil + 1.$$

1.3. Варианты для выполнения задания

1.3.1. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа условно разделена на 4 независимых этапа, в каждом из которых необходимо выполнить задание и проанализировать полученные характеристики дискретизации и квантования для сигналов разной формы $x(t)$, представляющих собой периодический процесс с заданными параметрами:

- амплитудой сигнала в интервале $[A_{Min}; A_{Max}]$;
- реализацией сигнальной выборки в N -отсчетов;
- частотой дискретизации сигнала dF ;

- заданным уровнем квантования амплитуды сигнала dA .

Необходимо смоделировать источники следующих сигналов:

1. калибровочного сигнала с заданными по варианту параметрами,
2. синусоидального периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
3. прямоугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
4. треугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами.

Смоделировать устройство первичного линейного аналого-цифрового прямого преобразования сигнала и аналогичного ему ЦАП прямого преобразования, для которых:

1. Получить, исследовать и проанализировать амплитудные калибровочные характеристики устройства, включая динамическую характеристику ошибки квантования для сигнального интервала в соответствии с вариантом:

а) оценить количество шагов квантования и определить разрядность АЦП,

б) представить калибровочные характеристики АЦП-ЦАП,

в) оценить энергию ошибки квантования и построить график зависимости энергии ошибки квантования от шага квантования на амплитудном интервале шага 0.01 ... 0.5 для своего амплитудного интервала по варианту задания, для каждого шага определять разрядность АЦП и представить график ошибки от разрядности АЦП,

г) представить графики ошибки квантования от величины шага квантования и от разрядности АЦП для случаев интерполяции выходного сигнала КИХ и БИХ-фильтрами (КИХ-фильтр с конечной импульсной характеристикой (FIR), БИХ-фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (IIR)), функциональную зависимость рекомендуется показать на предыдущем графике,

д) табличные значения для графиков рекомендуется представить в txt-файле с данными параметров калибровки.

2. Получить, исследовать и проанализировать амплитудные и частотные характеристики в ходе первичного прямого и обратного АЦП-ЦАП для периодических сигналов указанных форм с определением технических значений их параметров, включая ошибки квантования и дискретизации в соответствии со своим вариантом:

а) оценить восстановление сигнала по каждой из предложенных форм сигнала, оценить энергию ошибок квантования, представить графики зависимости абсолютной и относительной ошибок квантования для разных частот и

указать причины возникновения максимумов (пиков) на полученных экспериментальных зависимостях,

б) для каждой из предложенных форм сигнала представить экспериментальный график зависимости энергии ошибки квантования от частоты,

в) по каждой из предложенных форм сигнала представить экспериментальный график зависимости энергии ошибки квантования от частоты для случаев интерполяции выходного сигнала КИХ и БИХ-фильтрами,

г) провести оценку полученных зависимостей и проанализировать различия восстановления исходного сигнала для предложенных форм.

1.3.2. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 1.1

Данные аналогового исходного сигнала и его цифровой реализации.

№ варианта	N	A_{Min}	A_{Max}	dA	dF
1	3000	1.8	60	0.2	1000
2	2400	-8	26	0.15	4000
3	2500	-24	16	0.25	5000
4	3500	1	126	0.5	400
5	4000	2.3	76	0.45	2000
6	1500	-118	126	0.35	3000
7	4500	37	129	0.23	4000
8	3500	1.6	16	0.05	1000
9	1000	-2.6	26	0.15	2000
10	2000	3.1	46	0.25	5000
11	4500	-0.8	9.6	0.02	4000
12	2500	-0.8	26	0.15	1000
13	2800	4.1	216	0.35	4000
14	3600	-234	250	0.5	2000
15	6000	0.5	26	0.15	600
16	3000	-3.8	33	0.26	3000
17	4000	-8.5	26	0.18	5000
18	5000	22	56	0.34	2000
19	2800	3.7	26	0.12	3000
20	4400	-28	5	0.15	4000
21	5600	-18	-2.3	0.05	1000
22	2200	-0.8	2.6	0.01	1000
23	2600	-81	-26	0.25	3000
24	2400	4.8	46	0.42	2000
25	2500	-30	30	0.15	4000
26	2600	-8	96	0.25	5000
27	3400	2	41	0.12	4000
28	3500	-2.8	16	0.1	2000
29	4200	0.75	12	0.1	1000
30	4400	-0.5	14	0.05	4000

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 и исследования сигналов *progLAB – 1 – Kalibrovka – TSiUPD.m* — для исследования амплитудных калибровочных характеристик, *progLAB – 1 – Sinus – TSiUPD.m* — для исследования амплитудных и частотных характеристик периодического синусоидального сигнала, *progLAB – 1 – Meandr – TSiUPD.m* — для исследования амплитудных и частотных характеристик периодического прямоугольного сигнала, *progLAB – 1 – TriangW – TSiUPD.m* — для исследования амплитудных и частотных характеристик периодического треугольного сигнала.

4. По очереди запускать программы на исполнение, вводить исходные данные своего варианта, исследовать устройство и заданные сигналы получением нескольких реализаций, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но помним, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (при изменении частоты сигнала формируются новые файлы). Параметрические результаты сохраняются в текстовом-txt, а графики в pdf-формате.

5. Произвести все необходимые расчеты в соответствии с заданием и нанести значения на графики. Записать и представить 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 ФИО учащегося. 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 и устройств в отчет включать **НЕ НУЖНО!** Допускается модификация текстов программ. Все результаты **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должны быть представлены преподавателю в документальном или письменном ви-

де с обязательными атрибутами идентификации — номер варианта задания, номер группы и ФИО учащегося.

1.5. Контрольные вопросы

1. Что такое дискретизация аналогового сигнала, укажите ее особенности и корректный порядок действий при реализации?
2. Что характеризует ошибка квантования, перечислите причины ее возникновения и объясните ее свойства?
3. Что такое динамический диапазон сигнала, как обеспечить наиболее эффективную работу АЦП-ЦАП для детерминированных сигналов?
4. Поясните процедуру восстановления исходного аналогового сигнала по дискретам на приемной стороне системы передачи данных.
5. Как функционально связаны энтропия дискретного сигнала и разрядность АЦП при квантовании аналогового сигнала?

Список использованных источников

1. Емельянов, Г. А., Шварцман В. О. Передача дискретной информации: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2012. — 943 с.

Лабораторная работа 2

Исследование амплитудной модуляции и влияния аддитивного шума на сигнал в канале передачи данных

2.1. Цели работы

Научиться и приобрести практический опыт использования и исследования сигналов с амплитудной модуляцией. Научиться получать амплитудно-модулированные сигналы различной формы и анализировать их параметры в каналах передачи данных. Исследовать влияние шума на ошибки и получить характеристики амплитудных и частотных зависимостей ошибки информационного сигнала различной формы, полученного приемником канала передачи данных и проанализировать полученные результаты, зависимости и характеристики.

2.2. Теоретические сведения

2.2.1. Амплитудная модуляция сигналов

Исходные источники информации в каналах передачи данных чаще всего представляются в виде документов, изображений или первичных сигналов — речи, звукового вещания, видео — синхронизированная по кадровой развертка сигналов яркости и цветности в соответствии с исходным поэлементным разложением (разрешением ГОРИЗОНТАЛЬ X ВЕРТИКАЛЬ) динамической картинкой, совмещенная синхронно с каналами звукового сопровождения. Для передачи данных в канале обычно используются либо предварительно подготовленные двоичные файлы, либо получаемые в ходе текущих преобразований дискретные или двоичные сигналы. Для любых видов источников информации, будь-то файлы или первичные сигналы в процессе передачи данных в канале используется процедура модуляции.

Модуляцией называется процесс изменения текущего значения одного или нескольких физических параметров несущего (или поднесущего) сигнала в соответствии с изменением параметра (-ов) передаваемого информационного сигнала. Модель несущего (обычно более высокочастотного) сигнала в общем виде может быть представлена как функция:

$$u(t) = f(t, a_1, a_2, \dots, a_m),$$

где a_1, a_2, \dots, a_m — параметры информационного сигнала, в соответствии с которыми изменяются значения параметров несущего сигнала $u(t)$.

В качестве несущего сигнала наибольшее применение находит сигнал гармонического колебания

$$u(t) = U \cos(\omega t + \phi) = U \cos(2\pi f t + \phi),$$

у которого три свободных параметра U - амплитуда, f - частота или ϕ - фаза могут изменять свое значение. В зависимости от этого и различают *виды модуляции*.

Амплитудная модуляция (АМ) предполагает изменения в соответствии с информационным сигналом только амплитуды несущего колебания $U(t)$, оставляя неизменными f - частоту и ϕ - фазу. Значит АМ-сигнал можно записать в виде:

$$u_{AM}(t) = U(t)\cos(\omega_0 t + \phi_0) = U\cos(2\pi f_0 t + \phi_0).$$

Эта формула определяет АМ-сигнал как произведение амплитуды огибающей $U(t)$ и гармонического высокочастотного заполнения $\cos(2\pi f_0 t + \phi_0)$. Применение амплитудной модуляции устанавливает зависимость амплитуды огибающей $U(t)$ от информационного сигнала $x(t)$ согласно формулы

$$u(t) = U_m(1 + M * x(t)),$$

где U_m — амплитуда несущего колебания в отсутствие модуляции, M — коэффициент амплитудной модуляции. При $M = 0$ модуляции нет и передается только сигнал несущей частоты. При $M = 1$ производится глубокая модуляция, в результате которой, при максимуме сигнала амплитуда несущей увеличивается в 2 раза, что приводит к работе передатчика на максимальной мощности, а при минимуме сигнала амплитуда несущей падает практически до нуля. (Реальные АМ-передатчики используют $M \approx 0.3$).

Простой однотоновый амплитудно-модулированный сигнал получаем, модулируя несущую гармоническим сигналом с частотой F_x :

$$u_{AM}(t) = U_m(1 + M\cos(2\pi F_x t + \Phi_x))\cos(2\pi f_0 t + \phi_0).$$

Приводим выражение к сумме, запишем:

$$u_{AM}(t) = U_m\cos(2\pi f_0 t + \phi_0) + \frac{U_m * M}{2}\cos(2\pi(f_0 + F_x)t + \phi_0 + \Phi_x) + \frac{U_m * M}{2}\cos(2\pi(f_0 - F_x)t + \phi_0 - \Phi_x).$$

Анализируя полученное выражение можно сказать, что в спектр однотонового АМ-сигнала составляют три частоты:

- $2\pi f_0$ - несущая частота,
- $2\pi(f_0 + F_x)$ - верхняя боковая частота,
- $2\pi(f_0 - F_x)$ - нижняя боковая частота.

В спектре частоты боковых колебаний расположены симметрично относительно несущей $2\pi f_0$ и их амплитуды равны. Простые рассуждения показывают, что средняя мощность однотонового АМ-сигнала равна сумме средних мощностей несущего и боковых колебаний:

$$P_{AM} = P_{f_0} + (P_{f_0+F_x} + P_{f_0-F_x}) = \frac{U_m^2}{2} + \frac{U_m^2 M^2}{4},$$

и отсюда

$$\frac{(P_{f_0+F_x} + P_{f_0-F_x})}{P_{f_0}} = \frac{M^2}{2}.$$

Отсюда можно сделать вывод, что даже при $M = 1$ суммарная доля мощности боковых колебаний составит 50% от мощности несущего сигнала, а при $M = 0.3$ — всего лишь 4,5%. Поскольку, при амплитудной модуляции, вся передаваемая информация заключена в боковых колебаниях, использование мощности передатчика получается неэффективно.

Для реальных информационных сигналов $x(t)$ спектр имеет более сложную структуру составляющих гармонических колебаний, которые представляются в виде суммы

$$x(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \cos(2\pi F_l t + \Phi_l), \quad F_l < F_{l+1}.$$

Далее представляем $u_{AM}(t)$

$$u_{AM}(t) = U_m \left(1 + \sum_{l=1}^L M \alpha_l \cos(2\pi F_l t + \Phi_l) \right) \cos(2\pi f_0 t + \phi_0).$$

Вводим совокупность парциальных (частичных) коэффициентов модуляции для составляющих:

$$M_l = M \alpha_l,$$

затем запишем выражение для составного спектрального АМ-сигнала, представляющего реальный информационный сигнал в виде обобщенной формулы:

$$u_{AM}(t) = U_m \left(1 + \sum_{l=1}^L M_l \cos(2\pi F_l t + \Phi_l) \right) \cos(2\pi f_0 t + \phi_0).$$

Спектральное представление проведем аналогично одно тональному АМ-сигналу:

$$u_{AM}(t) = U_m \cos(2\pi f_0 t + \phi_0) + \sum_{l=1}^L \frac{U_m M_l}{2} \cos(2\pi(f_0 + F_l)t + \phi_0 + \Phi_l) +$$

$$+ \sum_{l=1}^L \frac{U_m M_l}{2} \cos(2\pi(f_o - F_l)t + \phi_0 - \Phi_l).$$

В спектре многотонального АМ-сигнала помимо несущего колебания, содержатся группы верхних и нижних боковых колебаний. Спектр верхних боковых колебаний является копией спектра модулирующего сигнала, сдвинутой в область высоких частот на величину $2\pi f_0$, а спектр нижних боковых колебаний представляет собой зеркальное отражение спектра верхних боковых колебаний относительно частоты $2\pi f_0$.

Из рассмотренного следует важный вывод: ширина спектра АМ-сигнала равна удвоенному значению наивысшей частоты в спектре модулирующего низкочастотного сигнала.

2.2.2. Аддитивные помехи в канале передачи данных

Аддитивные помехи в каналах связи различают по их происхождению, способу создания и вызываемому эффекту.

По происхождению различают:

- внутриканальные или внутриприемные помехи (обычно флуктуационные шумы в канале связи или в приемнике) и помехи природного происхождения;

- индустриальные помехи;
- взаимные помехи;
- преднамеренные помехи.

Преднамеренные помехи по способу создания бывают следующие:

- активные помехи в виде прямых излучений в канал связи;
- пассивные помехи, образующиеся в результате отражения сигналов от физических границ разделов сред распространения сигналов и прочих мешающих отражателей;

- комбинированные (активно-пассивные) помехи, образованные в результате простого наложения на пассивную помеху активной помехи.

По вызываемому эффекту (воздействию на полезный сигнал) различают:

- маскирующие помехи, то есть подавляющие полезный сигнал помехи (ухудшающие значение информационного параметра сигнала);
- имитирующие помехи, то есть создающие эффект полезного сигнала, но таковым не являющиеся.

Флуктуационные шумы

Шумы вызываются случайными движениями электронов в резисторах, электронных приборах и прочих устройствах и их возникновение или измене-

ние связаны обычно с изменением физических параметров или свойств окружающей среды. Типовой моделью такого флюктуационного шума является модель его возникновения в резисторе, находящемся в условиях термодинамического равновесия с внешней средой, то есть когда теплообмен с ней отсутствует. В радиодиапазоне эта модель приводит к формуле Найквиста, в оптическом диапазоне — к формуле Планка. Флюктуационные шумы в электронной аппаратуре рассчитывают, используя в качестве базовой модель шумов резистора, но всегда учитывают реальные условия работы оборудования.

Для типовых расчетов каналов и оборудования считается, что мгновенные значения флюктуационного шума, образуемые наложением большого числа примерно равноценных случайных независимых воздействий от разных источников шумов, распределены по нормальному закону.

Помехи природного происхождения

К помехам (шумам) природного происхождения относят шумовые излучения Солнца, отдельных участков поверхности Земли и другие шумовые излучения, приходящие из Галактики. Для модельных расчетов используется обычно аддитивная модель, аналогичная флюктуационным шумам, так как спектральную плотность мощности такого шума определяет в большей степени яркостная температура участка атмосферы и конструктивные особенности систем передачи (для некоторых систем этими расчетами пренебрегают).

Значительно большее влияние на системы передачи, как и системы связи вообще, оказывают импульсные атмосферные помехи, источником которых являются ближние грозы. Для оценки их влияния в каналах связи в основном используют непараметрические оценки и модели, опирающиеся на такие методы оценок. В данной лабораторной работе этот вид помехи не рассматривается.

2.2.3. Модель канала для проведения исследований

Для проведения исследований и получения результатов в ходе проведения лабораторной работы рекомендуется использовать заранее подготовленную программную модель, структурная схема которой приведена на рис. 2.1.

Программная модель состоит из блоков генераторов исходных сигналов, задающих форму информационному сигналу и сигналу помехи в соответствии с заданными входными параметрами. Блоки формирователей информационного сигнала и перекрестной помехи в соответствии с выбранными формами сигналов, шагом квантования, уровнем помехи относительно информационного сигнала — коэффициент в диапазоне $[0, 0.01, \dots, 1]$ выдают информационный и сигнал помехи на своих выходах. Опорным или базовым сигналом всей модели является информационный сигнал A , реализация кото-

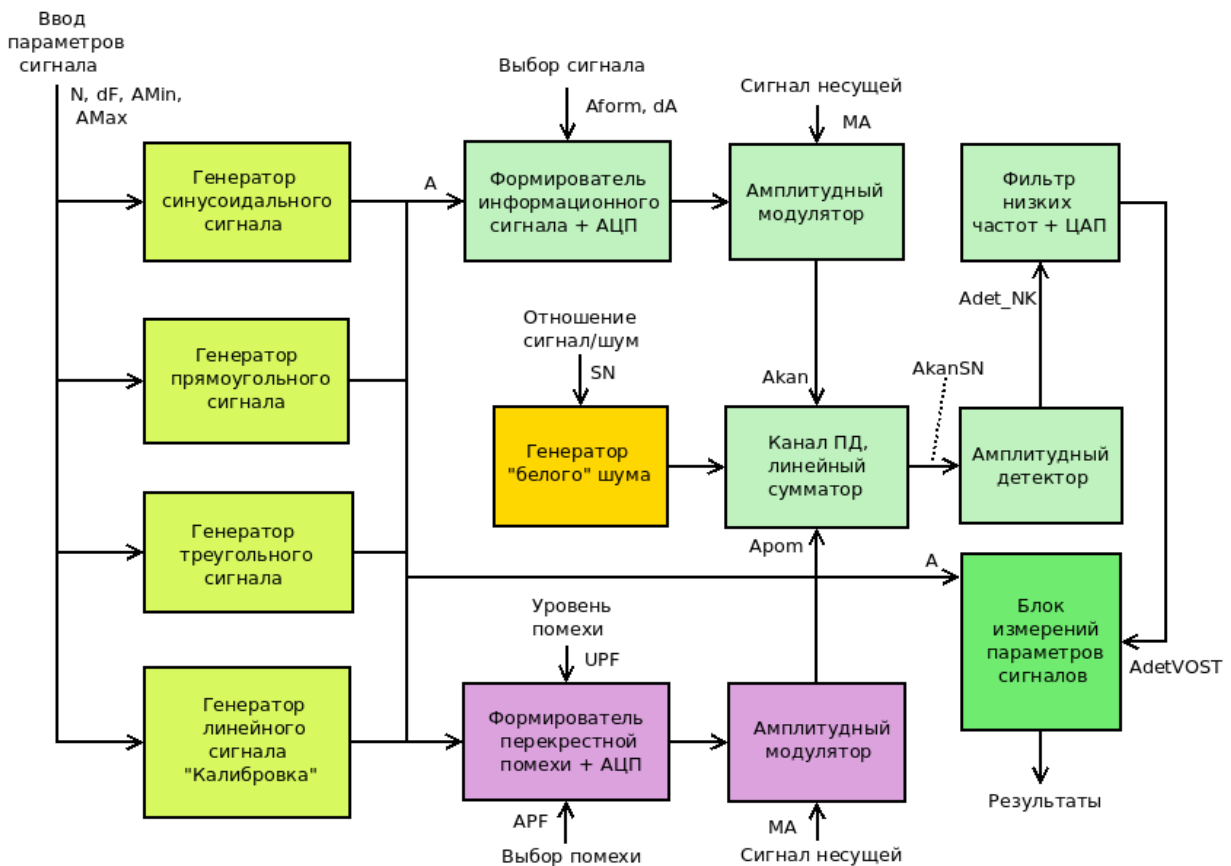


Рис. 2.1. Структурная схема программной модели

рого определяется количеством отсчетов и частотой дискретизации. В соответствии с частотой дискретизации по теореме Котельникова определяются границы частотных диапазонов формируемых сигналов.

Динамический диапазон исходного сигнала, определяемый максимальным и минимальным значением сигнала A , задает общий динамический диапазон аналого-цифровому (АЦП) и цифроаналоговому (ЦАП) преобразованию в соответствии с заданным порогом, автоматически рассчитывая разрядность АЦП-ЦАП. Он же формирует и задает по назначению блокам сигнальные уровни автоматической регулировки усиления (АРУ) на всей модели.

Сигнал несущей рассчитывается в соответствии с частотой дискретизации информационного сигнала A , увеличенной в целое число раз, и подается на амплитудный модулятор. Интерполированный под частоту несущей информационный сигнал в соответствии с заданным коэффициентом модуляции определяет форму и уровень АМ-сигнала, подаваемого в канал передачи данных.

Канал сформирован как линейный сумматор, с возможностью устанавливать влияние на сигнал аддитивного "белого" шума, определяя его уровень отношением сигнал/шум в целое число раз. Модель позволяет исследовать влияние на сигнал перекрестной помехи как аддитивной, с регулируемым от-

носителем информационного сигнала уровнем. Частота помехового сигнала не изменяется и всегда ниже, чем частота информационного.

Амплитудный детектор организован и работает в соответствии со схемой балансного амплитудного детектора (обе полуволны положительная и отрицательная без отсечки по уровню). Там же происходит децимация выпрямленного сигнала несущей до первичной частоты дискретизации исходного информационного сигнала A . Затем производится фильтрация информационного сигнала фильтром низких частот (примерно 30 порядка с амплитудно-частотной характеристикой в соответствии с фильтром Чебышева), и восстановление сигнала путем ЦАП с приведением уровней в соответствие с динамическим диапазоном исходного сигнала.

Восстановленный сигнал передается в блок измерения параметров для сравнения и оценки с исходным сигналом. Управление частотой исходного сигнала в цикле позволяет получать частотные зависимости по нескольким точкам для периодических сигналов.

Блок сохранения результатов позволяет по желанию пользователя выполнить запись результатов в файлы форматов TXT и PDF.

Наименование векторных массивов сигналов в опорных характеристиках, отмеченные на структурной схеме программной модели, позволят посмотреть графики и значения в области переменных после окончания вычислений в системе Octave и сохранить их в ручном режиме при необходимости.

2.3. Варианты для выполнения задания

2.3.1. Задание лабораторной работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо для 4-х различных типов информационных сигналов:

- синусоидального периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- прямоугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- треугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- линейно нарастающего сигнала с заданными по варианту параметрами,

модулирующих несущий периодический гармонический сигнал по амплитуде, исследовать:

1. процесс формирования амплитудно-модулированного сигнала для всех 4-х типов информационных сигналов в отсутствии "белого" шума и перекрестной помехи с коэффициентом модуляции $MA = 1$, получить временные диа-

граммы процесса амплитудной модуляции, получить графики зависимости ошибки восстановления сигнала на приемном конце системы передачи от частоты сигнала и проанализировать полученные результаты для разных форм,

2. для каждого из 4-х типов информационного сигнала получить графики зависимости ошибки восстановления амплитудно-модулированного сигнала при разных коэффициентах модуляции [0.8, 0.5, 0.3] от влияния "белого" шума в канале передачи данных согласно вектору отношения сигнал/шум со значениями [2000, 1000, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 4, 2, 1, 0.5, 0.1, 0.05] для получаемых в ходе моделирования частот периодических сигналов (для каждого типа по 7x3 графиков) и линейно нарастающего сигнала (1x3 график),

3. представить полученные результаты в виде двумерных графиков ошибки, как функции от отношения сигнал/шум для каждого типа, коэффициента модуляции и каждой частоты сигнала,

4. допускается представление графиков в трехмерном виде — по Z - значение ошибки, по X - значение отношения сигнал/шум, по Y - значение коэффициента модуляции (7 графиков для каждого из 3 типов периодических сигналов и 1 для линейного сигнала) (НЕ ЗАБЫВАЕМ СОХРАНЯТЬ частотные зависимости значения ошибки для типа сигнала с введенными параметрами коэффициента модуляции и шума - они будут переписываться каждый раз в одном и том же файле с разными значениями для разных частот разных типов сигналов),

5. проанализировать полученные результаты для разных форм, объяснить явления роста и спада ошибок для разных частот, коэффициентов модуляции и разных форм АМ-сигнала.

Для каждого варианта необходимо выполнить задание и проанализировать полученные характеристики в ходе исследований амплитудно-модулированных сигналов разной формы $x(t)$, представляющих собой линейный или периодический процесс с заданными параметрами:

- амплитудой сигнала в интервале $[A_{Min}; A_{Max}]$;
- реализацией сигнальной выборки в N -отсчетов;
- частотой дискретизации сигнала dF ;
- заданным уровнем квантования амплитуды сигнала dA .

Внимание! Перекрестную помеху НЕ ВКЛЮЧАТЬ!

2.3.2. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 2.1

Данные аналогового исходного сигнала и его цифровой реализации.

№ варианта	N	A_{Min}	A_{Max}	dA	dF
1	3000	1.8	60	0.2	1000
2	2400	-8	26	0.15	4000
3	2500	-24	16	0.25	5000
4	3500	1	126	0.5	400
5	4000	2.3	76	0.45	2000
6	1500	-118	126	0.35	3000
7	4500	37	129	0.23	4000
8	3500	1.6	16	0.05	1000
9	1000	-2.6	26	0.15	2000
10	2000	3.1	46	0.25	5000
11	4500	-0.8	9.6	0.02	4000
12	2500	-0.8	26	0.15	1000
13	2800	4.1	216	0.35	4000
14	3600	-234	250	0.5	2000
15	6000	0.5	26	0.15	600
16	3000	-3.8	33	0.26	3000
17	4000	-8.5	26	0.18	5000
18	5000	22	56	0.34	2000
19	2800	3.7	26	0.12	3000
20	4400	-28	5	0.15	4000
21	5600	-18	-2.3	0.05	1000
22	2200	-0.8	2.6	0.01	1000
23	2600	-81	-26	0.25	3000
24	2400	4.8	46	0.42	2000
25	2500	-30	30	0.15	4000
26	2600	-8	96	0.25	5000
27	3400	2	41	0.12	4000
28	3500	-2.8	16	0.1	2000
29	4200	0.75	12	0.1	1000
30	4400	-0.5	14	0.05	4000

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 программу моделирования и исследования АМ-сигналов *progLAB – 2 – АМ – TSiUPD.m*.
4. Запускать программу на исполнение, вводить исходные данные своего варианта и данные согласно задания работы, исследовать и получать заданные сигналы требуемых реализаций, сохранять файлы результатов реализаций

и их характеристики и требуемые параметры по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но помним, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (при изменении частоты сигнала формируются новые файлы). Параметрические результаты частично сохраняются в текстовом-txt, а графики в pdf-формате.

5. Произвести все необходимые расчеты в соответствии с заданием и нанести значения на графики. Записать и представить 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 ФИО учащегося. 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 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 ФИО учащегося.

2.5. Контрольные вопросы

1. Что такое амплитудная модуляция сигнала, укажите ее особенности и корректный порядок действий при реализации?

2. Что характеризует коэффициент амплитудной модуляции, укажите его особенности?

3. Что такое динамический диапазон АМ-сигнала, как обеспечить наиболее эффективную работу передающего канального устройства?

4. Поясните процедуру восстановления исходного аналогового сигнала по дискретам на приемной стороне системы передачи данных.

5. Чем функционально связаны амплитуда несущего сигнала и амплитуда информационного сигнала при амплитудной модуляции?

Список использованных источников

1. Емельянов, Г. А., Шварцман В. О. Передача дискретной информации: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.

2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2012. — 943 с.

Лабораторная работа 3

Исследование влияния перекрестной помехи на сигнал с амплитудной модуляцией в канале передачи данных

3.1. Цели работы

Научиться и приобрести практический опыт использования и исследования сигналов с амплитудной модуляцией. Научиться получать амплитудно-модулированные сигналы различной формы и анализировать их параметры в каналах передачи данных. Исследовать влияние помех на ошибки с получением характеристик амплитудных и частотных зависимостей ошибок информационного сигнала различной формы при воздействии на АМ-сигнал аддитивной перекрестной помехи в канале передачи данных и проанализировать полученные результаты, зависимости и характеристики.

3.2. Теоретические сведения

Данная работа является продолжением предыдущей лабораторной работы по исследованию сигналов с амплитудной модуляцией (АМ), но исследует воздействие на АМ-сигнал в канале передачи данных перекрестных помех. Краткие теоретические сведения по амплитудной модуляции, шумам, составу программной модели изложены в предыдущей лабораторной работе.

3.2.1. Перекрестные искажения полезного сигнала

Перекрестные искажения полезного сигнала являются результатом воздействия в канале передачи данных какой-либо внешней сосредоточенной помехи. Это проявляется в виде блокирований и искажений полезного сигнала под воздействием достаточно мощных взаимных или индустриальных помех на каскады приемного устройства, частота которых совпадает с частотами основного и неосновного каналов приема в системе передачи данных. Под блокированием понимается подавление полезного сигнала чаще всего в первых каскадах приемного устройства. В случае искажений подразумеваются искажения именно модуляции полезного сигнала под воздействием помехи.

Перекрестные помехи в канале передачи данных являются одними из основных видов помех влияющих на работоспособность и пропускную способность каналов передачи данных при использовании различных технологий систем передачи. Например, встречное включение ADSL-модема через межшкафную передачу резко снижает пропускную способность каналов для всех абонентов в этом кабеле, использующих эту технологию для передачи данных, влияние соседних, зеркальных и побочных каналов в радиотехнологиях, широкополосные искровые помехи от электротранспорта и прочие помехи проникающие в канал передачи в рабочем диапазоне частот.

В программной модели лабораторной работы реализован способ простого аддитивного воздействия мешающего сигнала по выбору из тех же форм, что предполагаются к исследованию и на той же несущей частоте. Модулирующая частота мешающего сигнала выбрана намеренно ниже самой низкой информационной частоты, для того, чтобы мешающий сигнал был четко различим на временных диаграммах.

Амплитуда сигнала промодулированной помехи с амплитудной модуляцией устанавливается в долях от амплитуды основного сигнала коэффициентом уровня помехи. Форма мешающего сигнала выбирается аналогично форме основного сигнала целочисленным коэффициентом формы.

3.3. Варианты для выполнения задания

3.3.1. Задание лабораторной работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо для 4-х различных типов информационных сигналов:

- синусоидального периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- прямоугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- треугольного периодического сигнала с заданными по варианту параметрами,
- линейно нарастающего сигнала с заданными по варианту параметрами,

модулирующих несущий периодический гармонический сигнал по амплитуде, исследовать:

1. процесс формирования амплитудно-модулированного сигнала для всех 4-х типов информационных сигналов при воздействии "белого" шума и перекрестной помехи совместно при коэффициенте модуляции $MA = 1$, отношении сигнал/шум $SN = 1$ и уровне перекрестной помехи $UPF = 0.5$, получить временные диаграммы процесса амплитудной модуляции, получить графики зависимости ошибки восстановления сигнала на приемном конце системы передачи от частоты сигнала и проанализировать полученные результаты для каждой из 4-х разных форм сигнала и помехи,

2. для информационного сигнала прямоугольной формы получить графики зависимости ошибки восстановления амплитудно-модулированного сигнала при разных коэффициентах модуляции [0.8, 0.5, 0.3] от влияния перекрестной помехи при отсутствии "белого" шума в канале передачи данных согласно вектору уровней помехи [1, 0.75, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05] для получаемых в ходе моделирования частот периодических сигналов (для каждого типа помехи 6х3 графиков) и линейно нарастающего сигнала (1х3 график),

3. представить полученные результаты в виде двумерных графиков ошибки, как функции от отношения уровня помехи для помех каждого из 4-х типов, коэффициента модуляции и каждой частоты сигнала,

4. допускается представление графиков в трехмерном виде — по Z - значение ошибки, по X - значение уровня помехи, по Y - значение коэффициента модуляции (3 графика для каждой из 3 форм мешающего сигналов и 1 для линейного сигнала) (НЕ ЗАБЫВАЕМ СОХРАНЯТЬ частотные зависимости значения ошибки для типа сигнала с введенными параметрами коэффициента модуляции и помехи - они будут переписываться каждый раз в одном и том же файле с разными значениями для разных частот и разных типов помехи),

5. проанализировать полученные результаты для разных форм, объяснить явления роста и спада ошибок для разных частот, коэффициентов модуляции и разных форм АМ-сигнала.

Для каждого варианта необходимо вводить правильные входные данные, выполнить задание и проанализировать полученные характеристики в ходе исследований амплитудно-модулированных сигналов разной формы $x(t)$, представляющих собой линейный или периодический процесс с заданными параметрами:

- амплитудой сигнала в интервале $[A_{Min}; A_{Max}]$;
- реализацией сигнальной выборки в N -отсчетов;
- частотой дискретизации сигнала dF ;
- заданным уровнем квантования амплитуды сигнала dA .

Внимание!

"Белый" шум ВКЛЮЧАТЬ в канал только при выполнении ПЕРВОГО ПУНКТА задания!

3.3.2. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 3.1

Данные аналогового исходного сигнала и его цифровой реализации.

№ варианта	N	A_{Min}	A_{Max}	dA	dF
1	3000	1.8	60	0.2	1000
2	2400	-8	26	0.15	4000
3	2500	-24	16	0.25	5000
4	3500	1	126	0.5	400
5	4000	2.3	76	0.45	2000
6	1500	-118	126	0.35	3000
7	4500	37	129	0.23	4000
8	3500	1.6	16	0.05	1000
9	1000	-2.6	26	0.15	2000

Данные аналогового исходного сигнала и его цифровой реализации.

№ варианта	N	A_{Min}	A_{Max}	dA	dF
10	2000	3.1	46	0.25	5000
11	4500	-0.8	9.6	0.02	4000
12	2500	-0.8	26	0.15	1000
13	2800	4.1	216	0.35	4000
14	3600	-234	250	0.5	2000
15	6000	0.5	26	0.15	600
16	3000	-3.8	33	0.26	3000
17	4000	-8.5	26	0.18	5000
18	5000	22	56	0.34	2000
19	2800	3.7	26	0.12	3000
20	4400	-28	5	0.15	4000
21	5600	-18	-2.3	0.05	1000
22	2200	-0.8	2.6	0.01	1000
23	2600	-81	-26	0.25	3000
24	2400	4.8	46	0.42	2000
25	2500	-30	30	0.15	4000
26	2600	-8	96	0.25	5000
27	3400	2	41	0.12	4000
28	3500	-2.8	16	0.1	2000
29	4200	0.75	12	0.1	1000
30	4400	-0.5	14	0.05	4000

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 программу моделирования и исследования АМ-сигналов *progLAB – 2 – АМ – TSiUPD.m*.
4. Запускать программу на исполнение, вводить исходные данные своего варианта и данные согласно задания работы, исследовать и получать заданные сигналы требуемых реализаций, сохранять файлы результатов реализаций и их характеристики и требуемые параметры по каждому из сигналов. Можно сохранять все реализации, но помним, что файлы переписываются каждый раз заново по результатам текущей сигнальной реализации (при изменении частоты сигнала формируются новые файлы). Параметрические результаты частично сохраняются в текстовом-txt, а графики в pdf-формате.
5. Произвести все необходимые расчеты в соответствии с заданием и нанести значения на графики. Записать и представить 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 ФИО учащегося. 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 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 ФИО учащегося.

3.5. Контрольные вопросы

1. Что такое шумы и помехи в канале передачи данных, укажите их особенности и влияние на полезный сигнал?

2. Что приводит к перекрестным искажениям исходного амплитудно-модулированного сигнала в канале передачи данных?

3. Что такое блокирование и искажения полезного сигнала?

4. Какие эффекты вызывают помехи воздействующие на полезный сигнал и к каким результатам они приводят?

5. Что такое флуктуационные шумы и помехи природного происхождения и как они воздействуют на сигнал в канале передачи данных?

Список использованных источников

1. Емельянов, Г. А., Шварцман В. О. Передача дискретной информации: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.

2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2012. — 943 с.

Лабораторная работа 4

Моделирование и исследование характеристик сигналов с многоуровневой амплитудной манипуляцией

4.1. 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, ошибки передачи для сигналов с М-ичной амплитудной манипуляцией.

4.2. Теоретические сведения

4.2.1. 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 может позволить 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, известные как амплитудная манипуляция (ASK-amplitude shift keying), фазовая манипуляция (PSK-phase shift keying) и 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, многоамплитудная манипуляция со сдвигом и комбинированная многофазная многоамплитудная манипуляция сигнала.

4.2.2. 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 (PAM - 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 (2ASK).

Форматы М-ASK или PAM более высокого порядка представляют собой схему линейной модуляции в которой заданная и сформированная последовательность ξ 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 ξ_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 скалярных кратных одной формы 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 PAM 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 $M - 1$, расположенных в средних точках соседних сигнальных точек. Результат этих сравнений дает решение о минимальном расстоянии (и, следовательно, о максимальной вероятности) принятого символа ξ_k .

4.2.3. Вероятность ошибки М-ASK или PAM

Вероятность символьной ошибки М-ASK или PAM при когерентной демодуляции можно корректно оценить, взяв за основу вероятность правильного решения

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

где q_1 - вероятность правильного решения для двух соседних точек созвездия, а q_2 - такая же вероятность для $(M - 2)$ внутренних точек. Определив

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

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

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

и, наконец,

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

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,

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

Асимптотическая эффективность мощности - это множитель, умножающий отношение сигнал/шум $\frac{E_s}{N_0}$ как аргумент erfc ($\operatorname{erfc}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty e^{-t^2} dt$, дополнительная функция ошибки) в точке. Для этого вида модуляции по асимптотической эффективности мощности получаем

$$\gamma_{\text{PAM, MASK}} = \frac{3 \log_2 M}{M^2 - 1},$$

который уменьшается при увеличении M .

При M-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 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 .

4.2.4. Спектр мощности и эффективность полосы пропускания

Спектральная плотность мощности сигнала M-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 ∞ , 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 равна

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

Она увеличивается с увеличением M . В заключение, можно сказать, что для M-ASK или PAM увеличение M улучшает эффективность полосы пропускания, но снижает энергоэффективность.

4.3. Варианты для выполнения задания

4.3.1. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в 2 независимых этапа.

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

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

Задание первого этапа:

- получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту;
- для каждого сигнального созвездия в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить для следующих точек:
 - граничные точки в соответствии с пределами канального шума;
 - граничная точка 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;

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 для заданного пределами канального шума;
13. оценить и записать количество появляющихся BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований;
14. выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

Задание второго этапа:

- используя полученные параметры сигнального созвездия и пределы канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов;
- подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов;
- выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

4.3.2. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 4.1

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№ варианта	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
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

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 $M - PAM - dat - Lab4.m$ — 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 (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, всегда помним, 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 ФИО учащегося. 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 ФИО учащегося.

4.5. Контрольные вопросы

1. Что такое сигнальное созвездие?
2. Что характеризуют ошибки в канале, перечислите и объясните причины их возникновения?
3. Что такое динамический диапазон сигнала, как обеспечить наиболее эффективную работу канала для сигнальных созвездий?
4. Поясните процедуру восстановления исходных данных на приемной стороне канала системы передачи данных.
5. Как функционально связаны энтропия информационного сигнала и разрядность АЦП-ЦАП при восстановлении сигнала?

Список использованных источников

1. Емельянов, Г. А., Шварцман В. О. Передача дискретной информации: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2012. — 943 с.

Лабораторная работа 5

Моделирование и исследование характеристик сигналов с многофазной манипуляцией

5.1. Цели работы

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

5.2. Теоретические сведения

5.2.1. 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 K -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 Φ . 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:

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

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

5.2.2. 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

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

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

5.2.3. 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

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

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 ∞ , 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 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 M-PSK модуляции пропорциональна $W = \frac{1}{T}$ и тогда ее эффективность полосы пропускания будет

$$\left(\frac{R_s}{W} \right)_{PSK} = \log_2 M.$$

Она увеличивается с увеличением M . В заключение, можно сказать, что для M-PSK (как и для PAM) увеличение M улучшает эффективность полосы пропускания и снижает энергоэффективность.

5.3. Варианты для выполнения задания

5.3.1. Задание лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в 2 независимых этапа.

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

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

Задание первого этапа:

- получить от преподавателя параметры сигнального созвездия, пределы канального шума и параметры моделирования или использовать задание по своему варианту;

- для каждого сигнального созвездия в соответствии с полученным набором параметров для исследований представить для следующих точек:

- граничные точки в соответствии с пределами канального шума;
- граничная точка 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;

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 для заданного пределами канального шума;
13. оценить и записать количество появляющихся BER на границах появления ошибок для второго этапа исследований;
14. выполнить анализ полученных результатов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

Задание второго этапа:

- используя полученные параметры сигнального созвездия и пределы канального шума, произвести по смоделированному в соответствии с заданием каналу передачи данных передачу реальных файлов;
- подтвердить и уточнить полученные на первом этапе параметры и характеристики канала передачи данных в указанных характерных точках при реальной передаче файлов;
- выполнить анализ полученных результатов передачи файлов и представить выводы для характерных точек и сигнальных созвездий в письменном виде.

5.3.2. Варианты заданий лабораторной работы

Вариант задания выбирается по номеру студента в журнале группы.

Таблица 5.1

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№ варианта	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
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

Данные сигнального созвездия и канального шума.

№ варианта	M	N_{faza}	P_{min}	P_{max}	S_{pwr}
29	2,8,128	$-\pi/6$	-10	30	-2,5
30	4,16,32	$\pi/6$	-6	32	-1,5

5.4. 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, всегда помним, 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 ФИО учащегося. 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!** До-

пускается 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 ФИО учащегося.

5.5. Контрольные вопросы

1. Что такое сигнальное созвездие со сферической упаковкой сигнала?
2. Что характеризуют ошибки в канале, 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. Поясните процедуру 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 ПД при восстановлении сигнала?

Список использованных источников

1. Емельянов, Г. А., Шварцман В. О. Передача дискретной информации: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2012. — 943 с.

Владимиров Сергей Александрович

ТЕОРИЯ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Лабораторный практикум

Редактор *X. X. XXXXXXXXXXXX*

План изданий 20XX г., п. XX

Подписано к печати *XX.XX.XXXXX*
Объем *X,0* печ. л. Тираж 10 экз. Заказ *XXXX*

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