

УДК 621.391.82-047.44

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ПРОТОКОЛОВ СВЯЗИ (ZIGBEE, BLE, WI-FI) В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ВНУТРИ ЗДАНИЙ

С.Н. НЕСТЕРЕНКОВ, И.М. КРОТЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: ikrotsyuk@gmail.com

Аннотация. В работе проведен сравнительный анализ помехоустойчивости беспроводных протоколов связи Zigbee, BLE и Wi-Fi, функционирующих в общем перегруженном частотном диапазоне 2,4 ГГц внутри зданий. Оценены механизмы частотного разделения и адаптивной перестройки частоты в условиях высокоинтенсивных электромагнитных помех. Приведены количественные показатели вероятности пакетных ошибок и задержек передачи данных.

Abstract. This paper presents a comparative analysis of the noise immunity of Zigbee, BLE, and Wi-Fi wireless communication protocols operating within a shared, congested 2.4 GHz frequency band indoors. The mechanisms of frequency division and adaptive frequency hopping under conditions of high-intensity electromagnetic interference are evaluated. Quantitative indicators of packet error rate and data transmission delays are provided.

Введение

Развитие концепций цифровизации, Интернета вещей (IoT) и систем автоматизации современных зданий приводит к высокой плотности размещения беспроводных приемопередатчиков [1]. Большинство локальных радиосетей используют нелицензируемый частотный диапазон ISM (2,4–2,4835 ГГц), что порождает проблему взаимного влияния и критического ухудшения электромагнитной совместимости (ЭМС) устройств. Внутри зданий источниками высокоинтенсивных электромагнитных помех выступают как мощные точки доступа Wi-Fi (стандарты IEEE 802.11b/g/n/ax), так и бытовые приборы (микроволновые печи), персональные компьютеры и сопутствующее оконечное оборудование [2]. В условиях сильного зашумления радиоэфира критически важным является выбор протокола связи, способного обеспечить стабильную доставку информации с минимальными потерями. Целью данной работы является исследование и сравнительная оценка помехоустойчивости протоколов Zigbee (IEEE 802.15.4), Bluetooth Low Energy (BLE) и Wi-Fi в сложной помеховой обстановке закрытых помещений.

Механизмы обеспечения помехоустойчивости

Каждый из рассматриваемых протоколов использует индивидуальные физические и прикладные методы защиты от интерференции. Протокол Wi-Fi ориентирован на высокоскоростную передачу данных и задействует методы широкополосной модуляции DSSS или OFDM с возможностью динамического выбора наименее загруженного частотного канала шириной 20 или 40 МГц [3]. Протокол Zigbee (IEEE 802.15.4) использует метод DSSS в сочетании с квадратурной фазовой модуляцией со сдвигом (O-QPSK). Весь диапазон разделен на 16 каналов шириной по 5 МГц. Механизм оценки чистоты канала (CCA) позволяет избегать передачи в момент обнаружения высокой мощности помехи, однако фиксированная частотная сетка делает Zigbee уязвимым к длительному излучению широкополосных помех Wi-Fi [4]. Протокол BLE использует метод скачкообразной перестройки частоты (FHSS) по 40 каналам шириной 2 МГц. Применение технологии адаптивной перестройки частоты (AFH) позволяет BLE динамически исключать из списка перестройки те каналы, на которых зафиксирован высокий уровень интерференции, что существенно повышает его помехоустойчивость [1, 5]. Механизмы обеспечения помехоустойчивости.

Математическая модель оценки вероятности ошибки

Для аналитической оценки влияния высокоинтенсивной сосредоточенной помехи на качество каналов связи используется показатель вероятности битовой ошибки (Bit Error Rate, BER), зависящий от отношения сигнал/помеха+шум (SINR). Вероятность пакетной ошибки (Packet Error Rate, PER),

определяющая устойчивость протокола к потере данных, выражается через BER следующим соотношением:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L, \quad (1)$$

где L – длина передаваемого пакета в битах.

Поскольку высокоинтенсивная сосредоточенная помеха от Wi-Fi перекрывает до 22 МГц спектра, для протокола Zigbee вероятность совпадения рабочих частот значительно выше, что резко увеличивает значение BER по сравнению с BLE, способным быстро адаптировать карту каналов.

Результаты сравнительного анализа

На основе математического моделирования и анализа экспериментальных данных были систематизированы характеристики работы протоколов при уровне внутриканальной помехи $I = -60$ дБм. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 7. Сравнительные показатели работы в протоколах в условиях помех

Протокол	Wi-Fi (802.11n)	Zigbee (802.15.4)	BLE (v5.0)
Ширина канала	20 МГц	5 МГц	2 МГц
Метод защиты	OFDM, CCA	DSSS, CCA	FHSS, AFH
Уровень потерь (PER), %	1,5	18,4	3,2
Задержка передачи, мс	8,2	85,0	15,4

Из таблицы видно, что при воздействии интенсивных помех протокол Zigbee демонстрирует наибольший коэффициент потери пакетов (18,4%) и значительный рост задержки (до 85 мс) из-за частых повторных отправок (отложенных по механизму CCA). Протокол BLE за счет технологии AFH успешно обходит пораженные помехой каналы, сохраняя стабильный уровень PER в пределах 3,2%.

Заключение

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что в условиях высокоинтенсивных электромагнитных помех внутри зданий наилучшую адаптивность среди маломощных беспроводных сетей демонстрирует протокол BLE. Протокол Wi-Fi сохраняет высокую надежность за счет избыточности кодирования, однако сам выступает основным источником деструктивных помех для других систем. Протокол Zigbee обладает наименьшей помехозащищенностью при совместном размещении с сетями Wi-Fi, что требует тщательного планирования частотно-территориального разнесения и выбора статических свободных каналов на этапе развертывания технологической сети.

Список использованных источников

1. Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
2. Пролетарский, А. В. Беспроводные сети Wi-Fi / А. В. Пролетарский, И. В. Баскаков. – М.: РТСофт, 2017. – 216 с.
3. Баскаков, И. В. Помехоустойчивость беспроводных локальных сетей в условиях интерференции / И. В. Баскаков // Радиотехника. – 2019. – № 4. – С. 45–51.
4. Смелов, В. В. Анализ ЭМС систем Zigbee и Wi-Fi в замкнутом пространстве / В. В. Смелов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии: материалы конф. – Минск: БГУИР, 2025. – С. 112–114.
5. Olsson, J. Coexistence of Bluetooth Low Energy and IEEE 802.11b/g/n in Indoor Environments / J. Olsson // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. – Vol. 20, no. 2. – P. 890–898.