

## КОМПЕНСАЦИЯ МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ПОМЕХ ПОСРЕДСТВОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО РЕШЕНИЮ ДЛЯ СИГНАЛОВ С РЕШЕТЧАТОЙ КОДИРОВАННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Григоренко Д.В., Ручкин В.Н.

### Введение

В рекомендации V.32bis Международного телекоммуникационного союза [1] для повышения помехоустойчивости модема используется решетчатое кодирование (РК) с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ). РК с КАМ уменьшает вероятность появления ошибок при высоких скоростях передачи данных по телефонному каналу [2,3]. Такой же вид РК и созвездия используются в факс-протоколе модуляции V.17 и в протоколе связи по четырехпроводным выделенным каналам связи – протокол V.33.

Обычно телефонный канал имеет равномерную амплитудную частотную характеристику с плавным спадом на краях [3]. Для таких каналов применяют линейный адаптивный эквалайзер, подавляющий межсимвольную интерференцию сигнала с РК. Однако, если в полосе пропускания канала имеется сильное затухание или существенные узкополосные помехи, линейный эквалайзер не эффективен из-за повышения уровня шумов на корректируемых частотах. В этом случае для сигналов без РК можно использовать эквалайзер с ОСР [5].

Декодирование решетчатых кодов осуществляется с помощью алгоритма Витерби [2]. Простое каскадное соединение эквалайзера с ОСР и алгоритма Витерби невозможно использовать из-за задержки при декодировании [1,3].

Целью данной работы является разработка алгоритма компенсации межсимвольных помех с помощью ОСР для РК сигналов, обеспечивающего высокие скорости передачи данных даже при сильных амплитудных искажениях.

### Декодирование с компенсацией межсимвольных помех посредством ОСР

Проведем анализ алгоритма декодирования сигналов с РК модуляцией без ОСР, состоящий из двух основных этапов [1,6]:

1. Поиск точки  $y_k$  в каждом подмножестве, которая является ближайшей к принятой точке  $x_k$ . Данный поиск проводится среди нескольких точек в эталонном созвездии, ближайших к принятой точке. Этим точкам  $y_k$  соответствуют: переход (ветвь)  $S_k$  в  $S_{k-1}$  в решетчатой диаграмме, биты данных и проверочный бит, определяемый исходным состоянием  $S_{k-1}$ . В результате отбрасываются параллельные ветви между исходными  $S_{k-1}$  и конечными состояниями  $S_k$ .

2. Поиск кратчайшего пути в решетчатой диаграмме с помощью алгоритма Витерби. Длина каждой из ветвей, из которых состоят пути, равна квадрату расстояния между найденной на предыдущем этапе точкой  $y_k$  и принятой точкой  $x_k$ . Суть алгоритма заключается в том, что среди

*Рассмотрен вопрос о совместной реализации решетчатого кодирования и алгоритма компенсации межсимвольных помех с помощью обратной связи по решению (ОСР). На примере модема V.32bis показана эффективность такой реализации.*

всех путей, входящих в одно состояние, выбирается кратчайший, остальные пути отбрасываются. В результате такого отбора «выживают» только кратчайшие пути, заканчивающиеся в возможных состояниях  $S_k$  к определенному моменту времени  $k$ .

Рассмотрим возможность использования ОСР в алгоритме декодирования сигналов с РК модуляцией. В состоянии  $S_{k-1}$  входит только один выживший путь, состоящий из  $k-1$  ветвей. Поскольку ветвям соответствуют определенные точки  $y_m$ , для каждого состояния  $S_{k-1}$  можно применить компенсацию с ОСР:

$$x'_k = x_k + \sum_{i=0}^{N-1} b_i y_{k-1-i}, \quad (1)$$

где  $\{b_i\}$  - коэффициенты фильтра обратной связи по решению.

Скорректированная точка  $x'_i$  может оказаться ближе к другим точкам в эталонном созвездии  $y_i$ , чем принятая точка  $x_i$ ; точки  $y_i$  могут быть различными для разных состояний  $S_m$ . Поэтому коррекцию (1) и поиск наилучших точек  $y_k$  на первом этапе необходимо проводить для каждого  $S_{k-1}$ . На первом этапе декодирования с ОСР квадрат расстояний между точками рассчитывается для каждого состояния  $S_{k-1}$ . Таким образом, компенсацию межсимвольных помех посредством ОСР можно использовать для каждого из отдельно выживших путей.

Для стандарта V.32bis определены восемь состояний (подмножества A-G). Следовательно, ОСР потребует 8 операций коррекции (1) и нахождения ближайших точек  $y_k$ , что допустимо при реализации на современных сигнальных процессорах.

### Фазовая автоподстройка частоты с петлей, управляемой решениями

Настройка эквалайзера с использованием декодированных с задержкой точек (комплексных отсчетов) не вызывает серьезных затруднений. Однако такая задержка недопустима в петле обратной связи фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1,7], отслеживающей сдвиг частоты и фазовое дрожание [1]. ФАПЧ с задержкой является устойчивой только при узкой полосе частот петлевого фильтра и не отслеживает быстрые изменения фазы в телефонном канале. Таким образом, для устойчивой и быстрой работы

ФАПЧ требуются мгновенные эталонные отсчеты, которые можно получить различными способами.

Например, в качестве опорных можно использовать точки созвездия, ближайšie к принятым точкам  $x_k$  [1], или точки  $y'_k$  после промежуточного декодирования. Предлагается реализовать промежуточное декодирование без задержки по критерию максимального правдоподобия следующим образом.

Для всех «выживших» путей на текущий дискретный момент времени  $k$  выбирается кратчайший путь, которому соответствует декодированная точка  $y'_k$ . Использование точки  $y'_k$  при работе ФАПЧ обеспечивает более высокую помехоустойчивость и отсутствие ложных нулей дискриминационной характеристики. Следует отметить, что выбор ближайших точек в качестве опорных приводит к увеличению числа ошибок и ложных нулей. В процессе работы модема точки  $y'_k$  можно использовать в качестве эталонных точек в петле ФАПЧ.

Фазовая ошибка несущей при использовании ОСР имеет вид:

$$\hat{\Delta\phi} = \arg \left( x_k \left( y'_k - \sum_{i=0}^{N-1} b_i y_{k-i} \right)^* \right), \quad (2)$$

где  $x_k = z_k \exp j\phi$  - принятая точка,  $z_k$  - искаженный переданный отсчет,  $\Delta\phi$  - поворот фазы. Корректирующая добавка в правой части (1) имеет нулевой поворот фазы, поэтому в (2) эта добавка из отсчета (1) перенесена к эталонному отсчету  $y'_k$ .

**Результаты моделирования**

На рис.1 показана зависимость вероятности символьной ошибки от отношения сигнал-шум при разных вариантах декодирования. Результаты получены имитационным моделированием для канала с дискретным временем без межсимвольных помех. Наименьшая вероятность ошибки получена для декодирования Витерби с задержкой в 31 такт (рис. 1.2, 1.5, 1.8). Декодирование путем простого поиска ближайшей эталонной точки созвездия к принятой точке дает наибольшую вероятность ошибки (рис. 1.1, 1.4, 1.7, 1.10). Неполное декодирование Витерби без задержки обеспечивает на порядок меньшую вероятность ошибки (рис. 1.3, 1.6, 1.9).

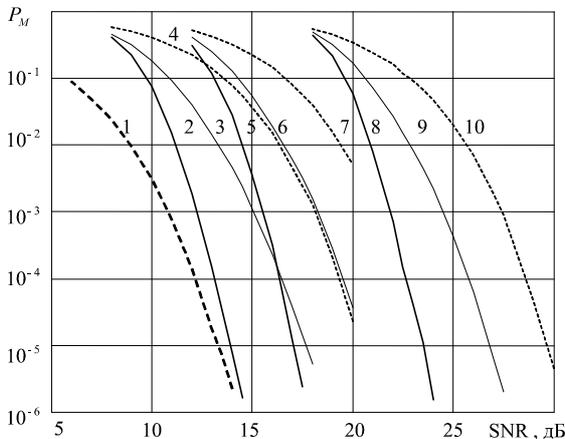


Рис.1. Зависимость вероятности символьной ошибки от отношения сигнал-шум для: 1) скорости 4800 бит/сек (ФМн-4 без решетчатого кодирования); 2) скорости 7200 бит/сек (КАМ-16 с решетчатым кодированием); 3) скорости 7200 бит/сек (КАМ-16 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 4) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 5) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 6) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 7) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 8) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 9) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 10) КАМ-128 сигнала без решетчатого кодирования.

7200 бит/сек (КАМ-16 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 4) КАМ-16 сигнала без решетчатого кодирования (скорость 9600 бит/сек), 5) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 6) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 7) КАМ-32 сигнала без решетчатого кодирования; 8) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 9) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 10) КАМ-128 сигнала без решетчатого кодирования.

Для иллюстрации эффективности ОСР используем канал с импульсной характеристикой {0,407; 0,815; 0,407} [3]. Рассмотрим влияние искажений в таком канале на вероятность ошибки для сигналов с РК модуляцией. По приведенным в [5] формулам рассчитаем оптимальные значения весовых коэффициентов обратной связи  $\{b_i\} = \{-1,903; -0,906\}$  и коэффициентов входного фильтра при условии нулевых межсимвольных помех. На рис.2 показана зависимость вероятности ошибок от отношения сигнал-шум при использовании ОСР. При декодировании Витерби (рис.2.2 и 2.4) обеспечивается на 8 дБ более высокая помехоустойчивость, чем при декодировании по ближайшим точкам (рис.2.8 и 2.9). Увеличение скорости передачи приводит к снижению преимущества полного декодирования (рис.1.2, 1.4, 1.6) по сравнению с декодированием без задержки (рис.1.3, 1.5, 1.7). Однако при полном декодировании наблюдаются отдельные сплошные пачки ошибок, а при частичном – отдельные ошибки, распределенные равномерно. Пачки ошибок исправляются при автоматическом запросе повторения передачи, а отдельные ошибки усредняются в системе ФАПЧ.

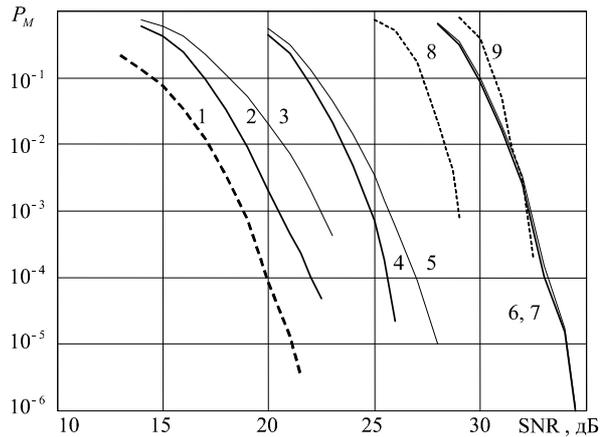


Рис.2. Зависимость вероятности символьной ошибки от отношения сигнал-шум при наличии искажений для: 1) скорости 4800 бит/сек (ФМн-4 без решетчатого кодирования); 2) скорости 7200 бит/сек (КАМ-16 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 3) скорости 7200 бит/сек (КАМ-16 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 4) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 5) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 6) скорости 9600 бит/сек (КАМ-32 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 7) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 8) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 9) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 10) КАМ-128 сигнала без решетчатого кодирования.



рованием) и декодирования без задержки; 6) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования с задержкой 31; 7) скорости 14400 бит/сек (КАМ-128 с решетчатым кодированием) и декодирования без задержки; 8) КАМ-16 сигнала без решетчатого кодирования; 9) КАМ-32 сигнала без решетчатого кодирования.

### Заключение

Разработан алгоритм декодирования РК кодов совместно с ОСР, позволяющий увеличить помехоустойчивость в каналах с резкими провалами в частотной характеристике и узкополосными помехами. Показано, что частично декодированные с ОСР отсчеты могут быть использованы в системе ФАПЧ. Проведено имитационное моделирование работы декодера при наличии спектральных нулей и показано, что решетчатое кодирование на 8 дБ улучшает помехоустойчивость при ОСР.

### Литература

1. John A.C. Bingham. «The theory and practice of modern design», издательство John Wiley and Sons, 605 Third Ave., New York, NY 10158. (A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION. 1988. 454 pp.).
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. 2-е изд. испр. М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. 1099с.
3. Прокис Д. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
4. Форни Дж. Алгоритм Витерби // ТИИЭР. 1973. №3. С.12-25.
5. Бельфиоре К.А., Парк Дж. Х. Компенсация посредством решающей обратной связи // ТИИЭР, 1979, т.67. №8. С.67-83.
6. Кочетков А.А. Оптимизация алгоритма декодирования Витерби для треллис-модулированных сигналов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 11-й Международной науч.-техн. конф. Рязань: РГРТА, 2002. С.124-126.
7. Астапкович К.Ф. и др. Цифровой модем-9600 для каналов ТЧ // Электросвязь. 1984. №3. С.15-18.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемый коллега!*

*Приглашаем Вас принять участие в работе 11-ой Международной конференции и выставки  
«Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'2009»,  
которая состоится в Москве 24-26 марта 2009 года*

### ОРГАНИЗАТОРЫ:

- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова
- IEEE Signal Processing Society
- Российская секция IEEE
- Институт радиотехники и электроники РАН
- Институт проблем управления РАН
- Институт проблем передачи информации РАН
- Московский научно-исследовательский телевизионный институт
- Компания AUTEX Ltd. (АВТЭКС)

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Теория сигналов и систем
- Теория и методы ЦОС
- Цифровая обработка многомерных сигналов
- Цифровая обработка речевых и звуковых сигналов
- Цифровая обработка изображений
- ЦОС в системах телекоммуникаций
- ЦОС в радиотехнических системах
- ЦОС в системах управления и робототехники
- Цифровая обработка измерительной информации
- Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений
- Цифровое телевидение и телевидение
- Цифровое радиовещание
- ЦОС в системах защиты информации
- Проектирование и техническая реализация систем ЦОС
- ЦОС в открытых системах
- Проблемы подготовки специалистов в области ЦОС