

УДК 621.396.4

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЛОКОВОЙ ОШИБКИ В КАНАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ OFDMA

**С. Н. Моисеев**, ведущий сотрудник ЗАО «Кодофон»; smoiseev@kodofon.vrn.ru

**М. С. Кондаков**, инженер ОАО «Концерн «Созвездие»

**Ключевые слова:** оценка вероятности блоковой ошибки, адаптация к каналу распространения, ОСШ, множественный доступ с частотно-временным разделением.

**Введение.** Беспроводные сети передачи данных на основе множественного доступа с временным разделением и технологии OFDM, а также множественного доступа с частотно-временным разделением (OFDMA), например сети стандарта IEEE 802.16 [1], можно рассматривать как наиболее многообещающее решение для передачи мультимедийного трафика. Ключевые требования, предъявляемые к этим сетям, — высокая спектральная эффективность и соответствие заданному качеству обслуживания (QoS), что достигается в первую очередь за счет продвинутых адаптивных алгоритмов передачи.

Для адаптивных алгоритмов передачи, удовлетворяющих требованиям QoS, необходима оценка вероятности блоковой ошибки (BLER) для каждого передаваемого кодового блока данных в зависимости от условий приема [2, 3]. Как правило, условия приема характеризуются единственным параметром — отношением сигнал-шум (ОСШ). Общепринятый подход к оценке BLER заключается в том, что зависимости BLER от ОСШ получают с помощью симулятора физического уровня сети для заданной модели канала посредством усреднения по всем реализациям шума и фединга.

Однако такой подход имеет два серьезных недостатка для сети OFDMA в условиях частотно-селективного фединга. Во-первых, для разных моделей канала зависимость BLER от ОСШ заметно различается. Во-вторых, даже для заданной модели канала эта зависимость, полученная усреднением по разным реализациям частотно-селективного фединга, сильно отличается от аналогичных зависимостей, полученных для фиксированных реализаций фединга [4, 5], что значительно ухудшает характеристики адаптивных алгоритмов. В специальной литературе предлагается несколько способов решения данной проблемы.

Суть первого подхода, опирающегося на понятие эффективного ОСШ [6—8], заключается в использовании для произвольного канала зависимостей BLER от ОСШ, полученных для канала, содержащего только аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). При применении этих зависимостей для частотно-селективного канала используется некое преобразование ОСШ, называемое эффективным ОСШ. Недостатком такого подхода является то, что влияние канала на величину BLER характеризуется единственным параметром — ОСШ, а влияние амплитудно-частотной характеристики канала вообще не принимается во внимание.

Второй подход основан на использовании регрессионной зависимости индикатора от ОСШ при выборе схемы кодирования и модуляции для известного канала и требуемого значения BLER [4, 5].

Развивая идеи этого подхода, авторы данной статьи предлагают практическую оценку BLER, довольно устойчивую к различиям в моделях частотно-селективных каналов. Кривая BLER оценивается как функция двух параметров — усредненного по поднесущим кодового блока данных ОСШ и среднеквадратического отклонения (СКО) ОСШ, нормализованного к усредненному ОСШ. Весь диапазон возможных значений СКО ОСШ разбивается на пять интервалов, чтобы уменьшить количество кривых BLER для алгоритмов адаптации. У предлагаемого алгоритма оценки есть по крайней мере два преимущества по сравнению с известными. Во-первых, очевиден выигрыш в пропускной способности сети; во-вторых, зависимость BLER от различных моделей частотно-селективных каналов значительно уменьшается. А это способствует более точной адаптации алгоритмов передачи данных к неизвестному каналу.

**Постановка задачи и известные решения.** Кратко рассмотрим особенности передачи данных в сети OFDMA. Блоки данных кодируются, образуя кодовые блоки. Каждый кодовый блок модулируется с помощью квадратурно-амплитудной модуляции (QAM). Символам модуляции назначаются поднесущие символы OFDM. При использовании множественного доступа с временным разделением и технологии OFDM кодовый блок занимает всю полосу частот. В случае множественного доступа OFDMA поднесущие одного кодового блока обычно псевдослучайно перемешиваются во всей полосе частот, обеспечивая выигрыш за счет частотного разнесения. Таким образом, символы модуляции одного кодового блока оказываются распределены по всей полосе частот. Во временной области кодовый блок занимает один или несколько символов OFDM.

На приемной стороне в условиях частотно-селективного канала ситуация следующая. Во временной области коэффициент передачи канала для каждой поднесущей примерно постоянен на протяжении передачи одного кодового блока. В частотной области коэффициенты передачи канала для разных поднесущих одного кодового блока заметно различаются. Следовательно, мягкие решения на входе декодера имеют различные ОСШ. Вариации ОСШ мягких решений в пределах одного кодового блока существенно влияют на значение BLER. Поэтому для заданной схемы кодирования и модуляции BLER  $\beta$  зависит от всего множества ОСШ кодового блока

$$\beta = \beta(\mathbf{z}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  — множество ОСШ на всех поднесущих кодового блока;  $n$  — количество поднесущих кодового блока. Функция (1) неприменима на практике ввиду большого количества переменных. Поэтому приходится использовать подходы, снижающие число переменных до приемлемого уровня.

В первом подходе [6—8] оценивают кривую BLER  $\beta_{AWGN}$  как функцию ОСШ  $z_{AWGN}$  в канале с АБГШ для заданной схемы кодирования и модуляции:

$$\beta_{AWGN} = \beta_{AWGN}(z_{AWGN}).$$

Для произвольного канала кривая BLER рассчитывается по формуле

$$\beta = \beta_{AWGN}(z_{Eff}),$$

где  $z_{Eff} = f(\mathbf{z})$  — эффективное ОСШ, являющееся функцией всего множества ОСШ кодового блока.

Таким образом, в этом подходе BLER является функцией только одного параметра ( $z_{Eff}$ ). Функция  $f(\mathbf{z})$  может быть подобрана для конкретного канала, однако она будет разной для разных каналов. Кроме того, в этом подходе не учитываются изменения BLER для разных реализаций одного и того же канала.

Во втором подходе BLER рассматривается как функция двух переменных — среднего ОСШ и индикатора [4, 5]:

$$\beta = \beta(m, I).$$

Здесь  $m = m(\mathbf{z}), I = I(\mathbf{H})$ , где  $\mathbf{H} = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$  — множество коэффициентов передачи канала для каждой поднесущей кодового блока.

У этого подхода тоже есть недостатки. Во-первых, предполагается [4, 5], что модель канала точно известна. Во-вторых, для определения необходимой величины ОСШ для заданного значения BLER функцию  $m = m(\beta, I)$  предлагается использовать в роли индикатора. Однако для многих алгоритмов адаптивной передачи требуется оценка функции BLER, а не ОСШ [2, 3]. В-третьих, индикатор  $I$  имеет непрерывную область определения, что делает невозможным его практическое применение в случае неизвестного канала. К тому же для неизвестного канала авторы данного подхода [4, 5] не предложили алгоритмов оценки индикатора  $I$ .

При развитии идеи второго подхода одновременно устраняются его недостатки.

**Оценка BLER.** Предлагается оценивать BLER как функцию двух переменных — среднего ОСШ  $m$  и нормализованного СКО ОСШ  $\gamma$  [9]:

$$\beta = \beta(m, \gamma),$$

$$\text{где } m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i; \quad \gamma = \frac{\sigma}{m}; \quad \sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - m)^2.$$

Здесь  $z_i$  — ОСШ на поднесущей  $i$ .

Причины, по которым была выбрана такая оценка BLER, следующие. Во-первых, использование ОСШ на поднесущую  $z_i$  вместо коэффициента передачи канала  $H_i$  позволяет учитывать помехи от соседних секторов сети. Во-вторых, среднее ОСШ  $m$  и СКО ОСШ  $\sigma$  являются независимыми случайными процессами в сети OFDMA на базе стандарта IEEE 802.16 [10]. Это означает, что  $m$  и  $\sigma$  более полно учитывают информацию о канале по сравнению с другими зависимыми параметрами.

Для практического применения предложенной оценки BLER целесообразно разбить интервал возможных значений  $\gamma$  на конечное число подынтервалов  $\Delta_i = (\gamma_{i-1}, \gamma_i)$ ,  $i = \overline{1, L}$ . Функции  $\beta(m, \gamma \in \Delta_i)$  оцениваются для каждого подынтервала  $\Delta_i$ . Увеличение числа подынтервалов  $L$  способствует более точной адаптации к каналу, но при этом увеличивается количество кривых BLER. На практике параметры  $m$  и  $\gamma$  можно

оценить, например, по преамбуле или с помощью информации, переданной приемником передатчику по обратной связи.

**Моделирование.** С помощью симулятора физического уровня системы OFDMA на основе стандарта IEEE 802.16 были получены функции  $\beta(m, \gamma)$  для сверточного кодера для следующих схем кодирования и модуляции: квадратная фазовая манипуляция (QPSK) со скоростью кодирования 1/2 и 3/4, QAM с размером созвездия 16, скоростями кодирования 1/2 и 3/4, QAM с размером созвездия 64, скоростями кодирования 1/2, 2/3 и 3/4. Моделирование проводилось для семейств моделей каналов SUI [11] и ITU-R M.1225 [12]. Число подынтервалов  $L$  для  $\gamma$  составило пять со следующими границами:  $\gamma_0 = 0; \gamma_1 = 0,3; \gamma_2 = 0,5; \gamma_3 = 0,6; \gamma_4 = 0,7; \gamma_5 = \infty$ .

Покажем на результатах моделирования преимущества предлагаемого подхода. Предположим, что модель канала известна. Вероятность блоковой ошибки (рис. 1) определяется с помощью кривых  $\beta(m, \gamma)$  для QPSK со скоростью кодирования 3/4 и кодовым блоком 27 байт, снятых в канале SUI-1. Кривые 1—5 соответствуют пяти подынтервалам параметра  $\gamma$ , кривая 6 соответствует кривой BLER  $\beta(m)$ , зависящей только от одного параметра — среднего ОСШ.

Пусть величина среднего ОСШ равна 13,3 дБ. Если требуемое для обеспечения качества сервиса значение BLER равно  $10^{-4}$  и согласно [6—8] используется кривая 6, то следует выбрать схему QPSK со скоростью кодирования 3/4, соответствующую этому случаю. Но если текущие условия в канале описываются кривой 5, для которой значение BLER равно  $3 \cdot 10^{-3}$ , то требования по качеству обслуживания удовлетворены не будут.

Зафиксируем требуемую величину BLER, например, на уровне  $10^{-4}$ . При использовании усредненной зависимости BLER (кривая 6) надо выбрать схему QPSK со скоростью кодирования 3/4, если среднее ОСШ превышает 13,3 дБ. Однако, если текущие условия в канале характеризуются кривой 2, подойдет схема QPSK со скоростью кодирования 3/4 при среднем ОСШ более 8,5 дБ. Таким образом, с помощью предлагаемой оценки BLER благодаря более точной подстройке к каналу можно получить выигрыш в пропускной способности сети.

С помощью технологии, описанной в [13], была выполнена оценка пропускной способности отдельного сектора сети. На рис. 2 приведены две кривые огибающих пропускной способности сектора при использовании вышеперечисленных схем кодирования и модуляции в частотно-селективном канале ITU-R M.1225 Outdoor to Indoor B [12]. Схемы кодирования и модуляции могут адаптивно выбираться в зависимости от условий в канале. Первая огибающая была получена при использовании оценки BLER  $\beta(m, \gamma)$  для первого подынтервала СКО ОСШ  $\gamma \in [0,03]$ , вто-

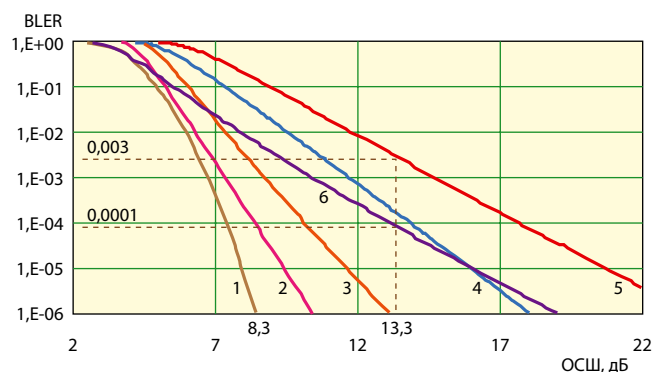


Рис. 1

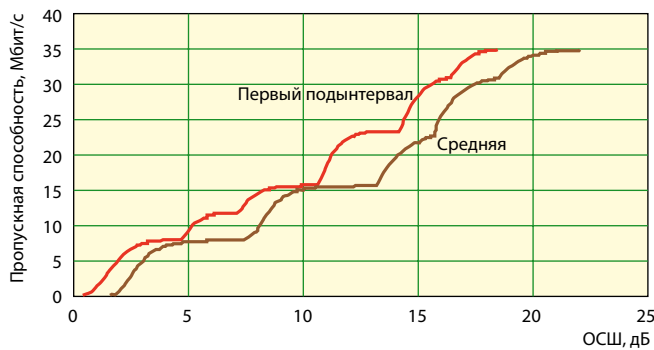


Рис. 2

рая — с помощью средней кривой  $\beta(m, \gamma)$ , не учитывающей СКО ОСШ. Для этого были задействованы следующие параметры сети: размер быстрого преобразования Фурье — 2048, количество поднесущих для передачи данных — 1440, ширина полосы частот — 10 МГц, длительность OFDM-символа, включая защитный интервал, — 184,8 мкс.

При помощи функции распределения среднего ОСШ и методологии [13] была рассчитана пропускная способность сектора для этих двух случаев. Если при использовании средней кривой BLER пропускная способность сектора оказалась равной 9,24 Мбит/с, то для кривой BLER из первого подынтервала нормализованного СКО ОСШ — 11,59 Мбит/с. Выигрыш составил примерно 25 %.

Заметим, что средняя кривая BLER  $\beta(m)$  является идеальной функцией в подходе, использующем понятие эффективного ОСШ, так как получена при усреднении всех реализаций канала. Таким образом, предлагаемый в данной работе подход превосходит подход, использующий понятие эффективного ОСШ.

Рассмотрим случай, когда модель канала неизвестна. Проверим, насколько велико различие между кривыми BLER в разных каналах. На основе функции  $\beta(m, \gamma)$  были получены обратные функции  $m(\beta, \gamma)$  для двух сильно различающихся моделей каналов SU1-5 и ITU-R M.1225 Indoor A и для схемы модуляции QAM с размером созвездия 16, скоростью кодирования 1/2 и кодовым блоком, равным 36 байт. Для каждого значения BLER были рассчитаны разности между соответствующими средними значениями ОСШ в этих каналах и соответствующие разности для средней  $m(\beta)$  функции. На рис. 3 эти разности показаны для пяти подынтервалов  $\gamma$  (кривые 1—5) и для средней функции (кривая 6).

Из рис. 3 видно, что разность между средними функциями  $m(\beta)$  достаточно велика и для  $\text{BLER} = 10^{-6}$  достигает 2,5 дБ. Отсюда следует, что если использовать среднюю функцию для одного канала, в то время как реально наблюдается другой канал, то пропускная способность снизится либо не будут выполняться требования по качеству обслуживания.

На практике модель канала неизвестна. Следовательно, методы, позволяющие сделать оценку BLER более устойчивой к различиям в каналах, необходимы для эффективной работы адаптивных алгоритмов. Предлагаемая оценка BLER полностью не устранит различий между кривыми BLER в разных каналах, однако позволит эти различия значительно уменьшить. Для интервала значений  $\gamma$  в пределах  $[0; 0,6]$  разница в значениях меньше 1 дБ (см. рис. 3, кривые 1—3). И хотя для кривых 4, 5 это различие больше, оно все-таки меньше, чем для средних кривых BLER.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки вероятности блоковой ошибки дает дополнительные возможности для более гибкой адаптации к изменяющимся условиям

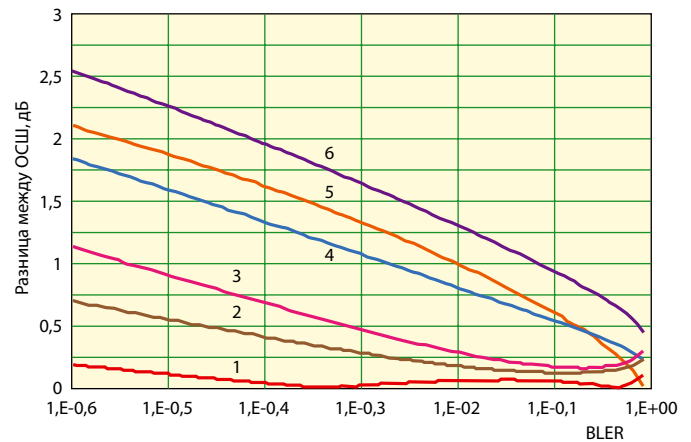


Рис. 3

в канале распространения и, как следствие, более устойчив к изменениям характеристик канала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Standard 802.16—2004; IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks.— Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Oct. 1, 2004.
2. Filin S.A. et al. QoS-guaranteed cross-layer adaptive transmission algorithms for the IEEE 802.16 OFDMA system//IEEE Wireless Communications and Networking Conference: WCNC 2006.— 2006.— Vol. 2.
3. Filin S.A. et al. 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.— 2006.— Vol. 11.
4. Lampe M., Rohling H., Zirwas W. Misunderstandings about link adaptation for frequency selective fading channels//IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: PIMRC 2002.— 2002.— Vol. 2.
5. Lampe M., Giebel T., Rohling H. PER-prediction for PHY mode selection in OFDM communication systems//IEEE Global Communications Conference: Globecom 2003.— 2003.— Vol. 22, no. 1.
6. Tee A., Yoon S., Cleveland J. Link-system interface simulation methodologies//http://ieee802.org/20/Contribs/C802.20—04—67.ppt.— 2004.
7. Brueninghaus K. et al. Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems//IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: PIMRC 2005.— 2005.
8. Yaniv R. et al. CINR measurements using the EESM method // http://www.ieee802.org/16/tge/contrib/C80216 e-05\_141 r3.pdf.— 2005.
9. Moiseev S.N. et al. Practical propagation channel robust BLER estimation in the OFDM/TDMA and OFDMA broadband wireless access networks//IEEE Vehicular Technology Conference: VTC 2006 Fall.— 2006.
10. Moiseev S.N. et al. Analysis of the statistical properties of the SINR in the IEEE 802.16 OFDMA network//IEEE International Conference on Communications: ICC 2006.— 2006.
11. Erceg V. et al. Channel models for fixed wireless applications//http://ieee802.org/16/tg3/contrib/802163 c-01\_29 r4.pdf.— 2001.
12. Recommendation ITU-R M.1225; Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000.— 1997.
13. Ball C.F., Humburg E., Ivanov K. Spectrum efficiency evaluation for different wireless technologies based on traffic modeling//IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: PIMRC 2005.— 2005.