

Содержание

Практическое занятие №1 Расчет помехоустойчивости приемника-обнаружителя сигналов со случайной начальной фазой	4
Практическое занятие №2 Расчет помехоустойчивости приемника-обнаружителя федингующего сигнала	8
Практическое занятие №3 Расчет помехоустойчивости приемника-различителя сигналов со случайной начальной фазой	10
Практическое занятие №4 Расчет помехоустойчивости приемника-различителя сигналов при наличии пуассоновской помехи	12
Практическое занятие №5 Расчет помехоустойчивости приемника-измерителя параметров сигнала	14
Практическое занятие №6 Расчет помехоустойчивости приемника-измерителя при наличии коррелированных шумов	16
Практическое занятие №7 Расчет помехоустойчивости линейного фильтра	18
Практическое занятие №8 Расчет помехоустойчивости нелинейного фильтра	21
Практическое занятие №9 Расчет помехоустойчивости адаптивного фильтра	23
Практическое занятие №10 Помехоустойчивость основных способов кодирования сообщений	27
Приложение. Градации достоверности передачи информации	32

Практическое занятие №1

Расчет помехоустойчивости приемника-обнаружителя сигналов со случайной начальной фазой

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-обнаружителя радиосигналов.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

В задаче обнаружения сигнала требуется наилучшим образом по заданному критерию оптимальности на основании наблюдения процесса ответить на вопрос, содержит ли наблюдаемый процесс сигнал вместе с шумом или является только шумом.

Критерием оптимальности называется правило, по которому из всех возможных обнаружителей можно выбрать наилучший. Наиболее общим критерием оптимального обнаружения является критерий Байеса, или иначе - критерий минимума среднего риска. С точки зрения критерия Байеса оптимальным считается такой обнаружитель, который имеет минимальную вероятность ошибочных решений с учетом их "веса" или степени нежелательности.

При обнаружении сигнала могут быть четыре ситуации:

- 1) правильное обнаружение (по), когда сигнал на входе обнаружителя существует и принимается решение о его наличии;
- 2) правильное необнаружение (пн), когда сигнала на входе нет и принимается решение об его отсутствии;
- 3) пропуск сигнала (проп), когда сигнал на входе существует, однако принимается решение об его отсутствии;
- 4) ложная тревога (лт), когда сигнала на входе нет, но принимается решение о его присутствии.

С помощью графа исходов, представленного на рис.1. можно рассчитать вероятность принятия ошибочного решения $P_{ош}$. На рис.1 приняты следующие обозначения: $P H_1$, $P H_0$ - априорные вероятности наличия и отсутствия сигнала; $P_{no} = P A | H_1$ - условная вероятность правильного обнаружения, соответствующая вероятности правильного решения A при условии, что в действительности сигнал существует; $P_{nn} = P A | H_0$ - условная вероятность правильного необнаружения, соответствующая вероятности правильного решения A при условии, что в действительности сигнала нет; $P_{проп} = P \bar{A} | H_1$ - условная

вероятность пропуска, соответствующая вероятности ошибочного решения \bar{A} при условии, что в действительности сигнал есть; $P_{лт} = P \bar{A} | H_0$ – условная вероятность ложной тревоги, соответствующая вероятности ошибочного решения \bar{A} при условии, что сигнала в действительности нет.

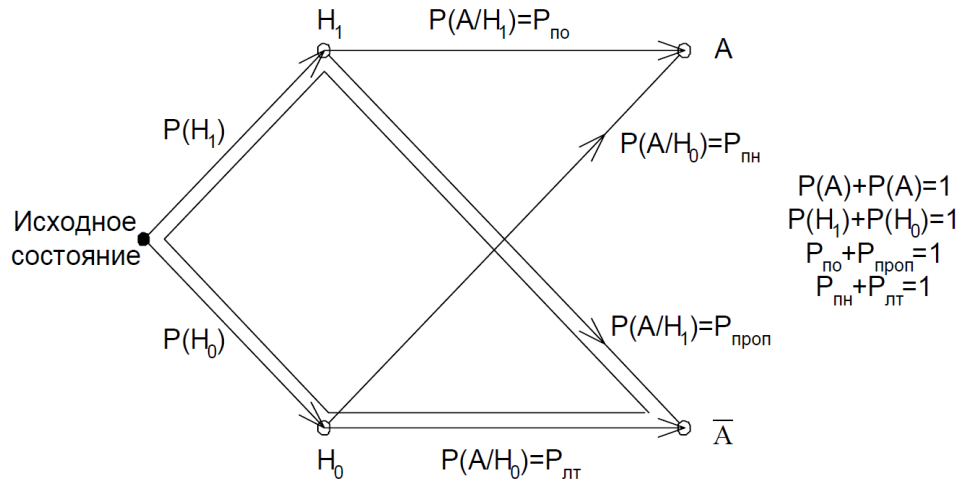


Рис. 1. Граф исходов

Вероятность принятия ошибочного решения определяется выражением:

$$P_{ош} = P \bar{A} = P H_1 P \bar{A} | H_1 + P H_0 P \bar{A} | H_0 =$$

$$= P H_1 P_{проп} + P H_0 P_{лт}. \quad (1.1)$$

Используя условные вероятности $P_{по}$, $P_{лт}$ и выражение (1.1), можно записать следующее выражение для среднего риска процесса обнаружения:

$$\bar{R} = P H_1 (1 - P_{по}) C_{проп} + P H_0 P_{лт} C_{лт}, \quad (1.2)$$

где $C_{проп}$, $C_{лт}$ - веса ошибочных решений.

Вынесем в выражении (1.2) за скобки $P H_1 C_{проп}$, тогда получим:

$$\bar{R} = P H_1 C_{проп} (1 - P_{по} - \Lambda_0 P_{лт}),$$

где Λ_0 - весовой коэффициент, определяемый выражением:

$$\Lambda_0 = \frac{P H_0 C_{лт}}{P H_1 C_{проп}}. \quad (1.3)$$

Из анализа (1.3) следует, что условие минимизации \bar{R} заключается в получении максимального значения разности $P_{no} - \Lambda_0 P_{lm}$, которую называют взвешенной разностью.

Критерий Неймана-Пирсона записывается в виде:

$$P_{lm} = const; P_{no} \rightarrow \max.$$

Пусть в результате наблюдения выборки $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ по выбранному критерию оптимальности должно быть получено одно из двух взаимоисключающих решений: A – сигнал есть; \bar{A} – сигнала нет. Каждая возможная выборка представляется в многомерном пространстве одной точкой. Оптимальный обнаружитель должен разделить пространство выборок на два соприкасающихся пространства X и \bar{X} . Если точка M , соответствующая k -й выборке $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, попадает в пространство X – принимается решение A , в противном случае – решение \bar{A} . В соответствии с критерием Неймана-Пирсона можно записать:

$$P_{no} - \Lambda_0 P_{lm} = \int \dots \int_X [p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 1) - \Lambda_0 p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 0)] dX \rightarrow \max,$$

где $p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 1)$ и $p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 0)$ – условные n -мерные плотности вероятности выборки $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ при наличии сигнала ($\lambda = 1$) и при отсутствии сигнала ($\lambda = 0$), соответственно.

Выполнение приведенного выше условия возможно при положительной подынтегральной разности:

$$p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 1) - \Lambda_0 p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 0) > 0,$$

тогда получаем:

$$\frac{p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 1)}{p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 0)} > \Lambda_0. \quad (1.4)$$

Следовательно, обнаружитель должен вычислять величину:

$$\Lambda = \frac{p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 1)}{p(x_1, \dots, x_n | \lambda = 0)}, \quad (1.5)$$

которая называется отношением правдоподобия. В результате получаем решающее правило:

$$\Lambda \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \Lambda_0. \quad (1.6)$$

Для определения структуры оптимального приемника-обнаружителя, формирующего отношение правдоподобия и расчета его потенциальной помехоустойчивости необходимо конкретизировать плотности вероятности, входящие в (5).

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию.

Затем преподаватель конкретизирует модель радиосигнала со случайной начальной фазой, законы амплитудной и фазовой модуляции, априорное распределение фазы сигнала, а также закон распределения шума. Студенты самостоятельно конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (1.5) и определяют отношение правдоподобия, а затем конкретизируют вид решающего правила (1.6). На этом этапе практического занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-обнаружителя.

Далее студенты используя выражение для расчета вероятности правильного обнаружения вычисляют значения этой вероятности при заданных преподавателем значениях вероятности ложной тревоги и отношения сигнал-шум. Преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы:

1. Что такое потенциальная помехоустойчивость?
2. Что такое оптимальное решающее правило?
3. Назовите критерии обнаружения сигнала. В чем их суть?
4. Сформулируйте постановку задачи обнаружения сигналов.
5. Что такое отношение правдоподобия?
6. Что такое квадратурный обнаружитель сигнала?
7. Почему используется операция логарифмирования функции правдоподобия?

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №2

Расчет помехоустойчивости приемника-обнаружителя федингующего сигнала

Цель практическое занятие – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-обнаружителя при условии замираний радиосигнала.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

В системах радиосвязи на практике случайной является не только фаза, но и амплитуда радиосигналов, причем эта случайность обусловлена:

- перемещением приемника и передатчика в пространстве;
- прохождением сигнала через неоднородную среду (плохие метеоусловия).

Флуктуации амплитуды, в данном случае, называют федингом или замираниями сигнала. Фединг можно рассматривать как результат воздействия на сигнал мультипликативной помехи. Как правило, фединг проявляется в форме затухания радиоприема или колебания слышимости при радиоприеме. Замирания сигнала, вызванные перемещением приемника и передатчика в пространстве, называют быстрыми, а замирания вызванные прохождением сигнала через неоднородную среду - медленными.

На практике обычно амплитуда a и фаза φ сигнала статистически независимы и имеют соответственно релеевское и равномерное распределения:

$$p_a = \frac{a}{\sigma_a^2} \exp\left\{-\frac{a^2}{2\sigma_a^2}\right\}, a \geq 0, \quad (2.1)$$

$$p_\varphi = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

где σ_a^2 - дисперсия флуктуации амплитуды сигнала.

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию.

Затем преподаватель конкретизирует модель федингующего радиосигнала, законы амплитудной и фазовой модуляции, а также закон распределения шума. Студенты самостоятельно конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (1.5) и определяют отношение правдоподобия, а затем конкретизируют вид решающего правила (1.6), используя выражения (2.1). На этом этапе практического занятия преподаватель проверяет правильность расчетов.

Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-обнаружителя. Далее студенты конкретизируют выражение для расчета вероятности правильного обнаружения и вычисляют значения этой вероятности при заданных преподавателем значениях вероятности ложной тревоги и отношения сигнал-шум.

Затем студенты сравнивают полученный результат с результатом, полученным на практическом занятии №1.

Преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Что такое фединг радиосигнала?
2. В чем причина замираний радиосигнала?
3. Какие замирания радиосигнала бывают?
4. Назовите меры борьбы с замираниями радиосигнала.

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №3

Расчет помехоустойчивости приемника-различителя сигналов со случайной начальной фазой

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-различителя радиосигналов.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

В задаче различения сигналов требуется наилучшим образом по заданному критерию оптимальности на основании наблюдения процесса ответить на вопрос, содержит ли наблюдаемый процесс сигнал $s_1 t$ или сигнал $s_2 t$. Устройство, решающее задачу различения называют приемником-различителем.

В качестве критерия оптимального различения сигналов используется критерий идеального наблюдателя. В соответствии с этим критерием нежелательны любые ошибочные решения, т.е. вес ошибок одинаков $C_{проп} = C_{лт} = 1$. Тогда средний риск может быть определен выражением:

$$\bar{R} = P_{H_1} (1 - P_{no}) + P_{H_0} P_{лт} = P_{ош}. \quad (3.1)$$

Таким образом, для критерия идеального наблюдателя весовой множитель определяется выражением:

$$\Lambda_0 = \frac{P_{H_0}}{P_{H_1}}. \quad (3.2)$$

Так как априорные вероятности гипотез известны, то можно записать следующее решающее правило:

$$\Lambda \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \Lambda_0, \quad \Lambda = \frac{p_{s1}(x, t)}{p_{s2}(x, t)}, \quad (3.3)$$

где $p_{s1}(x, t)$ и $p_{s2}(x, t)$ - функционалы плотности вероятности при непрерывном наблюдении.

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию.

Затем преподаватель конкретизирует модели радиосигналов и модель наблюдения, закон модуляции, а также закон распределения шума. Студенты самостоятельно конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (1.5) и определяют отношение правдоподобия, а затем конкретизируют вид решающего правила (3.3). На этом этапе практического занятия преподаватель проверяет правильность расчетов.

Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-различителя.

Далее студенты конкретизируют выражение для расчета вероятности ошибочного решения и вычисляют значения этой вероятности при заданных преподавателем значениях отношения сигнал-шум и коэффициента корреляции сигналов.

Преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постановку задачи различения сигналов.
2. Сравните помехоустойчивость приемника-различителя при различных видах манипуляции.
3. В чем разница между когерентным и некогерентным приемом радиосигналов?
4. Сформулируйте критерий идеального наблюдателя.
5. Назовите область применения критерия идеального наблюдателя.

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №4
Расчет помехоустойчивости приемника-различителя сигналов при
наличии пуассоновской помехи

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-различителя в случае приема негауссовской помехи.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Помехи, действующие в канале связи не всегда можно считать гауссовскими. В некоторых случаях (например, при постановке организованных помех) помеховую обстановку описывают при помощи пуассоновской хаотической импульсной помехи. Под пуассоновской хаотической импульсной помехой $\eta(t)$ понимается последовательность радиоимпульсов с нормированной огибающей $h(t)$, случайными и взаимозависимыми амплитудами a_i , начальными фазами φ_i и моментами появления импульсов τ_i :

$$\eta(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i h(t - \tau_i) \cos \omega t + \varphi_i, t \geq 0. \quad (4.1)$$

Случайные амплитуды имеют одну и ту же плотность вероятности $p(a)$, начальные фазы равномерно распределены в интервале $-\pi, \pi$, моменты появления импульсов представляют собой пуассоновский поток с интенсивностью ν , длительности импульсов предполагаются значительно меньше фиксированной длительности полезных сигналов.

Принятое колебание, с учетом пуассоновской хаотической импульсной помехи, можно записать в виде:

$$\xi(t) = \theta s_1(t) + (1 - \theta) s_2(t) + \eta(t) + n(t), 0 \leq t \leq T, \quad (4.2)$$

где $s_1(t)$, $s_2(t)$ - известные полезные сигналы, θ - параметр различения.

Алгоритм работы корреляционного приемника определяется выражением:

$$\frac{2}{N} \int_0^T \xi(t) s_1(t) - s_2(t) dt \underset{s_2}{\overset{s_1}{>}} h, \quad (4.3)$$

где h - значение порога.

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию.

Затем преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов, закон модуляции, а также закон распределения гауссовской помехи и интенсивность пуассоновской импульсной хаотической помехи. Студенты самостоятельно, для модели (4.2), конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (1.5) и определяют отношение правдоподобия, а затем конкретизируют вид решающего правила (3.3). На этом этапе практического занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-различителя.

Далее студенты конкретизируют выражение для расчета вероятности полной ошибки и вычисляют значения этой вероятности при заданных преподавателем значениях отношения сигнал-шум.

Преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постановку задачи различения сигналов при действии пуассоновской помехи.
2. Что такое пуассоновская хаотическая импульсная помеха?
3. Каков характер влияния пуассоновская хаотическая импульсная помеха на полезный радиосигнал?
4. Как вид модуляции влияет на помехоустойчивость приемника-различителя?

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.

4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №5

Расчет помехоустойчивости приемника-измерителя параметров сигнала

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-измерителя при оценке значений неэнергетических и энергетических параметров сигнала.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Устройство, предназначенное для измерения параметров сигнала, будем называть приемником-измерителем. Измеренные значения параметров не обязательно воспроизведут истинные значения параметров, так как в реальных условиях полезный сигнал поступает на приёмную сторону только в смеси с помехами. Кроме того, на измерения может существенно влиять наличие у сигнала не только полезных (несущих необходимую информацию) параметров, но и параметров, не известных потребителю и не содержащих интересных для него сведений. Полезные параметры сигнала, содержащие нужную абоненту информацию, будем называть **информационными**, а остальные неизвестные параметры – **неинформационными**.

Пусть случайная величина s имеет определённое распределение, но в нём неизвестен параметр λ . Известна условная плотность вероятности $p(s|\lambda)$.

Для оценки неизвестного параметра λ , проводят наблюдения случайной величины s и получают выборку, которую можно представить как:

$$\xi = \langle \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \rangle. \quad (5.1)$$

Формируемая оценка:

$$\hat{\lambda} = f(\xi), \quad (5.2)$$

имеет практическую ценность, если обладает свойствами:

1) несмещённости (математическое ожидание оценки параметра совпадает его истинным значением $M \hat{\lambda} = \lambda_u$);

2) состоятельности (с увеличением объёма выборки оценка сходится по вероятности к истинному значению оцениваемого параметра

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \hat{\lambda} - \lambda_0 \right| < \varepsilon \right\} = 1);$$

3) эффективности (наилучшая оценка имеет наименьшую дисперсию).

На практике для оценки параметров сигналов наиболее часто применяют два метода:

1) метод максимума апостериорной плотности вероятности:

$$p(\lambda | \xi) = k p(\lambda) L(\lambda), \quad (5.3)$$

здесь k – коэффициент пропорциональности; $p(\lambda)$ – априорная плотность вероятности оцениваемого параметра; $L(\lambda)$ – функция правдоподобия;

2) метод максимума функции правдоподобия:

$$L(\lambda) = p(\xi | \lambda) = k \exp\left(-\frac{1}{N_0} \int_0^T \xi(t) - s(t, \lambda)^2 dt\right). \quad (5.4)$$

Сами оцениваемые параметры делятся на два типа: энергетические, т.е. те параметры, от которых зависит энергия сигнала (амплитуда и длительность сигнала), и неэнергетические (частота, фаза, время запаздывания сигнала).

2.Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию.

Первая часть занятия посвящена расчету показателей помехоустойчивости приемника различителя в случае оценки неэнергетических параметров.

Преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов, и неизвестные неэнергетические параметры, подлежащие оценке, закон модуляции, а также закон распределения гауссовской помехи. Студенты самостоятельно, для заданной модели, конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (1.5) реализуют метод (5.3). На этом этапе практического занятия преподаватель проверяет правильность расчетов.

Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-различителя и определяют значение ошибки оценки параметра и ее зависимость от отношения сигнал-шум.

Первая часть занятия посвящена расчету показателей помехоустойчивости приемника-различителя в случае оценки энергетических параметров. Преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов, и неизвестные энергетические параметры, подлежащие оценке, закон модуляции, а также закон распределения гауссовской помехи. Студенты самостоятельно выполняют аналогичные расчеты

В конце занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постановку задачи определения параметров сигнала.
2. Назовите критерии, в соответствии с которыми формируется оценка параметров сигнала.
3. В чем состоит методика оценки параметров сигнала при малых шумах?
4. Какие параметры сигнала относятся к энергетическим?
5. Какие параметры сигнала относятся к неэнергетическим?
6. Что такое граница Рао-Крамера?
7. Дайте определение функции неопределенности.

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №6

Расчет помехоустойчивости приемника-измерителя при наличии коррелированных шумов

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости приемника-измерителя при действии окрашенных шумов.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Пусть принятое колебание имеет вид:

$$\xi(t) = s(t, \lambda) + n(t), 0 \leq t \leq T, \quad (6.1)$$

где λ - параметр, сигнала подлежащий оценке; $n(t)$ - гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и известной корреляционной функцией:

$$R_n(t_1, t_2) = M \{ n(t_1) n(t_2) \}. \quad (6.2)$$

Задача оценки параметров сигнала на фоне гауссовского коррелированного шума может быть успешно решена путем использования обеляющих фильтров [1-3]. Однако в данном практическом занятии рассмотрим другой вариант решения задачи.

Функционал плотности вероятности для гауссовского шума определяется как:

$$p(n(t)) = C \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T n(t_1) n(t_2) \theta(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \right\}, \quad (6.3)$$

где функция $\theta(t_1, t_2)$ является решением интегрального уравнения:

$$\int_0^T R_n(t_1, t) \theta(t_1, t_2) dt = \delta(t_1 - t_2). \quad (6.4)$$

Функционал правдоподобия имеет вид:

$$F(\lambda) = p(\xi_0^T | \lambda) = C \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \xi(t_1) h_\lambda(t_1) \xi(t_2) h_\lambda(t_2) \theta_n(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \right\}. \quad (6.5)$$

$$\cdot \theta_n(t_1, t_2) dt_1 dt_2.$$

Логарифм (6.5) имеет вид:

$$\ln F(\lambda) = \ln C - \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \xi(t_1) h_\lambda(t_1) \xi(t_2) h_\lambda(t_2) \theta_n(t_1, t_2) dt_1 dt_2. \quad (6.6)$$

Оценка параметра λ находится максимизацией выражения (6.6), при этом получается уравнение:

$$\int_0^T \frac{dh_\lambda(t)}{d\lambda} \xi(t) h_\lambda(t) dt = 0, \quad (6.7)$$

где $h_\lambda(t)$ - импульсная характеристика фильтра.

Основная трудность получения оценки (6.7) на фоне гауссовского коррелированного шума связано с нахождением функции $h_\lambda(t)$. Существуют три выражения для функции $h_\lambda(t)$, подробно рассмотренные в [4].

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию. Далее преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов, и выражения для импульсной характеристики фильтра. Студенты самостоятельно, для заданной модели, конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (6.5) и реализуя метод максимального правдоподобия получают конкретный вид выражения (6.7). Затем преподаватель проверяет правильность расчетов.

Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему приемника-различителя и определяют значение ошибки оценки параметра и ее зависимость от отношения сигнал-шум.

В конце занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Что понимается под коррелированным шумом?
2. Что такое обесцвечивающий фильтр?
3. В чем суть метода использования обесцвечивающих фильтров?
4. Сформулируйте основные положения методики оценки параметров, которая используется в данном практическом занятии.

4. Литература

1. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
2. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №7

Расчет помехоустойчивости линейного фильтра

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости линейного фильтра при воздействии белого шума.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Задача фильтрации является весьма распространенной. В общем виде ее можно сформулировать так.

Пусть непосредственному наблюдению доступен случайный процесс ξt , являющийся детерминированной функцией от полезного сигнала λt и некоторой помехой ζt :

$$\xi t = F s t, \lambda t, \zeta t. \quad (7.1)$$

Полезный сигнал является функцией много компонентного сообщения $\lambda t = \lambda_1 t, \lambda_2 t, \dots, \lambda_n t$, представляющего собой векторный случайный процесс.

Предполагаются следующие априорные сведения относительно наблюдаемого процесса:

1) известен способ комбинирования сигнала и помехи, т.е. конкурентный вид функции $F \cdot$;

2) сигнал $s t, \lambda t$ является известной функцией аргументов t и λt ;

3) известны все необходимые вероятностные характеристики случайного процесса λt и помехи ζt .

Располагая априорными сведениями, а также доступной непосредственному наблюдения реализацией процесса ξt , необходимо сформировать для каждого момента оценку $\hat{\lambda} t$. Критерием оценки в задачах линейной фильтрации является критерий минимума средней квадратической ошибки:

$$\varepsilon^2 t = M \lambda t - \hat{\lambda} t^2 \rightarrow \min_{\hat{\lambda} t}. \quad (7.2)$$

Пусть уравнение наблюдения и сообщения являются линейными и заданы в виде скалярных разностных уравнений:

$$\xi_k = H_k \lambda_k + n_k, \quad (7.3)$$

$$\lambda_k = \beta_{k-1} \lambda_{k-1} + n_{0k}, \quad (7.4)$$

где $H_k = H t_k$ и $\beta_k = \beta t_k$ являются известными функциями времени.

Совместная плотность вероятности имеет вид:

$$p \lambda_{k-1}, \xi_1^{k-1} = p \xi_1^{k-1} p \lambda_{k-1} | \xi_1^{k-1} \quad (7.5)$$

Тогда апостериорная плотность вероятности на $k-1$ шаге имеет вид:

где R_{k-1} - апостериорная дисперсия.

Апостериорная плотность вероятности на шаге k имеет вид:

$$p \lambda_k | \xi_1^k = C \exp \left\{ - \left(\frac{\lambda_k - \beta_{k-1} \hat{\lambda}_{k-1}}{2 \beta_{k-1}^2 R_{k-1} + D_{0k}} + \frac{\xi_k - H_k \lambda_k}{2 D_k} \right)^2 \right\}. \quad (7.7)$$

На основании (7.7) получаем уравнения для линейного фильтра:

$$\lambda_k = \beta_{k-1} \hat{\lambda}_{k-1} + K_k \left[\xi_k - H_k \beta_{k-1} \hat{\lambda}_{k-1} \right], \quad (7.8)$$

$$K_k = H_k \left(\frac{R_k}{D_k} \right),$$

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{\beta_{k-1}^2 R_{k-1} + D_{ok}} + \frac{H_k^2}{D_k}.$$

Полученные выражения удобны для реализации в цифровых вычислительных машинах.

Линейный фильтр в зависимости от изменения, или не изменения, коэффициента K_k во времени может быть нестационарным или стационарным, соответственно.

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию. Далее преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов, и априорные сведения о полезном сообщении. Студенты самостоятельно, для заданной модели, конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (7.7) и реализуя метод минимума среднеквадратического значения оценки формируют уравнения фильтра (7.8). Затем преподаватель проверяет правильность расчетов. Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему оптимального линейного фильтра и определяют значение ошибки оценки параметра от отношения сигнал-шум.

В конце занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постановку задачи линейной фильтрации.
2. Какие критерии используются для получения оценки параметра?
3. Что такое информационные и сопутствующие процессы?
4. Что такое дискретный белый шум?
5. Что такое формирующий фильтр?

4. Литература

1. Козленко Н.И. Помехоустойчивость дискретной передачи непрерывных сообщений. – М.: Радиотехника, 2003.
2. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
3. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №8

Расчет помехоустойчивости нелинейного фильтра

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости нелинейного фильтра при воздействии белого шума.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Задача фильтрации называется нелинейной, если нелинейным является дифференциальное уравнение, которым описывается информационное сообщение, или уравнение наблюдения содержат нелинейные сообщения.

Для определения оценки $\hat{\lambda}^t$ следует в общем случае определять апостериорную плотность вероятности, которая удовлетворяет уравнению Стратоновича:

$$\frac{\partial p^t, \lambda}{\partial d} = L^t p^t, \lambda + [F^t, \lambda - F^t] p^t, \lambda, \quad (8.1)$$

где

$$F t, \lambda = -\frac{1}{2} [\xi t - s t, \lambda]^T \mathbf{N}^{-1} t, \lambda [\xi t - s t, \lambda],$$

$$F t = \int F t, \lambda p t, \lambda d\lambda,$$

$$L p t, \lambda = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial \lambda_i} a_i t, \lambda p t, \lambda + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 N_{0ij} t, \lambda p t, \lambda}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j}.$$

Оценка $\hat{\lambda} t$ процесса по критерию минимума среднего квадрата ошибки определяется по $p t, \lambda$ из выражения:

$$\hat{\lambda} = \int \lambda p t, \lambda d\lambda. \quad (8.2)$$

Уравнение Стратоновича для апостериорной плотности вероятности представляет собой интегро-дифференциальное уравнение в частных производных и в общем случае не имеет точного решения. На практике наиболее распространение получил приближенный способ решения уравнения Стратоновича, основанной на аппроксимации $p t, \lambda$ нормальной плотностью вероятности:

$$p t, \lambda = 2\pi^{-\frac{n}{2}} |\mathbf{R} t|^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\lambda - \hat{\lambda} t]^T \mathbf{R}^{-1} [\lambda - \hat{\lambda} t] \right\}. \quad (8.3)$$

Получаемые при этом алгоритмы принято называть **квазиоптимальными**.

В рамках практического занятия ограничимся частным случаем, когда сообщение λt описывается скалярным линейным стохастическим дифференциальным уравнением, а нелинейным является только уравнение наблюдения:

$$\xi t = s t, \lambda + n t. \quad (8.4)$$

Уравнение для оценки в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\lambda} t}{dt} &= -\alpha \hat{\lambda} t + \frac{2}{N} R t \frac{\partial s t, \hat{\lambda}}{\partial \hat{\lambda}} [\xi t - s t, \hat{\lambda}], \\ \frac{dR t}{dt} &= \frac{N_0}{2} - 2\alpha R t + \frac{2R^2 t}{N} \left\{ [\xi t - s t, \hat{\lambda}] \frac{\partial^2 s t, \hat{\lambda}}{\partial \lambda^2} - \left[\frac{\partial s t, \hat{\lambda}}{\partial \lambda} \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (8.5)$$

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию. Далее преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов и априорные сведения о полезном сообщении и помехе. Студенты самостоятельно, для заданной модели, конкретизируют уравнение Стратоновича (8.1), уравнения оценки (8.5). Затем преподаватель проверяет правильность расчетов. Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, строят структурную схему нелинейного фильтра и определяют значение ошибки оценки параметра и ее зависимость от отношения сигнал-шум.

В конце занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постановку нелинейной фильтрации.
2. Что такое уравнение Стратоновича?
3. Что представляет собой оператор Фоккера-Планка-Колмогорова?
4. Какие методы решения уравнения Стратоновича существуют?
5. В чем суть метода текущей линеаризации?
6. Что такое квазиоптимальный нелинейный фильтр?

4. Литература

1. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №9

Расчет помехоустойчивости адаптивного фильтра

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости адаптивного фильтра при воздействии белого шума.

Время – 4 часа.

1. Основные теоретические положения

При решении задачи обнаружения, оценки и фильтрации сообщений предполагалось, что статистические характеристики сигналов и помех известны, однако на практике это часто не так. В связи с этим представляет интерес синтез адаптивных (приспосабливающихся) устройств, способных принимать информацию в условиях некоторой неопределенности.

Полезный сигнал зависит не только от информационного параметра λt , но и от ряда дополнительных неизвестных параметров αt :

$$\xi t = s t, \lambda, \alpha + n t. \quad (9.1)$$

Параметры αt называются сопровождающими или сопутствующими. Обычно сопутствующие параметры изменяются во времени гораздо медленнее, чем информационные.

Существуют несколько подходов к решению задач адаптивного оценивания. Рассмотрим кратко основные подходы.

I. Для оценки информационного параметра необходимо определить плотность вероятности $p \lambda | \xi$. По свойству согласованности плотностей вероятности можно записать:

$$p \lambda | \xi = \int p \lambda, \alpha | \xi d\alpha. \quad (9.2)$$

Значение $p \lambda | \xi$ позволяет определить оценку:

$$\hat{\lambda} = \int \lambda p \lambda | \xi d\lambda. \quad (9.3)$$

Таким образом, если определить совместную плотность вероятности $p \lambda, \alpha | \xi$ всех неизвестных параметров, как информационных, так и сопутствующих, то на основании (9.2) и (9.3) можно отыскать значение оценки $\hat{\lambda}$.

В рассмотренном подходе задача определения сопутствующих параметров не ставится.

Если $p \alpha | \xi$ узка, так что ее при интегрировании можно принять за дельта-функцию, то имеем:

$$p \lambda | \xi \approx p \lambda | \xi, \hat{\alpha}. \quad (9.4)$$

Оценка сопутствующего параметра может быть определена по критерию максимума правдоподобия.

В случае, когда $p \alpha | \xi$ не является дельтаобразной ее можно аппроксимировать суммой дельта-функций:

$$p(\mathbf{a} | \xi) \approx \sum_i p_i \delta(\mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}}_i). \quad (9.5)$$

II. Другой подход основан на рассмотрении совместного процесса λ, \mathbf{a} .

Уравнение для апостериорной вероятности совместного процесса имеет вид:

$$\frac{\partial p(t, \lambda, \mathbf{a})}{\partial t} = L_\lambda p(t, \lambda, \mathbf{a}) + \left[F(t, \lambda) - \int F(t, \lambda) p(t, \lambda, \mathbf{a}) d\lambda d\mathbf{a} \right] p(t, \lambda, \mathbf{a}). \quad (9.6)$$

Уравнение (9.6) получено непосредственным использованием уравнения Стратоновича. В уравнении (9.6) принято, что сопутствующие параметры изменяются во времени медленнее, чем информационные, т.е. на интервале оценивания справедливо выражение:

$$\frac{d\mathbf{a}(t)}{dt} = 0. \quad (9.7)$$

III. Наиболее распространенным способом решения задачи адаптивного оценивания является алгоритм «разделения». Апостериорную плотность вероятности можно представить в виде:

$$p(t, \lambda, \mathbf{a}) = p(t, \lambda | \mathbf{a}) p(t, \mathbf{a}). \quad (9.8)$$

Подставив (9.8) в (9.6) и интегрируя обе части по информационному параметру получаем уравнение для плотности вероятности сопутствующего параметра:

$$p(t, \mathbf{a}) = \frac{\exp\left\{ \int_0^t F_\alpha(\tau) d\tau \right\} p(\mathbf{a})}{\int_\alpha \exp\left\{ \int_0^T F_\alpha(\tau) d\tau \right\} p(\mathbf{a}) d\mathbf{a}}. \quad (9.9)$$

Уравнение для $p(t, \lambda | \mathbf{a})$, входящей в (9.8), получается подстановкой (9.8) и (9.9) в (9.6):

$$p(t, \lambda | \mathbf{a}) = L_\lambda p(t, \lambda | \mathbf{a}) + \left[F(t, \lambda) - F_\alpha(t) \right] p(t, \lambda | \mathbf{a}). \quad (9.10)$$

Алгоритм адаптивного оценивания заключается в получении оценок сопутствующих параметров и далее на их основе получения оценки информационного параметра.

Технически алгоритм «разделения» сложнее, чем рассмотренные выше алгоритмы, однако он более работоспособен.

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию. Далее преподаватель конкретизирует модели полезных радиосигналов априорные сведения о информационных и сопутствующих параметрах, а также априорные сведения о помехе. Студенты самостоятельно, для заданной модели, конкретизируют плотности вероятности, входящие в выражение (9.6) и реализуя изложенные методы адаптивного оценивания формируют структуру адаптивных фильтров. Затем преподаватель проверяет правильность расчетов. Затем студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, определяют значение ошибки оценки параметра и ее зависимость от отношения сигнал-шум.

В конце занятия преподаватель проверяет правильность расчетов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Сформулируете постановку задачи адаптивного приема.
2. Назовите основные способы решения задачи адаптивного приема.
3. Какие критерии используются при построении адаптивных фильтров?
4. В чем состоит трудность байесовского подхода построения адаптивных фильтров?
5. В чем суть алгоритма разделения?
6. В чем суть гауссовского приближения в задачах адаптивной фильтрации?
7. В чем трудность алгоритмов гауссовского приближения?
8. В чем суть метода максимального правдоподобия?

4. Литература

1. Макаров А.А. Основы теории потенциальной помехоустойчивости. Учебное пособие. – Новосибирск, 1997 г.
2. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Практическое занятие №10

Помехоустойчивость основных способов кодирования сообщений

Цель практического занятия – практическое освоение методики расчета помехоустойчивости основных способов кодирования сообщений.

Время – 2 часа.

1. Основные теоретические положения

Рассмотрим помехоустойчивость корректирующих кодов при поэлементном приеме и в случае приема комбинации в целом.

Помехоустойчивость корректирующих кодов при поэлементном приеме.

Рассмотрим помехоустойчивость кода без избыточности. Положим, что искажения различных сигналов в кодовых комбинациях статистически независимы. Пусть вероятность p искажения сигнала в кодовой комбинации является одинаковой для всех сигналов.

В каналах с потенциальной помехоустойчивостью вероятность p определяется формулами:

- при когерентном приеме

$$p = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{Q^2} \right) \right), \quad (10.1)$$

- при некогерентном приеме

$$p = \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2} Q^2}, \quad (10.2)$$

где Q - отношение энергии сигнала к удельной интенсивности помехи.

При использовании кодов без избыточности и поэлементном приеме комбинация будет принята правильно при условии правильной регистрации всех сигналов ее составляющих.

Вероятность правильной регистрации комбинации кода без избыточности равна:

$$1 - P = g^{n_0} = (1 - p)^{n_0}, \quad (10.3)$$

где P - вероятность искажения кодовой комбинации; n_0 - минимальная длина комбинации; $g = 1 - p$ - вероятность правильной регистрации отдельного сигнала, и вероятность искажения кодовой комбинации:

$$P = 1 - (1 - p)^{n_0}. \quad (10.4)$$

На практике $p \ll 1$, то $P \approx n_0 p$.

Помехоустойчивость кодов с исправлением ошибок. Для исправления k ошибок код должен иметь минимальное расстояние $d_{\min} \geq 2k + 1$.

Комбинация будет принята правильно, если число ошибок в ней будет не больше k . Вероятность того, что комбинация из n элементов содержит i ошибок, согласно биномиальному закону, равна:

$$P_i = C_n^i p^i (-p)^{n-i}. \quad (10.5)$$

Вероятность правильной регистрации кодовой комбинации из n элементов равна вероятности того, что в ней содержится не более k ошибок:

$$1 - P = P_{i \leq k} = \sum_{i=0}^{i=k} C_n^i p^i (-p)^{n-i}. \quad (10.6)$$

В соответствии с формулой (10.6) определим вероятность ошибки в системе связи с 9, 12 и 15-ти элементными корректирующими кодами, разработанными для передачи дискретного сообщения с числом символов в алфавите $M=32$.

Для 9-ти элементного кода, исправляющего одну ошибку, имеем:

$$P_{Q=9, k=1} = 1 - (-p)^9 + 9p(-p)^8. \quad (10.7)$$

Для 12-ти элементного кода, исправляющего две ошибки, имеем:

$$P_{Q=12, k=2} = 1 - (-p)^{12} + 12p(-p)^{11} + 66p^2(-p)^{10}. \quad (10.8)$$

Для 15-ти элементного кода, исправляющего три ошибки, имеем:

$$P_{Q=15, k=3} = 1 - (-p)^{15} + 15p(-p)^{14} + 105p^2(-p)^{13} + 455p^3(-p)^{12}. \quad (10.9)$$

При одном и том же значении Q корректирующие коды обеспечивают существенное повышение помехоустойчивости каналов связи. Вместе с тем, приведенные выше выражение не дают однозначного сравнения корректирующих кодов между собой. Объективная оценка различных кодов может быть произведена по их помехоустойчивости при передаче информации с одинаковой скоростью или по скорости передачи информации различными кодами с одинаковой помехоустойчивостью.

Помехоустойчивость кодов при приеме комбинации в целом. Как следует из теории потенциальной помехоустойчивости, обработка кодовых комбинаций оптимальными фильтрами является оптимальной в каналах с флуктуационными помехами и, следовательно, прием в целом реализует максимальную помехоустойчивость данного кода. Помехоустойчивость кодов увеличивается с увеличением d_{\min} . Оптимальным кодом называется код с максимальным значением минимального расстояния. Очевидно, что:

$$d_{\min} \leq d_{cp}, \quad (10.10)$$

где

$$d_{cp} = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^{M-1} d_j, \quad (10.11)$$

где d_j - расстояние между данной и какой-либо другой из $M-1$ комбинаций.

Из (10.10) следует, что:

$$d_{\min} \rightarrow \max = d_{cp}. \quad (10.12)$$

Коды, для которых выполняется условие (10.12) называются эквидистантными, т.е. кодами с одинаковыми расстояниями между комбинациями.

Вероятность замены комбинаций в оптимальном коде равна:

$$P = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{2} \gamma Q^2} \right) \right), \quad (10.13)$$

где $\gamma = 1$ - для каналов с ортогональными сигналами, $\gamma = 2$ - для каналов с противоположными сигналами.

Вероятность искажения символов при когерентном приеме кодовых сигналов

$$P_{ошM} \approx M-1 \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{2} \gamma Q^2} \right) \right). \quad (10.14)$$

Для ортогональных сигналов

$$P_{ошM} \approx M-1 \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{Q^2} \right) \right). \quad (10.15)$$

Рассмотренная выше помехоустойчивость эквидистантных кодов оптимальна по критерию максимума минимального кодового расстояния. Однако помехоустойчивость эквидистантного кода также зависит от конкретной формы используемых для передачи его позиций сигналов. Более общим является определение оптимального кода как кода с максимальной потенциальной помехоустойчивостью. Такое определение оптимального кода совпадает с определением оптимальной системы по Котельникову.

Для оптимальной по Котельникову систем кодовых сигналов справедливы выражения для функции взаимной корреляции и вероятности:

$$R_{1,2} = E \frac{1}{M-1}; P_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{M}{M-1} Q^2} \right) \right), \quad (10.16)$$

соответственно:

$$P_{ошM} \approx M - 1 \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{M}{M-1}} Q^2 \right) \right), \quad (10.17)$$

При $M \gg 1$ получаем $M_{1,2} \approx 0$. Значение $M_{1,2} = 0$ имеют ортогональные кодовые сигналы, для которых:

$$M_{1,2} = \int_0^T \psi_i \psi_j dt = 0, \quad (10.18)$$

где ψ_i - кодовая комбинация.

Т.е. достаточно близкими по помехоустойчивости к оптимальному по Котельникову коду являются ортогональные коды, которые обеспечивают передачу символов сообщения ортогональными кодовыми сигналами.

Для ортогональных кодов справедливо:

- при когерентном приеме:

$$P_{ош(КГ)} \approx M - 1 \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{Q^2} \right) \right), \quad (10.19)$$

- при некогерентном приеме:

$$P_{ош(НКГ)} \approx M - 1 \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2} Q^2}. \quad (10.20)$$

2. Порядок проведения практического занятия

При подготовке к занятию.

В период подготовки к практическому занятию студенты, используя материалы лекций и рекомендуемую для практического занятия литературу, изучают учебный материал по теме практического занятия.

Порядок проведения занятия.

Во время проведения занятия преподаватель осуществляет опрос студентов и определяет их готовность к занятию. Далее преподаватель определяет исходные данные для проведения расчетов. Студенты самостоятельно, под руководством преподавателя, выполняют расчеты по формулам (10.7)-(10.9) и (10.14), (10.15) и формулируют выводы. Преподаватель проверяет правильность расчетов и выводов. При необходимости неясные вопросы обсуждаются в группе под руководством преподавателя.

По окончании занятия студенты оформляют отчет и представляют его на подпись преподавателю.

3. Контрольные вопросы

1. Что такое кодовая комбинация?

2. Дайте классификацию помехоустойчивых кодов.
3. Что такое минимальное кодовое расстояние?
4. Дайте определение кодов исправляющих ошибки и кодов обнаруживающих ошибки.
5. Какие коды называются эквидистантными?
6. Постройте схему поэлементного приема сигналов.
7. Постройте схему приема кодовых комбинаций в целом.
8. Какие коды оптимальны по Котельникову?
9. Дайте определение ортогонального кода.
10. Приведите примеры ортогональных кодов, используемых в авиационных системах связи.

4. Литература

1. Теплов Н.Л. Теория передачи сигналов по электрическим каналам связи. - М.: Воениздат, 1976.
2. Горелкин В.Г. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Мир книги», 1993.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.

Градации достоверности передачи информации

Таблица П.1. Градации достоверности передачи информации

Максимальное значение коэффициента ошибок на бит информации	Коэффициент необнаруженной ошибки для градаций достоверности		
	1	2	3
10^{-2}	10^{-4}	$10^{-6} \dots 10^{-7}$	$10^{-8} \dots 10^{-9}$
10^{-3}	10^{-5}	$10^{-7} \dots 10^{-8}$	$10^{-9} \dots 10^{-10}$