

УДК 681.518 + 621.391.82

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ КАНАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Кузнецова Т.А., Репп П.В.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: tak@pstu.ru

Проводится исследование качества системы беспроводной электросвязи в условиях действия внешних и внутренних помех. Целью работы является анализ помехоустойчивости WiFi и Bluetooth-сетей при передаче мультимедийного потока при наличии канальной интерференции. Произведен теоретический расчет вероятности ошибки приемника в составе двоичного симметричного канала при частотной модуляции. Оцениваются потери в свободном пространстве и дальность передачи Bluetooth-сетей. Методом математического моделирования с применением пакета прикладных программ MatLab исследуется помехоустойчивость Bluetooth-сетей в условиях действия аддитивной флуктуационной помехи типа белый шум в различных режимах работы. Получены зависимости вероятности ошибки приемника от соотношения сигнал/шум с учетом и без учета канальной интерференции, создаваемой совместной работой с устройством. При выбранном разбросе несущих частот канальная интерференция незначительно понижает помехоустойчивость системы связи, существенно меняя вид спектрограмм. Сделан вывод о необходимости разнесения диапазона рабочих частот совместно работающих беспроводных устройств для обеспечения заданного качества связи. Даны рекомендации для оптимального выбора оборудования при проектировании устройств беспроводной связи, исходя из их частотной совместимости.

Ключевые слова: беспроводные сети, помехоустойчивость, помехи, канальная интерференция, Bluetooth, WiFi, ошибка приемника, соотношение сигнал/шум

NOISEPROOF FEATURE OF WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM WITH THE CHANNEL INTERFERENCE

Kuznetsova T.A., Repp P.V.

State National Research Politechnical University, Perm, e-mail: tak@pstu.ru

The quality of the wireless communication system exposed by the external and internal noise was studied. The aim of the research was the noiseproof analysis of Wi-Fi and Bluetooth networks with channel interference during the multimedia transmission. A theoretical calculation of the probability of error in receiver as part of binary symmetrical channel with frequency modulation was performed. The losses in free space and the transmitting distance of Bluetooth networks were estimated. Via mathematical modeling using the MatLab software in different operation modes was investigated noiseproof of the Bluetooth network exposed by Additive Gaussian White Noise (AGWN). The dependence of the receiver error probability from the signal-to-noise ratio with and without channel interference by combined work with the device were found. With the spread of the chosen carrier frequencies the channel interference nominally reduces the noiseproof of the communication system and significantly changes the spectrograms shapes. The conclusion about the necessity of the optimization for the working frequencies band of wireless devices creating the channel interference was made. The recommendations for the equipment optimal selection in the wireless communication devices design based on their frequency compatibility were given.

Keywords: wireless networks, noiseproof, interference, channel interference, Bluetooth, WiFi, the receiver error, signal-to-noise ratio

Беспроводные технологии связи, позволяющие развертывать как глобальные и региональные (WWAN и WMAN), так и персональные (WLAN) сети – одна из наиболее быстро и эффективно развивающихся областей ИТ-сферы. Основными преимуществами беспроводных сетей являются: гибкость архитектуры, значительная зона покрытия, мобильность. Однако мобильность объектов связи и неоднородность среды передачи создает дополнительные сложности при обеспечении качества коммуникаций (высокой достоверности передачи информации), главным образом из-за возросшей вариативности помех. В этой связи при проектировании беспроводных систем связи актуальной задачей является адекватная оценка помеховой обстановки и прогноз ее влияния на качество приема/передачи.

Целью исследования является оценка качества приема/передачи информации в условиях действия внешних помех, в том числе с учетом канальной интерференции при совместной работе мобильных устройств, реализующих различные беспроводные технологии.

Материал и методы исследования

Несмотря на стремительное развитие беспроводных сетей передачи локального и Интернет трафика, персональные беспроводные сети остаются популярными. Это связано с тем, что в данном случае для подключения к сетевой инфраструктуре и передаче данных между устройствами не нужно использовать сетевую кабель, что активно используется в автомобильной промышленности (технология hands-free); в беспроводных клавиатурах, мышках, наушниках, колонках; при развертке сетей в местах чрезвычайных происшествий и организации спасательных

операций (где необходима быстрота передачи данных при минимальном количестве задействованного оборудования); при работе «в полевых условиях» (для коммуникаций при отсутствии спутниковой связи); при создании систем типа «Умный Дом» и т.д. Во всех этих случаях максимально быстрым и удобным является процесс подключения с использованием устройств Bluetooth.

В этой связи все мобильные устройства нового поколения оснащены блоками Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11) [1] и Bluetooth (стандарт IEEE 802.15) [2]. Причем Wi-Fi, как правило, используется для беспроводного подключения пользователя к Internet, а Bluetooth работает как многоточечный радиоканал для передачи мультимедийных аудио- и видеопотоков как на терминальные стационарные компьютеры, так и на мобильные устройства.

Передача мультимедийного трафика по беспроводным сетям более подвержена влиянию различных помех. Таким образом, задача определения возможности беспроводных клиентов получать тот или иной мультимедийный поток в определенном месте сети в условиях действия помех и повышения помехоустойчивости сети является актуальной.

Кроме того, следует учитывать, что современная техника проектируется с расчетом обеспечения максимальной мобильности и малых габаритов устройств, поэтому блоки Wi-Fi и Bluetooth монтируются на одной плате, что приводит к возникновению взаимных помех, обусловленных близостью рабочих диапазонов частот: для стандартов IEEE 802.11–0,9; 2,4; 3,6 и 5 ГГц (для IEEE 802.11b) [1]; для IEEE 802.15 – 2,4–2,4835 ГГц [2]. Таким образом, при оценке помехоустойчивости Wi-Fi и Bluetooth сетей необходимо учитывать канальную интерференцию этих двух стандартов.

Под помехой понимается любое воздействие, накладывающееся на полезный сигнал и затрудняющее его прием. Сигнал на входе канала связи F_m может быть представлен как линейная комбинация базовых векторов [3]:

$$F_m = a_1 \bar{S}_1(t) + a_2 \bar{S}_2(t) + a_3 \bar{S}_3(t) + \dots + a_n \bar{S}_n(t). \quad (1)$$

В случае дискретного канала, как правило, один из $a_i = 1$, другие, соответственно, нулю. Для приемников различных двух сигналов S_1 и S_2 – базисные век-

тора. На вход приемника устройства приходит либо: $x_1 = S_1(t) + \xi_1(t)$, либо: $x_2 = S_2(t) + \xi_2(t)$, где $\xi_i(t)$ – сигнал помехи. Вероятность ошибки приемника в составе двоичного симметричного канала:

$$P_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\frac{d}{2\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right), \quad (2)$$

где σ – заданное среднеквадратичное отклонение. Это выражение оценивает вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ как вероятность того, что проекция вектора помехи на вектор разности $\bar{d} = \bar{S}_1 - \bar{S}_2$ примет значение, превышающее $\frac{d}{2}$, где d – длина вектора \bar{d} . В этом случае конец вектора $\bar{x} = \bar{S}_1 + \bar{\xi}_2$ (при передаче сигнала S_1) окажется в пространстве второго сигнала \bar{S}_2 , и информация будет искажена.

При замене переменной $\frac{\xi_n^2}{2\sigma^2} = \frac{z^2}{2}$ получим $\xi_n = \sigma z$ и $d\xi_n = \sigma dz$. Тогда

$$P_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{d}{2\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right) = 0,5 \cdot (1 - \Phi(h)), \quad (3)$$

где $h = \frac{d}{2\sigma}$ и $\Phi = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^h e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ – функция Крампса для

нормированной величины $z(0, 1)$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. При частотной модуляции (применяемой в устройствах Bluetooth) $S_1(t)$ и $S_2(t)$ считаются ортогональными и

$$h = \sqrt{\frac{E}{N_0}},$$

$$a \quad P_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{E}{N_0}\right) \right]. \quad (4)$$

Теоретический график зависимости $P_{\text{ош}}$ (в пределах изменения $P_{\text{ош}} = [0,001; 0,1]$) от соотношения сигнал/шум $\left(\sqrt{\frac{E}{N_0}}\right)$ изображены на рис. 1.

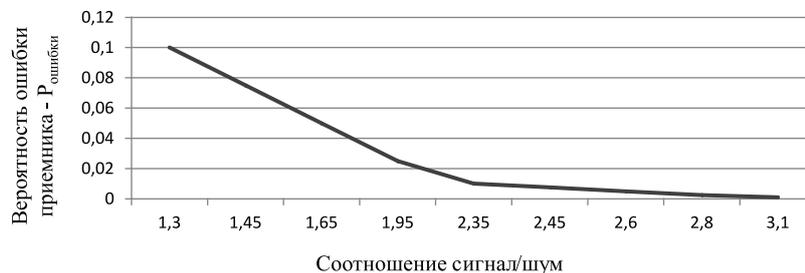


Рис. 1. Теоретическая зависимость ошибки приемника от соотношения сигнал/шум $\sqrt{\frac{E}{N_0}}$

В данной работе проводится исследование влияния помехи типа белый шум, возникающей в беспроводной персональной Bluetooth-сети, работающей на частоте 2,4 ГГц, при передаче голосового сигнала на короткие расстояния с учетом влияния Wi-Fi-сети,

стандарта IEEE 802.1b, поддерживающий частоты 2,4 и 5,5 ГГц и скорость передачи до 11 Мбит/с.

Аддитивная флуктуационная помеха типа белого шума используется как модель наиболее тяжелого вида помехи в каналах связи. Плотность распределения

вероятности белого шума подчиняется нормальному закону. Энергетический спектр помехи равномерен в полосе частот сигнала, и мощность белого шума на выходе канала связи $P_{\xi} = N_0 f$ [Вт], где N_0 – спектральная плотность мощности белого шума [Вт/Гц].

Исследование влияния помех на качество передачи звука в системе Bluetooth велось методом математического моделирования с применением встроенного MatLab Demos Bluetooth Voice Transmitter, трансформированного в соответствии с задачами исследования [4].

Топ-уровень модели Bluetooth Voice Simulink, включает: Master Transmitter – передающее устройство, например, смартфон), AWGN (модель радиоканала, в котором действует «белый шум»), Free Space Path Loss – имитатор длинной беспроводной линии, определяющий потери в свободном пространстве, 802.11b Interferer – модель источника помехи в виде передатчика, работающего по протоколу Wi-Fi IEEE 802.11b, Slave Receiver – приемник подчиненного узла (принимающее устройство).

При построении модели передатчика сигнала учитывалось, что все реальные передаваемые в системах связи непрерывные сообщения отражают процессы, основная часть спектра которых сосредоточена в конечном интервале частот. Это объясняется частотными свойствами источников сообщений и абонентов (получателей сообщений), являющихся реальными физическими системами. Начиная с некоторой частоты, высокочастотные составляющие спектра сообщения оказываются значительно ниже уровня помех и не воспринимаются получателем. В таком случае все реальные непрерывные сообщения можно рассматривать как функции с ограниченным спектром, т.е. таким, в котором не содержится частот выше некоторой граничной частоты f_c .

В соответствии с теоремой Котельникова (Найквиста-Шеннона) сигнал, имеющий конечный (ограниченный по ширине) спектр, может быть восстановлен с заданным качеством по своим отсчетам, взятым с частотой, строго больше удвоенной верхней частоты f_c . Теорема справедлива и для случая, когда непрерывное сообщение $x(t)$ имеет спектр, заключенный в ограниченной полосе частот от f_n до f_b . В частности, при передаче в системе Bluetooth звукового сигнала, имеющего диапазон частоты $f = [0,3-3,4]$ КГц, полоса частот $\Delta f = 3,4-0,3 = 3,1$ КГц [2]. В этом случае отсчеты следует брать через интервал времени [3]

$$\Delta t = \frac{1}{2(f_b - f_n)} = \frac{1}{2\Delta f_{\text{сп}}}, \quad (5)$$

где $\Delta f_{\text{сп}} = (f_b - f_n)$ – ширина спектра функции.

В рассматриваемом случае звукового сигнала $\Delta f = 3,1$ кГц и время дискретизации:

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot f_{\eta}} = 125 \text{ мкс}, \quad (6)$$

где $\eta = [1,1; 1,2]$ – инженерный коэффициент, учитывающий неидеальность устройств восстановления.

Частота дискретизации $f_s = \frac{1}{\Delta t} = 8$ КГц, а скорость передачи $v = 8 \text{ бит} \cdot 8 \text{ КГц} = 64 \text{ Кбит/с}$.

Кроме того, при постановке модельного эксперимента учитывалось, что на качество передачи в значительной степени влияет затухание в свободном пространстве между передатчиком и приемником, которое определяется по формуле [5]:

$$L_0 = 20 \lg \frac{4\pi f l}{c} \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

где L_0 – затухание; l – расстояние, для которого это затухание считается; f – частота; c – скорость света. Разрешив (7) относительно расстояния l , получим формулу для определения дальности передачи:

$$l = \frac{c \cdot 10^{\frac{L_0}{20}}}{4\pi f}. \quad (8)$$

В рассматриваемой модели Bluetooth существует возможность задания потерь в свободном пространстве при распространении волны как через заданное затухание от 10 до 40 дБ, так и через заданные частоту и дальность передачи.

Результаты исследования и их обсуждение

Как отмечалось, для радиообмена устройства Bluetooth используют диапазон частот 2400–2483,5 МГц. Емкость этой полосы частот – 79 подканалов с шириной полосы пропускания равной 1 МГц. Несущая частота подканалов $f_k = 2402 + k$ (МГц), где $k = 0, \dots, 78$. Таким образом, для центрального 39 канала несущая частота $f_k = 2402 + 39 = 2441$ МГц, для терминального 79 канала $-f_k = 2402 + 78 = 2480$ МГц.

Затухание в свободном пространстве при $l = 2$ м (традиционное расстояние, на которое работает Bluetooth на практике) из (8): для 39 канала $L_0 = 40,19312$ дБ, для 79 канала $-L_0 = 40,3264$ дБ.

Дальность передачи при $L_0 = 40$ дБ из (7): для 39 канала дальность передачи $l = 0,978011$ м, для 79 канала $l = 0,996119$ м.

При отсутствии канальной интерференции ошибка приемника в составе двоичного симметричного канала передачи звука по Bluetooth (при изменении $P_{\text{ош}}$ в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-3}) характеризуется полученной в результате модельного эксперимента зависимостью, представленной на рис. 2. Спектрограмма процесса передачи звука по Bluetooth на 39 канале при соотношении

сигнал/шум $\sqrt{\frac{E}{N_0}} = \sqrt{6}$ представлена на

рис. 3.

Для учета канальной интерференции устройств WiFi и Bluetooth в модель встроен блок 802.11b Interferer – модель источника помехи в виде передатчика, работающего по протоколу Wi-Fi IEEE 802.11b в расширенном диапазоне частот (2,4...5,5 ГГц).

Как показало моделирование, работа WiFi по протоколу IEEE 802.1b (на частоте 5,5 ГГц) не приносит существенной ошибки при передаче звуковых сигналов в системе Bluetooth. При этом функция зависимости ошибки приемника в составе двоичного симметричного канала передачи

звука по Bluetooth (в диапазоне $P_{\text{ош}} = [10^{-1}$ до $10^{-3}]$), полученная в результате моделирования, утрачивает гладкость (рис. 4). Это

объясняется изменением физики процесса, что наглядно подтверждается полученными спектрограммами (рис. 5).

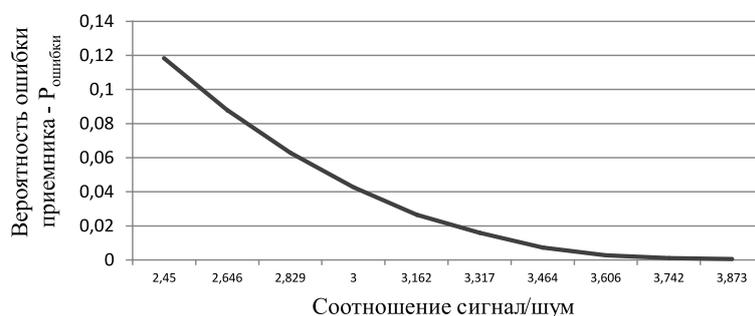


Рис. 2. Зависимость ошибки приемника от соотношения сигнал/шум $\sqrt{\frac{E}{N_0}}$ при отсутствии канальной интерференции

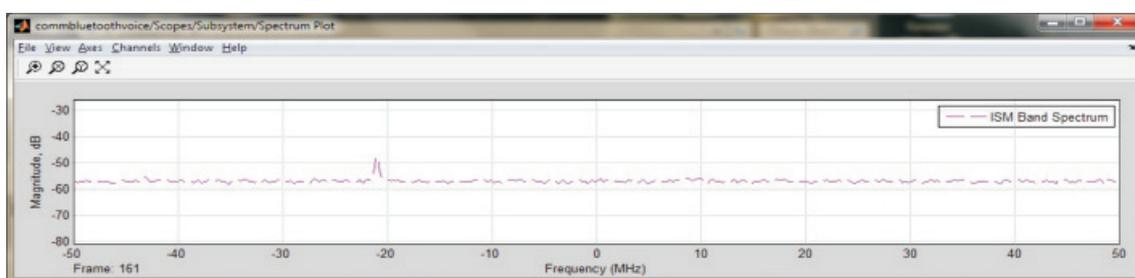


Рис. 3. Спектрограмма принимаемого звукового сигнала при соотношении сигнал/шум $\sqrt{\frac{E}{N_0}} = \sqrt{6}$ в отсутствие канальной интерференции

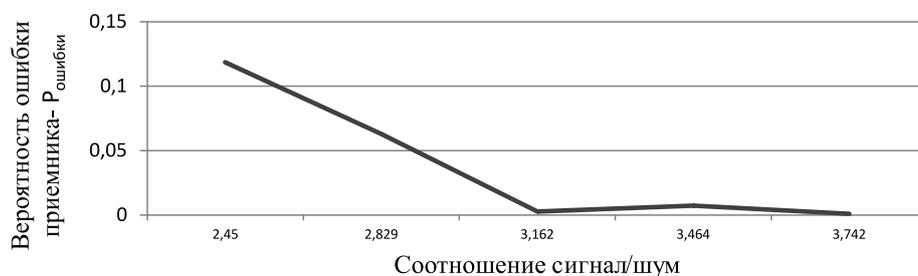


Рис. 4. Зависимость ошибки приемника от соотношения сигнал/шум $\sqrt{\frac{E}{N_0}}$ в условиях наличия канальной интерференции

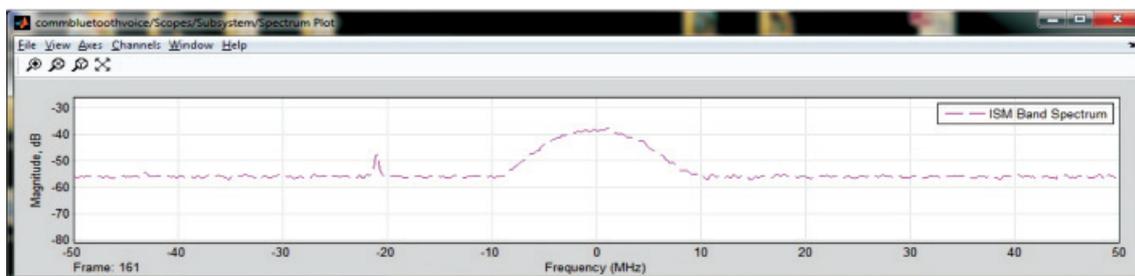


Рис. 5. Спектрограмма принимаемого звукового сигнала при соотношении сигнал/шум

$$\sqrt{\frac{E}{N_0}} = \sqrt{6} \text{ в условиях канальной интерференции}$$

Выводы

В данной работе были рассмотрены вопросы помехоустойчивости каналов передачи информации по технологии Bluetooth, применяющейся в большинстве типов электронных устройств для обеспечения беспроводной связи с терминальными устройствами. Благодаря высокой скорости обмена данными стандарт Bluetooth используется для организации беспроводной альтернативы USB-соединению при передаче мультимедийного потока, в наибольшей степени подверженного влиянию помех. Одним из факторов, снижающих помехоустойчивость систем связи, является канальная интерференция вследствие взаимного влияния устройств, реализующих беспроводные технологии в близком частотном диапазоне.

В результате модельного эксперимента было выяснено, что влияние работы WiFi по протоколу 802.11b на вероятность появления ошибок приемника Bluetooth не превышает 0,01%, однако физика процессов различна, что продемонстрировано спектрограммами. Это объясняется существенным разбросом рабочих частот (в два раза). Очевидно, что изменение рабочей частоты WiFi в меньшую сторону (что соответствует большинству применяемых на практике протоколов) повлечет существенное увеличение ошибки приема, что необходимо учитывать при выборе оборудования при проектировании беспроводных систем связи в условиях действия внешних и внутренних помех.

Список литературы

1. Стандарт IEEE 802.11 URL: <http://www.ieee802.org/11>.

2. Стандарт IEEE 802.15.1 URL: <http://www.ieee802.org/15>.

3. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры. – Пермь: Изд-во Перм.гос.техн.ун-та, 2007. – 312 с.

4. Communications System Toolbox MatLab Examples URL: <http://www.mathworks.com/help/comm/index.html>.

5. Propagation of Radiowaves, Barclay L.W. (Ed.), 2nd Ed. – London: IEEE, 2003. – 482 p.

References

1. Standart IEEE 802.11, Available at: URL: <http://www.ieee802.org/11>.

2. Standart IEEE 802.15.1, Available at: <http://www.ieee802.org/15>.

3. Kon E.L., Frejman V.I. Teorija jelektricheskoj svjazi. Pomehoustojchivaja peredacha dan-nyh v informacionno-upravljajushhih i telekommunikacionnyh sistemah: modeli, algoritmy, struktury (Theory of telecommunications. Noise-immune data transmission in information control and telecommunication systems: models, algorithms, structure) Perm: Izdatelstvo Perm. gos. tehn. universiteta, 2007. 312 p.

4. Communications System Toolbox MatLab Examples, Available at: <http://www.mathworks.com/help/comm/index.html>.

5. Propagation of Radiowaves, Barclay L.W. (Ed.), 2nd Ed., London: IEEE, 2003. 482 p.

Рецензенты:

Труфанова Н.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой конструирования и технологий в электротехнике, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь;

Южаков А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 06.03.2014.