

# СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.391

*И.С. ШОСТКО, д-р техн. наук, Ю.Э. СОСЕДКА, АЛМАКАДМА ТАХА*

## РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В WPAN

### Введение

Мир телекоммуникаций и передачи данных сталкивается с динамично растущим спросом на частотные и временные ресурсы. В беспроводных системах связи, эта тенденция в основном связана с увеличением числа мобильных пользователей Internet и также с увеличением объемов передаваемой информации. Полоса пропускания в расчете на одного пользователя стремительно увеличивается. Поэтому задача увеличения скорости передачи данных (пропускной способности) в беспроводных каналах связи является актуальной.

Одним из перспективных направлений развития беспроводной связи для WPAN является переход к сверхширокополосным (СШП) сигналам (технология UWB Multiband OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing)) [1], которые обеспечивают максимальную на сегодняшний день скорость передачи данных в радиоканале, высокую помехоустойчивость в условиях многолучевого распространения и воздействия помех (стандарт IEEE 802.15.3a) [2]. Для увеличения скорости передачи данных в радиоканале и обеспечения высокой помехоустойчивости в условиях многолучевого распространения и воздействия помех необходимо в перспективных системах WPAN использовать технологию UWB Multiband OFDM при оптимальном управлении параметрами сигнала.

### Описание технологии Wireless Universal Serial Bus (WUSB)

Технология стандартизирована институтом IEEE – стандарт IEEE 802.15.3a [3]. Рабочие частоты – 3,1 – 10,6 ГГц, поддерживаемая скорость передачи данных: 53.3, 80, 106.7, 160, 200, 320, 400, 480, 640, 800, 960 и 1024 Мбит в секунду.

Однако расстояние от передатчика до приемника, при котором обеспечивается надежная передача данных со столь высокой скоростью, весьма мало. В пределах трех метров гарантируется скорость 480 Мбит/с. При увеличении этого расстояния до 10 м максимальная скорость передачи информации падает до 110 Мбит/с, и при дальнейшем возрастании расстояния от передатчика до приемника эта скорость продолжает стремительно убывать (причем гораздо быстрее, чем при использовании иных технологий беспроводной передачи данных — Wi-Fi, Bluetooth и др.)

Транспортный уровень Wireless USB базируется на UWB технологии; физический представляет собой уровень формирования среды передачи данных, где помимо WUSB с легкостью могут фигурировать W1394 (Wireless FireWire), Bluetooth и прочие.

### Особенности протокола Wireless USB

Структура кадра [2], который состоит из трех компонентов: преамбула PLCP, заголовок PLCP и PSDU. Компоненты перечислены в порядке передачи. Преамбула PLCP содержит пакет/синхронизации кадровой последовательности и канала оценки последовательности. PSDU является последним компонентом кадра. Этот компонент формируется из полезной нагрузки, кадра проверки (FCS), 6 бит и бит, которые вставлены с целью обозначения границы чередования символов. Полезная нагрузка содержит фактически данные для передачи. Полезная нагрузка может варьироваться от 1 до 4095 байт или даже может быть полностью опущена, если она не является полезной в данном контексте. Когда необходимо передать больше, чем 4095 байт, общую сумму делят на несколько кадров. В конце полезной нагрузки добавляется проверочный код FCS, чтобы помочь обнаружить ошибки передачи.

Участок из 6 бит влияет только на скорость передачи данных. При передаче пакетов преамбула PLCP отправляется первой, затем PLCP заголовок и, наконец, PSDU. Систематическая часть заголовка PLCP всегда передается со скоростью 39,4 Мбит/с. PSDU передается с желаемой скоростью передачи данных 53,3, 80, 106,7, 160, 200, 320, 400, 480, 640, 800, 960 или 1024 Мбит/с.

Проведём оценку накладных расходов, связанных с передачей данных, и вычислим эффективную пропускную способность. Накладные расходы для 480 Мбит/с приведены на рис. 1.

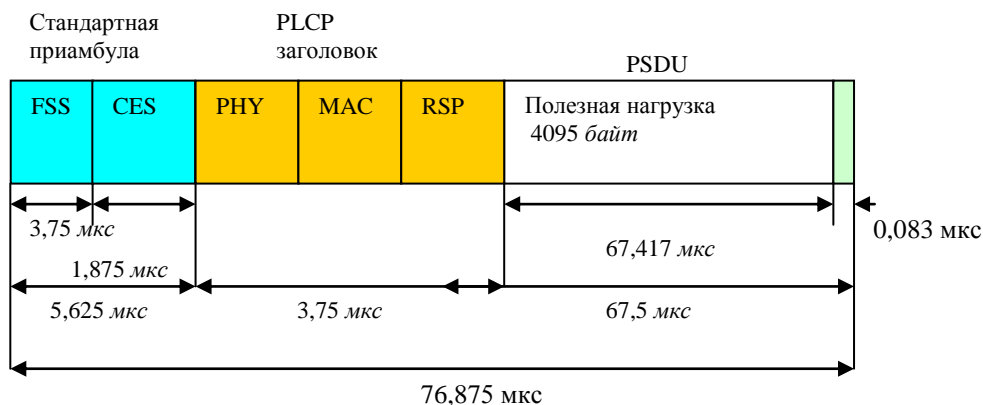


Рис.1. Структура временных интервалов кадра для 480 Мбит/с

Оценка накладных расходов времени:

$$\frac{t_{\text{общ}} - t_{\text{полезной нагрузки}}}{t_{\text{общ}}} = \frac{76,875 - 67,417}{76,875} = 12,3\% \quad (1)$$

или эффективный эквивалентный битрейт 420,9 Мбит/с.

То же самое можно вычислить для 53,3 Мбит/с, как показано на рис. 2.

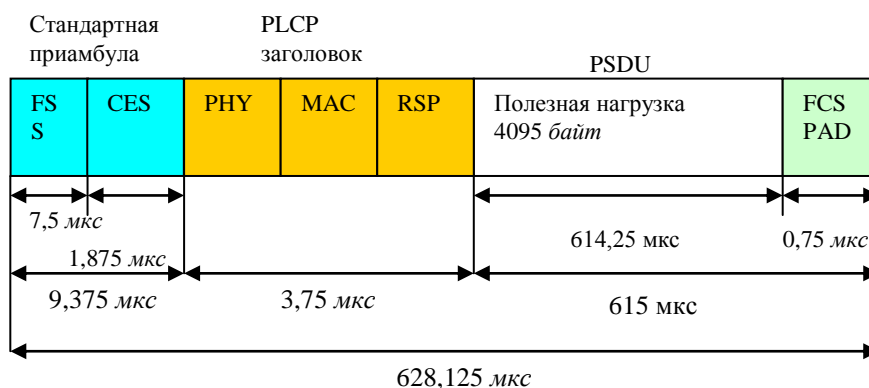


Рис. 2. Структура временных интервалов кадра для 53,3 Мбит/с

Оценка накладных расходов времени:

$$\frac{t_{\text{общ}} - t_{\text{полезной нагрузки}}}{t_{\text{общ}}} = \frac{628,125 - 615}{628,125} = 2,09\% \quad (2)$$

или эффективный эквивалентный битрейт 52,2 Мбит/с.

Результаты расчёта эффективности выбранного протокола  $\eta_p$  для максимальной длины полезной нагрузки для каждого стандарта номинальной скорости передачи данных, для

стандартного кадра (1) и с разрывом преамбулы (2) (допускается только для скорости передачи данных выше, 200 Мб/с) показаны на рис. 4.

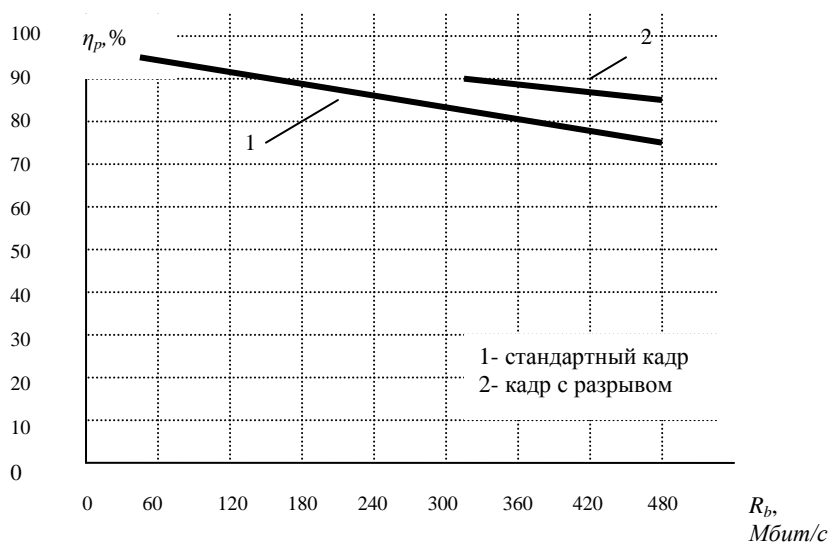


Рис. 3. Эффективность протокола  $\eta_p$  как функция от  $R_b$

### Разработка модели UWB Multiband OFDM приёмопередатчика

Имитационная модель физического уровня приёмо-передающей системы UWB была разработана в среде Matlab/Simulink [4 – 6]. Блок-схема данной модели приведена на рис. 4.

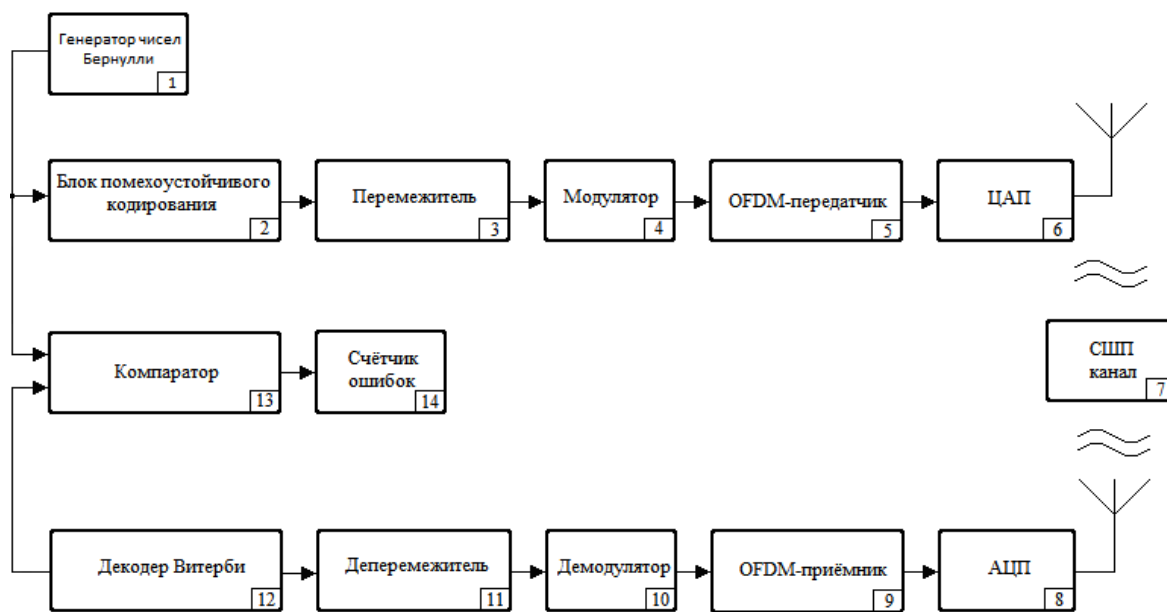


Рис. 4. Блок-схема модели СШП физического уровня

Первый блок представляет собой генератор чисел Бернулли, для получения случайной последовательности бит.

Второй блок – блок помехоустойчивого кодирования подробнее представлен на рис. 5:

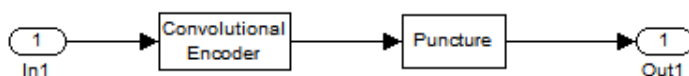


Рис. 5. Блок-схема помехоустойчивого кодирования в системе UWB

Третий блок представляет собой перемежитель. Основная его цель состоит в том, чтобы сделать потенциальную групповую ошибку одиночной в нескольких местах, это даёт возможность увеличить возможность правильного декодирования сигнала.

Четвёртый блок представляет собой модулятор, в нашей работе модель собрана на основе QPSK модуляции. Этот вариант модуляции выбран на основе проведённых исследований [7], где на основе опытного сравнения доказано, что система MB-OFDM UWB эффективнее работает с QPSK модуляцией, в которой используется созвездие из четырёх точек, расположенных на равных расстояниях (рис. 6).

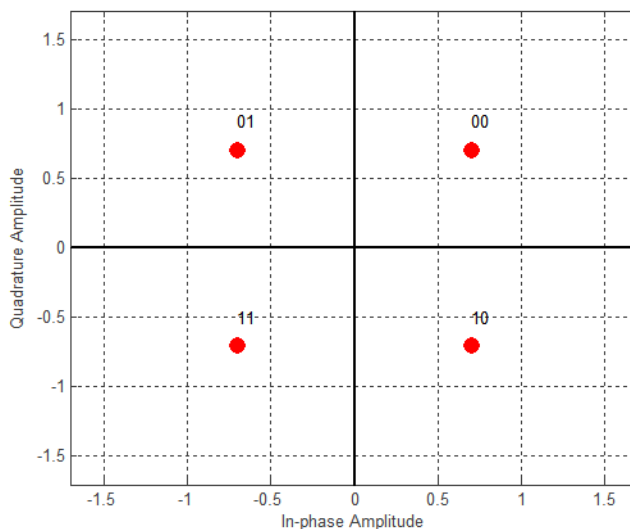


Рис. 6. Сигнальное созвездие QPSK

Для QPSK модуляции вероятность битовой ошибки имеет следующий вид

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3)$$

$$\text{BER}_{\text{qpsk}} = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_o}}\right) \quad (4)$$

где  $\text{erfc}$  – дополнительная функция ошибок, которая в свою очередь имеет вид

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (5)$$

На рис. 7 отображен пятый блок модели приемо-передающей системы UWB – OFDM передатчик:

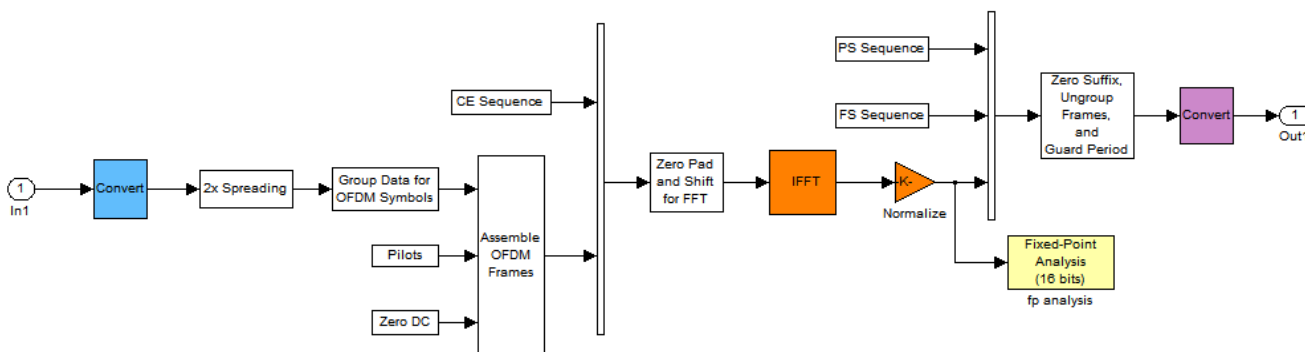


Рис. 7. Общая структура OFDM-передатчика

Цифровой сигнал, преобразованный в системе кодеров, поступает на полосовой модулятор. Выходная последовательность с модулятора поступает в мультиплексор, где и разбивается на множество потоков, которые будут поступать на блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Далее необходимо реализовать мультиплексирование потока данных по частоте. Эту операцию выполняют следующим образом: последовательный поток преобразуют в матрицу, каждый столбец которой далее будет преобразован в OFDM сигнал. После ОБПФ нужно создать циклический префикс (ЦП). Но передавать такой сигнал нельзя, его необходимо усилить.

При использовании квадратурно-амплитудной модуляции с количеством точек на созвездии большим, чем у QAM-4(QPSK), эти точки не будут соответствовать постоянной мощности, вследствие чего появляется такое понятие, как PAPR (Peak to Average Power Ratio) или отношение пиковой мощности к средней мощности сигнала. Для уменьшения значения PAPR используется метод Резервирования Тона (Tone Reservation (TR)). Он предполагает выделение дополнительных поднесущих с информацией, которая минимизирует PAPR.

В TR основная идея состоит в том, чтобы зарезервировать некоторые поднесущие OFDM, называемые Пиковые Тоны Сокращения (PRT) для снижения PAPR. Эти поднесущие не несут информации о данных, и используются только для того, чтобы уменьшить PAPR. Этот метод ограничивает вектор данных, и сокращает пиковый вектор, при этом не имеет связи с сеткой частот. Из-за этого условия в сигнале не возникают нелинейные искажения. Значения, использованные для преобразования сигнала, просто кодируются и передаются. Это объясняет увеличение вероятности битовой ошибки при использовании модуляции порядка выше четырёх.

Проблема заключается в том, что если сигнальное созвездие представляет собой квадратную сетку, символьная ошибка происходит при выходе за пределы квадрата со стороны, равной шагу квадратной сетки. При BPSK (рис. 8, а) и QPSK (рис. 8, б) все значения являются краевыми, поэтому рост вероятности ошибки линеен. Но в варианте QAM-8 (рис. 8, в) появляется понятие «краевой эффект», когда для краевых точек вероятность ошибки меньше, чем для остальных. Отсюда появляется нелинейное возрастание вероятности ошибки при порядках модуляции выше четырёх.

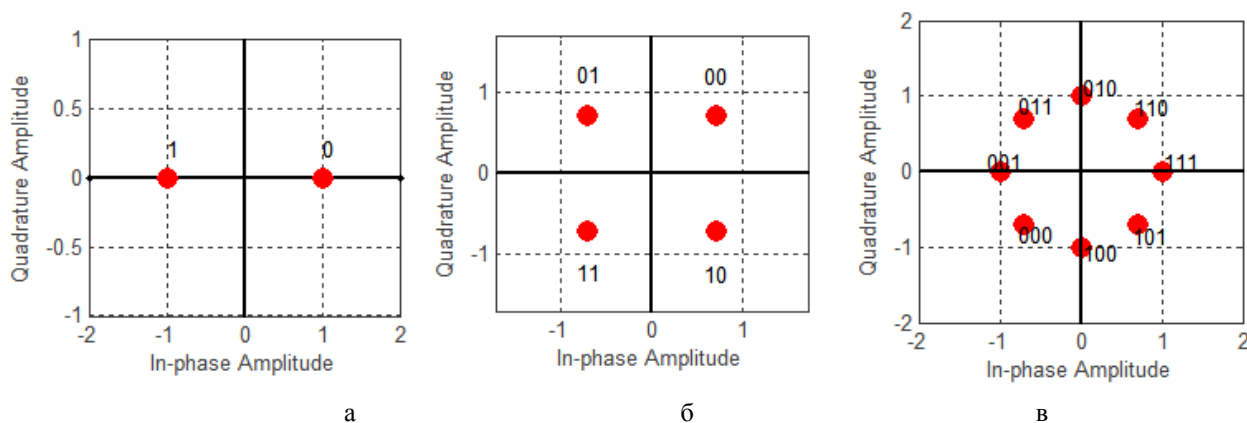


Рис.8. Сигнальные созвездия BPSK – а, QPSK – б и QAM-8 – в

С выхода OFDM-модулятора цифровой сигнал преобразуется в аналоговый посредством ЦАП (блок 6, рис. 4). После чего посредством СШП антенны, сигнал излучается в общую среду передачи (блок 7 – СШП канал, рис. 4). В приёмную часть входят: АЦП, OFDM-приёмник, QAM-демодулятор, деперемежитель, декодер Витерби, компаратор и счётчик ошибок.

В конечном итоге, UWB модель позволяет проделать следующее:

– исследовать зависимость вероятности битовой ошибки от скорости свёрточного кодирования;

- исследовать зависимость вероятности битовой ошибки от особенностей канала связи (прямая видимость сигнала, приём с переотражениями – CM1-4);
- исследовать зависимость вероятности битовой ошибки от расстоянии между приёмником и передатчиком;
- исследовать зависимость вероятности битовой ошибки от размера символа OFDM.

### **Анализ результатов моделирования и разработка рекомендаций по увеличению скорости передачи данных в WPAN с использованием СШПС**

Задача заключается в исследовании возможностей увеличения скорости передачи данных в системе UWB. Для этого в модели системы UWB, на основе Multiband OFDM, было сделано следующее:

- исследована зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от скорости свёрточного кодирования (11/32, 1/2 и 5/8);
- исследована зависимость соотношения сигнал/шум для различных моделей среды распространения по отношению к общей вероятности битовой ошибки;
- исследовано влияние различных размеров OFDM символа (16, 12, 10 и 8 бит) на вероятность битовой ошибки.

Предложенные группой IEEE [8] четыре модели среды распространения и приёма сигнала можно охарактеризовать следующим образом:

- расстояние от 0 до 4 м без преград (CM1);
- расстояние от 0 до 4 м с преградами (CM2);
- расстояние от 4 до 10 м с преградами (CM3);
- расстояние от 4 до 10 м с преградами и среднеквадратическим отклонением задержки в 25 нс (CM4).

В первом случае, изменение вероятности битовой ошибки при скорости свёрточного кодирования 11/32, в условиях не прямой видимости на расстоянии до 10 м (CM4) наблюдается наилучшее значение вероятности битовой ошибки при заданном соотношении сигнал/шум. Вариант CM4 имеет запас мощности по отношению к наихудшему варианту CM2 примерно 1 дБ. Это связано с низкоскоростным избыточным кодированием, которое предотвращает влияние помех и разнородностей в канале передачи. Во втором случае, изменение вероятности битовой ошибки при скорости свёрточного кодирования уже 1/2, в случае прямой видимости на расстоянии до 4 м (CM1) наблюдается наилучшее значение вероятности битовой ошибки при заданном соотношении сигнал/шум. Вариант CM1 имеет запас мощности по отношению к наихудшему варианту CM4 уже 2 дБ. Здесь, в отличии от случая со свёрточным кодом 11/32, вносимой избыточности недостаточно для уменьшения вероятности ошибки при плохих условиях распространения сигнала. Это также касается и следующего случая со свёрточным кодом 5/8. И в случае третьего варианта, изменение вероятности битовой ошибки при скорости свёрточного кодирования 5/8, в условиях прямой видимости на расстоянии от 4 до 10 м (CM1) наблюдается наилучшее значение вероятности битовой ошибки при заданном соотношении сигнал/шум. Вариант CM1 имеет запас мощности по отношению к наихудшему варианту CM4 порядка 2 дБ.

После сравнительной характеристики различных условий передачи для заданных скоростей передачи, (рис. 9) приведём сравнительную характеристику вероятности битовой ошибки для различных скоростей передачи данных. Наибольший запас соотношения сигнал/шум наблюдается в случае со свёрточным кодом 11/32, в котором используется наибольшая избыточность, что даёт выигрыш по запасу мощности более 4 дБ при вероятности битовой ошибки  $1 \cdot 10^{-6}$ .

На рис. 10 отображена зависимость размера символа OFDM в PLPC кадре относительно вероятности битовой ошибки. Для наглядности было взято соотношению сигнал/шум равное 8 дБ и свёрточный код 5/8. В соответствии с технологией OFDM, были использованы четыре возможных варианта в битах: 16, 12, 10 и 8. При размер символа в 8 бит проявляется наи-

худший результат по вероятности битовой ошибки, и далее с последующим увеличением размера OFDM символа, начиная с размера в 10 бит, изменение вероятности битовой ошибки становится более пологим.

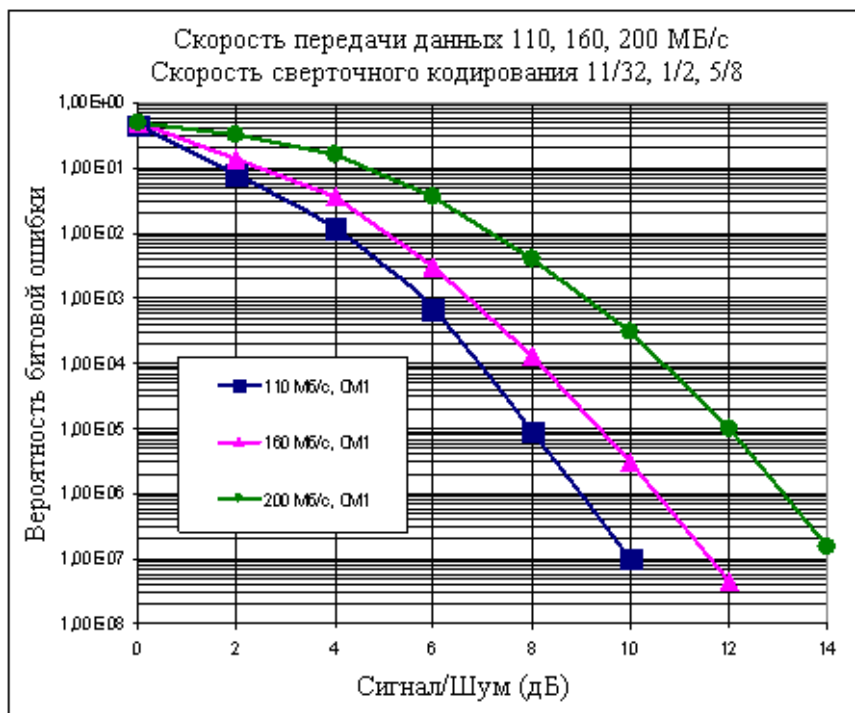


Рис. 9. Вероятности битовой ошибки для скоростей передачи данных 110, 160 и 200 Мб/с в канальной модели CM1

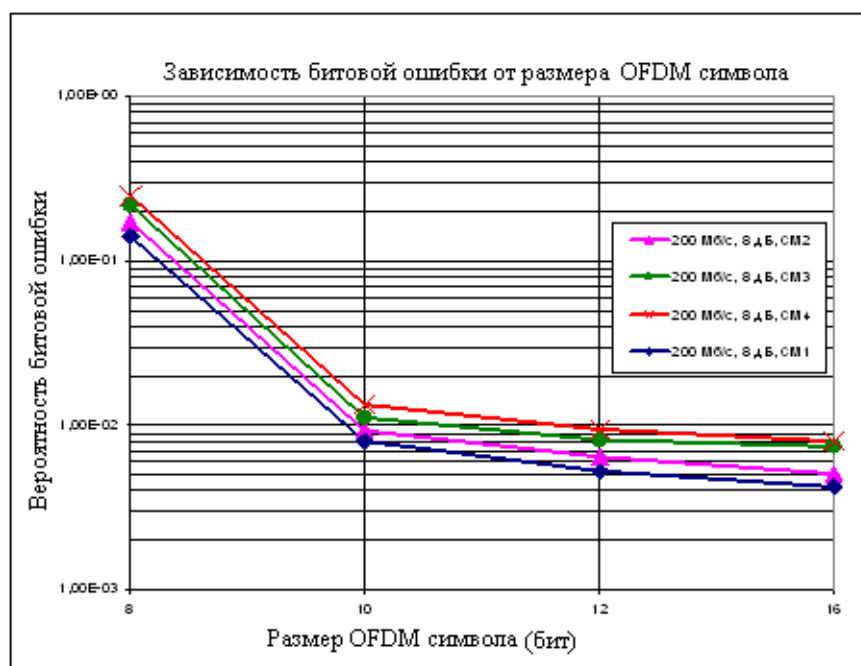


Рис. 10. Зависимость вероятности битовой ошибки от размера OFDM символа в битах

На основе проведённых исследований, на модели UWB, можно сделать следующие рекомендации:

– если приёмник и передатчик находятся в зоне прямой видимости, то лучше всего будет использование свёрточных кодов с малой избыточностью, например 5/8;

– когда же приёмник и передатчик не находятся в зоне прямой видимости, т.е. сигнал приходит переотраженный от различных объектов, то рекомендуется использовать свёрточный код 11/32, причем наибольший выигрыш по соотношению сигнал/шум получаем при наличии джиттера задержки сигнала порядка 25 нс;

– размер символа OFDM в технологии Multiband OFDM не рекомендуется использовать равным 8 бит, в данном случае наблюдаются высокая вероятность ошибки. При увеличении символа до 10 бит вероятность ошибки уменьшается примерно в 80 раз, при дальнейшем увеличении OFDM символа вероятность ошибки уменьшается более медленно. Так при размере OFDM символа в 16 бит (наибольшее значение, предложенное в технологии Multiband OFDM), то вероятность ошибки уменьшается на 2 порядка, т.е. в 100 раз.

### **Заключение**

Разработана модель приёмо-передатчика с использованием технологии UWB Multiband OFDM (стандарт IEEE 802.15.3a). Модель позволяет исследовать:

- зависимость вероятности битовой ошибки от скорости свёрточного кодирования;
- зависимость вероятности битовой ошибки от особенностей канала связи (прямая видимость сигнала или приём с переотражениями);
- зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния между приёмником и передатчиком;
- зависимость вероятности битовой ошибки от размера символа OFDM.

На основании результатов моделирования даны рекомендации:

- если приёмник и передатчик находятся в зоне прямой видимости, то предлагается использовать свёрточный код с малой избыточностью, например 5/8;
- когда же приёмник и передатчик не находятся в зоне прямой видимости, т.е. сигнал приходит переотраженный от различных объектов, то рекомендуется использовать свёрточный код 11/32, причем наибольший выигрыш по соотношению сигнал/шум получается при наличии джиттера задержки сигнала порядка 25 нс;
- размер символа OFDM в технологии Multiband OFDM влияет на вероятность ошибки. При увеличении размера OFDM символа с 8 до 16 бит (наибольшее значение, предложенное в технологии Multiband OFDM), вероятность ошибки уменьшается на два порядка.

**Список литературы:** 1. *Ramjee, Prasad*. OFDM for wireless communications systems – Boston: Artech House, Inc., 2004. – 274 p. 2. *Intel Corporation*. Intel's Multi-band UWB PHY Proposal for IEEE 802.15.3a // IEEE 802.15.3a Working Group, submission, Mar. 2003. 3. *Рекомендация IEEE 802.15.3a*. Режим доступа: www/ URL: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/> 4. *Ануфриев, И.Е., Смирнов, А.Б., Смирнова, Е.Н.* MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с. 5. *Черных, И.В.* Simulink: среда создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 496 с. 6. *Черных, И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: Диалог-МИФИ, 2008. – 288 с. 7. *Bikramaditya, Das, Susmita Das*. Efficacy of Multiband OFDM Approach in High Data Rate Ultra WideBand WPAN Physical Layer Standard using Realistic Channel Models // International Journal of Computer Applications; Vol.2, No.2, May 2010 81–87 p. 8. *Foerster, J.* Channel Modeling Sub-Committee report final IEEE Doc.11.P802.15-02/490r1-SG3a, 2003.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.09.2012