

УДК 621.391

МЕТОД ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПОДНЕСУЩИМИ В ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ КАНАЛАХ И ШУМОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

© 2007 г.

А.В. Давыдов¹, А.А. Мальцев^{1,2}¹ ЗАО «Интел А/О», г. Нижний Новгород² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевскогоmaltsev@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 24.05.2007

Предложен метод предсказания вероятности ошибки декодирования принятого сигнала в системах с ортогональными поднесущими, функционирующих при наличии частотно-селективного канала и шума интерференции. Процедура позволяет получать оценку помехоустойчивости физического уровня для заданных мгновенных реализаций собственного канала и мощности шума интерференции без прямого моделирования передачи и демодуляции принятого сигнала. Предложенный метод может использоваться для упрощения моделирования сетевого уровня системы для различных сценариев развертывания сети, а также в качестве алгоритма оптимального выбора комбинаций модуляции и кодирования в адаптивных системах связи. Рассмотрены системы с одноэлементными и многоэлементными антеннами, использующие процедуры пространственного и помехоустойчивого кодирования. При этом предполагается, что приемник не использует знания параметров интерференции для демодуляции и декодирования принятого сигнала.

Введение

Традиционно для предсказания помехоустойчивости физического уровня при сетевом моделировании системы использовались зависимости вероятности пакетной или битовой ошибки от отношения сигнал – шум – интерференция, полученные путем усреднения по ансамблю реализаций канала [1]. Стоит отметить, что помехоустойчивость системы для фиксированной канальной реализации может существенно отличаться от средней помехоустойчивости, что приводит к достаточно грубому описанию физического уровня при сетевом моделировании. В то же время высокая сложность моделирования прямой передачи и демодуляции сигнала делает затруднительным использование этого метода оценки помехоустойчивости системы для моделирования сетевого уровня. Целью данной работы является разработка упрощенной процедуры предсказания помехоустойчивости систем с ортогональными поднесущими OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Рассматриваются так называемые «простые» приемники, не использующие параметры частотно-селективной интерференции для декодирования принятого сигнала.

Состояние проблемы

Один из возможных подходов, позволяющих получить достаточно точную оценку мгновенной помехоустойчивости OFDM-системы с аддитивным белым гауссовским шумом, был рассмотрен в работе [1]. Суть данного метода заключается в отображении с помощью некоторой функции сжатия мгновенных отношений сигнал – шум на каждой поднесущей в некоторое значение, позволяющее достаточно точно описывать помехоустойчивость OFDM-системы. Выбор функции сжатия, как правило, основывается на эвристических предположениях. Так, наиболее популярными функциями отображения являются: логарифмическая, экспоненциальная, функция пропускной способности и взаимной информации для дискретных модуляций. Стоит отметить, что в современных широкополосных системах связи, функционирующих в каналах с многолучевым распространением, условие постоянства мощности шума от частоты, как правило, не выполняется. Это связано с наличием частотно-селективных помех от соседних передающих станций, мощность которых, как правило, существенно превышает мощность аддитивного белого гауссовского шума приемника [2]. Обобщение метода функции сжатия для приемников с идеальным знанием мгновенного значения отношения сигнал – шум – интерференция на каждой поднесущей, функционирующих в каналах с частотно-

селективным профилем шума интерференции, было предложено в работе [3]. Стоит отметить, что реализация таких приемников относительно затруднительна и, как правило, связана с оценкой ряда параметров интерференции на каждой поднесущей. С практической точки зрения наиболее интересным является рассмотрение помехоустойчивости так называемых «простых» приемников (также известных в литературе как приемники, не согласованные с каналом), использующих для демодуляции и декодирования сигнала только параметры собственного канала. При этом шум интерференции предполагается пространственно белым и не зависящим от индекса поднесущей.

Модель OFDM-системы связи

Рассмотрим OFDM-систему, функционирующую в канале с многолучевым распространением. Предположим, что длина защитного интервала OFDM-символа выбрана больше максимальной задержки канала. Тогда модель принятого сигнала на i -й поднесущей можно записать следующим образом

$$y_i = h_i \cdot s_i + \sum_{k=1}^{N_{BS}} g_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)} + n_i,$$

где y_i – принятый сигнал, s_i – переданный символ, h_i – собственный канал, $g_i^{(k)}$ – канал от k -й интерферирующей станции, $x_i^{(k)}$ – сигнал, переданный k -й интерферирующей станцией, n_i – реализация аддитивного белого гауссовского шума. При этом мгновенная мощность шума интерференции S_i^2 определяется как

$$S_i^2 = \sum_{k=1}^{N_{BS}} |g_i^{(k)}|^2 \cdot B_i^{(k)} \cdot hit_i^{(k)} + S_n^2,$$

где $B_i^{(k)}$ – контроль мощности, осуществляемый k -й интерферирующей станцией на i -й поднесущей, $hit_i^{(k)}$ – индикатор перекрытия поднесущих собственной и интерферирующей станции, S_n^2 – мощность аддитивного белого гауссовского шума. В работе [4] было показано, что помехоустойчивость «простых» приемников (не использующих параметры помех для демодуляции сигнала) практически не зависит от распределения средней мощности интерференции в частотной области. Используя данное наблюдение, введем эффективную

мощность шума как среднее значение мощности аддитивного белого гауссовского шума и интерференции по поднесущим

$$S_E^2 = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{j=1}^{N_{sc}} S_j^2.$$

Тогда, без ограничения общности, для функции сжатия – пропускная способность индикатор помехоустойчивости можно записать в следующем виде

$$C_M = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log \left(1 + \frac{|h_i|^2}{\frac{1}{N_{sc}} \sum_{j=1}^{N_{sc}} S_j^2} \right).$$

Для случая системы с несколькими приемными антеннами модель принятого сигнала на i -й поднесущей можно записать следующим образом

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i \cdot s_i + \sum_{k=1}^{N_{BS}} \mathbf{g}_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)} + \mathbf{n}_i,$$

где \mathbf{y}_i – принятый сигнальный вектор, s_i – переданный символ, \mathbf{h}_i – собственный канал, $\mathbf{g}_i^{(k)}$ – канал от k -й интерферирующей станции, $x_i^{(k)}$ – сигнал, переданный k -й интерферирующей станцией, \mathbf{n}_i – реализация аддитивного белого гауссовского шума. Тогда мгновенная корреляционная матрица шума интерференции можно быть записана в следующем виде

$$\mathbf{R}_i = \sum_{k=1}^{N_{BS}} (\mathbf{g}_i^{(k)} \cdot \mathbf{g}_i^{(k)H}) \cdot B_i^{(k)} \cdot hit_i^{(k)} + S_n^2 \mathbf{I}.$$

Обобщая выражение для индикатора помехоустойчивости на случай систем с многоэлементными приемными антеннами, использующих метод максимизации отношения сигнал – шум (МОСШ), получим

$$C_M = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i)^2}{\frac{1}{N_{sc}} \sum_{j=1}^{N_{sc}} \mathbf{h}_j^H \mathbf{R}_j \mathbf{h}_j} \right).$$

Для систем с многоэлементными передающими и приемными антеннами модель принятого сигнала может быть записана в следующем виде

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{s}_i + \sum_{k=1}^{N_{BS}} \mathbf{G}_i^{(k)} \cdot \mathbf{x}_i^{(k)} + \mathbf{n}_i,$$

где \mathbf{y}_i – принятый сигнальный вектор, \mathbf{s}_i – переданный символ, \mathbf{H}_i – матрица собственного

канала, $\mathbf{G}_i^{(k)}$ – матрица канала от k -й интерферирующей станции, $\mathbf{x}_i^{(k)}$ – сигнальный вектор, переданный k -й интерферирующей станцией, \mathbf{n}_i – реализация аддитивного белого гауссовского шума. Мгновенная корреляционная матрица шума интерференции можно быть

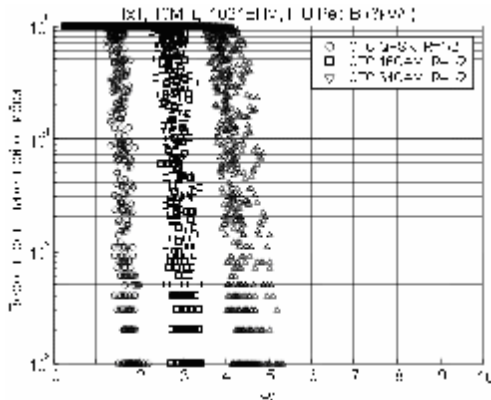


Рис. 1. Зависимость вероятности пакетной ошибки от модифицированного значения пропускной способности для систем с одноэлементными антеннами

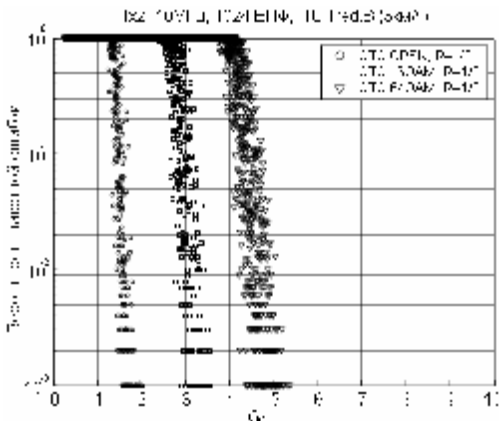


Рис. 2. Зависимость вероятности пакетной ошибки от индикатора помехоустойчивости для систем с пространственным разнесением сигнала на приемнике

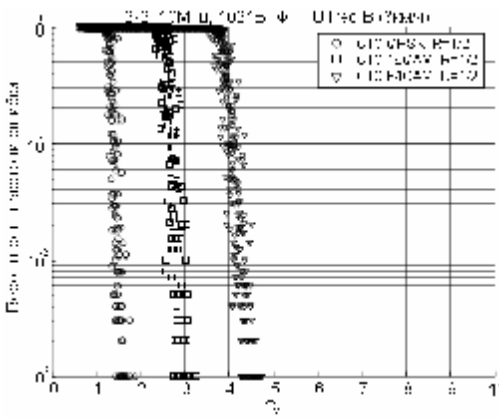


Рис. 3. Зависимость вероятности пакетной ошибки от индикатора помехоустойчивости для систем с пространственным разнесением сигнала на передатчике

записана так:

$$\mathbf{R}_i = \sum_{k=1}^{N_{BS}} (\mathbf{G}_i^{(k)} \cdot \mathbf{G}_i^{(k)H}) \cdot B_i^{(k)} \cdot \text{hit}_i^{(k)} + S_n^2 \mathbf{I}.$$

Обобщая выражение для индикатора помехоустойчивости для системы с пространственным разнесением сигнала на передающей стороне (данная схема известна в литературе как схема Аламути [5]) получим следующее выражение

$$C_M = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log \left(1 + \frac{\text{tr}(\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i)^2}{\frac{1}{N_{sc}} \sum_{j=1}^{N_{sc}} \text{tr}(\mathbf{H}_j^H \mathbf{R}_j \mathbf{H}_j)} \right).$$

Аналогично, для систем с пространственным мультиплексированием

$$C_M = \frac{1}{N_{ss}} \cdot \frac{1}{N_{sc}} \times \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log \det \left(\mathbf{I} + \left[\frac{1}{N_{sc}} \sum_{j=1}^{N_{sc}} \mathbf{R}_j \right]^{-1} \cdot \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \right).$$

Результаты моделирования

Диаграммы рассеяния вероятности пакетной ошибки, полученной путем прямого моделирования физического уровня, от значения индикатора предсказания показаны на рисунке 1 для систем с одноэлементными антеннами, на рисунке 2 для систем с многоэлементными антеннами и пространственным разнесением на приемнике, на рисунке 3 для систем с многоэлементными антеннами с пространственным разнесением сигнала на передатчике. В качестве схемы модуляции и кодирования использовались квадратурная амплитудная модуляция (QPSK, 16QAM, 64QAM), кодированная кодом Грея, и сверточные турбокоды с темпом кодирования $R=1/2$. Число ортогональных поднесущих 1024, полоса 10 МГц, число интерферирующих станций 2. Модель многолучевого канала выбиралась согласно рекомендациям ITU [6]. Скорость движения приемника составляла 3 км/ч. Легко видеть, что помехоустойчивость системы для различных реализаций канала достаточно хорошо коррелирована со значениями предложенного индикатора помехоустойчивости, что позволяет использовать предложенную процедуру для предсказания значения пакетной ошибки по заданному частотному профилю собственного

A novel method for performance prediction of OFDM systems operating in frequency selective channel & interference is suggested. Proposed method estimates error performance of physical layer without direct modeling signal transmission and demodulation. The method may be used for simplification of a system level simulation different deployment scenarios or as a link adaptation algorithm in adaptive systems. Single and multiple antenna systems with channel and space-time coding are considered. It is also assumed that the receiver does not use parameters of interference for signal demodulation.

MCS		
CTC QPSK R=1/2		
CTC QPSK R=3/4		
CTC 16QAM R=1/2		
CTC 16QAM R=3/4		
CTC 64QAM R=1/2		
CTC 64QAM R=3/4		
CTC 64QAM R=5/6	-3.3814	19.8698

канала и шума интерференции. Для практической реализации алгоритма предсказания необходимы аппроксимации полученных зависимостей вероятности пакетной ошибки FER от предложенного индикатора помехоустойчивости C_M . В частности, могут быть использованы лог-линейная или лог-квадратичная аппроксимации, дающие достаточно точное описание полученных диаграмм рассеяния. В таблице приведены значения коэффициентов для лог-линейной аппроксимации

$$\log_{10} FER(C_M) = A \cdot C_M + B,$$

полученные для всех комбинаций схем модуляций и кодирования стандарта IEEE 802.16-2005 [7].

Помимо достаточно точного предсказания помехоустойчивости системы, кривая предсказания, аппроксимирующая зависимость вероятности пакетной ошибки от модифицированного значения пропускной способности, практически не зависит от пространственной обработки сигнала, используемой в приемнике или передатчике, и требует хранения всего двух коэффициентов для описания помехоустойчивости различных режимов. Стоит отметить, что в случае

плоского аддитивного шума интерференции предложенный метод будет эквивалентен процедуре предсказания помехоустойчивости системы, рассмотренной в работе [1]. Также предложенная схема может быть обобщена на случай произвольной функции сжатия.

Список литературы

1. Brueninghaus K. // PIMRC. – 2005. – Vol. 4. – P. 2306–2311.
2. FITNESS, D3.3.1-MTMR Baseband Transceivers Needs for Intra-system and Inter-system (UMTS/WLAN) Reconfigurability. November 2003. <http://www.ist-fitness.org/>.
3. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000.
4. Давыдов А., Мальцев А. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 6. — С. 533–543.
5. Alamouti S. // IEEE J. Selected Areas Communications. October 1998. – P. 1451–1458.
6. Recommendation ITU-R M.1225, 2000.
7. IEEE Std. 802.16e-2005. USA, 2005.