

Л. р. №16. Передача дискретных сообщений по каналам с МСИ

Исследуемые алгоритмы: приём без учёта МСИ, приём с ОСР, приём в целом с поэлементным решением (ПЦПР).

Исследуемые каналы: идеальный, двухлучевой, трёхлучевой.

Количество испытаний: 3000.

1. Исследование помехоустойчивости алгоритмов поэлементного приёма двоичных сигналов в идеальном (без искажений) канале

Параметры канала: $\tau = 0$, $g_0 = 1$.

Заполнить табл. 1. Сравнить между собой помехоустойчивость исследованных алгоритмов.

2. Исследование помехоустойчивости алгоритмов поэлементного приёма двоичных сигналов в двухлучевом канале

Исследование проводится для трёх различных форм импульсной характеристики (ИХ) канала:

2.1. Параметры канала: $\tau_0 = 0$, $g_0 = 0,8$;
 $\tau_1 = 1$, $g_1 = 0,6$.

2.2. Параметры канала: $\tau_0 = 0$, $g_0 = 0,71$;
 $\tau_1 = 1$, $g_1 = 0,71$.

2.3. Параметры канала: $\tau_0 = 0$, $g_0 = 0,6$;
 $\tau_1 = 1$, $g_1 = 0,8$.

Заполнить табл. 1 для каждого из трёх случаев. Сравнить между собой помехоустойчивость исследованных алгоритмов при одной форме ИХ и помехоустойчивость одного и того же алгоритма при разных формах ИХ. Сделать вывод о влиянии формы ИХ на помехоустойчивость алгоритма приёма.

3. Исследование помехоустойчивости алгоритмов поэлементного приёма двоичных сигналов в трёхлучевом канале

Исследование проводится для трёх различных форм импульсной характеристики (ИХ) канала:

3.1. Параметры канала: $\tau_0 = 0$, $g_0 = 0,8$;
 $\tau_1 = 1$, $g_1 = 0,5$;
 $\tau_2 = 2$, $g_2 = 0,33$.

3.2. Параметры канала: $\tau_0 = 0, \quad g_0 = 0,58;$
 $\tau_1 = 1, \quad g_1 = 0,58;$
 $\tau_2 = 2, \quad g_2 = 0,58.$

3.3. Параметры канала: $\tau_0 = 0, \quad g_0 = 0,33;$
 $\tau_1 = 1, \quad g_1 = 0,5;$
 $\tau_2 = 2, \quad g_2 = 0,8.$

Заполнить табл. 1 для каждого из трёх случаев. Сравнить между собой помехоустойчивость исследованных алгоритмов при одной форме ИХ и помехоустойчивость одного и того же алгоритма при разных формах ИХ. Сделать вывод о влиянии формы ИХ на помехоустойчивость алгоритма приёма.

Сравнить результаты п. 3 и п. 2. Сделать вывод о влиянии числа лучей в канале на помехоустойчивость алгоритма приёма.

Таблица 1

h^2	0,01	1	2	3	4	5	6
без ОСР							
с ОСР							
ПЦППР							

4. Исследование несократимой вероятности ошибки

Параметры канала: $\tau_0 = 0, \quad g_0 = 0;$
 $\tau_1 = 1, \quad g_1 = 1.$

Заполнить табл. 2. Сделать выводы о причинах возникновения ненулевой несократимой вероятности ошибки.

Таблица 2

h^2	1	5	50
без ОСР			
с ОСР			
ПЦППР			

Сравнить результаты моделирования по каждому пункту работы. Сделать вывод, какой из исследованных алгоритмов приёма обеспечивает лучшую помехоустойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория электрической связи / Под ред. Д.Д.Кловского - М.: Радио и связь, 1998, стр. 180 - 185.
2. Кловский Д.Д., Шилкин В.А. Теория электрической связи. Сб. задач и упражнений. – М., Радио и связь, 1990, стр. 99 - 102.
3. Теория передачи сигналов / Зюко А.Г., Кловский Д.Д. и др. - М.: Радио и связь, 1986, стр.174-180.
4. Кловский Д.Д. Теория передачи сигналов. - М.: Связь, 1973, стр.246-253, 263, 317-321.

Работа № 16

ПЕРЕДАЧА ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ ПО КАНАЛАМ С МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ

Цель работы - ознакомление с особенностями преобразования сигналов, передающих дискретные сообщения, в каналах связи с рассеянием, явлением межсимвольной интерференции (МСИ) и методами приема сигналов в условиях МСИ.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Межсимвольная интерференция

и ее влияние на передачу дискретных сообщений

В современных условиях, когда быстро растут требования объему и скорости передачи информации, особое значение приобретает повышение эффективности использования имеющихся линий и каналов связи. В силу действия помех и других мешающих факторов количество информации, которое может быть передано по любому реальному каналу в единицу времени, Γ всегда конечно и, как доказывается в теории информации, имеет предел C , называемый пропускной способностью канала (см. работу 14). По мере приближения скорости Γ к C техническая реализация передачи и приема сигналов, как правило, существенно затрудняется. При передаче дискретных сообщений последовательными методами одной из основных причин, затрудняющих практическое использование высоких скоростей передачи, является *межсимвольная интерференция* (МСИ).

Сущность этого явления состоит в следующем.

При указанных методах отдельные символы дискретного сообщения передаются последовательно друг за другом элементами сигнала $u_k(t)$ определенной формы (например, символы 0 и 1 передаются прямоугольными импульсами со значениями $-U_0$ и U_0) с некоторым **тактовым интервалом** T . Если канал не является идеальным, т.е. не имеет равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в полосе частот спектра сигналов (а так обычно и бывает на практике), то форма сигналов искажается при передаче, а длительность увеличивается (это явление называют временным рассеянием или дисперсией сигнала). В результате принятый элемент сигнала $s_k(t)$ может иметь длительность $t_k > T$ и накладываться на последующие элементы $s_{k+1}(t), s_{k+2}(t), \dots, s_{k+Q}(t)$. Тогда приём символов, соответствующих каждому из этих элементов, оказывается зависящим от предшествующих элементов. Это явление наложения элементов сигнала называют **межсимвольной интерференцией** (МСИ), а обусловленную зависимость (в вероятностном смысле) между принятыми символами - **памятью** канала. Количественно память характеризуется числом соседних элементов сигнала, на которые распространяется МСИ:

$$Q = \text{int}(t_k / T) \quad (16.1)$$

где int - знак целой части. Например, при $t_k = 2,56T$ $Q = 2$.

МСИ и память канала существенно зависят от скорости передачи. При заданной скорости V каждый элемент сигнала на передающей стороне имеет длительность $\tau \leq T = 1/V$. При этом ширина спектра сигнала - порядка $1/\tau \geq V$. Если полоса пропускания канала, соответствующая условиям неискаженной передачи (см. выше) $F \geq 1/\tau$, временное рассеяние невелико и МСИ отсутствует. С увеличением скорости V уменьшается $T = 1/V$ и τ , расширяется спектр сигнала, возрастает его ограничение и фазовые искажения в канале, а поэтому увеличивается длительность реакции t_k . Вместе с уменьшением T это приводит к резкому возрастанию числа соседних элементов, на которые распространяется МСИ, т.е. памяти Q .

При $V \leq F$ память канала Q -порядка нескольких единиц, с увеличением V до $2F$ она уже составляет несколько десятков. Значение $V = 2F$ известно в технике связи как граница Найквиста, при превышении которой прием сигналов резко усложняется. МСИ особенно велика в каналах с многолучевым распространением сигналов (из-за различий во времени прихода по разным лучам), в частности,

ионосферных радиоканалах.

Таким образом, если при последовательной передаче дискретных сообщений по каналу с ограниченной полосой частот в целях более полного использования его пропускной способности увеличивать скорость передачи, необходимо соответственно изменить и алгоритм приема - так, чтобы он учитывал МСИ. Такие алгоритмы значительно сложнее обычного поэлементного приема в каналах без памяти.

Методы приема в каналах с МСИ

1. Коррекция характеристик канала.

Этот метод наиболее распространен на практике и предполагает включение на входе приемника корректирующих звеньев (эквалайзеров), частично выравнивающих характеристики канала. Однако полная коррекция, как правило, нереализуема, а при изменении характеристик канала во времени (например, в каналах с замираниями) необходимо соответственно перестраивать корректор, что усложняет его реализацию. Кроме того, этот метод приема не является оптимальным.

2. Прием в целом.

Предполагает обработку сигнала, соответствующего всему пакету сообщения. Если пакет содержит M двоичных сигналов, то при приеме необходимо перебирать $N = 2^M$ альтернативных вариантов сигнала. Уже при $M = 10$ $N = 1024$. Поэтому при больших M техническая реализация этого метода очень сложна.

3. Прием с обратной связью по решению (ОРС) и обработкой на тактовом интервале (алгоритм Кловского)

При приеме некоторого символа пакета сигнал на входе приемника имеет вид

$$s(t) = \sum_{i=-k+1}^{M-k+1} s_0(b_i, t-iT), \quad (16.2)$$

где принимаемым считается символ b_0 (k -ый от начала пакета), а слагаемые с $i < 0$ соответствуют ранее принятым символам. Поскольку решения, вынесенные демодулятором относительно них, уже известны, эту часть сигнала, зная импульсную реакцию канала, можно сформировать на приемной стороне и вычесть из суммы (16.2). Такая операция получила название *обратной связи по решению (ОСР)*.

Остается

$$s'(t) = \sum_{i=0}^{M-k+1} s_0(b_i, t - iT), \quad (16.3)$$

Этот сигнал на интервале передачи символа b_0 уже свободен от МСИ, а на последующих образует некоторую, зависящую от сообщения, помеху. Это позволяет, правда с потерей некоторой части энергии сигнала, ограничиться обработкой входной смеси на указанном тактовом интервале, как в канале без памяти. Такой алгоритм впервые предложен Д.Д.Кловским и назван по его имени.

4. Прием в целом с поэлементным решением - алгоритм Кловского-Николаева (АКН)

Этот способ приема является естественной модификацией предыдущего и предусматривает обработку входной смеси не на одном, а на нескольких тактовых интервалах в пределах памяти канала, т.е на интервале анализа $T_a = (Q + 1)T$. Но в этом случае в интервал обработки попадают символы, следующие за принимаемым, решение о которых еще не вынесено. Они играют роль так называемых мешающих параметров. Один из подходов к приему в условиях априорной неопределенности относительно мешающих параметров базируется на близком к оптимальному *правиле обобщенного максимального правдоподобия (ОМП)*. В рассматриваемой задаче оно представляется в виде

$$\hat{b}_0 = \arg \max_{b_0, b_1, \dots, b_Q} w(z/b_0, b_1, \dots, b_Q) \quad (16.4)$$

Это означает, что максимум функции правдоподобия ищется по всем цепочкам символов b_0, b_1, \dots, b_Q , а решение принимается только относительно первого из них b_0 . Такой алгоритм называют приемом в целом с поэлементным решением (ПЦПР). Для приема в каналах с МСИ он впервые предложен Д.Д.Кловским и Б.И.Николаевым.

Если прием сигналов осуществляется на фоне белого гауссовского шума, правило (16.4) реализуется путем минимизации квадратического функционала

$$\mathcal{Q}(b) = \int_0^T \left[z(t) - \sum_{i=0}^Q s_0(b_i, t - iT) \right]^2 dt, \quad (16.5)$$

т.е.

$$\hat{b}_0 = \arg \min_{b_0, b_1, \dots, b_Q} \mathcal{Q}(b) \quad (16.6)$$

Реакция канала на единичный элемент сигнала, которую необходимо знать для реализации этого алгоритма, определяется с помощью специальных зондирующих импульсов, передаваемых в паузах между информационными пакетами, или другими способами.

Использование ОСР основано на допущении, что предшествующие символы приняты без ошибок, т.е. вероятность ошибки p считается пренебрежимо малой. Такая ОСР называется идеальной.

В системе с реальной ОСР надо считаться с тем, что некоторые из предшествующих символов - ошибочные, поэтому вычитание реакции из них может не только не улучшить, а даже ухудшить прием следующих символов, т.е. произойдет размножение ошибок. Поскольку при достаточно малом p вероятность такого события тоже мала, в среднем реальная ОСР обычно обеспечивает повышение помехоустойчивости.

4. Оптимальный прием в каналах с МСИ.

Для синтеза алгоритма оптимального приема в рассматриваемых условиях необходимо располагать определенной вероятностной моделью последовательности принимаемых символов. Обычно она рассматривается как некоторая многомерная марковская цепь, а задача приема сводится к оценке ее состояния. Один из распространенных методов ее решения, известный как *алгоритм Витерби*, основан на идее рекуррентного выбора оптимального пути на графе.

При удельной скорости передачи 5 бит/с на 1 Гц полосы энергетический проигрыш алгоритма Витерби по сравнению с оптимальным поэлементным приемом сигналов ФМ без МСИ составляет всего 1 дБ. Однако этот алгоритм сложен в реализации.

Внедрение методов приема сигналов с МСИ позволяет существенно повысить эффективность использования каналов связи. Так, без МСИ обычно организуют в полосе ТЧ (3100 Гц) 24 канала тонального телеграфирования с полосой 120 Гц и скоростью 50 бит/с, т.е. удельная скорость передачи составляет 0,417 бит/с/Гц. При использовании описанных методов приема скорость передачи по каналу ТЧ удастся повысить до 4800-9600 бит/с, что соответствует удельной скорости порядка 2 и более бит/с/Гц. Это означает, что пропускная способность канала используется в 5-6 раз эффективнее.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Задан трехлучевой канал, в котором принимаемый сигнал (без учета шума) $s(t)$ связан с переданным, $u(t)$, соотношением

$$s(t) = g_1 u(t - \tau_1) + g_2 u(t - \tau_2) + g_3 u(t - \tau_3) \quad (16.7)$$

где g_1, g_2, g_3 и τ_1, τ_2, τ_3 - коэффициенты передачи и задержки лучей.

При передаче по каналу символы сообщения (1 и 0) представляются элементами сигнала $u_0(t)$ в виде прямоугольных импульсов длительностью τ_0 со значениями соответственно 1 и -1 и передаются с тактовым интервалом $T = \tau_0$.

Указанные параметры канала имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} g_1 &= a/10, \quad g_2 = b/10, \quad g_3 = c/10, \\ \tau_1 &= a/3, \quad \tau_2 = b/3, \quad \tau_3 = c/3, \end{aligned} \quad (16.8)$$

где a, b, c - три последние цифры номера студенческого билета.

По каналу передается четырехразрядная кодовая комбинация, соответствующая двоичному представлению последней цифры указанного номера (c) ($\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$).

1. Изобразить временную диаграмму реакции канала $s_0(t)$ на единичный элемент сигнала $u_0(t)$. Определить по ней память канала Q .

2. Записать указанную выше кодовую комбинацию ($\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$) и построить временную диаграмму представляющего ее сигнала

$$u(t) = - \sum_{i=0}^3 (-1)^{\alpha_i} u_0(t - iT) \quad (16.9)$$

3. Построить временную диаграмму реакции канала $s(t)$ на сигнал $u(t)$, определенный (16.9), используя при этом формулу (16.7) с параметрами (16.8).

Примечание. При выполнении п.3 рекомендуется сначала построить временные диаграммы для отдельных слагаемых в (16.7), а затем произвести их графическое сложение.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

После ответа на заданные ПК контрольные вопросы и допуска к работе выполняется следующее.

1. Ввод передаваемой кодовой комбинации.

По запросу ПК вводится кодовая комбинация, записанная в п.2 домашнего задания, после чего ПК изображает соответствующий ей сигнал. Необходимо сравнить его с построенным в п.2 и подтвердить их совпадение (в противном случае ввод повторяется).

2. Исследование преобразований сигнала в каналах с МСИ.

ПК моделирует преобразования сигнала, заданного в п.1, в четырех разных видах каналов:

- 1) идеальном (без искажений);
- 2) полосовом;
- 3) двухлучевом;
- 4) трехлучевом.

По запросам ПК необходимо указать вид и параметры канала. Для полосового канала задается полоса пропускания по отношению к полосе частот сигнала и коэффициент передачи

$$F_k/F_c = 0,3 + 0,1N, \quad K = 1,$$

где N - номер бригады (если иное не указано преподавателем).

Для многолучевых каналов задаются параметры по формуле (16.8) домашнего задания.

Следует зарисовать временные диаграммы всех выходных сигналов, появляющиеся на мониторе.

3. Моделирование передачи сигналов по каналу с МСИ.

Моделируется 3 из рассмотренных ранее алгоритмов поэлементного приема двоичных сигналов в канале с МСИ и белым гауссовским шумом: прием без учета МСИ, с ОСР и прием в целом с поэлементным решением (ПЦПР). По запросу ПК для каждого алгоритма вводится число статистических испытаний NS (обычно не менее 100, если не задано иное) и ряд значений дисперсии шума (в условных единицах) из приведенной ниже таблицы. ПК моделирует процесс передачи сигналов по каналу с МСИ и шумом, а также их прием по указанным алгоритмам. На каждом шаге на мониторе высвечивается номер текущего испытания, переданный и принятый символы, зарегистрированное число ошибок. Записывать следует только окончательные результаты - вероятности ошибок. Эти результаты заносятся в таблицу:

Дисперсия шума, D_n	Вероятности ошибок для 3 алгоритмов:		
	Без учета МСИ	с ОСР (АК)	ПЦПР (АКН)
0,5			
1			
1,5			
2			
5			

По результатам моделирования необходимо построить 3 зависимости вероятностей ошибок от дисперсии шума (на одном графике) и сделать вывод, какой из трех алгоритмов приема обеспечивает наибольшую помехоустойчивость.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Выполненное домашнее задание.
2. Временные диаграммы сигналов, числовые характеристики и графики, полученные в результате выполнения работы.
3. Выводы и объяснение результатов по каждому пункту работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие факторы препятствуют неограниченному увеличению скорости передачи информации по реальным каналам связи?
2. Что понимается под временным рассеянием сигналов в каналах связи и каковы его причины?
3. Как влияет временное рассеяние сигналов на передачу дискретных сообщений?
4. В чем сущность явления межсимвольной интерференции и каковы ее причины?
5. Что называют памятью канала и от каких факторов она зависит?
6. Используя результаты лабораторной работы, изобразите примерный вид реакции канала с полосой пропускания F на прямоугольный импульс длительностью T для трех случаев:
1) $F = 2/\tau$ 2) $F = 1/\tau$ 3) $F = 1/2\tau$
Принять, что в указанной полосе $K(\omega) = 1$, $\varphi(\omega) = -3\omega\tau$. Какова память канала в этих трех случаях?
7. Изобразите реакцию двухлучевого канала на импульс, указанный в вопросе 6 для случаев, когда коэффициенты передачи обеих лучей одинаковы и равны 0,5, а задержки следующие:
1) $\tau_1 = \tau$, $\tau_2 = 2\tau$;
2) $\tau_1 = 2\tau$, $\tau_2 = 3\tau$;
3) $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 4\tau$;
Какова память канала в этих трех случаях?
8. Перечислите методы, с помощью которых можно вести прием сигналов в каналах с МСИ.
9. Почему МСИ осложняет прием дискретных сообщений?

10. Как используются корректоры (эквалайзеры) для приема в каналах с МСИ? В каких случаях необходимы адаптивные корректоры?

11. Что понимают под обратной связью по решению (ОСР) и как она используется при приеме сигналов с МСИ?

12. В чем разница между идеальной и реальной ОСР?

13. Что понимают под "приемом в целом" и как он используется в каналах с МСИ?

14. По какому принципу строится алгоритм Кловского-Николаева (АКН)?

15. По какому принципу строится алгоритм Витерби?

16. Перечислите алгоритмы приема в каналах с МСИ в порядке убывания их помехоустойчивости.

17. Объясните, почему внедрение методов приема сигналов, в которых учитывается МСИ, обеспечивает повышение эффективности использования каналов связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория электрической связи /Под ред. Д.Д.Кловского - М.: Радио и связь, 1998, стр. 151 - 152, 192-197.

2. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. - М.: Радио и связь, 1982, стр.124 - 147.

3. Николаев Б.И. Последовательная передача дискретных сообщений по каналам с памятью. - М.; Радио и связь, 1988, стр.16 - 114.

4. Передача дискретных сообщений //Колл. авторов. - М.: Радио и связь, 1990, стр.215 - 224.