

Общие положения

В данное пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория систем связи» включены описания четырёх лабораторных работ: «Исследование модели АМ канала связи», «Исследование модели ЧМ канала связи», «Исследование модели ФМ канала связи», «Исследование модели ОФМ канала связи».

Закреплению материала способствует проведение моделирования изучаемых каналов связи на ЭВМ.

Все лабораторные работы проводятся по единому плану:

- выполнение домашнего задания и подготовка отчёта;
- получение допуска к выполнению лабораторной работы;
- выполнение экспериментальной части лабораторной работы;
- оформление отчёта;
- защита работы.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- название и цель работы;
- краткие теоретические сведения, основные понятия и их взаимосвязь;
- результат выполнения домашнего задания и экспериментальной части работы (схемы, таблицы и графики с необходимыми пояснениями);
- выводы по работе.

Описание структуры лабораторного комплекса и его подпрограмм

Пакет программ выполнен по модульному принципу и состоит из управляющей программы и набора программ – модулей, которые вызываются управляющей программой в зависимости от поступающего задания. Структурная схема иерархии моделирующей программы и блок-схема управляющей программы показаны на рисунках в лабораторных работах. Задания и необходимые исходные данные вводятся в ЭВМ в диалоговом режиме. Принцип обмена информацией с ЭВМ – «вопрос-ответ». Выводимая на экран дисплея информация по желанию может дублироваться на устройстве печати. Вводимые в ЭВМ задания состоят из указания исследуемого объекта и необходимых исходных данных, количество которых зависит от выбранного объекта. Объектами исследования могут быть: источник дискретных сообщений; модулятор; линия связи; демодулятор.

Для каждого из этих объектов разработана подпрограмма, моделирующая их работу. Причём подпрограммы с большим номером вызываются для обеспечения своей работы программой с меньшим номером. Кроме указанных подпрограмм, моделирующих объекты исследования, в пакет входят сервисные подпрограммы, служащие для организации диалога при вводе исходной информации, для статистической обработки результатов исследования объектов и их вывода в виде чисел, графиков-осциллограмм. Ниже даётся описание программ, моделирующих СПДИ, и сервисных подпрограмм.

Подпрограмма «Источник дискретных сообщений»

Подпрограмма «Источник дискретных сообщений» вырабатывает двоичную последовательность элементарных символов, которая может быть трёх типов:

- 1) непрерывная серия из одних нулей (0000...) или единиц (1111...);
- 2) серия из чередующихся нулей и единиц (101010...);
- 3) псевдослучайная серия нулей и единиц.

Тип и длина последовательности задаются в исходных данных, которые запрашиваются на экране дисплея в виде соответствующих вопросов. Псевдослучайная серия нулей и единиц генерируется по рекуррентному алгоритму на основе циклического кода с образующим полиномом $P(x) = x^5 + x^2 + 1$. Рекуррентная формула имеет вид:

$$\lambda_k = \lambda_{k-5} \oplus \lambda_{k-3},$$

где λ_k – элементы двоичной псевдослучайной последовательности;

\oplus – операция сложения двоичных чисел по модулю два, которая находится по правилу: $1+1=0+0=0$; $1+0=0+1=1$.

В результате работы подпрограммы источника дискретных сообщений (ИС) на экран выдаётся сформированная последовательность двоичных символов и соответствующий ей график-осциллограмма первичного видеосигнала.

Подпрограмма «Модулятор»

Подпрограмма «Модулятор» имитирует работу аналоговых модуляторов АМ, ЧМ и ФМ сигналов. В результате работы подпрограммы на экране дисплея выдаются графики-осциллограммы дискретных сообщений и соответствующего им сигнала-переносчика с АМ, ЧМ и ФМ. На экран выдаётся также значение коэффициента корреляции сигналов.

Подпрограмма «Линия связи»

Подпрограмма «Линия связи» моделирует линию связи с аддитивными помехами. В качестве помехи может быть выбрана помеха с гауссовским или лапласовским законами распределения с независимыми значениями. Подпрограмма линии связи по окончании работы выдаёт на экран дисплея либо график чистого сигнала-переносчика, либо график реализации аддитивной смеси сигнала и помехи. На экран дисплея также выдаётся гистограмма помехи. Подпрограмма позволяет исследовать степень влияния помехи на передаваемый по линии связи сигнал $S(t)$, а также по гистограмме оценить плотность распределения помехи $\omega_n(n)$.

Подпрограмма «Демодулятор»

Подпрограмма «Демодулятор» реализует алгоритм (9.1). Для обеспечения своей работы подпрограмма вызывает подпрограмму моделирования линий связи, в результате чего формируется массив реализации y_n , состоящий из N элементарных сигналов (символов). Данный массив обрабатывается в соответ-

ствии с алгоритмом (9.1). При этом подсчитывается количество ошибок путём сравнения значений, переданных от источника двоичных символов λ_k , со значениями принятых символов $\lambda_k^{\$}$, которые появляются на выходе решающего устройства. В процессе работы подпрограммы на экран выдаются значения о текущем количестве ошибок $N_{\text{ош}}$ и количестве переданных символов. По окончании своей работы подпрограмма запрашивает номер исследуемого символа. При задании данного номера производится вывод графиков чистого сигнала и смеси, соответствующих данному символу. Также на экран выводятся диаграммы, показывающие процесс накопления выходных эффектов алгоритма для данного символа в соответствии с формулой (9.1). Задавая различные законы распределения помех и их параметров, а также меняя вид исследуемого алгоритма (линейный корреляционный алгоритм, нелинейный корреляционный алгоритм), можно тем самым экспериментально исследовать помехоустойчивость алгоритмов (вероятность ошибок) и сравнить ее с теоретической по формулам при различных видах и параметрах модуляции, соотношении сигнал/помеха, виде помехи, количестве обрабатываемых выборок на элементарный сигнал и так далее. Экспериментальная оценка помехоустойчивости при этом производится по формуле:

$$P_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N},$$

где N – общее число переданных элементарных символов;

$N_{\text{ош}}$ – число ошибочно принятых символов.

Подпрограмма «График»

Данная подпрограмма имитирует работу обычного однолучевого и двухлучевого осциллографа и позволяет выводить в виде графиков отдельные реализации исследуемых дискретных процессов первичного сигнала сообщения, сигнала-переносчика, помехи, аддитивной смеси сигнала с помехой. При выполнении подпрограммы реализация исследуемого процесса выводится в автоматическом масштабе, при котором обеспечивается наиболее полное использование площади экрана дисплея. Расположение оси времени осциллограмм – горизонтальное.

Подпрограмма статистической обработки случайных реализаций дискретного процесса

Подпрограмма производит расчёт значений выборочного среднего и дисперсии массива дискретной реализации по формулам:

$$m_n = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k n_p;$$

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k n_p^2 - m_n^2,$$

где n_p –элементы массива;

k – объем массива.

Подпрограмма также строит гистограмму данного массива.

Гистограмма – это графическое изображение в виде ступенчатой кривой частности попадания элементов массива в равновеликие интервалы, которые покрывают в виде шкалы весь диапазон вариаций элементов массива. Чтобы гистограмма позволяла выявить закономерность оцениваемого ею закона распределения $\omega_n(n)$ случайной величины наилучшим образом, необходимо ширину интервала выбрать оптимальной:

$$\Delta p = \frac{n_{max} - n_{min}}{\log_2 k},$$

где n_{max} и n_{min} – максимальное и минимальное значения элемента массива выборок.

Построение гистограммы проводится следующим образом:

- 1) определяется максимальный и минимальный элементы массива методом перебора;
- 2) вычисляется оптимальный шаг интервала Δp ;
- 3) определяется количество интервалов, укладываемых в диапазон $n_{max} - n_{min}$;
- 4) подсчитывается методом перебора количество попаданий K_p элементов массива в каждый из интервалов;
- 5) строится график из прямоугольников, основаниями которых являются интервалы, а высоты пропорциональны или равны количеству попаданий K_p в данный интервал Δp . Обычно высоту прямоугольников нормируют по формуле $L_p = \frac{K_p}{K \Delta p}$ с тем, чтобы сумма всех площадей прямоугольников гистограммы равнялась 1.

При моделировании программа показывает на экране структурную схему канала связи, моделируемого в данный момент.

Технические требования

IBM – совместимый компьютер, монитор. Для работы программы необходим доступ к жёсткому диску и наличие на нем свободного места, определяемого в зависимости от объёма исследуемой выборки сигнала (24 байта на один отсчёт). При наличии на машине расширенной памяти и версии MSDOS не ниже 6.0 желательно включить в AUTOEXEC.BAT SMARTDRV.EXE.

Программа поддерживает мышь, но может управляться и при помощи клавиатуры. Для распечатки получаемых графиков необходим принтер. Загружать GRAPHICS.COM не требуется.

Программа может работать без русификаторов.

Для установки программы достаточно скопировать все поставляемые файлы в один каталог на жёстком диске.

Литература

Основная литература:

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник. – СПб.: Питер, 2003.*
2. Сергеев В.Г. Устройства приёма и обработки сигналов. Расчёт и проектирование: в 2 ч. – М.: МГТУ ГА, 2001. – Ч. 1, 2002. – Ч. 2.*
3. Сергеев В.Г. Оптимальный приём радиосигналов: текст лекций. – М.: МГТУ ГА, 1997.

Дополнительная литература:

4. Акимов В.А., Арипов М.Н. Передача дискретных сообщений в задачах и упражнениях: учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 1994.
5. Передача дискретных сообщений: учебник для вузов / под ред. В.П. Шувалова. – М.: Радио и связь, 1990.*
6. Штагер В.В. Цифровые системы связи, теория расчёт и оптимизация. – М.: Радио и связь, 1993.
7. Парамонов А.А., Куликов Г.В. Цифровые системы и узлы радиоприёмных устройств: учеб. пособие. – М.: МГИ РЭА, 1998.

* – имеется в наличии в библиотеке МГТУГА.

1. Краткие теоретические сведения

Система передачи дискретных сообщений является одной из важнейших составных частей автоматизированных систем сбора и обработки информации, автоматизированных систем управления и массового обслуживания.

В последнее время бурное развитие цифровой элементной базы, ряд её достоинств вызывают широкое использование в системах связи цифровых методов формирования и обработки сигналов в условиях различных помех.

Круг задач для математического моделирования на ЭВМ рассмотрим на примере структурной схемы радиосистемы связи (рис.1.1), предназначенной для передачи информационного процесса (И).

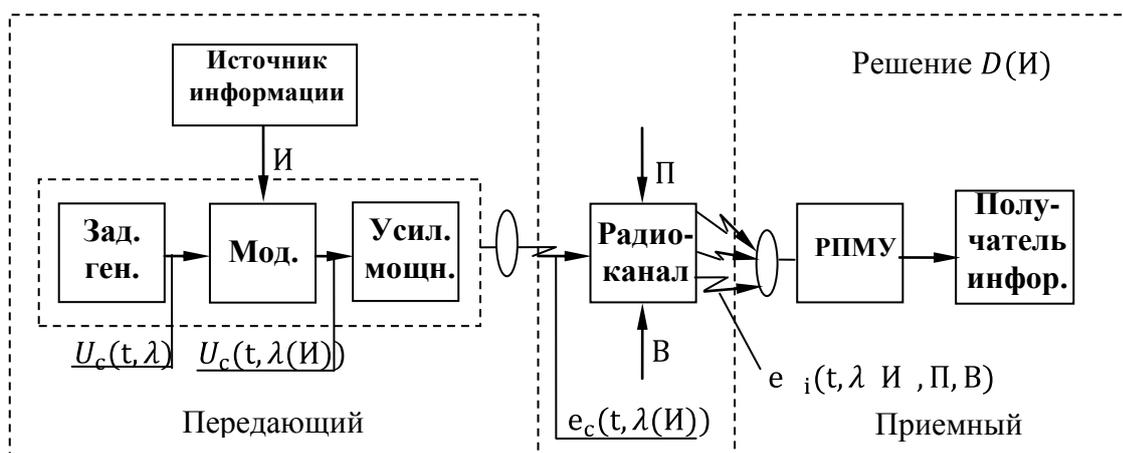


Рис.1.1. Структурная схема радиосистема связи

С помощью радиопередающего устройства (РПДУ) формируется информативный радиосигнал $u_c[t, \lambda(\text{И})]$, в котором полезная информация содержится в информационном (модулирующем) параметре $\lambda(\text{И})$.

Электромагнитное поле радиосигнала $e_c[t, \lambda(\text{И})]$, распространяясь по радиоканалу (РК), далее обрабатывается радиоприёмным устройством (РПМУ) и в виде некоторого решения поступает к потребителю информации.

Характерными особенностями радиосистемы связи являются:

1) разнообразие типов решения $D(\text{И})$, которые РПМУ формирует на выходе при обнаружении, различении радиосигналов, измерении их параметров, фильтрации (демодуляции) параметра радиосигнала и так далее;

2) многолучевость радиоканала (РК) и наличие в нем турбулентных возмущений (В) и помех (П) естественного и искусственного происхождения;

3) использование при приёме разнесённых в пространстве по частоте и времени антенно-фидерного устройства и так далее.

В соответствии с этим работа радиосистемы должна быть описана статистически, а входное воздействие РПМУ (смесь $u_x[t, \lambda \text{ И } , В, П]$) является в общем случае векторным и зависит от указанных факторов.

Комплекс лабораторных работ иллюстрирует возможности цифровых методов формирования и обработки сигналов.

2. Помехоустойчивость дискретных сигналов при оптимальном приёме

Основным (базовым) показателем качества цифровой системы передачи (канала связи) как при передаче дискретных, так и аналоговых сообщений является вероятность ошибочного приёма элементарных символов $P_{\text{ош}}$.

Вероятность $P_{\text{ош}}$ зависит от вида и модели цифровых сигналов, метода приема и энергетического отношения сигнала к шуму.

Рассмотрим методику расчёта $P_{\text{ош}}$ при оптимальном приеме элементарных дискретных сигналов различных моделей.

Пусть элементарное дискретное сообщение λ_i может принимать одно и только одно из a возможных дискретных значений (например: 0, 1, 2, ..., -1), соответствующих значениям цифр, используемой системы счисления.

Априорные вероятности этих сообщений соответственно обозначим $\omega(\lambda_0), \omega(\lambda_1), \dots, \omega(\lambda_{a-1})$.

Поскольку события $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{a-1}$ образуют полную группу несовместимых событий, то сумма их вероятностей равна единице, т.е.

$$\sum_{i=0}^{a-1} \omega \lambda_i = 1.$$

Каждому значению сообщения λ_i соответствует свой элементарный сигнал (символ) $\xi_c \lambda_i = \xi_{c_i}$. Поэтому априорные вероятности сигналов ξ_{c_i} и соответствующих сообщений λ_i равны $\omega(\xi_{c_i}) = \omega(\lambda_i)$.

В большинстве практических случаев можно считать, что все дискретные

сообщения равновероятны, т.е.

$$\omega(\xi_{c_i}) = \omega \lambda_i = \frac{1}{a} = const.$$

Предположим, что на вход приёмника поступает аддитивная смесь дискретного сигнала $\xi_c(\lambda_k, t, \beta_k)$ и белого гауссова шума $n(t)$ так, что наблюдаемая аддитивная реализация имеет вид:

$$y(t) = \xi_c(\lambda_k, t, \beta_k) + n(t),$$

где $\xi_c(\lambda_k, t, \beta_k) = \xi_{ck}(t, \beta_k) = \xi_{ck}$ — *k-ый* элементарный сигнал, являющийся функцией передаваемого сообщения λ_k , времени t и случайных неинформативных параметров сигнала β_k (частоты, фазы, времени).

При полностью известных сигналах $\beta_k = 0$. Можно показать, что в этом случае максимально полезная информация о передаваемом дискретном сообщении или сигнале заключена в апостериорном распределении вероятностей $\omega_Y(\xi_{c_j})$, вычисляемых для всего ансамбля дискретных сигналов.

Оптимальный приёмник дискретных сообщений, прежде всего, должен вычислить апостериорное распределение вероятностей для всех возможных дискретных сообщений λ_j (сигналов ξ_{c_j}) и на основании его анализа принять решение о передаваемом сообщении λ_k (сигналов ξ_{ck}). В соответствии со сказанным, оптимальный приёмник дискретных сигналов (как аналоговых, так и импульсных) должен состоять из оптимального приёмно-фильтрующего устройства (ПФУ) и решающего устройства (РУ), как это видно из рис. 2.1.

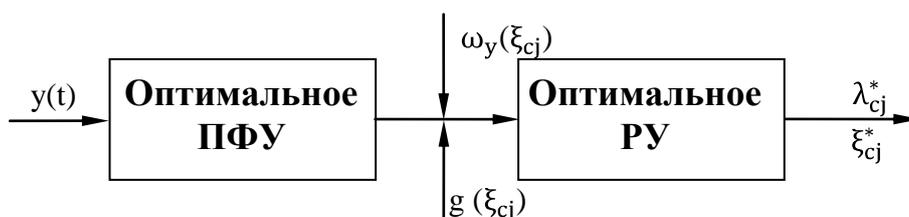


Рис. 2.1. Структурная схема оптимального приёмника дискретных сигналов

Операция вычисления апостериорного вычисления вероятностей обеспечивает наилучшую (оптимальную) фильтрацию полезного сигнала от помех, в смысле максимизации отношения сигнала к шуму.

В решающем устройстве могут использоваться различные правила принятия решений: по максимальной апостериорной вероятности, функции правдоподобия, в соответствии с критерием Неймана-Пирсона и др.

При передаче различных сообщений в системах связи обычно одинаково опасны ошибки различного вида.

В этом случае оптимальным алгоритмом решающего устройства является решение по максимуму апостериорной вероятности или максимуму функции правдоподобия.

Апостериорная вероятность $\omega_Y(\lambda_j)$ однозначно связана с функцией взаимной корреляции $g(\lambda_j)$, например, для полностью известных сигналов

$$\omega_Y \xi_{Cj} = \omega_Y \lambda_j = K \omega_{\xi_{Cj}} \omega_{\xi_{Cj} | Y} = K \omega(\xi_{Cj}) \exp[g(\xi_{Cj})]. \quad (2.1)$$

Здесь $\omega_{\xi_{Cj}}(y)$ – функция правдоподобия, т.е. условная вероятность того, что передавался сигнал ξ_{Cj} при условии приема реализации $y(t)$. В случае, когда $\omega_{\xi_{Cj}} = const$, решение по максимуму апостериорной вероятности равноценно решению по максимуму функции взаимной корреляции $g \xi_{Cj}$. Поэтому в реальных оптимальных приемниках вычисляется обычно лишь функция взаимной корреляции. Так как $g \xi_{Cj}$ представляет собой логарифм от функции правдоподобия $\omega_{\xi_{Cj} | Y}$, то часто такой алгоритм работы приёмника называется алгоритмом максимального правдоподобия.

Этот алгоритм работы оптимального приёмника дискретных сигналов находит наиболее широкое применение в технике связи. Это связано со многими причинами. Прежде всего, для системы связи наиболее характерно как одинаковая априорная вероятность элементарных символов, так и одинаковая опасность ошибок разного вида. Заметим, что одинаковая априорная вероятность ошибок характерна для симметричных каналов при флуктуационной помехе в канале.

Отметим также, что такой алгоритм существенно упрощает схему оптимального приёмника.

Функция взаимной корреляции при передаче дискретных сообщений (сигналов) определяется для всех сигналов $\xi_{Cj}(t)$ выражением:

$$q \xi_{Cj} = \frac{2}{N_0^2} \int_0^{\tau_c} y(t) \xi_{Cj}(t) dt = g(\xi_{CK}, \xi_{Cj}) + h(\xi_{Cj}), \quad (2.2)$$

где ξ_{CK} – передаваемый k -ый элементарный сигнал;

$\xi_{Cj}(t)$ – ансамбль опорных сигналов;

$h(\xi_{Cj})$ – случайные нормальные величины с нулевым средним, дисперсией $D h = 2\alpha_1^2$, взаимноковариационной матрицей, определяемой $R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj})$.

Как видно из выражения (2.1), $g(\xi_{Cj})$ состоит из сигнальной и помеховой составляющих. Сигнальную составляющую при полностью известных сигналах можно представить в виде:

$$g_j = g_{kj} = g(\xi_{CK}, \xi_{Cj}) = \frac{2}{N_0^2} \int_0^{\tau_c} \xi_{CK}(t) \xi_{Cj}(t) dt = 2\alpha_1^2 R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj}), \quad (2.3)$$

где $R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj}) = R_C(\lambda_K, \lambda_j)$ – нормированный коэффициент взаимной корреляции между $\xi_{CK}(t)$ и $\xi_{Cj}(t)$ сигналами,

$$R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj}) = \frac{1}{E_1^2} \int_0^{\tau_c} \xi_{CK}(t) \xi_{Cj}(t) dt;$$

α_1^2 – отношение энергии элементарного символа (сигнала) E_1^2 к спектральной плотности белого шума N_0^2 .

Соответственно при $\xi_{CK} = \xi_{Cj} = \xi_{Ci}$ и полностью известных сигналах, так как $R_C \xi_{CK}, R_{Cj} = 1$, $g_{max} = 2\alpha_1^2$.

При $\xi_{CK} \neq \xi_{Cj}$ и полностью известных сигналах:

$$g_{Kj} = 2\alpha_1^2 R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj}) \leq 2\alpha_1^2.$$

При наличии случайных параметров у сигналов:

$$g_{Kj} = 2\alpha_1^2 R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj}, \Delta\beta_j),$$

где $\Delta\beta_j$ – сдвиг по соответствующему параметру принимаемого и опорного сигналов.

Приёмник, действующий по принципу максимальной апостериорной вероятности выдаёт на выходе каждый раз сигнал, вероятность которого при данной $y(t)$ наибольшая.

Это означает, что правильный приём сигнала будет иметь место, если наибольшей будет вероятность $\omega_y(\xi_{CK}) = \omega_y(\lambda_K)$, т.е. если из всех величин g_{Kj} наибольшей окажется $g(\xi_{CK}, \xi_{CK}) = g_K$. Вполне очевидно, что при равных априорных вероятностях дискретных сообщений, оптимальный приемник воспроизводит сигнал $\xi_C(\lambda_K, t)$, если будет соблюдаться условие для всех $K \neq j$:

$$\frac{2}{N_0^2} \int_0^{\tau_c} y(t) \xi_{CK}(t) dt > \frac{2}{N_0^2} \int_0^{\tau_c} y(t) \xi_{Cj}(t) dt,$$

или соответственно

$$\Delta g = \frac{2}{N_0^2} \int_0^{\tau_c} y(t) \xi_{CK}(t) - \xi_{Cj}(t) dt = H > 0.$$

Отметим, что Δg будет иметь нормальную плотность вероятности с параметрами:

$$m_1 = \langle \Delta g \rangle = 2\alpha_1^2 [1 - R_C(\lambda_K, \lambda_j)];$$

$$\sigma_1^2 = 4\alpha_1^2 [1 - R_C(\lambda_K, \lambda_j)].$$

Плотность распределения вероятностей $g(\xi_{Cj})$ для каналов, где имеется лишь помеха и для случая, где имеется сигнал и помеха, будет определяться выражениями:

$$\omega_n(g_j) = \frac{1}{4\pi\alpha_1^2} \cdot \exp\left[-\frac{g^2}{4\alpha_1^2}\right]; \quad (2.4)$$

$$\omega_{cn}(g_k) = \frac{1}{4\pi\alpha_1^2} \cdot \exp\left[-\frac{(g-2\alpha_1^2)}{4\alpha_1^2}\right]. \quad (2.5)$$

Из приведённых выражений видно, что в общем случае помехоустойчивость таких сигналов будет определяться отношением сигнала к шуму α_1^2 и коэффициентом взаимной корреляции $R_C(\xi_{CK}, \xi_{Cj})$ между сигналами.

В соответствии со сказанным, оптимальный приёмник, прежде всего, должен вычислять функции взаимной корреляции $g(\lambda_j)$ для всех возможных дискретных значений λ_j (для всех возможных дискретных сигналов $\xi_{Cj}(t)$, со-

ответствующих λ_j).

В соответствии с (2.2) структурная схема оптимального приёмника полностью известных сигналов может быть представлена в виде многоканального коррелятора и решающего устройства, представляющего собой детектор максимального сигнала, выбирающего сигнал с максимальной амплитудой (см. рис. 2.2).

Вычисление $g(\lambda_j)$ для всех возможных значений λ_j может также производиться с помощью набора (гребёнки) оптимальных согласованных фильтров или устройств комбинированного типа.

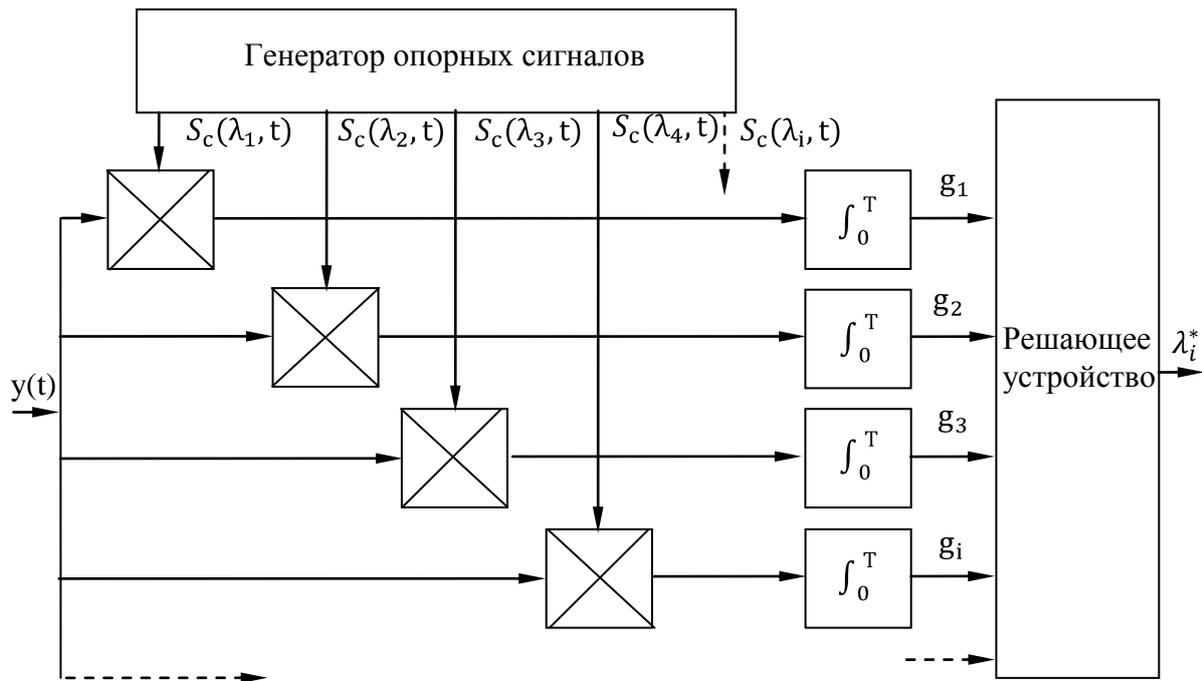


Рис. 2.2. Структурная схема оптимального приёмника полностью известных сигналов

3. Оценка вероятности ошибочного приёма дискретных сигналов с полностью известными параметрами

Следует отметить, что общая теория систем с произвольным ансамблем дискретных сигналов практически не разработана. Однако для отдельных случаев с помощью более или менее искусственных приёмов удаётся получить точные решения или приближенные оценки для $P_{\text{ош}}$. Эти решения и будут приведены ниже.

Обобщённое выражение для ошибки в опознании элементарных равноудалённых сигналов с одинаковой энергией ($E_j^2 = E_i^2 = \text{const}R_c$, $\xi_{ci}, \xi_{cj} = \text{const}$) при оптимальном приёме в условиях флуктуационного шума будет определяться выражением

$$P_{\text{ОШ}} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} 1 - P_1 g_j \geq H^{a-1} \omega_{\text{CH}}(H) dH, \quad (3.1)$$

где $P_1 g_i > H = \int_H^{\infty} \omega_n(h) dh$ – вероятность того, что в канале, где нет сигнала, напряжение превысит некоторую величину $H = 2\alpha_1^2 + h$ в канале, где имеется сигнал и шум;

$\omega_n h = \omega_n(g_j)$ – плотность распределения вероятностей g_j на выходе канала, где нет сигнала $\xi_{\text{СК}}(t)$;

$\omega_{\text{CH}}(H)$ – плотность распределения вероятностей H в канале, где имеется сигнал плюс шум;

a – число (ансамбль) дискретных сигналов.

А также равноудалённые сигналы часто называются эквидистантными.

В общем случае интеграл (3.1) не выражается в элементарных функциях и расчёт по приведённой формуле может быть произведён лишь путём численного интегрирования; причём в общем случае $P_{\text{ОШ}}$ зависит от модели, вида и ансамбля сигналов (полностью известные сигналы, сигналы с неизвестной начальной фазой, сигнал со случайной амплитудой и начальной фазой), определяющих выражение для $\omega_n(g_j)$ и $\omega_{\text{CH}}(g_j)$, а также от вида взаимноковариационной матрицы $R_C \xi_{\text{СК}}, \xi_{\text{С}j}$.

В частности, при оптимальном приёме полностью известных равноудалённых сигналов, имеющих одинаковую энергию, приближенное выражение для $P_{\text{ОШ}}$ можно получить на основании формулы (3.1):

$$P_{\text{ОШ}} = a - 1 V \alpha_1 \cdot 1 - R_C \xi_{\text{С}i}, \xi_{\text{С}j} \quad , \quad (3.2)$$

где $V \alpha_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} e^{-z^2} dz$ – интеграл вероятностей (табулированная функция).

Ансамбль оптимальных дискретных равноудалённых сигналов, представленных Котельниковым В. А., при использовании которых обеспечивается минимальная $P_{\text{ОШ}}$, должен иметь коэффициент взаимной корреляции, определяемый выражением:

$$R_C \xi_{\text{С}i}, \xi_{\text{С}j} = -\frac{1}{a-1} .$$

В частности, при $a = 2$, $R_C \xi_{\text{С}i}, \xi_{\text{С}j} = -1$. Таким $R_C \xi_{\text{С}i}, \xi_{\text{С}j}$ обладают противоположные сигналы типа КИМ₂ – ФМ со сдвигом фаз на 180°.

Если используется ансамбль ортогональных сигналов, с одинаковой энергией, для которых:

$$R_C \xi_{\text{С}i}, \xi_{\text{С}j} = \begin{cases} 1, & \text{при } i=j \\ 0, & \text{при } i \neq j \end{cases} ,$$

где «1» при $i = j$, а «0» при $i \neq j$, то приближённо:

$$P_{\text{ОШ}} \approx a - 1 V(\alpha_1). \quad (3.3)$$

Заметим, что точное решение для этого случая имеет вид:

$$P_{0\text{ш}} = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [1 - V(\sqrt{2}\alpha_1 + y^{a-1})] \exp(-\frac{y^2}{2}) dy.$$

Рассмотрим пример расчёта:

1. Пусть используются сигналы типа КИМ₂ – ЧМ прямоугольной формы:

$$\frac{\xi_{C1}(t) = U_m \cos(\omega_1 t + \varphi_1)}{\xi_{C2}(t) = U_m \cos(\omega_2 t + \varphi_2)} \Rightarrow 0 \leq t \leq \tau_c.$$

Тогда согласно (2.3)

$$R_{0\text{ш}}(\xi_{Ci}, \xi_{Cj}) = \frac{1}{E_1^2} \int_0^{\tau_c} \xi_{C1}(t) \xi_{C2}(t) dt = \frac{\sin(\omega_2 - \omega_1)\tau_c}{(\omega_2 - \omega_1)\tau_c},$$

где $E_1^2 = U_m^2 \cdot \tau_c$.

Из приведённой зависимости видно, что при данном способе манипуляции максимальная помехоустойчивость получается при:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} = 0,7 \tau_c.$$

В этом случае $P_{0\text{ш}} = V(\alpha_1) \sqrt{1,2}$. При меньших разностях $\omega_2 - \omega_1$ помехоустойчивость будет уменьшаться.

При $\frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = \frac{1}{\tau_c}$ сигналы считаются ортогональными и

$$P_{0\text{ш}} = (a - 1)V(\alpha_1),$$

что совпадает с (3.3).

2. Пусть используются сигналы типа КИМ₂ – ФМ:

$$\frac{\xi_{C1}(t) = U_m \cos \omega t}{\xi_{C2}(t) = U_m \cos \omega t + \pi = -U_m \cos \omega t} \Rightarrow 0 \leq t \leq \tau_c.$$

Для таких сигналов $R_C(\xi_{C1}, \xi_{C2}) = -1$ и вероятность ошибки будет определяться выражением:

$$P_{0\text{ш}} = V(\sqrt{2}\alpha_1).$$

Соответственно можно показать, что при оптимальном приёме полностью известных сигналов типа КИМ₂ – АМ:

$$P_{0\text{ш}} = V(\alpha_1 \sqrt{2}).$$

Результаты расчёта $P_{0\text{ш}}$ по полученным формулам при $a=2$ в виде сплошных кривых представлены на рис. 3.1.

Из приведённых формул и графиков видно, что наивысшей помехоустойчивостью из двоичных сигналов обладают противоположные сигналы типа КИМ₂ – ФМ. Далее следуют ортогональные сигналы вида КИМ₂ – ЧМ и КИМ₂ – АМ.

При использовании многоосновных дискретных сигналов, когда $a > 2$, близкими к оптимальным являются ортогональные сигналы.

Все приведённые соотношения получены в предположении, что все параметры сигналов на приёмной стороне известны, то есть известны U_m , ω , φ , τ .

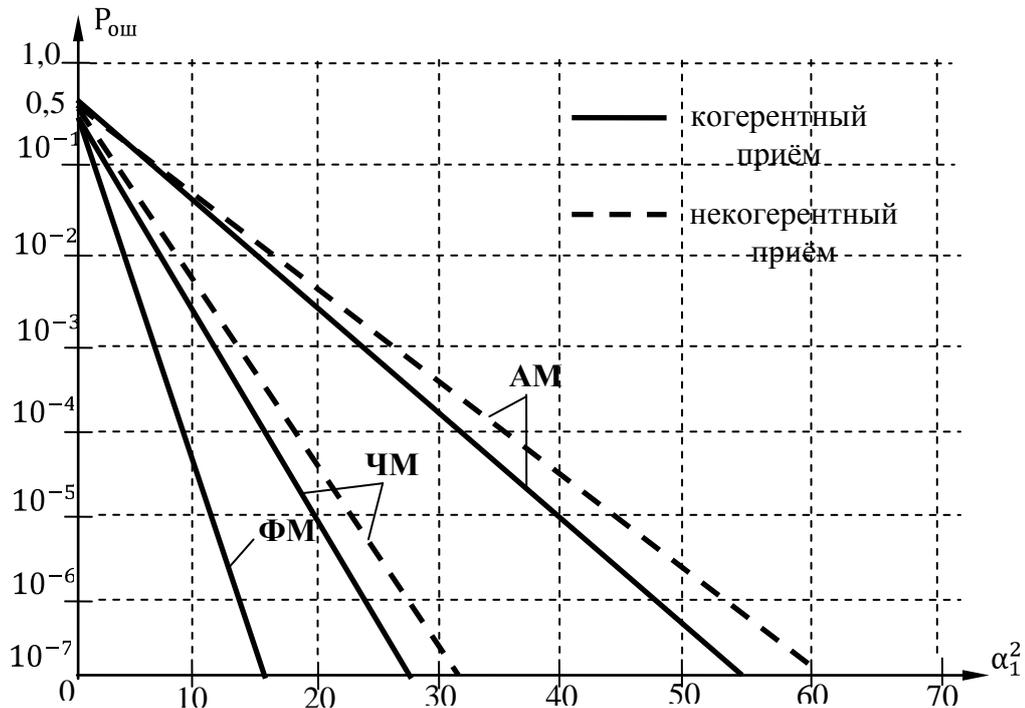


Рис. 3.1. Результаты расчёта $P_{ош}$ по полученным формулам при $a=2$

4. Помехоустойчивость дискретных сигналов со случайными параметрами при оптимальном приёме

Реальные каналы связи являются каналами со случайными параметрами. Это означает, что в подавляющем большинстве случаев принимаемые сигналы являются сигналами со случайными параметрами (случайной амплитудой, частотой, фазой).

Случайные параметры сигналов-переносчиков, подразделяются на существенные (частота, временная задержка, амплитуда) и несущественные, например, фаза (иногда существенные параметры называются фиксируемыми, а несущественные – не фиксируемыми).

Вместе с тем следует отметить, что когда необходимо обеспечить оптимальный когерентный приём, фаза сигнала должна считаться существенным параметром, а когда необходимо обеспечить оптимальный некогерентный приём, то фаза считается несущественным параметром.

Оптимальный приём сигналов со случайными параметрами требует усреднения апостериорной вероятности по несущественным параметрам и изменения существенных параметров.

Выясним сначала, какие особенности в вычислении $\omega_y(\xi_{ci})$ появляются

при наличии у сигнала $\xi_C(\alpha_j, t, \beta_i)$ несущественных паразитных случайных параметров $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$. Для этого случая имеем:

$$y(t) = \xi_C(\alpha_j, t, \beta_i) + n(t).$$

По аналогии с (2.1) можно также записать:

$$\omega_{y, \lambda_j, \beta_i} = k \omega_{\lambda_j, \beta_i} \cdot \omega_{\lambda_j, \beta_j}(y),$$

где $\omega_{\lambda_j, \beta_j}(y)$ – вероятность того, что при приеме данной реализации $y(t)$ случайные параметры сигнала $\xi_C(\alpha_j, t, \beta_i)$ равны α_j и β_i соответственно, причём неинформативные параметры не содержат полезной информации, т.е. статистически независимы от λ .

Нас же интересует ω_{y, λ_j} , т.е. вероятность того, что при данной реализации $y(t)$ сообщение равно λ_j . При этом значение паразитных параметров β_i может быть любым. Очевидно, что для определения ω_{y, λ_j} следует проинтегрировать функцию $\omega_{y, \lambda_j, \beta_i}$ по всем возможным значениям случайных параметров β_i :

$$\omega_{y, \lambda_j} = \int_{b_1} \dots \int_{b_n} \omega_{y, \lambda_j, \beta_1, \dots, \beta_n} \cdot \omega_{\beta_1} \dots \omega_{\beta_n} d\beta_1 \dots d\beta_n,$$

где β_i – области всех возможных параметров β_i соответственно.

5. Помехоустойчивость дискретных сигналов при некогерентном приёме

Как уже отмечалось выше при некогерентном приёме фаза сигнала относится к несущественным параметрам. При этом в большинстве случаев принимается, что фаза сигнала равномерно распределена на интервале $(-\pi, +\pi)$, т.е.

$$\omega_{\varphi} = \frac{1}{2\pi}.$$

Поскольку имеется один несущественный параметр – фаза сигнала, то расчёт соответствующих вероятностей ошибок должен вестись путём усреднения $\omega_{y, [\xi_{Cj}(t, \varphi)]}$ по φ , т.е. оптимальный приёмник должен вычислять усреднённую по фазе апостериорную вероятность в соответствии с:

$$\omega_{\text{уср}} \xi_{Cj} = \int_{-\pi}^{\pi} \omega_{y, [\xi_{Cj}(t, \varphi)]} \cdot \omega_{\varphi} d\varphi = k \omega_{\xi_{Cj}} I_0[g(\xi_{Cj})],$$

где $I_0[g_j]$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

$g(\xi_{Cj}) = g_j$ – модуль функции взаимной корреляции, определяемой в соответствии с выражениями:

$$g_j = \frac{2}{N_0^2} \int_0^T y(t) \xi_C(\lambda_j, t) dt = \overline{g_{1j}^2 + g_{2j}^2};$$

$$g_{1,2j} = \frac{2}{N_0^2} \int_0^T y(t) \xi_{C1,2}(\lambda_j, t) dt, \quad (5.1)$$

где $\xi_{c1,2}$, λ_j, t – квадратурные (сдвинутые по фазе на 90°) составляющие опорного (опорных) сигнала.

При работе приёмника по максимуму апостериорной вероятности (по максимуму функции правдоподобия, когда $\omega \lambda_j = const$) в приёмнике должен вычисляться модуль функции взаимной корреляции в соответствии с (5.1) для всех сигналов и выбираться канал с максимальной амплитудой.

Структурная схема устройства, вычисляющего g_j , представлена на рис. 5.1.

Плотность распределения вероятности соответственно для каналов, где имеется только помеха $\omega_n(g)$ и полезный сигнал и помеха $\omega_{cn}(g)$, будут определяться выражениями:

$$\omega_n g_j = \omega g = \frac{g}{2\alpha_1^2} \exp\left(-\frac{g^2}{4\alpha_1^2}\right); \quad (5.2)$$

$$\omega_{cn} g_k = \frac{g}{2\alpha_1^2} \exp\left[-\frac{g^2 + 4\alpha_1^2}{4\alpha_1^2}\right] \cdot I_0(g). \quad (5.3)$$

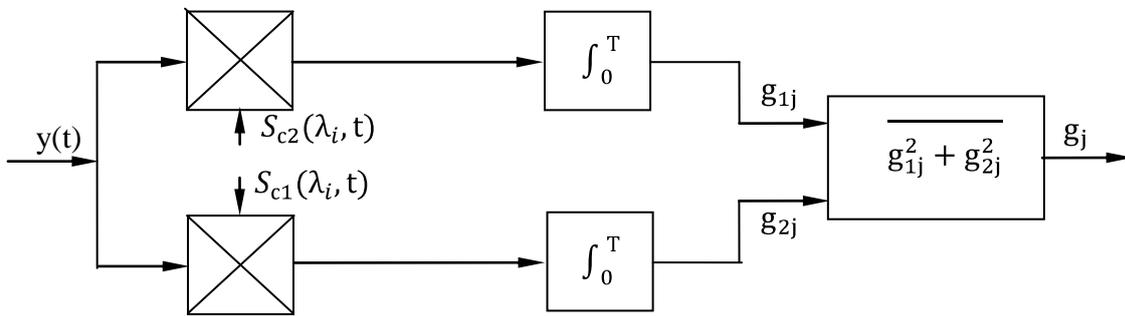


Рис. 5.1. Структурная схема устройства, вычисляющего g_j

Для расчёта вероятности появления ошибки при некогерентном оптимальном приёме a ортогональных сигналов, имеющих одинаковую энергию, может использоваться формула (3.1), в которую необходимо подставить выражения (5.2) и (5.3) для $\omega_n g_j$ и $\omega_{cn} g_k$.

В результате подстановки и приближенного интегрирования можно получить:

$$P_{0ш} = 1 - \int_0^\infty \left(1 - e^{-\frac{y^2}{2}}\right)^{a-1} y \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2} + \alpha_1^2\right] I_0(\sqrt{2}\alpha_1 y) dy \approx \approx \frac{a-1}{2} \exp\left(\frac{\alpha_1^2}{2}\right). \quad (5.4)$$

Результаты расчёта $P_{0ш}$ по формуле для различных значений α_1 и $a = 2$ представлены на рис. 3.1 в виде пунктирной кривой. Из сопоставления расчётных формул и графиков для $P_{0ш}$ при когерентном и некогерентном приёме ортогональных сигналов видно, что некогерентный приём сравнительно незначительно уступает по помехоустойчивости когерентному приёму.

6. Помехоустойчивость дискретных сигналов со случайными существенными параметрами при оптимальном приёме

Как уже указывалось, при приёме цифровых сигналов со случайными существенными параметрами необходимо проводить измерения этих параметров и формировать опорные сигналы, необходимые для оптимальной корреляционной обработки с учётом этих измерений.

Измерение существенных случайных параметров сигналов-переносчиков возлагается на специальное устройство, обычно называемое системой синхронизации. Структурная схема оптимального корреляционного приёмника дискретных сигналов со случайными существенными параметрами представлена на рис. 6.1.

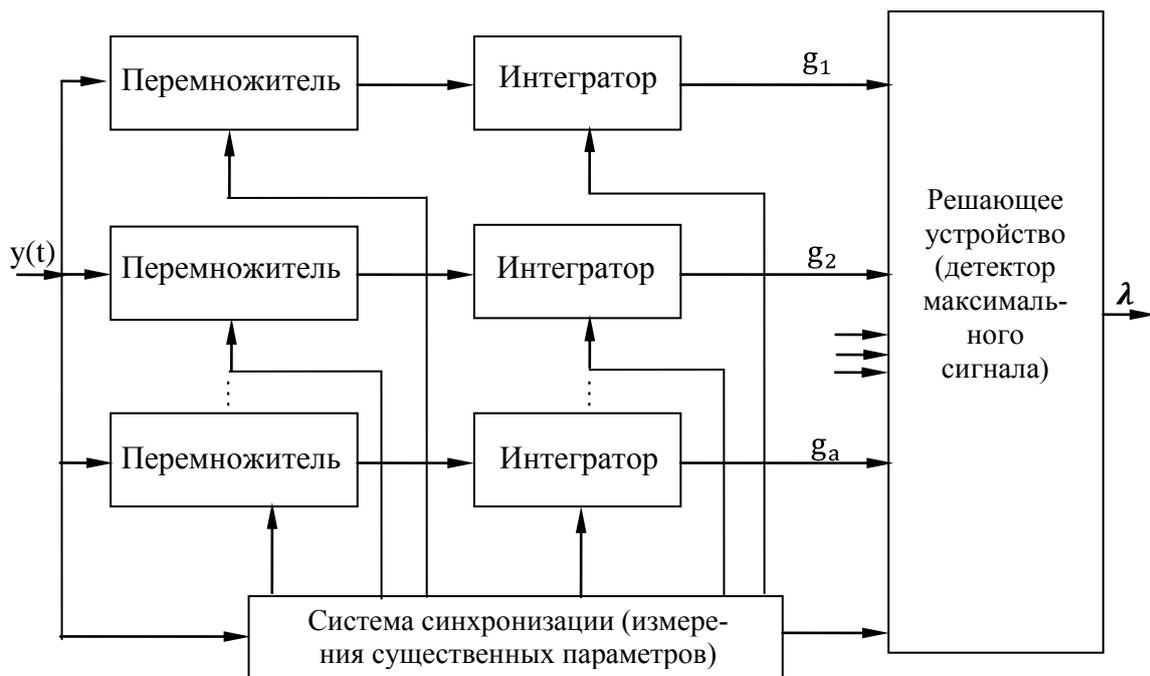


Рис. 6.1. Структурная схема оптимального корреляционного приёмника дискретных сигналов со случайными существенными параметрами

Отметим, что система синхронизации может работать, используя или только информационные сигналы, или для её функционирования могут передаваться специальные синхронизирующие сигналы.

Учитывая, что эти измерения случайных существенных параметров β_i могут производиться лишь с определённой погрешностью, то вероятность ошибки в опознании элементарных сигналов (символов) будет являться функцией ошибок ε_l в измерениях этих параметров (частоты, временной задержки, фазы сигнала при когерентном приёме).

Проведённые исследования показывают, что степень влияния неидеальности системы синхронизации (неточности измерения существенных параметров) на помехоустойчивость цифровых сигналов зависят от следующих факто-

ров:

- отношения энергии цифровых сигналов к спектральной плотности мощности белого шума в информационном канале;
- от качества работы системы синхронизации (вида распределения $\omega(\varepsilon_i)$ и его характеристик);
- от вида функции корреляции сигнала $R_C \beta_i = R_C \varepsilon_i$ по соответствующему параметру β_i , например, временной задержке.

Если с течением времени величина сдвига ε_i по соответствующему параметру изменяется случайным образом с плотностью вероятности $\omega(\beta_i)$, то средняя вероятность ошибочного приема элементарного символа может быть найдена путем усреднения по всем возможным значениям соответствующих сдвигов параметров:

$$P_{\text{ош.ср}} = \int_{B_1} \dots \int_{B_n} P_{\text{ош}}(\varepsilon_i) \omega_{\varepsilon_1} \dots \omega_{\varepsilon_n} d\varepsilon_1 \dots d\varepsilon_n.$$

Ухудшение помехоустойчивости в приёме сигналов со случайными существенными параметрами происходит прежде всего за счёт уменьшения отношения сигнала к шуму на выходе приёмно-фильтрующего устройства (ПФУ) и увеличения остаточных напряжений переходных процессов от предыдущих сигналов.

Если как и раньше предполагать, что в качестве выходного эффекта ПФУ используется функция взаимной корреляции $g_{\lambda_j, \beta_i} = 2\alpha_1^2 R_C \alpha_j, \beta_i + h(\alpha_j)$, то максимальное отношение мощности сигнала к мощности шума будет определяться выражением:

$$\frac{P_C}{P_n \text{ вых.макс.}} = 2\alpha_1^2 R_C^2(0, \beta_i).$$

В частности можно показать, что помехоустойчивость при когерентном приёме двоичных сигналов КИМ₂ – ФМ, ФИМ₂ – ЧМ_{орт}, КИМ₂ – АМ при наличии только сдвига по фазе на угол φ между принимаемым и опорным сигналом будет определяться выражением:

$$P_{\text{ош}} = V(\gamma \alpha_1 \cos \varphi),$$

где γ – коэффициент, зависящий от вида вторичной манипуляции $\gamma_{\text{ФМ}} = \frac{1}{2}$, $\gamma_{\text{ЧМ орт}} = 1$, $\gamma_{\text{АМ}} = \frac{1}{2}$.

При записи учитывалось, что $R_C(0, \varphi) = \cos \varphi$.

Если предположить, что при когерентном приёме КИМ₂ – ФМ сигналов фаза опорного сигнала, относительно принимаемого, случайно и медленно изменяется с известной плотностью вероятности $\omega(\varphi)$ (на интервале $-\pi, +\pi$), то

$$P_{\text{ош ср}} = \int_{-\pi}^{\pi} V(\frac{1}{2} \alpha_1^2 \cos \varphi) \omega(\varphi) d\varphi.$$

Результаты численного интегрирования этого выражения в предположении, что $\omega(\varphi)$ описывается нормальным законом, приведены на рис. 6.2, где σ_φ^2 – дисперсия фазовой ошибки.

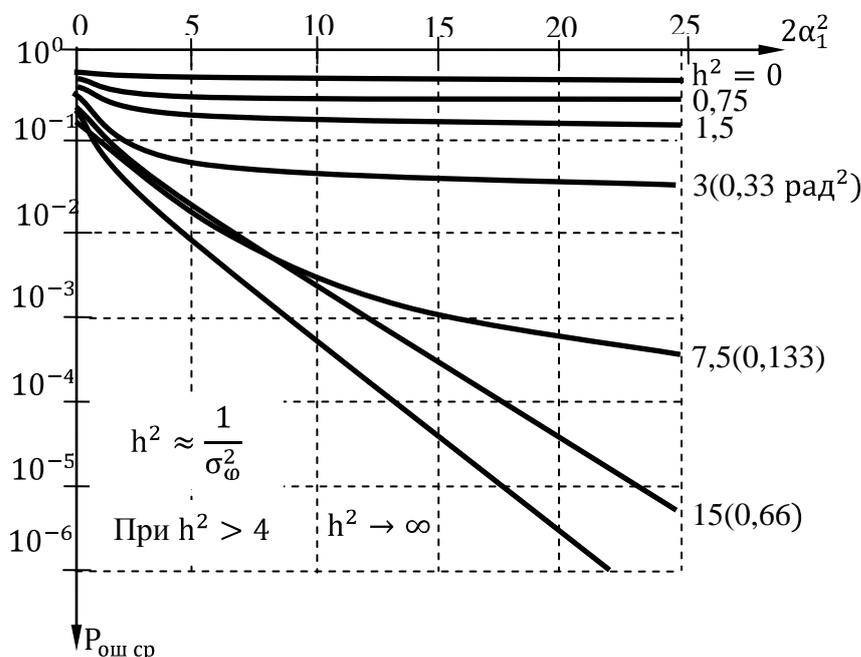


Рис. 6.2. Результаты расчёта $P_{\text{ош ср}}$

Из приведённого выражения видно, что $P_{\text{ош ср}}$ зависит от отношения α_1^2 , дисперсия фазовых флуктуаций σ_φ^2 . Из приведенных графиков видно, что для того, чтобы система синхронизации несущественно снижала помехоустойчивость, она должна обеспечивать отслеживание по фазе с дисперсией не более $\sigma_\varphi^2 = 0,1 \div 0,05 \text{ рад}^2$.

Аналогичным образом могут быть получены расчётные формулы и графики для $P_{\text{ош ср}}$ при случайном характере временной задержки дискретных сигналов. Анализ проведённых исследований показывает, что для того чтобы система синхронизации несущественно снижала помехоустойчивость системы передачи при флуктуациях оценки временного положения сигнала, она должна обеспечивать малые ошибки в оценке временного положения границ символов, т.е. $\sigma_\tau^2 \ll \tau_c$.

7. Алгоритмы формирования дискретных сигналов

Для передачи дискретных сообщений λ_i по различным каналам связи наиболее широко используются гармонические сигналы-переносчики с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ манипуляцией. Формирование перечисленных сигналов-

переносчиков на ЭВМ осуществляется по соответствующим формулам для дискретных моментов времени:

$$t_h = (h - 1)T_0, \quad h = 1, 2, \dots, H,$$

где T_0 – период опроса (дискретизация);

τ_c – длительность элементарного символа;

$H = \frac{\tau_c}{T_0}$ – количество отсчётов на длительности элементарного символа.

Для ускорения работы алгоритма вычисление синусов и косинусов производится по рекуррентным формулам:

$$S_h = cS_{h-1} + SC_{h-1}; S_0 = 0,$$

где $C_h = CC_{h-1} - SS_{h-1}; C_0 = 1; C = \cos\omega T_0; S = \sin\omega T_0$.

8. Алгоритм формирования помехи

Для формирования помехи при дискретном наблюдении сигнала производится обращение к стандартной программе датчика для равномерной случайной величины на интервале (0,1). В результате образуется совокупность неравномерно распределённых чисел $\{1_i\}$. Затем при помощи специального вида нелинейных случайных преобразований образуется совокупность случайных чисел $\{n_i\}$ с требуемым одномерным законом распределения $\omega_0(n)$. Функциональное преобразование при этом имеет вид:

$$n_i = F^{-1}(1_i), \quad i = 1, 2, \dots,$$

где $F^{-1}(1_i)$ – функция, обратная интегральной кривой;

$$F(1_i) = \int_{-\infty}^{n_i} \omega_0(n) dn.$$

Данный способ генерации, получивший название метода нелинейного преобразования, даёт независимую совокупность выборок $\{n_i\}$ типа белого шума.

В настоящей работе используются гауссовская и лапласовская одномерные плотности распределения вероятностей значений помехи:

$$\omega_{n1}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right);$$

$$\omega_{n2}(n) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_n} \exp\left(-\frac{|n|}{\sigma_n}\right),$$

где σ_n^2 – дисперсия (мощность) помехи.

Соответствующие формулы функционального преобразования имеют вид:

– для гауссовского закона

$$n_i = \sigma_n \sqrt{-2 \ln(1 - 2i^{-1})} \sin(2\pi i^{-1});$$

– для лапласовского закона

$$n_i = -\frac{\sigma_n}{2} \ln(1 - 2i^{-1}) \operatorname{sign}(1 - 2i^{-1}),$$

где sign – знаковая функция ($\operatorname{sign}(x)=1$ при $x \geq 0$ и $\operatorname{sign}(x)=-1$ при $x < 0$).

Алгоритм формирования аддитивной смеси сигнала и помехи представляет собой операцию суммирования дискретных значений сигнала-переносчика и помехи:

$$y_{t_h} = y_h = S_h + n_h, \quad \text{при } 0 \leq t \leq \varepsilon_c \tau_c. \quad (8.1)$$

9. Алгоритм демодуляции дискретных сигналов

Моделируется оптимальный когерентный приём для полностью известных сигналов по критерию максимального правдоподобия:

$$\max g_{\lambda_i} = \max S_{\lambda_i}.$$

При использовании алгоритма максимального правдоподобия основной необходимой и достаточной операцией оптимального и асимптотически оптимального приёмника полностью известных сигналов является формирование функции взаимной корреляции $g(S_i)$ для всех дискретных сигналов $S_i = \lambda_i$, которая при дискретном наблюдении и помехе с независимыми значениями определяется выражением:

$$g_{\lambda_i} = g_{S_i} = \prod_{h=1}^H Z_{t_h} S_{j_0}(t_h), \quad (9.1)$$

где $S_{j_0}(t_h)$ – ансамбль опорных дискретных сигналов;

H – число выборок на длительности элементарного символа τ_c ;

$Z(t_h)$ – в общем случае преобразованный входной сигнал y_{t_A} с оператором безынерционного преобразования (БНП);

$$Z y = -\frac{d}{dy} \ln \omega_n(y), \quad (9.2)$$

где $\omega_n(y)$ – одномерная плотность распределения вероятностей помехи;

$$y_{t_h} = S_i t_h + n(t_h).$$

При воздействии белого гауссовского шума безынерционный преобразователь имеет вид $Z y_h = y_h / \sigma_n^2$, то есть представляет собой линейный усилитель, а приемник в целом является оптимальным линейным.

При помехе с лапласовским законом распределения:

$$Z y_h = \frac{1}{2 \sigma_n^2} \text{sign } y_h,$$

то есть БНП представляет собой жёсткий ограничитель. Заметим, что при воздействии негауссовской помехи алгоритм (8.1) является лишь асимптотически оптимальным, то есть при условии малого входного отношения сигнал/помеха и большого количества $H \rightarrow \infty$.

Структурная схема оптимального для гауссовского шума и асимптотически оптимального приёмника (для негауссовского белого шума) дискретных двоичных полностью известных сигналов с различными видами модуляции приведена на рис. Л1.1; Л2.1; Л3.1; Л4.1.

Из выражения (8.1) и рис. Л1.1; Л2.1; Л3.1; Л4.1 видно, что в общем случае приёмник является корреляционным нелинейным. Амплитудная характеристика БНП однозначно связана с одномерной плотностью распределения помехи. При гауссовской помехе БНП отсутствует.

Вероятность ошибки в опознании элементарного символа $P_{\text{ош}}$ при оптимальном и асимптотически оптимальном приёме двоичных дискретных равновероятных сигналов при дискретном наблюдении определяется выражением:

$$P_{\text{ош}} = V \frac{P_C H \mu_0^2 (1 - \eta_c)}{\sigma_n^2 \eta} \quad (9.3)$$

где P_C – мощность сигнала, определяемая выражением:

$$P_C = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H S_i^2(t_h) \approx \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_c} S_i^2(t) dt;$$

$$\eta_c = \frac{1}{AH} \sum_{h=1}^H S_j(t_h) S_i(t_h) \quad \text{— нормированный коэффициент взаимной корреляции между сигналами, причём при АМ } 1 - \eta_c = \frac{1}{2}; \text{ при ортогональной ЧМ } 1 - \eta_c = 1,0, \text{ а при ФМ } 1 - \eta_c = 2,0;$$

$\mu_0^2 = \sigma_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} z'(n)^2 \cdot \omega_n(n) dn$ – коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличивается отношение сигнал/помеха на выходе БНП с характеристикой преобразования мгновенных значений

$Z(n)$, определяемый по (9.2), по сравнению с отношением сигнал/помеха на входе БНП, если помеха характеризуется одномерной симметричной относительно нуля плотностью распределения вероятностей $\omega_n(n)$;

$$V_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-z^2) \eta dz \quad \text{— интеграл вероятностей, табулированные значения для которого приведены в табл. 8.1.}$$

Таблица 8.1

X	0	0.1	0.2	0.3	0.4
(X)	0.5	0.46	0.42	0.382	0.345
X	0.5	1.5	1.75	2.25	2.5
(X)	$3.08 \cdot 10^{-1}$	$6.68 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$6.21 \cdot 10^{-3}$
X	2.75	3.25	3.5	4.0	4.25
(X)	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$5.77 \cdot 10^{-4}$	$2.32 \cdot 10^{-4}$	$3.16 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-5}$

Коэффициент $\mu_0^2 \geq 1$ всегда больше или равен единице, причем равенство имеет место лишь при гауссовской помехе.

Из (9.3) видно, что при прочих равных условиях помехоустойчивость при негауссовских помехах может быть выше, чем при гауссовских. Это объясняется тем, что при равной дисперсии гауссовская помеха обладает большей неопределённостью (энтропией).

10. Первичная статистическая обработка данных

10.1. Проверка соответствия выбранной модели распределения исходным данным

При обработке ряда наблюдений

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (10.1)$$

исследуемой случайной величины очень важно понять механизм формирования выборочных значений x_i , то есть подобрать и обосновать некоторую модельную функцию распределения $F_{\text{mod}}(x)$, с помощью которой можно адекватно описать исследуемую функцию распределения $F_{\xi}(x)$. На определенной стадии исследования это приводит к необходимости проверки гипотезы типа

$$H: F_{\xi}(x) \equiv F_{\text{mod}}(x). \quad (10.2)$$

В случае, когда число возможных значений случайной величины не велико, представление о её распределении даёт набор частот появления каждого из значений.

Для того, чтобы представить распределение более наглядно, принято в прямоугольной системе координат строить специальный чертёж, называемый гистограммой распределения. Для этого горизонтальная ось разбивается на равные участки, соответствующие разрядам, и на каждом из отрезков, как на основании, строится прямоугольник с высотой, пропорциональной частоте данного разряда. Полученная таким образом прямоугольная гистограмма зависит от выбора длины разрядов. Чтобы уменьшить эту зависимость, прямоугольные гистограммы сглаживают. Один из приёмов сглаживания заключается в том, что прямыми линиями соединяют середины соседних площадок гистограммы.

Простейший алгоритм подготовки гистограммы заключается в сравнении x_i с сеткой границ d_1, d_2, \dots, d_N с помощью операции условных переходов и подсчёте числа попаданий x_i в каждый интервал. Однако программа при большом числе интервалов получается громоздкой, а главное, большим получается время обработки каждого x_i . В большинстве случаев отрезки d_1, d_2, d_2, d_3 и так далее имеют одинаковую ширину:

$$C = \Delta x = \frac{x_m - x_0}{N}, \quad (10.3)$$

где x_m — максимальное значение x_i ;

x_0 – минимальное значение x_i ;

N – число интервалов.

Тогда алгоритмы ускоренной подготовки данных для построения гистограммы будут следующими:

- находим x_m, x_0 , вводим N ;
- определяем массив счётчиков $A(N)$;
- организуем ввод x_i , вычисление $I \leftarrow I+1$ (формирование текущего номера i каждого x_i) и вычисление вспомогательной переменной $Y = \text{int } C x - x_0$.

Значение Y указывает на номер того отрезка, в который попадает заданное значение x_i ;

- вычисляем $A(Y) \leftarrow A(Y)+1$, то есть вносим 1 в содержимое счётчика $A(Y)$ и возвращаемся к пункту 3.

Ввод данных для построения гистограммы организуем с помощью цикла с управляющей переменной j , меняющейся от значения 1 до N с шагом 1. Число попаданий x_i в j -й отрезок получаем выводом значений $A(j)$. Для получения данных при построении гистограммы интегрального распределения вычисляем $S \leftarrow I+A(j)$ при начальном $S=0$.

10.2. Критерий χ^2 Пирсона

Проверка гипотез типа (10.2) осуществляется также с помощью критериев согласия и опирается на ту или иную меру различия между анализируемой эмпирической функцией распределения $F_{\xi}^{\exists n}(x)$ и гипотетическим модельным законом $F_{mod}(x)$.

Критерий χ^2 Пирсона позволяет осуществлять проверку гипотезы (10.2) в условиях, когда значения параметров модельной функции распределения не известны исследователю. Процедура статистической проверки гипотезы (10.2) складывается в данном случае из следующих этапов:

1. Весь диапазон значений исследуемой случайной величины ξ разбивается на ряд интервалов группирования $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k$ не обязательно одинаковой длины. Это разбиение на интервалы необходимо подчинить следующим условиям:

- общее количество интервалов k должно быть не менее 8;
- в каждый интервал группирования должно попасть не менее 7-10 выборочных значений ξ , причем желательно, чтобы в разные интервалы попало примерно одинаковое число точек;
- если диапазон исследуемой величины ξ – вся числовая прямая (полу-прямая), то крайние интервалы группирования будут полупрямыми (соответственно один из них).

2. На основании выборочных данных x_1, x_2, \dots, x_n строятся статистические оценки $\theta^{\exists(1)}, \theta^{\exists(2)}, \dots, \theta^{\exists(3)}$ неизвестных параметров $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(3)}$, от которых зависит данный закон распределения F . Более корректным способом

действий считается тот, при котором оценки $\theta^{\exists(1)}, \theta^{\exists(2)}, \dots, \theta^{\exists(3)}$ вычисляются на основе сгруппированных данных.

3. Подсчитывая число V_i точек, попавших в каждый из интервалов группирования Δi , вычисляются вероятности события $\xi \in \Delta i$, то есть вероятности попадания в те же интервалы Δi (x_{i-1}^0 и x_i^0 – суть левый и правый концы i -го интервала группирования).

$$P_i = F_{mod} x_i^0; \theta^{\exists 1}, \dots, \theta^{\exists 3} - F_{mod} x_{i-1}^0; \theta^{\exists 1}, \dots, \theta^{\exists 5} . \quad (10.4)$$

4. Вычисляется величина критической статистики $x^2 (K - S - 1)$ по формуле:

$$x^2 (K - S - 1) = \sum_{i=1}^K \frac{V_i - np_i}{np_i} . \quad (10.5)$$

5. Далее из табл. 8.1 находится $100 (1 - \alpha) / 2$ %-я точка $x_{1-\alpha/2}^2 (K - S - 1)$ и $100 \alpha / 2$ %-я точка $x_{\alpha/2}^2 (K - S - 1)$ x^2 – распределения с $K - S - 1$ степенями свободы (α , как обычно, уровень значимости, который задаётся заранее).

Если $x_{1-\alpha/2}^2 (K - S - 1) \leq x^2 (K - S - 1) < x_{\alpha/2}^2 (K - S - 1)$, то гипотеза о том, что исследуемая случайная величина ξ действительно подчиняется закону распределения F_{mod} принимается.

Выполнение неравенства $x^2 (K - S - 1) \geq x_{\alpha/2}^2 (K - S - 1)$ говорит о слишком большом отклонении исследуемого закона распределения от гипотетического $F_{mod}(x)$.

Так, например, при проверке гипотезы нормальности гипотетически закон F_{mod} будет иметь соответственно вид:

$$F_{mod} x, \alpha, \sigma^2 = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2} \right\} dx,$$

а в качестве оценок α^{\exists} и $\sigma^{\exists 2}$ двух неизвестных параметров α и σ^2 будут фигурировать величины:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K V_i X_i^0;$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^K V_i (X_i^0 - \alpha)^2,$$

через X_i^0 обозначается средняя точка интервала Δi .

Значения $F(x; \alpha; \sigma^2)$, необходимые для подсчета вероятностей p_i , можно найти, например, из табл. 8.1 функции нормированного нормального распределения с учетом соотношения $F(x; \alpha; \sigma^2) = F\left(\frac{x-\alpha}{\sigma}; 0,1\right)$. Число степеней свободы закона распределения x^2 , процентные точки которого нам понадобятся, будет равно в данном случае $K-3$, где K – число интервалов группирования.

11. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Что является основным показателем качества цифровой системы передачи (канала связи)?

2. От чего зависит вероятность ошибочного приёма элементарных символов?
3. Что вычисляет оптимальный приёмник?
4. Состав оптимального приёмника дискретных сигналов.
5. Нарисуйте схему оптимального приёмника полностью известных сигналов.
6. На что подразделяются случайные параметры сигналы - переносчики?
7. В каком случае фаза сигнала считается существенным параметром, а в каком несущественным? Поясните почему?
8. Нарисуйте структурную схему оптимального корреляционного приёмника дискретных сигналов со случайными существенными параметрами. Поясните работу.
9. От каких факторов зависит степень влияния неидеальности системы синхронизации на помехоустойчивость цифровых сигналов?
10. Из-за чего происходит ухудшение помехоустойчивости в приёме сигналов со случайными существенными параметрами?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование модели АМ канала связи

1. Цель работы

Закрепление теоретического материала, экспериментальные исследования радиотехнических систем передачи и оптимального приёма дискретных сообщений, а также усвоение принципов реализации цифровых методов формирования и обработки сигналов путём моделирования на ПЭВМ.

2. Подготовка к работе

2.1. Домашнее задание

Изучить работу системы передачи дискретной информации с АМ при различных ПРВ (плотность распределения вероятности) помехи.

3. Лабораторный эксперимент

3.1. Лабораторная установка

На рис. Л1.1 представлена модель АМ канала связи. С помощью условных обозначений показаны:

ИС – источник сигнала;

Мод – модулятор;

Г – гетеродин;

ЛС – линия связи;

ИП – источник помех;

БНП – блок нелинейного преобразования;

Сум – сумматор;

РУ – решающее устройство;

ГТС – генератор тактовых сигналов;

$S_{оп}$ – опорный сигнал.

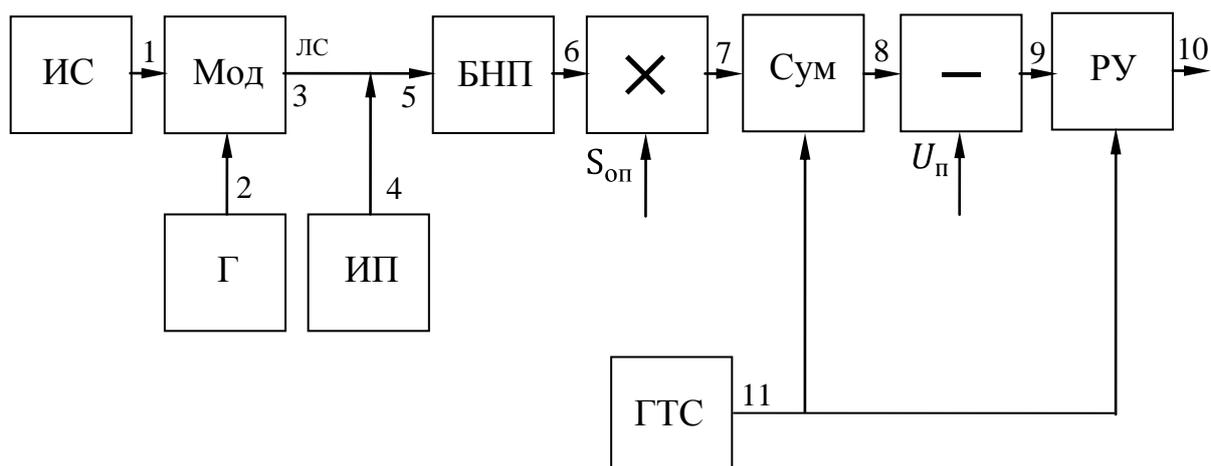


Рис. Л1.1. Модель АМ канала связи

3.2. Порядок проведения исследования

Программа исследует работу системы передачи дискретной информации с АМ при различных ПРВ помехи.

Для работы с программой не требуется хорошо ориентироваться в расположении алфавитных клавиш, так как используются только клавиши перемещения курсора, функциональные клавиши, <Enter>, <.>, пробел и цифровые клавиши, вместо которых можно использовать клавиши перемещения курсора.

Во всех случаях после получения результата для продолжения работы программы следует нажимать клавишу <Enter>.

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Выберите пункт «Модуляция» и задайте вид модуляции АМ. После этого выберите пункт «Помеха». Появится окно, в котором требуется ввести 2 числа: параметр обобщённо гауссовского распределения помехи и среднеквадратическое отклонение. После задания вида модуляции и характеристик помехи выберите пункт «Моделирование». После этого потребуется последовательно задать вид последовательности (случайная или детерминированная 101010), несущую частоту, длительность символа и общее число символов, параметр обобщённо гауссовского распределения блока безынерционного нелинейного преобразования, включаемого на входе приёмника. При амплитудной манипуляции потребуется ещё ввести порог решающего устройства. Рекомендуемое значение порога будет указано.

Для запуска программы необходимо загрузить файл .exe. После загрузки программа входит в режим ввода и изменения параметров.

3.3. Изменение параметров

В данном режиме на экране появляется перечень параметров, которые следует выбрать в соответствии с заданием. Пример в табл. Л.1.1.

Таблица Л.1.1

Вид модуляции	
Частота, Гц	
Разность фаз, °	
Мощность сигнала, Вт	
Вид последовательности 1–1111, 2–1010, 3–1000, 4–случ	
Вероятность, 1 (случ)	
Длительность символа, мс	
Помеха	
Дисперсия помехи, Вт	
Параметр БНП	

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Необходимо осуществить выбор **вида манипуляции**, для чего необходимо нажать <F3>, на экране появится окно с четырьмя возможными видами манипуляции: **АМ**; ЧМ; ФМ; ОФМ.

Следует подвести курсор к нужному вам виду АМ и нажать <Enter>, программа вернётся в режим изменения параметров.

После выбора вида модуляции АМ **по указанию преподавателя** необходимо **выбрать вид помехи** для чего нажмите клавишу <F5>, на экране появится окно изображённое ниже:

Обобщенно-гауссовское распределение
Гауссовское распределение
Лапласовское распределение

Для выбора нужно подвести курсор к нужному виду помехи и нажать на <Enter>, после чего программа вернётся в режим изменения параметров. Далее следует изменить параметры в соответствии с заданием. Для изменения значения какого-либо параметра подведите курсор к его текущему значению и введите на этом месте новое значение или измените отдельные цифры. Лишние символы удаляются с помощью клавиши пробел. Допускается наличие пробелов между знаками числа.

Параметр «Вероятность, 1 (случ)» учитывается только при формировании случайной двоичной последовательности.

Параметр ОГР помехи следует задавать в диапазоне 0,6...10. СКО помехи не должно быть значительно меньше амплитуды сигнала, равной 1 В. Рекомендуется задавать СКО в диапазоне 0,2...2 В, причём при амплитудной манипуляции и минимальном значении СКО помехи рекомендуемое значение порога,

определяемое в предположении малого отношения сигнал/помеха, будет отличаться от оптимального.

Учитывая, что моделирование осуществляется с частотой дискретизации 1000Гц, несущую частоту следует выбирать порядка 100 Гц, длительность символа – 20...50 мс. Параметр ОГР БНП для асимптотически оптимального приёмника должен совпадать с параметром ОГР помехи. Для линейного приёмника этот параметр равен 2, для идеального ограничителя 1.

После ввода всех значений на экране появится функциональная схема системы передачи дискретной информации и начнётся моделирование её работы. В нижней части экрана будут указаны общее число переданных символов и число ошибок, а также значения каждого символа (переданного и принятого). После того, как моделирование будет закончено, можно будет выбрать любые два соседних символа и просмотреть осциллограммы в нескольких точках схемы. Для этого нужно выделить нужные символы с помощью клавиш перемещения курсора и нажать <Enter>. Для перемещения на 30 символов используются клавиши <PgUp> и <PgDn>. Можно выбрать символы и с помощью мыши. Первое нажатие левой кнопки мыши выделяет символ.

После установки всех необходимых параметров для продолжения исследований нажмите клавишу <F6>. После этого программа войдёт в режим выбора исследуемых характеристик:

Осциллограф
Статистическое определение помехоустойчивости
Гистограмма
Коэффициент корреляции
Спектр
Характеристика БНП
ФРВ помехи
Изменение параметров

3.4. Осциллограф

Работа данного режима напоминает работу двухлучевого осциллографа. Верхний рисунок соответствует 1-й точке, нижний – другой выбранной Вами точке.

Ввод значений масштабов .2.0 и .2.0 номеров точек аналогичен режиму «Изменение параметров». Для окончания ввода следует нажать <F9>.

3.5. Статистическое определение помехоустойчивости

Данный режим состоит из двух подрежимов. В режиме «100 символов» на экран выводятся переданные и принятые символы и число ошибок. Имеется возможность просмотреть осциллограммы в любых точках канала для интересующего Вас символа (например, ошибочно принятого). Для этого введите номер интересующего Вас символа. Дальнейшая работа аналогична режиму «Ос-

циллограф». Можно просмотреть несколько символов. Для окончания просмотра введите вместо номера символа «0».

В режиме «до 1000 символов» подсчитывается число ошибок при передаче любого числа символов, введённого Вами (до 1000). Возможности просмотра осциллограмм в этом режиме нет.

Нажатие кнопки на выделенном символе выбирает его. После выбора символа потребуется ввести номера точек схемы. Всего можно выбрать от 1 до 4 точек одновременно. После этого появятся осциллограммы, соответствующие двум символам. Можно перемещаться к соседним символам, используя клавиши «Курсор влево» и «Курсор вправо». Для возврата к схеме следует нажать <Esc>.

Кроме выбора символа и просмотра осциллограмм, имеется возможность расчёта гистограмм, спектров и автокорреляционных функций. Для этого следует выбрать одну из точек схемы аналогично тому, как выбираются символы. Для переключения от выбора символа к выбору точки используется клавиша <Tab>. При использовании мыши нажимать эту клавишу не требуется. В режиме выбора точки верхняя часть экрана, в которой расположена схема, выделяется жёлтой рамкой. После выбора точки начнётся расчёт характеристик. По мере его выполнения будут указываться клавиши, с помощью которых можно просмотреть каждую из рассчитанных характеристик. Вызвать гистограмму можно, не дожидаясь расчёта остальных характеристик. Под гистограммой указываются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Эксцесс рассчитывается как нормированный четвёртый момент (без вычитания 3).

3.6. Гистограмма

Строится гистограмма процесса в любой точке схемы. Вычисляются математическое ожидание, дисперсия и эксцесс. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0,5–1 Вт.

3.7. Коэффициент корреляции

Вычисляется коэффициент корреляции между сигналами 0 и 1.

3.8. Спектр

Строится амплитудный спектр сигнала в любой точке канала по 200 отсчётам.

С помощью клавиши <F5> вызывается график функции БНП.

С помощью клавиши <F6> вызывается теоретический график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха. На этом же графике показываются экспериментальные значения вероятностей ошибок. Эти вероятности хранятся до изменения вида модуляции или любого из параметров, кроме СКО помехи и порога решающего устройства.

3.9. Характеристика БНП и ФРВ помехи

При построении характеристики БНП не учитывается дисперсия помехи, так как для помех с обобщённо гауссовским распределением не требуется учёта дисперсии при работе БНП. При построении ФРВ помехи дисперсия учитывается. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0.5–1 Вт.

Изменение параметров.

Во всех случаях для возврата к схеме и для перехода от схемы к главному меню используются клавиша <Esc> или правая кнопка мыши. После возврата в главное меню все введённые значения сохраняются, поэтому их не требуется каждый раз вводить заново. При вводе нескольких параметров можно вернуться к предыдущему окну с помощью клавиши <Esc>.

Для выхода из программы следует выйти в главное меню и нажать <Alt>–<X>.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое помехоустойчивость радиосигналов?
2. Поясните возможные методы получения и приёма радиосигналов АМ.
3. Каковы особенности выполнения демодуляторов радиосигналов АМ?
4. Каким образом выбираются значения оптимального порога при АМ?
5. Нарисуйте радиосигнал с АМ.
6. Расскажите о методах формирования АМ радиосигналов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование модели ЧМ канала связи

1. Цель работы

Закрепление теоретического материала, экспериментальные исследования радиотехнических систем передачи и оптимального приёма дискретных сообщений, а также усвоение принципов реализации цифровых методов формирования и обработки сигналов путём моделирования на ПЭВМ.

2. Подготовка к работе

2.1. Домашнее задание

Изучить работу системы передачи дискретной информации с ЧМ при различных ПРВ (плотность распределения вероятности) помехи.

3. Лабораторный эксперимент

3.1. Лабораторная установка

На рис. Л2.1 представлена модель ЧМ канала связи. С помощью условных обозначений показаны:

ИС – источник сигнала;

Мод – модулятор;

Г – гетеродин;

ЛС – линия связи;

ИП – источник помех;

БНП – блок нелинейного преобразования;

Сум – сумматор;

РУ – решающее устройство;

ГТС – генератор тактовых сигналов.

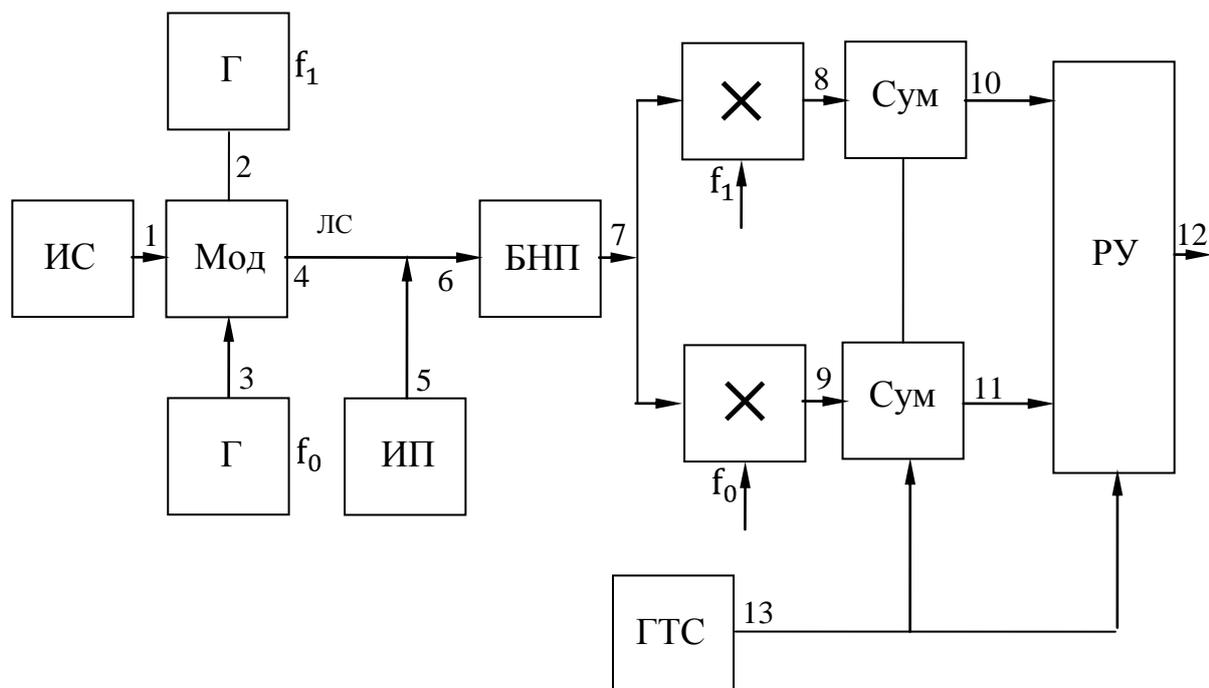


Рис. 12.1. Модель ЧМ канала связи

3.2. Порядок проведения исследования

Программа исследует работу системы передачи дискретной информации с ЧМ при различных ПРВ помехи.

Для работы с программой не требуется хорошо ориентироваться в расположении алфавитных клавиш, так как используются только клавиши перемещения курсора, функциональные клавиши, <Enter>, <.>, пробел и цифровые клавиши, вместо которых можно использовать клавиши перемещения курсора.

Во всех случаях после получения результата для продолжения работы программы следует нажимать клавишу <Enter>.

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Выберите пункт «Модуляция» и задайте вид модуляции. После этого выберите пункт «Помеха». Появится окно, в котором требуется ввести 2 числа: параметр обобщённо гауссовского распределения помехи и среднеквадратическое отклонение. После задания вида модуляции ЧМ и характеристик помехи выберите пункт «Моделирование». После этого потребуется последовательно задать вид последовательности (случайная или детерминированная 101010), несущую частоту (для ЧМ – 2 частоты, соответствующие 1 и 0), длительность символа и общее число символов, параметр обобщённо гауссовского распределения блока безынерционного нелинейного преобразования, включаемого на входе приёмника.

Для запуска программы необходимо загрузить файл .exe. После загрузки

программа входит в режим ввода и изменения параметров.

3.3. Изменение параметров

В данном режиме на экране появляется перечень параметров, которые следует выбрать в соответствии с заданием. Пример в табл. Л.2.1.

Таблица Л.2.1

Вид модуляции	
Частота, Гц	
Разность фаз, °	
Мощность сигнала, Вт	
Вид последовательности 1–1111, 2–1010, 3–1000, 4–случ	
Вероятность, 1 (случ)	
Длительность символа, мс	
Помеха	
Дисперсия помехи, Вт	
Параметр БНП	

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Необходимо осуществить выбор **вида манипуляции**, для чего необходимо нажать <F3>, на экране появится окно с четырьмя возможными видами манипуляции: АМ; **ЧМ**; ФМ; ОФМ.

Следует подвести курсор к нужному вам виду и нажать <Enter>, программа вернётся в режим изменения параметров.

После выбора вида модуляции ЧМ, *по указанию преподавателя* необходимо **выбрать вид помехи**, для чего нажмите клавишу <F5>, на экране появится окно:

Обобщенно-гауссовское распределение
Гауссовское распределение
Лапласовское распределение

Для выбора нужно подвести курсор к нужному виду помехи и нажать на <Enter>, после чего программа вернётся в режим изменения параметров. Далее следует изменить параметры в соответствии с заданием. Для изменения значения какого-либо параметра подведите курсор к его текущему значению и введите на этом месте новое значение или измените отдельные цифры. Лишние символы удаляются с помощью клавиши пробел. Допускается наличие пробелов между знаками числа.

Параметр «Вероятность, 1 (случ)» учитывается только при формировании случайной двоичной последовательности.

Параметр ОГР помехи следует задавать в диапазоне 0.6...10. СКО помехи не должно быть значительно меньше амплитуды сигнала, равной 1 В. Рекомен-

дуются задавать СКО в диапазоне 0.2...2 В.

Учитывая, что моделирование осуществляется с частотой дискретизации 1000Гц, несущую частоту следует выбирать порядка 100 Гц, длительность символа – 20...50 мс. Параметр ОГР БНП для асимптотически оптимального приёмника должен совпадать с параметром ОГР помехи. Для линейного приёмника этот параметр равен 2, для идеального ограничителя 1.

После ввода всех значений на экране появится функциональная схема системы передачи дискретной информации и начнётся моделирование её работы. В нижней части экрана будут указаны общее число переданных символов и число ошибок, а также значения каждого символа (переданного и принятого). После того, как моделирование будет закончено, можно будет выбрать любые два соседних символа и просмотреть осциллограммы в нескольких точках схемы. Для этого нужно выделить нужные символы с помощью клавиш перемещения курсора и нажать <Enter>. Для перемещения на 30 символов используются клавиши <PgUp> и <PgDn>. Можно выбрать символы и с помощью мыши. Первое нажатие левой кнопки мыши выделяет символ.

После установки всех необходимых параметров для продолжения исследований нажмите клавишу <F6>. После этого программа войдёт в режим выбора исследуемых характеристик:

Осциллограф
Статистическое определение помехоустойчивости
Гистограмма
Коэффициент корреляции
Спектр
Характеристика БНП
ФРВ помехи
Изменение параметров

3.4. Осциллограф

Работа данного режима напоминает работу двухлучевого осциллографа. Верхний рисунок соответствует 1-й точке, нижний – другой выбранной Вами точке.

Ввод значений масштабов .2.0 и .2.0 номеров точек аналогичен режиму «Изменение параметров». Для окончания ввода следует нажать <F9>.

3.5. Статистическое определение помехоустойчивости

Данный режим состоит из двух подрежимов. В режиме «100 символов» на экран выводятся переданные и принятые символы и число ошибок. Имеется возможность просмотреть осциллограммы в любых точках канала для интересующего Вас символа (например, ошибочно принятого). Для этого введите номер интересующего Вас символа. Дальнейшая работа аналогична режиму «Ос-

циллограф». Можно просмотреть несколько символов. Для окончания просмотра введите вместо номера символа «0».

В режиме «до 1000 символов» подсчитывается число ошибок при передаче любого числа символов, введённого Вами (до 1000). Возможности просмотра осциллограмм в этом режиме нет.

Нажатие кнопки на выделенном символе выбирает его. После выбора символа потребуется ввести номера точек схемы. Всего можно выбрать от 1 до 4 точек одновременно. После этого появятся осциллограммы, соответствующие двум символам. Можно перемещаться к соседним символам, используя клавиши «Курсор влево» и «Курсор вправо». Для возврата к схеме следует нажать <Esc>.

Кроме выбора символа и просмотра осциллограмм, имеется возможность расчёта гистограмм, спектров и автокорреляционных функций. Для этого следует выбрать одну из точек схемы аналогично тому, как выбираются символы. Для переключения от выбора символа к выбору точки используется клавиша <Tab>. При использовании мыши нажимать эту клавишу не требуется. В режиме выбора точки верхняя часть экрана, в которой расположена схема, выделяется жёлтой рамкой. После выбора точки начнётся расчёт характеристик. По мере его выполнения будут указываться клавиши, с помощью которых можно просмотреть каждую из рассчитанных характеристик. Вызвать гистограмму можно, не дожидаясь расчёта остальных характеристик. Под гистограммой указываются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Эксцесс рассчитывается как нормированный четвёртый момент (без вычитания 3).

3.6. Гистограмма

Строится гистограмма процесса в любой точке схемы. Вычисляются математическое ожидание, дисперсия и эксцесс. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0,5–1 Вт.

3.7. Коэффициент корреляции

Вычисляется коэффициент корреляции между сигналами 0 и 1.

3.8. Спектр

Строится амплитудный спектр сигнала в любой точке канала по 200 отсчётам.

С помощью клавиши <F5> вызывается график функции БНП.

С помощью клавиши <F6> вызывается теоретический график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха. На этом же графике показываются экспериментальные значения вероятностей ошибок. Эти вероятности хранятся до изменения вида модуляции или любого из параметров, кроме СКО помехи и порога решающего устройства.

3.9. Характеристика БНП и ФРВ помехи.

При построении характеристики БНП не учитывается дисперсия помехи, так как для помех с обобщённо гауссовским распределением не требуется учёта дисперсии при работе БНП. При построении ФРВ помехи дисперсия учитывается. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0.5–1 Вт.

Изменение параметров.

Во всех случаях для возврата к схеме и для перехода от схемы к главному меню используются клавиша <Esc> или правая кнопка мыши. После возврата в главное меню все введённые значения сохраняются, поэтому их не требуется каждый раз вводить заново. При вводе нескольких параметров можно вернуться к предыдущему окну с помощью клавиши <Esc>.

Для выхода из программы следует выйти в главное меню и нажать <Alt>–<X>.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое помехоустойчивость радиосигналов?
2. Поясните возможные методы получения и приёма радиосигналов ЧМ.
3. Каковы особенности выполнения демодуляторов радиосигналов ЧМ?
4. Чем объясняется более высокая помехоустойчивость частотной манипуляции по сравнению с амплитудной манипуляцией?
5. Нарисуйте радиосигнал с ЧМ.
6. Расскажите о методах формирования ЧМ радиосигналов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование модели ФМ канала связи

1. Цель работы

Закрепление теоретического материала, экспериментальные исследования радиотехнических систем передачи и оптимального приёма дискретных сообщений, а также усвоение принципов реализации цифровых методов формирования и обработки сигналов путём моделирования на ПЭВМ.

2. Подготовка к работе

2.1. Домашнее задание

Изучить работу системы передачи дискретной информации с ФМ при различных ПРВ (плотность распределения вероятности) помехи.

3. Лабораторный эксперимент

3.1. Лабораторная установка

На рис. Л3.1 представлена модель ФМ канала связи. С помощью условных обозначений показаны:

ИС – источник сигнала;

Мод – модулятор;

Г – гетеродин;

ЛС – линия связи;

ИП – источник помех;

БНП – блок нелинейного преобразования;

Сум – сумматор;

ГТС – генератор тактовых сигналов;

РУ – решающее устройство.

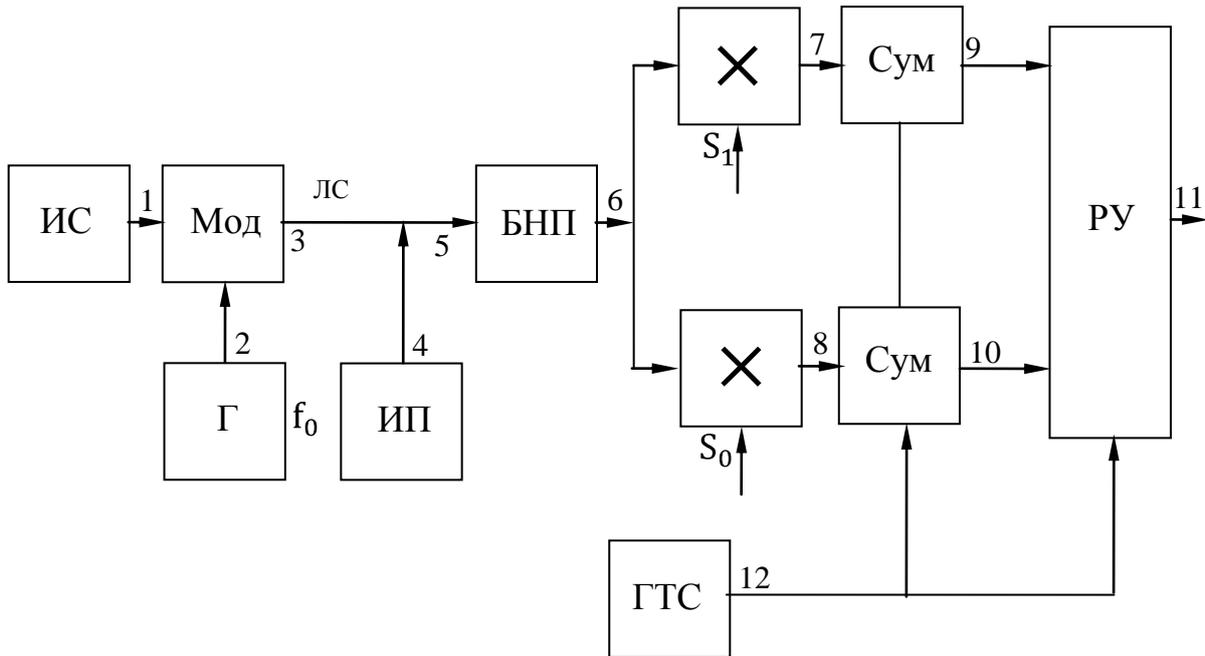


Рис. 13.1. Модель ФМ канала связи

3.2. Порядок проведения исследования

Программа исследует работу системы передачи дискретной информации с ФМ при различных ПРВ помехи.

Для работы с программой не требуется хорошо ориентироваться в расположении алфавитных клавиш, так как используются только клавиши перемещения курсора, функциональные клавиши, <Enter>, <. >, пробел и цифровые клавиши, вместо которых можно использовать клавиши перемещения курсора.

Во всех случаях после получения результата для продолжения работы программы следует нажимать клавишу <Enter>.

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Выберите пункт «Модуляция» и задайте вид модуляции ФМ. После этого выберите пункт «Помеха». Появится окно, в котором требуется ввести 2 числа: параметр обобщённо гауссовского распределения помехи и среднеквадратическое отклонение. После задания вида модуляции и характеристик помехи выберите пункт «Моделирование». После этого потребуется последовательно задать вид последовательности (случайная или детерминированная 101010), несущую частоту, длительность символа и общее число символов, параметр обобщённо гауссовского распределения блока безынерционного нелинейного преобразования, включаемого на входе приёмника

Для запуска программы необходимо загрузить файл .exe. После загрузки программа входит в режим ввода и изменения параметров.

3.3. Изменение параметров

В данном режиме на экране появляется перечень параметров, которые следует выбрать в соответствии с заданием. Пример в табл. Л.3.1.

Таблица Л.3.1

Вид модуляции	
Частота, Гц	
Разность фаз, °	
Мощность сигнала, Вт	
Вид последовательности 1–1111, 2–1010, 3–1000, 4–случ	
Вероятность, 1 (случ)	
Длительность символа, мс	
Помеха	
Дисперсия помехи, Вт	
Параметр БНП	

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Необходимо осуществить выбор **вида манипуляции**, для чего необходимо нажать <F3>, на экране появится окно с четырьмя возможными видами манипуляции: АМ; ЧМ; **ФМ**; ОФМ.

Следует подвести курсор к нужному вам виду и нажать <Enter>, программа вернётся в режим изменения параметров.

После выбора вида модуляции ФМ, **по указанию преподавателя** необходимо **выбрать вид помехи**, для чего нажмите клавишу <F5>, на экране появится окно:

Обобщенно-гауссовское распределение
Гауссовское распределение
Лапласовское распределение

Для выбора нужно подвести курсор к нужному виду помехи и нажать на <Enter>, после чего программа вернётся в режим изменения параметров. Далее следует изменить параметры в соответствии с заданием. Для изменения значения какого-либо параметра подведите курсор к его текущему значению и введите на этом месте новое значение или измените отдельные цифры. Лишние символы удаляются с помощью клавиши пробел. Допускается наличие пробелов между знаками числа.

Параметр «Вероятность, 1 (случ)» учитывается только при формировании случайной двоичной последовательности.

Параметр ОГР помехи следует задавать в диапазоне 0.6...10. СКО помехи не должно быть значительно меньше амплитуды сигнала, равной 1 В. Рекомендуется задавать СКО в диапазоне 0.2...2 В.

Учитывая, что моделирование осуществляется с частотой дискретизации

1000Гц, несущую частоту следует выбирать порядка 100 Гц, длительность символа – 20...50 мс. Параметр ОГР БНП для асимптотически оптимального приёмника должен совпадать с параметром ОГР помехи. Для линейного приёмника этот параметр равен 2, для идеального ограничителя 1.

После ввода всех значений на экране появится функциональная схема системы передачи дискретной информации и начнётся моделирование её работы. В нижней части экрана будут указаны общее число переданных символов и число ошибок, а также значения каждого символа (переданного и принятого). После того, как моделирование будет закончено, можно будет выбрать любые два соседних символа и просмотреть осциллограммы в нескольких точках схемы. Для этого нужно выделить нужные символы с помощью клавиш перемещения курсора и нажать <Enter>. Для перемещения на 30 символов используются клавиши <PgUp> и <PgDn>. Можно выбрать символы и с помощью мыши. Первое нажатие левой кнопки мыши выделяет символ.

После установки всех необходимых параметров для продолжения исследований нажмите клавишу <F6>. После этого программа войдет в режим выбора исследуемых характеристик:

Осциллограф
Статистическое определение помехоустойчивости
Гистограмма
Коэффициент корреляции
Спектр
Характеристика БНП
ФРВ помехи
Изменение параметров

3.4. Осциллограф

Работа данного режима напоминает работу двухлучевого осциллографа. Верхний рисунок соответствует 1-й точке, нижний – другой выбранной Вами точке.

Ввод значений масштабов .2.0 и .2.0 номеров точек аналогичен режиму «Изменение параметров». Для окончания ввода следует нажать <F9>.

3.5. Статистическое определение помехоустойчивости

Данный режим состоит из двух подрежимов. В режиме «100 символов» на экран выводятся переданные и принятые символы и число ошибок. Имеется возможность просмотреть осциллограммы в любых точках канала для интересующего Вас символа (например, ошибочно принятого). Для этого введите номер интересующего Вас символа. Дальнейшая работа аналогична режиму «Осциллограф». Можно просмотреть несколько символов. Для окончания просмотра введите вместо номера символа «0».

В режиме «до 1000 символов» подсчитывается число ошибок при передаче любого числа символов, введённого Вами (до 1000). Возможности просмотра осциллограмм в этом режиме нет.

Нажатие кнопки на выделенном символе выбирает его. После выбора символа потребуется ввести номера точек схемы. Всего можно выбрать от 1 до 4 точек одновременно. После этого появятся осциллограммы, соответствующие двум символам. Можно перемещаться к соседним символам, используя клавиши «Курсор влево» и «Курсор вправо». Для возврата к схеме следует нажать <Esc>.

Кроме выбора символа и просмотра осциллограмм, имеется возможность расчёта гистограмм, спектров и автокорреляционных функций. Для этого следует выбрать одну из точек схемы аналогично тому, как выбираются символы. Для переключения от выбора символа к выбору точки используется клавиша <Tab>. При использовании мыши нажимать эту клавишу не требуется. В режиме выбора точки верхняя часть экрана, в которой расположена схема, выделяется жёлтой рамкой. После выбора точки начнётся расчёт характеристик. По мере его выполнения будут указываться клавиши, с помощью которых можно просмотреть каждую из рассчитанных характеристик. Вызвать гистограмму можно, не дожидаясь расчёта остальных характеристик. Под гистограммой указываются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Эксцесс рассчитывается как нормированный четвёртый момент (без вычитания 3).

3.6. Гистограмма

Строится гистограмма процесса в любой точке схемы. Вычисляются математическое ожидание, дисперсия и эксцесс. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0,5–1 Вт.

3.7. Коэффициент корреляции

Вычисляется коэффициент корреляции между сигналами 0 и 1.

3.8. Спектр

Строится амплитудный спектр сигнала в любой точке канала по 200 отсчётам.

С помощью клавиши <F5> вызывается график функции БНП.

С помощью клавиши <F6> вызывается теоретический график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха. На этом же графике показываются экспериментальные значения вероятностей ошибок. Эти вероятности хранятся до изменения вида модуляции или любого из параметров, кроме СКО помехи и порога решающего устройства.

3.9. Характеристика БНП и ФРВ помехи

При построении характеристики БНП не учитывается дисперсия помехи, так как для помех с обобщённо гауссовским распределением не требуется учёта дисперсии при работе БНП. При построении ФРВ помехи дисперсия учитывается. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0.5–1 Вт.

Изменение параметров.

Во всех случаях для возврата к схеме и для перехода от схемы к главному меню используются клавиша <Esc> или правая кнопка мыши. После возврата в главное меню все введённые значения сохраняются, поэтому их не требуется каждый раз вводить заново. При вводе нескольких параметров можно вернуться к предыдущему окну с помощью клавиши <Esc>.

Для выхода из программы следует выйти в главное меню и нажать <Alt>–<X>.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое помехоустойчивость радиосигналов?
2. Поясните возможные методы получения и приёма радиосигналов ФМ.
3. Каковы особенности выполнения демодуляторов радиосигналов ФМ?
4. Чем объясняется более высокая помехоустойчивость фазовой манипуляции по сравнению с амплитудной манипуляцией?
5. Нарисуйте радиосигнал с ФМ.
6. Расскажите о методах формирования ФМ радиосигналов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование модели ОФМ канала связи

1. Цель работы

Закрепление теоретического материала, экспериментальные исследования радиотехнических систем передачи и оптимального приёма дискретных сообщений, а также усвоение принципов реализации цифровых методов формирования и обработки сигналов путём моделирования на ПЭВМ.

2. Подготовка к работе

2.1. Домашнее задание

Изучить работу системы передачи дискретной информации с ОФМ, при различных ПРВ (плотность распределения вероятности) помехи.

3. Лабораторный эксперимент

3.1. Лабораторная установка

На рис. Л4.1 представлена модель АМ канала связи. С помощью условных обозначений показаны:

ИС – источник сигнала;

Г – гетеродин;

ЛС – линия связи;

ИП – источник помех;

БНП – блок нелинейного преобразования;

Сум – сумматор;

РУ – решающее устройство;

ГТС – генератор тактовых сигналов.

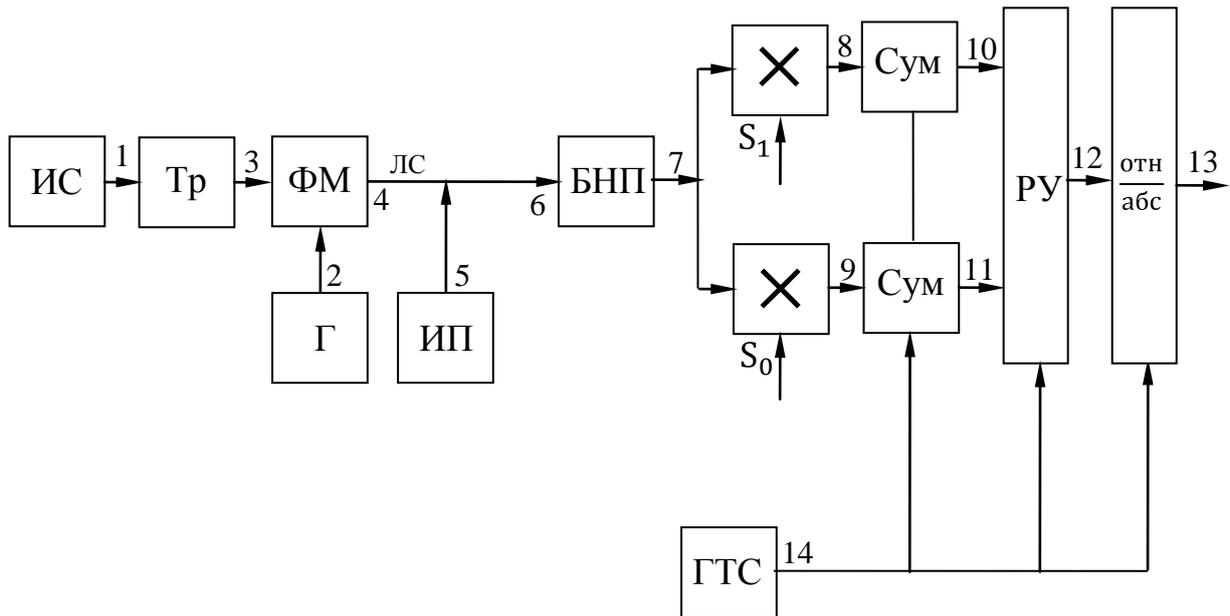


Рис. Л4.1. Модель ОФМ канала связи

3.2. Порядок проведения исследования

Программа исследует работу системы передачи дискретной информации с ОФМ при различных ПРВ помехи.

Для работы с программой не требуется хорошо ориентироваться в расположении алфавитных клавиш, так как используются только клавиши перемещения курсора, функциональные клавиши, <Enter>, <.>, пробел и цифровые клавиши, вместо которых можно использовать клавиши перемещения курсора.

Во всех случаях после получения результата для продолжения работы программы следует нажимать клавишу <Enter>.

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Выберите пункт «Модуляция» и задайте вид модуляции. После этого выберите пункт «Помеха». Появится окно, в котором требуется ввести 2 числа: параметр обобщённо гауссовского распределения помехи и среднеквадратическое отклонение. После задания вида модуляции и характеристик помехи выберите пункт «Моделирование». После этого потребуется последовательно задать вид последовательности (случайная или детерминированная 101010), несущую частоту, длительность символа и общее число символов, параметр обобщённо гауссовского распределения блока безынерционного нелинейного преобразования, включаемого на входе приёмника.

Для запуска программы необходимо загрузить файл .exe. После загрузки программа входит в режим ввода и изменения параметров.

3.3. Изменение параметров

В данном режиме на экране появляется перечень параметров, которые

следует выбрать в соответствии с заданием. Пример в табл. Л.4.1.

Таблица Л.4.1

Вид модуляции	
Частота, Гц	
Разность фаз, °	
Мощность сигнала, Вт	
Вид последовательности 1–1111, 2–1010, 3–1000, 4–случ	
Вероятность, 1 (случ)	
Длительность символа, мс	
Помеха	
Дисперсия помехи, Вт	
Параметр БНП	

Запустите файл lab1.exe. Появится главное меню программы. Необходимо осуществить выбор **вида манипуляции**, для чего необходимо нажать <F3>, на экране появится окно с четырьмя возможными видами манипуляции: АМ; ЧМ; ФМ; **ОФМ**.

Следует подвести курсор к нужному вам виду и нажать <Enter>, программа вернётся в режим изменения параметров.

После выбора вида модуляции ОФМ, **по указанию преподавателя** необходимо **выбрать вид помехи**, для чего нажмите клавишу <F5>, на экране появится:

Обобщенно-гауссовское распределение
Гауссовское распределение
Лапласовское распределение

Для выбора нужно подвести курсор к нужному виду помехи и нажать на <Enter>, после чего программа вернётся в режим изменения параметров. Далее следует изменить параметры в соответствии с заданием. Для изменения значения какого-либо параметра подведите курсор к его текущему значению и введите на этом месте новое значение или измените отдельные цифры. Лишние символы удаляются с помощью клавиши пробел. Допускается наличие пробелов между знаками числа.

Параметр «Вероятность, 1 (случ)» учитывается только при формировании случайной двоичной последовательности.

Параметр ОГР помехи следует задавать в диапазоне 0.6...10. СКО помехи не должно быть значительно меньше амплитуды сигнала, равной 1 В. Рекомендуется задавать СКО в диапазоне 0.2...2 В.

Учитывая, что моделирование осуществляется с частотой дискретизации 1000Гц, несущую частоту следует выбирать порядка 100 Гц, длительность символа – 20...50 мс. Параметр ОГР БНП для асимптотически оптимального при-

ёмника должен совпадать с параметром ОГР помехи. Для линейного приёмника этот параметр равен 2, для идеального ограничителя – 1.

После ввода всех значений на экране появится функциональная схема системы передачи дискретной информации и начнётся моделирование её работы. В нижней части экрана будут указаны общее число переданных символов и число ошибок, а также значения каждого символа (переданного и принятого). После того, как моделирование будет закончено, можно будет выбрать любые два соседних символа и просмотреть осциллограммы в нескольких точках схемы. Для этого нужно выделить нужные символы с помощью клавиш перемещения курсора и нажать <Enter>. Для перемещения на 30 символов используются клавиши <PgUp> и <PgDn>. Можно выбрать символы и с помощью мыши. Первое нажатие левой кнопки мыши выделяет символ.

После установки всех необходимых параметров для продолжения исследований нажмите клавишу <F6>. После этого программа войдёт в режим выбора исследуемых характеристик:

Осциллограф
Статистическое определение помехоустойчивости
Гистограмма
Коэффициент корреляции
Спектр
Характеристика БНП
ФРВ помехи
Изменение параметров

3.4. Осциллограф

Работа данного режима напоминает работу двухлучевого осциллографа. Верхний рисунок соответствует 1-й точке, нижний – другой выбранной Вами точке.

Ввод значений масштабов .2.0 и .2.0 номеров точек аналогичен режиму «Изменение параметров». Для окончания ввода следует нажать <F9>.

3.5. Статистическое определение помехоустойчивости

Данный режим состоит из двух подрежимов. В режиме «100 символов» на экран выводятся переданные и принятые символы и число ошибок. Имеется возможность просмотреть осциллограммы в любых точках канала для интересующего Вас символа (например, ошибочно принятого). Для этого введите номер интересующего Вас символа. Дальнейшая работа аналогична режиму «Осциллограф». Можно просмотреть несколько символов. Для окончания просмотра введите вместо номера символа «0».

В режиме «до 1000 символов» подсчитывается число ошибок при передаче любого числа символов, введённого Вами (до 1000). Возможности просмотр-

ра осциллограмм в этом режиме нет.

Нажатие кнопки на выделенном символе выбирает его. После выбора символа потребуется ввести номера точек схемы. Всего можно выбрать от 1 до 4 точек одновременно. После этого появятся осциллограммы, соответствующие двум символам. Можно перемещаться к соседним символам, используя клавиши «Курсор влево» и «Курсор вправо». Для возврата к схеме следует нажать <Esc>.

Кроме выбора символа и просмотра осциллограмм, имеется возможность расчёта гистограмм, спектров и автокорреляционных функций. Для этого следует выбрать одну из точек схемы аналогично тому, как выбираются символы. Для переключения от выбора символа к выбору точки используется клавиша <Tab>. При использовании мыши нажимать эту клавишу не требуется. В режиме выбора точки верхняя часть экрана, в которой расположена схема, выделяется жёлтой рамкой. После выбора точки начнётся расчёт характеристик. По мере его выполнения будут указываться клавиши, с помощью которых можно просмотреть каждую из рассчитанных характеристик. Вызвать гистограмму можно, не дожидаясь расчёта остальных характеристик. Под гистограммой указываются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Эксцесс рассчитывается как нормированный четвёртый момент (без вычитания 3).

3.6. Гистограмма

Строится гистограмма процесса в любой точке схемы. Вычисляются математическое ожидание, дисперсия и эксцесс. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0,5–1 Вт.

3.7. Коэффициент корреляции

Вычисляется коэффициент корреляции между сигналами 0 и 1.

3.8. Спектр

Строится амплитудный спектр сигнала в любой точке канала по 200 отсчётам.

С помощью клавиши <F5> вызывается график функции БНП.

С помощью клавиши <F6> вызывается теоретический график зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха. На этом же графике показываются экспериментальные значения вероятностей ошибок. Эти вероятности хранятся до изменения вида модуляции или любого из параметров, кроме СКО помехи и порога решающего устройства.

3.9. Характеристика БНП и ФРВ помехи

При построении характеристики БНП не учитывается дисперсия помехи, так как для помех с обобщённо гауссовским распределением не требуется учёта

дисперсии при работе БНП. При построении ФРВ помехи дисперсия учитывается. Для работы этого режима рекомендуется установить значение дисперсии 0.5–1 Вт.

Изменение параметров.

Во всех случаях для возврата к схеме и для перехода от схемы к главному меню используются клавиша <Esc> или правая кнопка мыши. После возврата в главное меню все введённые значения сохраняются, поэтому их не требуется каждый раз вводить заново. При вводе нескольких параметров можно вернуться к предыдущему окну с помощью клавиши <Esc>.

Для выхода из программы следует выйти в главное меню и нажать <Alt>–<X>.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое помехоустойчивость радиосигналов?
2. Поясните возможные методы получения и приёма радиосигналов ОФМ.
3. Каковы особенности выполнения демодуляторов радиосигналов ОФМ?
4. Нарисуйте радиосигнал с ОФМ.
5. Расскажите о методах формирования ОФМ радиосигналов.
6. Какую зависимость называют рабочей характеристикой приёмника?

Содержание

Общие положения.....	3
Литература.....	7
1. Краткие теоретические сведения.....	7
2. Помехоустойчивость дискретных сигналов при оптимальном приёме.....	8
Оценка вероятности ошибочного приёма дискретных сигналов с полностью известными параметрами.....	12
4. Помехоустойчивость дискретных сигналов со случайными параметрами при оптимальном приёме.....	15
5. Помехоустойчивость дискретных сигналов при некогерентном приёме.....	16
6. Помехоустойчивость дискретных сигналов со случайными существенными параметрами при оптимальном приёме.....	18
7. Алгоритмы формирования дискретных сигналов.....	20
8. Алгоритм формирования помехи.....	21
9. Алгоритм демодуляции дискретных сигналов.....	22
10. Первичная статистическая обработка данных.....	24
10.1. Проверка соответствия выбранной модели распределения исходным данным.....	24
10.2. Критерий χ^2 Пирсона.....	25
11. Вопросы для самостоятельной подготовки.....	26
Лабораторная работа № 1. Исследование модели АМ канала связи...	28
Лабораторная работа № 2. Исследование модели ЧМ канала связи....	34
Лабораторная работа № 3. Исследование модели ФМ канала связи...	40
Лабораторная работа № 4. Исследование модели ОФМ канала связи...	46