

ПРЕДСКАЗАНИЕ СРЕДНЕГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В СИСТЕМЕ OFDMA БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Моисеев С.Н., Филин С.А., Кондаков М.С.

Введение

Недавно опубликованные стандарты беспроводных широкополосных сетей передачи данных IEEE 802.16 [1] и 802.16e [2] рассматриваются как наиболее перспективные для построения сотовых сетей передачи мультимедийных данных. Стандарты поддерживают все основные современные технологии в области телекоммуникаций. В частности, они включают механизм поддержки заданного уровня качества обслуживания (QoS), адаптивное кодирование и модуляцию, регулировку мощности, механизм гибридной автоматической повторной передачи (H-ARQ), «умные» антенны, пространственно-временное кодирование (технологии MIMO) и метод множественного доступа посредством разделения ортогональных поднесущих (OFDMA). Краткое описание этих стандартов и технологии OFDMA на русском языке можно найти в работах [3-5].

Для эффективной работы сотовой сети, построенной на основе этих стандартов, необходимо использовать продвинутое алгоритмы адаптивной передачи. Алгоритмы адаптивной передачи требуют оценки условий приема [6], [7]. В системе OFDMA условия приема достаточно полно характеризуются усредненным по поднесущим отношением сигнал-шум (ОСШ) и среднеквадратическим отклонением ОСШ [8], [9], [10]. Поскольку эти значения не могут быть точно известны в текущем кадре передачи данных, их необходимо предсказывать. Ошибка предсказания существенно влияет на характеристики адаптивных алгоритмов [11], [12], [13].

Целью данной работы является построение статистической прогностической модели усредненного по поднесущим ОСШ, являющегося основным параметром, характеризующим условия приема в IEEE 802.16 OFDMA системе. Модель строится по реализациям ОСШ, полученным с помощью симулятора системного уровня.

Оценка среднего по поднесущим значения ОСШ

В симуляторе системного уровня использовалась топология беспроводной сети, состоящая из 19 трехсекторных сот. Таким образом, общее количество секторов сети составляло 57. Шесть сот первого слоя и двенадцать сот второго слоя окружали центральную соту. Радиус всех сот был равен 1000 м. Заданное количество мобильных станций равномерно распределялось в границах каждого сектора.

Коэффициент повторного использования частоты был равен 3, несущая частота - 2.4 ГГц, а ширина полосы частот в каждом секторе - 10 МГц. Базовые станции каждого сектора имели максимальную мощность 10 Вт,

Получены выражения для прогноза усредненного по поднесущим отношения сигнал-шум (ОСШ) в беспроводной сети передачи данных, использующей технологию OFDMA. Статистическая модель ОСШ строилась по реализациям, полученным с помощью симулятора сети системного уровня. Построение прогностической модели велось в рамках линейных процессов авторегрессии. Показано, что предлагаемая прогностическая модель дает более точные прогнозы по сравнению с тривиальным прогнозом по среднему значению.

коэффициент шума 5 дБ и 120-градусную секторную антенну. Каждая мобильная станция, имеющая всенаправленную антенну, рассчитывалась на максимальную мощность излучения 1 Вт и коэффициент шума 9 дБ.

В используемом симуляторе был взят временной дуплекс (TDD) с одинаковыми длительностями кадров прямого и обратного каналов. Для всех секторов сети реализован режим частотного разнесения [4,5]. Кадры всех секторов синхронизированы во времени. Данные размещались в кадре слева направо по временной оси, чтобы минимизировать потребляемую мощность.

Для того чтобы получить усредненное по поднесущим значение ОСШ для каждого передаваемого блока данных, необходимо измерить значение ОСШ на поднесущую для этого блока данных. Значение ОСШ на i -ой поднесущей измерялось следующим образом

$$x(i) = \left(P_{Tx}^{(U)} \cdot PL^{(U)}(i) \right) / \left(P_N + \sum_{\{I(i)\}} P_{Tx}^{(I)} \cdot PL^{(I)}(i) \right), \quad (1)$$

где $P_{Tx}^{(U)}$ - излучаемая мощность и $PL^{(U)}(i)$ - потери при распространении полезного сигнала на i -ой поднесущей, P_N - мощность термального шума на одну поднесущую, $\{I(i)\}$ - множество помеховых сигналов от других секторов сети, которые передаются на той же i -ой поднесущей, $P_{Tx}^{(I)}$ - излучаемая мощность и $PL^{(I)}(i)$ - потери при распространении помехового сигнала на i -ой поднесущей. ОСШ на одну поднесущую (1) представлено в линейном масштабе. В дальнейшем будем использовать ОСШ в логарифмическом масштабе:

$$\tilde{x}(i) = 10 \cdot \lg(x(i)).$$

Усредненное по всем поднесущим блока данных значение ОСШ имеет вид

$$z = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K \tilde{x}(i), \quad (2)$$

где K - множество поднесущих блока данных полезного сигнала.

В симуляторе была использована следующая модель потерь на трассе распространения сигнала на i -ой поднесущей:

$$PL(i) = G_{Tx} \cdot M \cdot F(i) \cdot L \cdot G_{Rx} \cdot 10^{-NF/10},$$

где G_{Tx} и G_{Rx} представляют собой коэффициенты усиления соответственно передающей и приемной антенн, M - медианные потери на трассе распространения для модели "Vehicular B" [14], $F(i)$ - быстрый фединг на i -ой поднесущей, генерируемый согласно модели "Vehicular B" и имеющий частоту Доплера 1 Гц, L - логарифмически нормальный фединг со среднеквадратическим отклонением 8 дБ, NF - коэффициент шума.

Усредненное по поднесущим значение ОСШ (2) z_t измерялось в каждом кадре длительностью 20 мс. (t обозначает номер кадра).

Прогностическая модель усредненного ОСШ

Регрессионный анализ значений ОСШ и результаты работы [15] показывают, что усредненное по поднесущим ОСШ можно рассматривать как стационарный коррелированный гауссовский случайный процесс. Для таких процессов прогностическую модель удобно строить в рамках линейных процессов авторегрессии $AR(p)$ порядка p . Линейным авторегрессионным процессом $AR(p)$ можно аппроксимировать любой линейный процесс с заданной точностью.

Линейный процесс авторегрессии $AR(p)$ порядка p описывается следующим стохастическим разностным уравнением [16]

$$y_t = \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \xi_t,$$

$$y_t = z_t - m, \quad m = E\{z_t\},$$

где $E\{x\}$ - среднее значение x , $\varphi_i, i = 1, \dots, p$ - авторегрессионные коэффициенты, ξ_t - шум с независимыми значениями, имеющий нулевое среднее значение и дисперсию σ_ξ^2 . Дисперсия шума ξ_t выражается через авторегрессионные коэффициенты следующим образом:

$$\sigma_\xi^2 = \sigma^2 \left(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i r_i \right),$$

где $\sigma^2 = E\{(z_t - m)^2\}$, r_i - i -ое значение нормированной корреляционной функции процесса y_t . Значения φ_i могут быть найдены из следующей системы линейных уравнений Юла-Уолкера [16]

$$r_0 = 1,$$

$$r_i = \sum_{j=1}^p \varphi_j r_{i-j}, \quad i > 0. \quad (3)$$

Оптимальный прогноз \hat{y}_{t+k} значения процесса y_{t+k} , по критерию минимума среднего квадрата ошибки прогноза, имеет вид:

$$\hat{y}_{t+1} = \varphi_1 y_t + \varphi_2 y_{t-1} + \dots + \varphi_p y_{t-p+1},$$

$$\hat{y}_{t+2} = \varphi_1 \hat{y}_{t+1} + \varphi_2 y_t + \dots + \varphi_p y_{t-p+2},$$

$$\hat{y}_{t+3} = \varphi_1 \hat{y}_{t+1} + \varphi_2 \hat{y}_t + \dots + \varphi_p y_{t-p+2},$$

...

$$\hat{y}_{t+k} = \sum_{i=1}^v \varphi_i \hat{y}_{t+k-i} + \sum_{i=v+1}^p \varphi_i y_{t+k-i}, \quad v = \min(k-1, p),$$

Прогноз \hat{y}_{t+k} на k кадров вперед дается с текущего момента времени t при условии, что значения $y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-p+1}$ процесса y_t известны. Оптимальный прогноз на k кадров вперед усредненного по поднесущим значения ОСШ z_{t+k} имеет вид

$$\hat{z}_{t+k} = \hat{y}_{t+k} + m.$$

Средний квадрат ошибки прогноза ОСШ z_t на k кадров вперед можно записать в следующем виде [17].

$$\sigma_k^2 = \sigma_\xi^2 \sum_{i=1}^k \Psi_{k-i}^2, \quad (4)$$

где

$$\Psi_j = 0, \quad j < 0,$$

$$\Psi_j = 1, \quad j = 0,$$

$$\Psi_j = \sum_{i=1}^p \varphi_i \Psi_{j-i}, \quad j > 0.$$

Условная плотность вероятностей усредненного ОСШ z_{t+k} при известных значениях $z_t, z_{t-1}, \dots, z_{t-p+1}$ может быть легко получена из условной плотности вероятностей ошибки предсказания процесса y_{t+k} при известных значениях $y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-p+1}$. Статистический анализ ошибки предсказания показал, что ее на практике можно считать в первом приближении гауссовской случайной величиной. Следовательно, условная плотность вероятностей усредненного ОСШ z_{t+k} будет гауссовской плотностью вероятностей

$$W(z_{t+k} | z_t, z_{t-1}, \dots, z_{t-p+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \exp \left[-\frac{(z_{t+k} - \hat{z}_{t+k})^2}{2\sigma_k^2} \right].$$

Эта плотность вероятностей полностью описывает в вероятностном смысле прогностическую модель усредненного по поднесущим блока данных ОСШ.

Оценка параметров прогностической модели

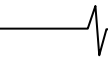
Для использования построенной прогностической модели на практике необходимо иметь оценки параметров модели. В первую очередь необходимо оценить параметры m, σ^2 и r_i . Пусть известны n значений усредненного ОСШ z_i для n подряд идущих кадров передачи данных. Оценки максимального правдоподобия параметров m, σ^2 и r_i имеют вид:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i,$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - m)^2,$$

$$r_i = \frac{1}{\sigma^2 (n-i)} \sum_{j=1}^{n-i} (z_j - m)(z_{j+i} - m).$$

Затем необходимо оценить порядок p авторегрессионного процесса y_t . Технология оценивания этого параметра была предложена в [16] и основана на оценках частной автокорреляционной функции $\rho_{i,i}$ процесса y_t . Частная автокорреляционная $\rho_{i,i}$ функция рассчитывается с помощью следующих рекуррентных соотношений



$$\rho_{0,0} = 1, \quad \rho_{1,1} = r_1,$$

$$\rho_{i+2,j+2} = \frac{r_{i+2} - \sum_{j=0}^i \rho_{i+1,i+1} r_{i-j+1}}{1 - \sum_{j=0}^i \rho_{i+1,i+1} r_{i+1}},$$

$$\rho_{i+2,j+1} = \rho_{i+2,j+1} - \rho_{i+2,i+2} \rho_{i+1,i-j+1}, \quad i \geq 0, \quad j = 0, \dots, i.$$

Оценка порядка авторегрессии p равна количеству первых значений частной автокорреляционной функции, начиная с единичной задержки, статистически значимо отличающихся от нуля. На рис. 1 в качестве примера приведена типичная выборочная частная автокорреляционная функция процесса y_t , полученная при обработке данных симулятора системного уровня. Горизонтальными линиями представлены 95% доверительные границы нулевых значений.

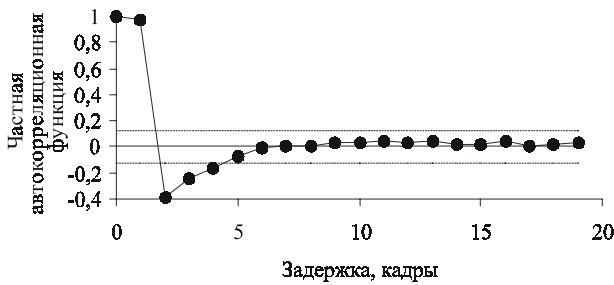


Рис. 1. Частная автокорреляционная функция процесса y_t .

Из рисунка видно, что значимо отличаются от нуля 4 значения частной автокорреляционной функции. Следовательно, для этого случая $p = 4$.

Наконец, авторегрессионные коэффициенты ϕ_i могут быть получены из системы линейных уравнений Юла-Уолкера.

Верификация прогностической модели

Качество подгонки модели авторегрессии к экспериментальным данным достаточно полно характеризует выборочная автокорреляционная функция остаточной ошибки модели ξ_t . На рис. 2 приведена в качестве примера выборочная нормализованная автокорреляционная функция ξ_t . Горизонтальными линиями представлены 95% доверительные границы нулевых значений автокорреляционной функции.

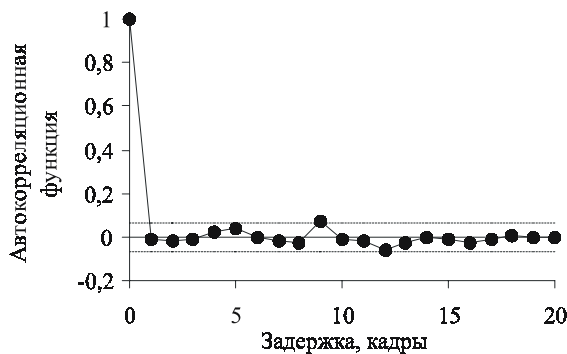


Рис. 2. Выборочная нормализованная автокорреляционная функция остаточной ошибки модели.

Из рис. 2 видно, что остаточную ошибку модели можно считать независимым шумом, так как все значения автокорреляционной функции не отличаются значительно от нуля. Это свидетельствует о том, что авторегрессионная модель четвертого порядка $AR(4)$ адекватно описывает экспериментальные данные.

Рис.3 иллюстрирует процесс прогнозирования усредненного ОСШ. Сплошной линией представлены наблюдаемые значения ОСШ z_{t+1} , пунктирной линией нанесены прогнозные значения ОСШ \hat{z}_{t+1} при прогнозе на один кадр вперед.



Рис. 3. Иллюстрация прогноза усредненного ОСШ.

На рис.4 сплошной линией представлена теоретическая среднеквадратическая ошибка прогноза σ_k в зависимости от времени упреждения прогноза k в кадрах. Кругами приведена выборочная оценка среднеквадратической ошибки прогноза σ_k , рассчитываемая по наблюдаемым данным z_t по формуле

$$\sigma_k^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{i+k} - \hat{z}_{i+k})^2}.$$

Горизонтальной линией нанесено среднеквадратическое отклонение процесса z_t , которое можно рассматривать как среднеквадратическую ошибку прогноза процесса z_t по его среднему значению

$$\hat{z}_{t+k}^{Av} = E\{z_{t+k}\} = m.$$

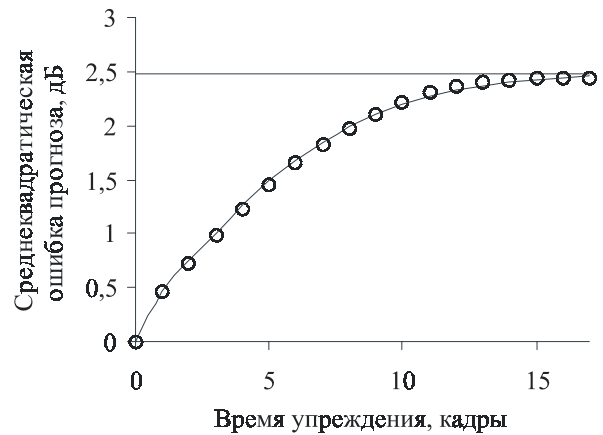


Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка прогноза.

Из рис. 4 видно, что оптимальный прогноз ОСШ \hat{z}_{t+1}^{Av} на 2 дБ точнее, чем прогноз по среднему значению \hat{z}_{t+1} . При увеличении времени упреждения прогноза k среднеквадратическая ошибка оптимального прогноза \hat{z}_{t+1}^{Av} стремится к среднеквадратическому отклонению ОСШ σ . Среднеквадратические ошибки прогнозов для Рис.4 были получены для произведения длительности

кадра на частоту Доплера быстрого фединга равного 0,02. При уменьшении этого произведения среднеквадратическая ошибка оптимального прогноза на заданное число кадров вперед будет уменьшаться.

Литература

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Standard 802.16–2004, Oct. 1, 2004.
2. Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, IEEE Standard 802.16e–2005, Dec. 7, 2005.
3. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16-2004. // Электроника: НТБ. 2005. N2. С. 46-52.
4. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А., Моисеев С.Н., Кондаков М.С. Технология OFDM и варианты множественного доступа на ее основе. // Мобильные системы. 2005. № 10. С. 12–18.
5. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А., Моисеев С.Н., Кондаков М.С. Технический обзор стандарта IEEE 802.16. // Мобильные системы. 2005. № 11. С. 16–24.
6. Filin S.A., Moiseev S.N., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Yim D.H., Lee J., Chang S., Park Y.S. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms for the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006), Apr. 2006.
7. Filin S.A., Moiseev S.N., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Yim D.H., Lee J., Chang S., Park Y.S. QoS-guaranteed cross-layer transmission algorithms with adaptive frequency subchannels allocation in the IEEE 802.16 OFDMA system. // IEEE International Conference on Communications (ICC 2006), Jun. 2006.
8. Lampe M., Rohling H., Zirwas W. Misunderstandings about link adaptation for frequency selective fading channels. // IEEE Int. Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 2002), vol. 2, pp. 710–714, Sep. 2002.
9. Lampe M., Giebel T., Rohling H., Zirwas W. PER–prediction for PHY mode selection in OFDM communication systems. // IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM 2003), vol. 22, no. 1, pp. 25–29, Dec. 2003.
10. Moiseev S.N., Filin S.A., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Savinkov A.Y., Park Y.S., Yim D.H., Lee J.H., Cheon S.H., Han K.T. Practical propagation channel robust BLER estimation in the OFDM/TDMA and OFDMA broadband wireless access networks. // IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2006 Fall), Sep. 2006.
11. Zhou S., Giannakis G.B. How accurate channel prediction needs to be for transmit-beamforming with adaptive modulation over Rayleigh MIMO channels? // IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 4, pp. 1285–1294, Jul. 2004.
12. Goeckel D.L. Adaptive coding for time-varying channels using outdated fading estimates. // IEEE Trans. Commun., vol. 47, no. 6, pp. 844–855, Jun. 1999.
13. Falahati S., Svensson A., Ekman T., Sternad M. Adaptive modulation systems for predicted wireless channels. // IEEE Trans. Commun., vol. 52, no. 2, pp. 307–316, Feb. 2004.
14. Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT–2000, Recommendation ITU-R M.1225, 1997.
15. Moiseev S.N., Filin S.A., Kondakov M.S., Garmonov A.V., Yim D.H., Lee J., Chang S., Park Y.S. Analysis of the statistical properties of the SINR in the IEEE 802.16 OFDMA network. // IEEE International Conference on Communications (ICC 2006), Jun. 2006.
16. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time series analysis, forecasting and control. San Francisco: Holden-Day, 1970.
17. Моисеев С.Н. Предельное время предсказуемости процессов авторегрессии-скользящего среднего. //Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2002. Т.45. N10. С. 900-908

Уважательные авторы!

Редакция научно-технического журнала "Цифровая обработка сигналов" просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст - текстовый редактор Microsoft Word на базе версии WINDOWS'95 или выше.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается:
 - краткой аннотацией на русском и английском языках;
 - номером УДК;
 - сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, телефоны, электронная почта).

2) Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) - желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) - М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.