

УДК 621.391.1

**МЕТОД ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КАНАЛА**

© 2011 г.

А.В. Давыдов, А.А. Мальцев, Г.В. Морозов

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

avdavydov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2011

Рассматривается задача предсказания помехоустойчивости систем связи, использующих практические схемы оценивания канала. Алгоритмы предсказания позволяют получать текущую оценку помехоустойчивости физического уровня без прямого моделирования передачи и приема сигнала. Предсказанное значение может быть использовано в адаптивных схемах быстрой канальной адаптации, а также для абстракции физического уровня при сетевом моделировании систем связи. В работе предложена оригинальная схема предсказания помехоустойчивости для приемника, использующего наиболее распространенный на практике метод оценки канала по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (МСКО). Предложенная схема предсказания справедлива для систем связи с одноэлементными и многоэлементными антеннами. С помощью математического моделирования проведена проверка точности предсказания предложенной модели для LTE-Advanced систем связи.

Ключевые слова: помехоустойчивость, оценивание канала, быстрая канальная адаптация, адаптивный выбор формата передачи, абстракция физического уровня, сетевое моделирование.

Введение

Предсказание помехоустойчивости является одной из основных задач современных систем связи на этапах их разработки и стандартизации. Оценка текущей помехоустойчивости (вероятности пакетной ошибки при передаче пакета данных) для заданной канальной реализации также широко применяется в реальных системах в алгоритмах адаптивного выбора модуляции, скорости кода, при определении числа пространственных потоков и матрицы диаграммообразующих векторов [1, 2]. За счет согласования формата передачи данных с текущей реализацией частотно-селективного канала такие алгоритмы позволяют существенно повысить эффективность всей системы в целом. Предсказание вероятности пакетной ошибки также применяется для упрощенного моделирования физического уровня при системном анализе. В силу высоких вычислительных затрат прямое моделирование передачи сигнала для оценки помехоустойчивости системы на сетевом уровне, как правило, не используется. В этом случае проверка безошибочности передачи производится с помощью более простых методов предсказания помехоустойчивости.

В предыдущих работах по предсказанию помехоустойчивости рассматривалась задача предсказания вероятности пакетной ошибки в предположении идеального знания канала [3–5].

Однако в практических системах связи из-за наличия ошибок в оценке канала связи использование традиционных подходов не всегда является оправданным. В настоящей работе предлагается и исследуется метод предсказания помехоустойчивости для систем связи с неидеальным знанием канала. Рассматриваются системы связи, использующие одноэлементные и многоэлементные антенны на передатчике и приемнике.

**Общий подход
к предсказанию помехоустойчивости**

Пусть биты на выходе помехоустойчивого кода передаются через канал, имеющий различные отношения сигнал/шум/помеха (ОСШП) на каждом сигнальном символе. В общем случае модель предсказания основывается на определении некоторой функции сжатия $F(\cdot)$, которая отображает множество физических значений ОСШП для каждого переданного символа, обозначаемых как SINR_i , в некоторую скалярную величину – метрику предсказания – следующим образом

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(\text{SINR}_i), \quad (1)$$

где N – число переданных символов. Скалярная метрика M далее в модели предсказания используется как аргумент функции отображения

в среднюю вероятность пакетной ошибки. Наиболее популярной и теоретически обоснованной функцией сжатия множества значений отношений сигнал/шум/помеха является функция взаимной информации $I_m(\cdot)$, задаваемая сигнальным созвездием m . Для данного способа метрика предсказания записывается следующим образом:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_m(\text{SINR}_i). \quad (2)$$

В общем случае получить аналитическое выражение для функции взаимной информации достаточно сложно. Поэтому на практике эта функция, как правило, аппроксимируется таблицей или задается с помощью кусочно-линейных элементарных функций. Например, в работе [4] функция взаимной информации задается выражением

$$I_m(\text{SINR}_i) = \sum_{k=1}^K a_k J(c_k \text{SINR}_i), \quad (3)$$

где нелинейная функция $J(\cdot)$ соответствует функции взаимной информации для двоичной модуляции Binary Phase Shift Keying (BPSK).

Для отображения вычисленной метрики взаимной информации M в значение вероятности пакетной ошибки $BLER$ (Block Error Rate) применяется параметрическая функция. Например, в работах [4, 5] для аппроксимации применяется функция Лапласа

$$BLER = \frac{1}{2} \left(1 - \text{erf} \left(\frac{M - b}{\sqrt{2c}} \right) \right). \quad (4)$$

Параметры аппроксимации b и c выбираются из анализа диаграммы рассеяния вероятности пакетной ошибки и метрики предсказания, полученной путем прямого моделирования физического уровня. Аппроксимирующая функция (4) с полученными параметрами b и c далее используется для предсказания помехоустойчивости системы на основании мгновенных значений ОСШП.

Основным недостатком традиционных методов является предположение об идеальном знании канала на приемнике. Однако из-за использования практических схем оценивания канала связи в реальных системах данное предположение не всегда оправданно. В этом случае полученная традиционная оценка помехоустойчивости не всегда является достаточно точной. В следующей главе мы предложим модель предсказания вероятности пакетной ошибки, учитывающую неидеальность знания канала.

Учет ошибки оценивания канала в модели предсказания помехоустойчивости

Рассмотрим модель принятого сигнала для систем связи с одноэлементными антеннами, использующих неидеальную оценку канала для обработки сигнала. Наличие ошибки в оценке канала можно рассматривать как дополнительный шум. Тогда модель сигнала можно представить в следующем виде:

$$y_d = Hs_d + n = \hat{H}s_d + \underbrace{(H - \hat{H})s_d + n}_{n'}, \quad (5)$$

где y_d – принятый сигнал, H – коэффициент усиления канала, s_d – переданный символ, \hat{H} – неидеальная оценка канала и n – аддитивный шум. Без ограничения общности будем считать, что канал является нормированным, т.е. $E\{|H|^2\} = 1$. Для алгоритма МСКО (минимум среднеквадратичной ошибки) оценки канала можно убедиться, что компонента нового шума n' является некоррелированной с переданным символом. Действительно, используя свойства МСКО оценки, можно получить [6]

$$E\{s_d, n'^*\} = E\{s_d, (H - \hat{H})^* s_d^*\} + E\{s_d, n^*\} = 0, \quad (6)$$

где $(\cdot)^*$ – операция комплексного сопряжения. Таким образом, помехоустойчивость системы с практической оценкой канала и моделью принятого сигнала

$$y_d = Hs_d + n \quad (7)$$

будет эквивалентна помехоустойчивости приемника с идеальным знанием канала \hat{H} и моделью сигнала

$$y_d = \hat{H}s_d + n', \quad (8)$$

где n' – новая компонента аддитивного шума. Для МСКО приемника мощность новой компоненты шума равна

$$\sigma^2 = \frac{1}{\beta^2} (\sigma_n^2 + \sigma_e^2),$$

где σ_e^2 – средняя квадратичная ошибка МСКО оценки канала, σ_n^2 – мощность аддитивного шума и β – смещение оценки канала. Для МСКО оценки существует связь между смещением оценки и средней квадратичной ошибкой σ_e^2 , задаваемая следующим уравнением:

$$\beta^2 = 1 - \sigma_e^2. \quad (9)$$

Тогда отношение сигнал/шум/помеха на приемнике записывается в виде

$$\text{SINR}' = \frac{1}{\sigma^2} = \frac{1 - \sigma_e^2}{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}. \quad (10)$$

Потери в отношении сигнал/шум/помеха, связанные с практической оценкой канала связи, можно описывать с помощью мультипликативной модели, задаваемой параметром α :

$$\alpha = \frac{\text{SINR}}{\text{SINR}'} = \frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{(1 - \sigma_e^2)\sigma_n^2}, \quad (11)$$

который можно интерпретировать как коэффициент усиления шума. Коэффициент α может быть использован для корректировки отношения сигнал/шум/помеха SINR перед вычислением метрики предсказания M в уравнении (2).

Для систем с N_{TX} передающими и N_{RX} приемными антеннами, использующими пространственную обработку сигнала, можно применить аналогичный способ перемещения ошибки оценки канала в шумовую компоненту:

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{H}\mathbf{s}_d + \mathbf{n} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{s}_d + \underbrace{(\mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}})\mathbf{s}_d}_{\mathbf{n}'}, \quad (12)$$

где \mathbf{y}_d – вектор принятого сигнала размерности $N_{RX} \times 1$, \mathbf{s}_d – вектор переданного сигнала размерности $N_{TX} \times 1$, \mathbf{H} – матрица мгновенного канала размерности $N_{RX} \times N_{TX}$ и \mathbf{n} – вектор аддитивного шума размерности $N_{RX} \times 1$ с ковариационной матрицей $\mathbf{R} = E(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^H)$. Тогда для каждого пространственного канала эквивалентная шумовая компонента задается выражением

$$n_k' = n_k + \sum_{m=1}^{N_{TX}} (H_{km} - \hat{H}_{km}) s_{dm}. \quad (13)$$

Мощность эквивалентного шума в этом случае определяется выражением

$$E\{n_k', n_k'^*\} = \sigma^2 + N_{TX}\sigma_e^2. \quad (14)$$

Легко получить коэффициент усиления шума для каждого пространственного канала

$$\alpha = \frac{N_{TX}\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{(1 - \sigma_e^2)\sigma_n^2}. \quad (15)$$

Заметим, что в системах с многоэлементными антеннами общая передаваемая мощность, как правило, разделяется между пространственными каналами, а средняя мощность сигнала, передаваемого на каждом пространственном канале, равна $1/N_{TX}$. В этом случае выражение (15) можно записать как

$$\alpha = \frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{(1 - \sigma_e^2)\sigma_n^2}. \quad (16)$$

Из полученного результата следует, что помехоустойчивость системы с практической оценкой канала и моделью сигнала (12) эквивалентна помехоустойчивости приемника с иде-

альной оценкой канала и ковариационной матрицей помех

$$\mathbf{R}' = E\{\mathbf{n}', \mathbf{n}'^H\} = \alpha \mathbf{R}. \quad (17)$$

Таким образом, неидеальность знания канала может быть учтена путем простого масштабирования мощности аддитивного шума в стандартной модели предсказания помехоустойчивости.

Результаты моделирования

Для исследования эффективности предложенного метода предсказания помехоустойчивости была реализована математическая модель передатчика и приемника, работающих на основе стандарта 3GPP e-UTRA Release-10 [7]. Прием сигнала в модели системы связи осуществлялся с использованием МСКО оценки канала связи. Для рассматриваемого алгоритма оценки зависимость коэффициента усиления шума α от среднего отношения сигнал/шум показана на рис. 1.

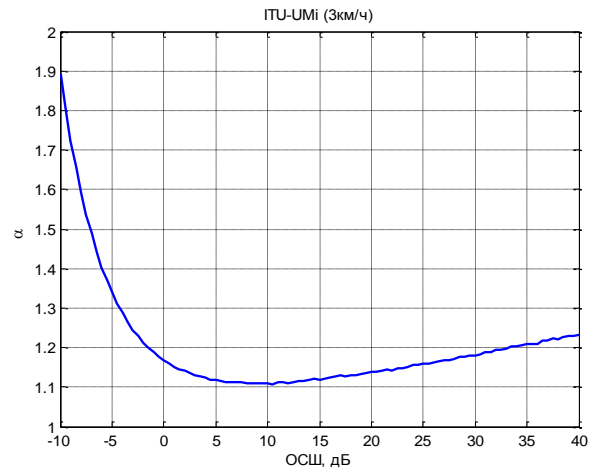


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления шума α от среднего отношения сигнал/шум

МСКО оценка канала проводилась по обучающим последовательностям (CRS – Common Reference Signals), определенным в стандарте для одной передающей антенны. Поднесущие, используемые для передачи обучающих последовательностей, были равномерно распределены в частотно-временной области. Из рис. 1 видно, что коэффициент усиления шума α растет при уменьшении отношения сигнал/шум. Это объясняется компенсацией смещения МСКО оценки, которая существенно отличается от единицы при низких значениях сигнал/шум. Для высоких отношений сигнал/шум наблюдается рост мультиплика-

тивного коэффициента α из-за наличия интерполяционных ошибок оценки канала.

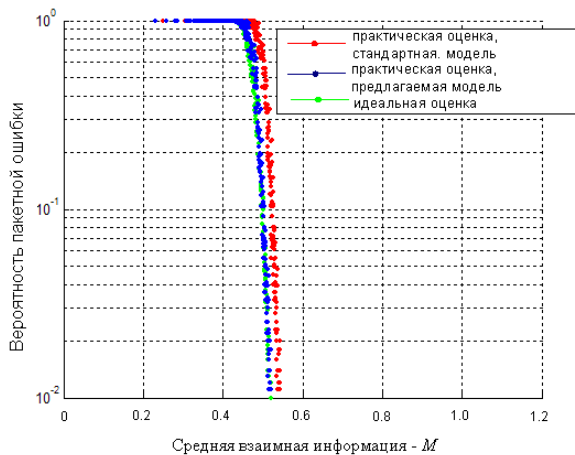


Рис. 2. Зависимость вероятности пакетной ошибки от метрики предсказания помехоустойчивости

Для проверки предложенной модели было проведено моделирование передачи и приема сигнала на физическом уровне. В качестве схемы модуляции использовалась квадратурная амплитудная модуляция 16-QAM, кодированная кодом Грея, а для кодирования – сверточный турбо код с темпом 1/2. Передача сигнала осуществлялась в полосе 10 МГц с использованием 4 физических ресурсов (частотно-временных блоков, состоящих из 12 поднесущих и 11 OFDM-символов). Для исследования использовалась стандартная UMi многолучевая модель канала, принятая Международным Союзом Электросвязи (International Telecommunication Union, ITU) [8]. Эта модель представляет собой многолучевой релейский канал со случайными средними мощностями и временами прихода лучей. Модель канала также учитывала временные изменения канала, возникающие из-за движения мобильного абонента со скоростью 3 км/ч. Диаграммы рассеяния вероятностей пакетной ошибки, полученной путем прямого моделирования на физическом уровне, от метрики предсказания канала – средней взаимной информации – показаны на рис. 2 для систем с идеальной и практической МСКО оценкой канала. Из приведенных на рис. 2 диаграмм видно, что использование метрики взаимной информации обеспечивает достаточно точное предсказание помехоустойчивости системы связи. Однако для традиционного подхода кривая предсказания смещена относительно кривой предсказания идеального приемника. Данное смещение объясняется

наличием шума практической оценки канала, не учитываемой традиционной моделью. Учет дополнительного шума в предложенной модели позволяет компенсировать смещение кривой предсказания. При этом для предсказания помехоустойчивости приемника с практической оценкой может применяться функция отображения метрики предсказания в вероятность пакетной ошибки (4) для идеально-го приемника.

Заключение

В настоящей работе предложен метод предсказания помехоустойчивости системы связи с учетом практической схемы оценивания канала. Метод предсказания позволяет рассчитать вероятность пакетной ошибки для систем с одноэлементными и многоэлементными антеннами на приемнике и передатчике. Показано, что неидеальность оценки канала связи может быть учтена путем масштабирования мощности аддитивного шума в стандартной модели предсказания помехоустойчивости. С помощью математического моделирования получен пример зависимости коэффициента усиления шума от отношения сигнал/шум. На примере современного стандарта связи LTE-Advanced показана высокая точность прогноза вероятности пакетной ошибки для предложенной модели.

Список литературы

1. Давыдов А.В., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. 2005. Выпуск 1(3). С. 93–101.
2. Рубцов А.Е., Мальцев А.А., Давыдов А.В., Тираспольский С.А., Пудеев А.В. // Прикладная радиоэлектроника (г. Харьков). 2006. №3. С. 326–336.
3. Давыдов А.В., Мальцев А.А. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. Выпуск 4. С. 58–61.
4. Sayana K., Zhuang J., Stewart K. // Proc. IEEE GLOBECOM – 2008. P. 1–6.
5. Davydov A., Morozov G., Papathanssiou A. // VTC Spring Budapest – 2011. P. 1–5.
6. Hassibi B., Hochwald M. // IEEE Transaction on Information Theory. 2003. Vol. 49. P. 951–963.
7. 3GPP TS 36.211, «Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation», V.10.0.0, January 2010.
8. Recommendation ITU-R M.2135, <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2135/en>, 2009.

**NOISE IMMUNITY PREDICTION METHOD
FOR COMMUNICATION SYSTEMS USING PRACTICAL SCHEMES
OF CHANNEL ESTIMATION**

A.V. Davydov, A.A. Maltsev, G.V. Morozov

The problem of noise immunity prediction is considered for communication systems using practical channel estimation schemes. The prediction algorithms provide the current estimation of the PHY layer immunity without direct simulation of signal transmission and reception. The predicted value can be used in fast channel adaptation schemes, as well as for PHY abstraction in communication network simulations. An original scheme to predict the noise immunity is proposed for a receiver which uses the most common practical technique of channel immunity estimation based on the minimum mean-square error (MMSE) criterion. The scheme proposed is valid for communication systems with single and multielement antennas. The model prediction accuracy has been checked for LTE-Advanced systems with the help of math simulation.

Keywords: noise immunity, channel estimation, fast channel adaptation, adaptive selection of transmission format, PHY abstraction, network simulation.