

Проблемы функционирования беспроводных устройств Bluetooth и IEEE 802.11 в нелицензируемом диапазоне частот ISM 2,4 ГГц и пути их решения

Иван САРДИН
vnsardin@mail.ru

Большинство развивающихся беспроводных технологий, таких как Bluetooth и WLAN, предназначены для работы в нелицензируемом диапазоне ISM 2,4 ГГц. Устройства Bluetooth и IEEE 802.11 работают в одном и том же диапазоне частот. Они могут оказаться вместе в одном ноутбуке или находиться близко друг от друга в настольном компьютере. Использование Bluetooth-гарнитур в непосредственной близости от приемной или передающей части промышленной системы сбора данных на основе WLAN может привести к искажению данных и в случае, когда, например, телеметрическая информация используется для выработки тех или иных действий, может привести к несчастным случаям.

Введение

Помехи, которые возникают при одновременной работе беспроводных устройств, находящихся в непосредственной близости друг от друга, могут привести к значительному ухудшению характеристик устройств. Целью этой статьи является описание проблем, связанных с взаимными помехами, при этом особое внимание уделяется совместимости двух технологий — Bluetooth и WLAN — в ближнепольном режиме. Проблема не была бы такой острой, если бы на основе указанных технологий беспроводной передачи данных не производились бы бытовые устройства, такие как беспроводные гарнитур Bluetooth или адаптеры Wi-Fi в ноутбуках. Указанный фактор налагает ряд ограничений на использование беспроводных технологий в промышленных системах автоматизации, поскольку помимо выполнения строгих требований по ЭМС внутри собственной беспроводной инфраструктуры предприятия необходимо учитывать возможность внесения дополнительных помех за счет использования работниками предприятия персональных средств, оснащенных устройствами беспроводной передачи данных. Поскольку основной атрибут беспроводного подключения — мобильность, то в качестве исходных данных при решении этой сложной проблемы мы даже не имеем информации о местоположении внесения помехи. В этом случае все расчеты необходимо производить, исходя из наиболее худшего варианта. Кроме того, в статье дается несколько решений совмести-

мости с различными сценариями помех. Также рассматривается несколько факторов, которые могут оказывать влияние на помехозащищенность (такие как фрагментация или пакетная инкапсуляция), а также предлагаются результаты моделирования по выбранным сценариям и конфигурациям интересов. Описанное в статье обеспечение сосуществования устройств технологий Bluetooth и WLAN может быть с небольшими дополнениями и изменениями перенесено на другие технологии беспроводной передачи данных, работающие в одном частотном диапазоне.

Темп жизни и работы людей постоянно ускоряется. В целях обеспечения этого мобильного стиля жизни и в связи с тем, что работа становится все более зависимой от информации, компании выпускают различные портативные и встраиваемые устройства, включая PDA, пейджеры, мобильные телефоны и быстродействующие персональные метки. В то же время, последние достижения в интеграции датчиков и миниатюризации электронных устройств дают возможность получить чувствительные элементы, оснащенные значительной памятью для обработки данных и беспроводными средствами связи для создания «умного» оборудования, в котором работа разрозненных датчиков может координироваться для создания сети связи. Эти носимые вычислительные устройства и специальное «умное» оборудование предъявляют исключительные требования к параметрам каналов связи: низкое энергопотребление, частое восстановление связи между объектами, обнаружение ресурсов и их использование. Все это создало необходимость использования персональных сетей беспроводной связи (WPAN — Wireless Personal Area Networks).

Сеть WPAN представляет собой специальную систему обмена данными, которая позволяет обеспечить связь между несколькими независимыми устройствами. Сеть WPAN отличается от других сетей беспроводной связи как пропускной способностью, так и радиусом охвата. Связь с помощью сети WPAN обычно ограничивается радиусом 10 м во всех направлениях.

Этим она отличается от локальных сетей беспроводной связи (WLAN), которые обычно охватывают географическую зону среднего размера, например в пределах одного здания или кампуса. Сети WLAN действуют в диапазоне 100 м и предназначены скорее для того, чтобы увеличить возможности традиционных проводных сетей LAN, нежели заменить их. Их часто используют для обеспечения последних нескольких

десятков метров связи между основной сетью и пользователем. Пользователи могут подключаться к сети, не утруждая себя поисками места, где подсоединить свой компьютер, и не заботясь об установке дорогих компонентов и прокладке кабеля до рабочего места.

Сегодня появляются и переживают бурное развитие технологии беспроводной связи, в том числе IEEE 802.11, Bluetooth, IrDA, HomeRF, которые обещают обеспечить портативные и встраиваемые устройства широкополосной беспроводной связью с возможностью выхода в Интернет. Использование Всемирной сети в промышленных системах автоматизации является весьма перспективным — не только с точки зрения получения информации о функционировании каких-либо подсистем завода, но и с точки зрения наличия возможности защищенного управления некоторыми некритическими процессами на производстве.

Благодаря своей почти глобальной доступности, нелицензируемый диапазон частот 2,4 ГГц для промышленной, научной и медицинской аппаратуры (ISM — Industrial, Scientific, Medical) представляет собой популярный диапазон, подходящий для недорогих беспроводных решений, таких, которые предложены для сетей WPAN и WLAN. Использование спектра частот различными беспроводными устройствами, которые могут действовать в одной и той же окружающей среде в пределах взаимной радиовидимости, может привести к сильным помехам и вызвать значительное ухудшение характеристик всех взаимодействующих приборов.

Технологии беспроводной связи в диапазоне 2,4 ГГц

Рассмотрим различные технологии радиосвязи, действующие в нелицензируемом диапазоне ISM 2,4 ГГц. Основное внимание уделим протоколам Bluetooth и IEEE 802.11.

Технические требования к Bluetooth

В данном разделе дается краткий обзор технологии Bluetooth и обсуждаются основные функциональные возможности согласно техническим требованиям к протоколу, которые состоят из нескольких разделов, а именно: радиочастотные параметры (RF), Baseband (BB) и управление связью (LM). Bluetooth — это технология беспроводной ближней связи (радиус действия 10 м или 100 м), изначально предназначенная для замены кабелей на коротких дистанциях. Использование кабелей затрудняет взаимодействие подключенных систем друг с другом. Особенно острой эта проблема становится при большом числе взаимодействующих систем. В наиболее типичном случае вместе соединяют телефоны, ноутбуки, карманные компьютеры (PDA) и другие портативные устройства. Сеть Bluetooth действует в США и Европе в диапазоне частот ISM, начиная с частоты 2,402 ГГц и заканчивая 2,483 ГГц. Стандартом определены 79 каналов шириной 1 МГц. Радиоинтерфейс проектируется с учетом мощности, подводимой к антенне (типичное значение составляет 1 мВт). Сигнал модулируется гауссовской частотной манипуляцией (GFSK). Максимальная физическая скорость передачи данных составляет 1 Мбит/с. Методом мультиплексирования с временным разделением (TDM) канал делится на слоты по 625 мкс. Передача данных осуществляется в виде пакетов, занимающих нечетное число слотов, вплоть

до 5. Пакеты данных передаются с разной частотой хопов, максимальная скорость при этом составляет 1600 хопов/с.

Два или более устройств, общающихся по одному и тому же каналу, образуют пикосеть, в которой одно устройство действует как ведущее, а другие (максимум семь активных одновременно) — как ведомые. Канал определяется как уникальная последовательность псевдослучайной частоты, производной от 48-битного адреса ведущего устройства и его тактовой частоты. При установке соединения ведомые устройства в пикосети синхронизируют свои хопы по времени и частоте параметрами ведущего устройства. В режиме соединения ведущее устройство контролирует доступ к каналу, используя схему опроса, согласно которой передачи ведущего и ведомого чередуются. Ведомый пакет данных всегда следует за передачей ведущего пакета.

Между ведущим и ведомым устройствами могут устанавливаться два типа соединений: синхронная связь на основе соединения (SCO) и асинхронная связь без установления соединения (ACL). Связь SCO представляет собой симметричное соединение «точка-точка» между ведущим и ведомым устройствами, при котором ведущее устройство через одинаковые промежутки времени (которые зависят от величины таймслота Tsc0) посылает пакет синхронизации SCO в один из слотов TX. Ведомое устройство отвечает пакетом SCO при следующей передаче. Величина Tsc0 устанавливается на 2, 4 или 6 таймслотов соответственно для форматов пакетов HV1, HV2 или HV3. Все три формата пакетов SCO предназначены для передачи речевого трафика 64 кбит/с, и их повторная передача в случае ошибки или потери пакета данных никогда не осуществляется. Связь ACL представляет собой ассиметричное прямое соединение типа «точка-точка» между ведущим устройством и активными ведомыми устройствами в пикосети. Для ACL определяются несколько форматов пакетов, а именно: пакеты DM1, DM2 и DM3, которые занимают соответственно таймслоты 1, 3 и 5. В тех случаях, когда пакеты ACL теряются при передаче, к ним применяется процедура автоматического запроса повторной передачи (ARQ), пока на источник не будет получено уведомление об успешном приеме данных (ACK). ACK вкладывается в заголовок пакета данных обратного направления, где устанавливается значение бита ARQN (1 или 0, в зависимости от того, был ли благополучно получен предыдущий пакет или нет). Кроме того, для обеспечения последовательного расположения пакетов данных в потоке и фильтрации повторных передач в пункте назначения в заголовке пакета используется бит порядкового номера (SEQN). В некоторых пакетах SCO и ACL используется методика прямого исправления ошибок (FEC), которая позволяет уменьшить число повторных передач ACL.

Технические требования IEEE 802.11

В стандарте IEEE 802.11 определены как физический протокол (PHY), так и протокол уровня управления доступом к среде передачи (MAC) для сетей WLAN. Далее мы будем использовать названия попеременно WLAN и 802.11, подразумевая одно и то же.

Стандартом IEEE 802.11 предусматриваются три различных спецификации физического уровня PHY: скачкообразная перестройка частоты (FH), расширенный спектр прямой последовательности (DS) и инфракрасная (IR) передача данных. Мощность передачи данных для устройств DS и FH определяется на уровне 1 Вт (максимальное значение), а чувствительность приемника достигает -80 дБ-мВт. Коэффициент усиления антенны ограничен 6 дБ. В данной статье основное внимание уделяется расширенному спектру DS (802.11b), поскольку он относится к тому же диапазону частот, что и Bluetooth, и используется наиболее часто.

Основная скорость передачи данных для систем DS составляет 1 Мбит/с, поток кодируется с помощью относительной двухпозиционной фазовой манипуляции (DBPSK). Предусмотрена также скорость 2 Мбит/с при использовании относительной четырехпозиционной фазовой манипуляции (DQPSK) с той же частотой следования элементарных посылок. Имеются также более высокие скорости передачи данных — 5,5 и 11 Мбит/с, в которых используется методика комбинирования четырехпозиционной фазовой манипуляции и манипуляции с дополняющим кодом (ССК). Во всех этих системах используются каналы шириной 22 МГц. Детальное рассмотрение методов модуляции представлено в третьей части статьи.

Спецификация уровня контроля доступа к среде передачи IEEE 802.11 MAC, общая для всех уровней PHY и скоростей передачи данных, обеспечивает координацию связи между станциями и контроль поведения пользователей, которые хотят иметь доступ к сети. Функция распределительной координации (DCF), в которой описано действие протокола MAC по умолчанию, основывается на схеме, известной как схема коллективного доступа с опросом несущей с коррекцией коллизий (CSMA/CA). Чтобы осуществить процедуры коррекции коллизий, взаимодействуют оба уровня, как MAC, так и PHY. На уровне PHY производится отсчет получаемой энергии через среду передачи данных и используется алгоритм CCA, чтобы определить, свободен ли канал. Это осуществляется путем измерения ВЧ-энергии на антенне и определения силы полученного сигнала с помощью RSSI — индикатора силы полученного сигнала. Кроме того, для определения, доступен ли канал, можно использовать и контроль несущей частоты. Эта методика более избирательна, поскольку проверяет, имеет ли сигнал такую же несущую частоту, что и передатчики 802.11. На MAC-уровне предусмотрен также механизм контроля виртуальной несущей. Здесь используется обмен сообщениями о готовности к передаче (RTS) и готовности к приему (CTS), чтобы прогнозировать будущую нагрузку на носитель и произвести коррекцию вектора расположения сети (NAV). Связь устанавливается, когда с одного узла беспроводной связи посылается короткий RTS-кадр. С принимающей станции выдается CTS-кадр, который повторяет адрес передатчика. Если CTS-кадр не получен, то предполагается, что произошла коллизия, и процесс RTS начинается снова. Протокол MAC необходим для осуществления процедуры базового доступа, независимо от того, используется или нет

¹ Акцент делается на первой версии стандарта: скоростные режимы также соответствуют ему.

стандартная программа контроля виртуальной несущей, и происходит это следующим образом. Если на станции имеются данные для передачи, то она ожидает, пока освободится канал, используя алгоритм CSMA/CA. Если среда передачи обнаруживается как «свободная» в течение периода, более продолжительного, чем межкадровое пространство DCF (DIFS), станция, прежде чем послать кадр, переходит к процедуре установления соединения. При успешном получении кадра станция-адресат возвращает кадр ACK после короткого межкадрового пространства (SIFS). Окно возврата базируется на случайной величине, равномерно распределенной в интервале $[CW_{min}, CW_{max}]$, где CW_{min} и CW_{max} представляют собой параметры окна конфликта. Если определяется, что в любой момент во время интервала возврата носитель занят, процедура возврата приостанавливается. Она возобновляется после того, как носитель оставался свободным в течение периода DIFS. Если за время простоя кадр ACK не был получен, то станция предполагает, что кадр данных или кадр ACK были потеряны, и необходимо снова передать кадр данных, повторив базовую процедуру доступа.

Помехи в диапазоне 2,4 ГГц

Диапазон ISM 2,4 ГГц предусмотрен для первичного и вторичного использования. Его вторичное использование не требует получения лицензии, но оно должно осуществляться в соответствии с правилами, оговоренными американской Федеральной комиссией по связи (FCC). Помехи различных пользователей не мешают первичной аппаратуре, пока выполняются установленные правила. Таким образом, основной недостаток нелицензируемого диапазона ISM состоит в том, что частоты разделяются между приложениями, а это может приводить к возникновению помех. Правила в отношении расширенного спектра и максимально допустимой излучаемой суммарной мощности довольно эффективны при разрешении конфликтов между пользователями этой полосы частот при условии, что радиоприемники физически разделены, но не действуют при близком расположении радиоприемников. Множество приложений, а также собственные помехи дают эффект увеличения уровня шума в данной полосе частот, что приводит к ухудшению характеристик канала обмена. Влияние помех может быть даже более сильным, когда радиоприемники различных приложений используют одну и ту же полосу частот, находясь при этом близко друг от друга.

Таким образом, для проблемы помех характерны временные и частотные коллизии, что и отражено на рис. 1. В данном случае показано, как система перескока частоты Bluetooth, занимающая полосу 1 МГц спектра, перекрывает сигнал WLAN DSSS, занимающий канал 22 МГц. Следует также отметить, что время перекрытия коллизий зависит от вида частотных скачков (хопов) и распределения трафика в обеих системах — Bluetooth и WLAN.

Более того, можно выделить два класса помех на основе использования ими спектра. Устройства, действующие по методу расширения спектра с помощью прямой последовательности DSSS, составляют один класс источников помех (используют фиксированный канал в данной полосе). Обычно этот канал имеет ширину 22 МГц, хотя эта величина зависит от реализации радиопередатчика. Второй класс источников помех представлен устройствами, обеспечивающими механизм перескока частоты (FH). Обратите внимание, что технические условия стандарта IEEE 802.11 включают метод перескока частоты, в котором используется детерминированный частотный паттерн. С другой стороны, техническими условиями Bluetooth определяется псевдослучайная последовательность частоты, основанная на адресе устройства Bluetooth и его внутреннем тактовом сигнале. Несмотря на то, что помехи между системами одного и того же типа, такими как Bluetooth и Bluetooth, или IEEE 802.11 и IEEE 802.11, могут быть значительными, это обстоятельство обычно учитывается на стадии разработки протокола. Поэтому самый худший реальный сценарий помех включает множество неоднородных устройств (то есть устройств, принадлежащих разным классам). Соответственно, большинство результатов, публикуемых в современной литературе, делают акцент на этом сценарии самого плохого варианта.

Недавно было сделано несколько попыток определения степени влияния помех на характеристики как WLAN, так и Bluetooth. Опубликованные результаты можно отнести, по меньшей мере, к трем категориям, в зависимости от того, на чем они основывались: на анализе, моделировании или на экспериментальных измерениях. Шеллхаммер (Shellhammer) [18], Эннис (Ennis) [7] и Зайрен (Zyren) [11] получили аналитические результаты на основе вероятности конфликта пакетов для случая потери пакета WLAN; Голми (Golmie) [16] — для случая с ошибкой в пакете Bluetooth. Эти аналитические результаты могут часто давать аппрокси-

мацию первого порядка по влиянию помех и ухудшению характеристик (до 25% для потери пакета Bluetooth и около 70% для потери пакета WLAN). Однако они часто помогают сделать ряд предположений относительно распределения вызовов и функционирования протокола доступа к среде передачи (MAC). Более важен тот факт, что для упрощения анализа взаимные помехи, которые могут изменить распределение каналов в каждой системе, часто не принимаются во внимание. С другой стороны, экспериментальные результаты, подобные тем, что получены Камерманом (Kammerman), Хоуитом (Howitt) и Фьюмолари (Fumolari), можно считать более точными благодаря тому, что они очень конкретны в отношении тестируемых методов реализации. Таким образом, третий вариант включает применение моделирования и имитацию с целью оценки влияния помех. Третий подход может обеспечить большую гибкость. Однако точность результатов зависит от допущений, сделанных в процессе моделирования. Зюрбес (Zurbes) дает результаты имитации для ряда устройств типа Bluetooth, расположенных в одной большой комнате. Они показывают, что при 100 одновременных сеансах связи характеристики ухудшаются только на пять процентов. Голми (Golmie) использует детальную структуру имитации MAC и PHY для оценки влияния помех. Сходные результаты были получены Лэнсфордом (Lansford), который использовал моделирование и экспериментальные измерения, чтобы оценить помехи, возникшие в результате действия систем Bluetooth и IEEE 802.11. Их модели симуляции основаны на анализе энергетического потенциала линии связи и вычислении функции Q соответственно для канала и моделей PHY в дополнение к действию уровня MAC.

Структура совместимости

Разработчики беспроводных систем связи всегда должны были бороться с помехами как от природных, так и от других источников. Например, классический цикл разработки устройств беспроводной связи включал измерение или прогнозирование ухудшения канала, выбор метода модуляции, ухудшение сигнала на передатчике и обработку сигнала на приемном устройстве, чтобы создать надежную структуру передаваемой информации. Однако в отличие от классических методов компенсации помех, таких как модуляция, канальное кодирование, чередование или уравнивание, в большинстве

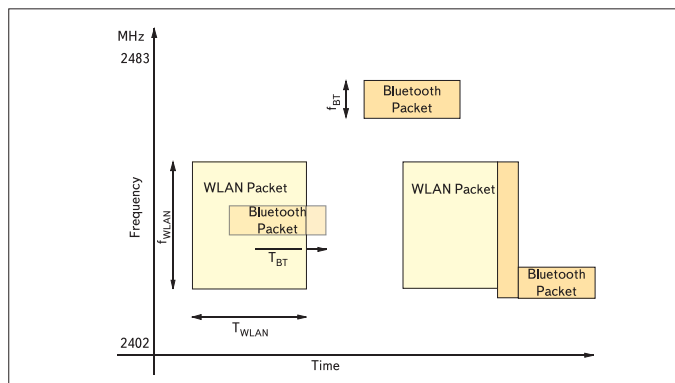


Рис. 1. Временные и частотные коллизии в диапазоне 2,4 ГГц

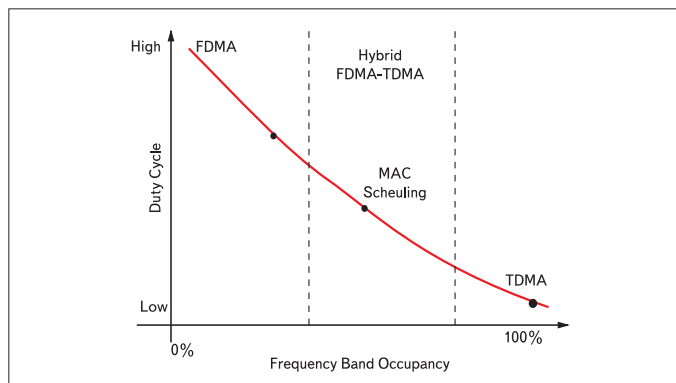


Рис. 2. Область решения сосуществования

методов, предлагаемых для решения проблемы помех в полосе 2,4 ГГц, делается акцент на адаптивные стратегии контроля обработки сигнала, включая управление мощностью и перескок частоты.

В действительности производители стараются обеспечить совместимость в полосе частот 2,4 ГГц различными методами. Была сформирована Целевая группа IEEE 802.15.2 по вопросам совместимости, чтобы произвести оценку работы устройств типа Bluetooth, мешающих работе устройств типа WLAN, и разработать модель совместимости, которая будет включать ряд рекомендаций и, возможно, изменений в технических требованиях [1] стандарта для устройств Bluetooth и IEEE 802.11, которые обеспечат нормальную совместную работу этих протоколов. В то же время, Специальная группа Bluetooth (SIG) сформировала свою целевую группу по вопросам совместимости. Обе рабочие группы поддерживают связь между собой и занимаются поиском новых методов ослабления влияния помех. Группами рассматриваются самые разные предложения, начиная от схем объединения протоколов Bluetooth и IEEE 802.11 в одном устройстве и заканчивая полностью независимыми решениями, основанными на обнаружении помех и их оценке.

Механизмы объединения

Механизмы объединенных схем были предложены Целевой группе по вопросам совместимости IEEE 802.15. Они основаны на использовании промежутка времени MAC, через который происходит чередование передачи пакетов Bluetooth и WLAN (при условии, что оба протокола реализуются в одном и том же устройстве, и для них используется общий передатчик) [12]. Приоритет в доступе для передачи речевых пакетов отдается протоколу Bluetooth, тогда как протоколу WLAN отдается приоритет для передачи данных.

Механизмы без объединения

Механизмы без объединения предусматривают большое разнообразие решений — от адаптивного перескока частоты [4] до определения сроков передачи пакетов и управления трафиком [14]. В них во всех используются схожие методики обнаружения присутствия других устройств в данной полосе частот — измерение битовой скорости или определение ошибочной скорости кадра, уровня сигнала, отношения сигнала к шуму (часто реализуемое в виде RSSI). Так, например, каждое устройство может измерять частоту появления ошибок в битах, приходящихся на используемую частоту. Тогда устройства с перескоками частоты могут знать, какие частоты заняты другими пользователями, и в соответствии с этим модифицировать свою модель перескока частоты. Они могут даже не передавать на определенной частоте, если эта частота занята. Каждая методика имеет свои преимущества и недостатки. Одним из преимуществ использования определения сроков является то, что при этом не требуется никаких изменений правил FCC. Фактически FCC [5] допускает применение системы перескока частот для распознавания присутствия других пользователей в пределах одной и той же полосы спектра с тем, чтобы они адаптировали свои наборы скачков и могли избежать перескоков на занятые кана-

Т а б л и ц а . Имитационные характеристики

Имитационные характеристики	Значения
Задержка на распространение сигнала	5 мкс/км
Продолжительность имитационного прогона	30 с
Характеристики Bluetooth	
Передаваемая мощность	1 мВт
Координаты ведомой частоты	(0,0) м
Координаты ведущей частоты	(1,0) м
Характеристики WLAN	
Продолжительность пакета	8000 бит
Промежуток времени поступления между двумя последовательными пакетами для 11 Мбит/с	1,86 мс
Передаваемая мощность	25 мВт
Координаты AP	(0,15) м
Мобильные координаты	(0,d) м
Заголовок пакета	224 бит
Временной сегмент	$2 \cdot 10^{-5}$ с
Время SIFS	$1 \cdot 10^{-5}$ с
Время DIFS	$52 \cdot 10^{-5}$ с
CW min	31
CW max	1023
Порог фрагментации	Нет
Порог RTS	Нет
Малый предел повторения	4
Большой предел повторения	7

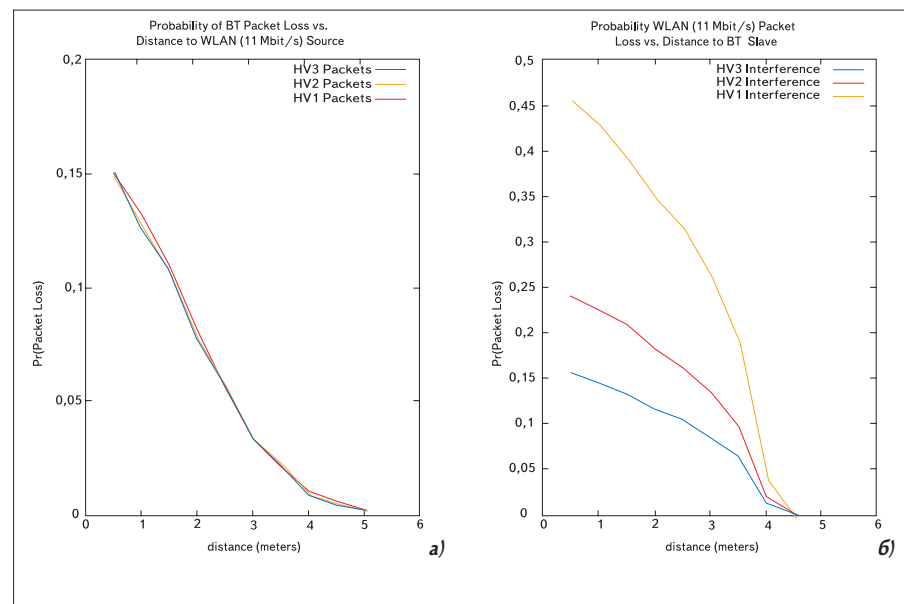


Рис. 3. Пакеты речевых данных Bluetooth с помехами 802.11 а) Вероятность потери пакета BT в зависимости от расстояния до источника WLAN. б) Вероятность потери пакета WLAN в зависимости от расстояния до ведомого устройства BT.

лы. Более того, определение сроков передачи пакетов в технических условиях для Bluetooth имеет свою специфику при реализации продавцом. Поэтому политику определения сроков можно легко осуществлять с имеющимся в настоящее время набором микросхем типа Bluetooth. С другой стороны, для адаптивного перескока частоты требуется внести изменения в модель перескока типа Bluetooth, а значит, нужен и новый набор микросхем Bluetooth. Наряду с тем, что оба метода могут уменьшить потери пакетов Bluetooth, а также влияние помех на другие системы, только метод адаптивного перескока частоты может увеличить пропускную способность сети Bluetooth путем максимизации использования спектра.

На рис. 2 показаны аспекты сосуществования различных устройств беспроводной передачи данных в отношении длительности рабочего цикла или активности устройства и занятости диапазона частот. Поскольку количество источников помех увеличивается, каждая система снижает частоту передач во избежание конфликтов. Таким образом, по мере увеличения занятости диапазона частот рабочий цикл уменьшается, что требует применения решений, связанных с изменением промежутка времени. Решения, связанные с частотной областью, такие как адаптивный перескок частоты, могут быть эффективными только в случае небольшой занятости диапазона частот.

Факторы, действующие на помехи

В данном разделе уделяется внимание различным факторам, которые могут оказать влияние на помехи. Наше описание основано на приведенных в общедоступных источниках результатах работы, полученных с помощью установки для создания детальной имитационной модели [16]. Примерный сценарий, который был для этого использован, основан на топологии четырех узлов, включая два узла WLAN (1 точка доступа (AP) и одно мобильное устройство) и два узла Bluetooth (1 ведущий и 1 ведомый). Данные передаются с мобильного узла WLAN на точку доступа, которая отвечает сообщением о подтверждении успешного приема пакетов данных.

Чтобы лучше представить топологию, можно подумать о размещении четырех беспроводных устройств в двумерной сети. Устройства WLAN расположены на расстоянии (0,15) и (0,d) метров соответственно для AP и мобильного устройства. Устройства Bluetooth расположены на расстоянии (0,0) и (1,0) метров соответственно для ведомого и ведущего устройства. Мощность передачи установлена 25 мВт и 1 мВт для WLAN и Bluetooth соответственно. Статистические данные собраны с ведомого устройства Bluetooth и мобильного узла WLAN. Обратите внимание, что расстояние между мобильным узлом WLAN ведущей Bluetooth меняется по координатной оси Y. Распределение вызовов WLAN установлено следующим образом. Предлагаемая нагрузка установлена в размере 50% от пропускной способности канала обслуживания. Размер пакета составляет 8000 бит, а время между прибытием пакетов установлено 1,86 мс. В таблице представлена конфигурация и параметры системы.

Выбор Bluetooth для инкапсуляции речевых сигналов

На рис. 3 представлено влияние выбора различных схем пакетной инкапсуляции для передачи речевых пакетов Bluetooth в среде помех. Инкапсуляция меняется от HV1, когда используется скорость 1/3 FEC и $T_{sco}=2$, до HV2, когда используется скорость 2/3 FEC и $T_{sco}=4$, и HV3, когда не используется FEC и $T_{sco}=6$. Обратите внимание, что нет разницы в общей длине пакета в различных пакетах HV. На рис. 3а видно, что выбор пакетной инкапсуляции не влияет на работу Bluetooth, другими словами, применение дополнительной коррекции ошибок не улучшает рабочие характеристики. С другой стороны, можно заметить на рис. 3б, что HV3 более «дружелюбно» по отношению к WLAN благодаря более продолжительному периоду T_{sco} .

Эффективность FEC

Используются три типа пакетной инкапсуляции Bluetooth: DM1, DM3 и DM5, которые занимают, соответственно, слоты 1, 3 и 5. Предложенная нагрузка для Bluetooth установлена равной 30% от пропускной способности канала обслуживания, который соответствует промежуткам между прибытием пакетов 2,91 мс, 8,75 мс и 14,58 мс соответственно для пакетов DM1, DM3 и DM5. В данном случае на рис. 4 можно заметить, что применение FEC имеет ограниченные преимущества и может улучшить характеристики Bluetooth только для сценариев с низким уровнем помех (например, для расстояний более 3 м).

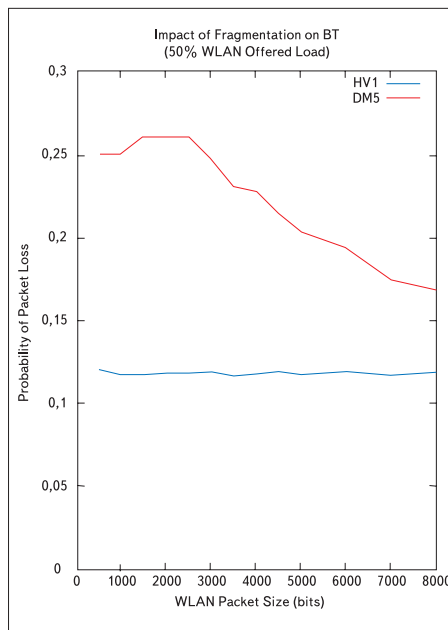


Рис. 4. Вероятность потери пакета BT в зависимости от размера пакета WLAN.

Влияние фрагментации на систему помех

Фрагментация или передача коротких пакетов — это методика, хорошо подтвержденная документально, она смягчает влияние помех, поскольку меньший пакет данных имеет меньшую вероятность конфликта с системой, создающей помехи. Однако на рис. 5 показано, что фрагментация может ухудшить работу системы, создающей помехи.

Заключение

Результаты показывают, что использование FEC ограничило преимущества многих сценариев наведения помех. Кроме того, применение фрагментации может снизить вероятность потери пакета за счет создания большего количества помех для других систем. Б

Литература

- 802-11 I.S. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. June 1997.
- A. Kamerman. Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11CCK. Solutions to avoid mutual interference. IEEE P802.11 Working Group Contribution. IEEE P802.11-00/162r0. July 2000.
- Association I.D. IrDA Advanced Infrared Physical Layer Specification, v. 1.0. September 1998.
- B. Treister, A. Batra, K.C. Chen, O. Eliezer. Adaptive Frequency Hopping: A Non-Collaborative Coexistence Mechanism. IEEE P802.15 Working Group Contribution. IEEE P802.15-01/252r0. Orlando, FL, USA. May 2001.
- Commission F.C. Title 47, Code for Federal Regulations, Part 15. October 1998.
- D. Fumolari. Link Performance of an Embedded Bluetooth Personal Area Network. Proceedings of IEEE ICC'01, Helsinki, Finland. June 2001.
- G. Ennis. Impact of Bluetooth on 802.11 Direct Sequence. IEEE P802.11 Working Group Contribution, IEEE P802.11-98/319. September 1998.
- Group B. S.I., Specifications of the Bluetooth System, vol. 1, v. 1.0B 'Core' and vol. 2 v1.0B 'Profiles', December 1999.

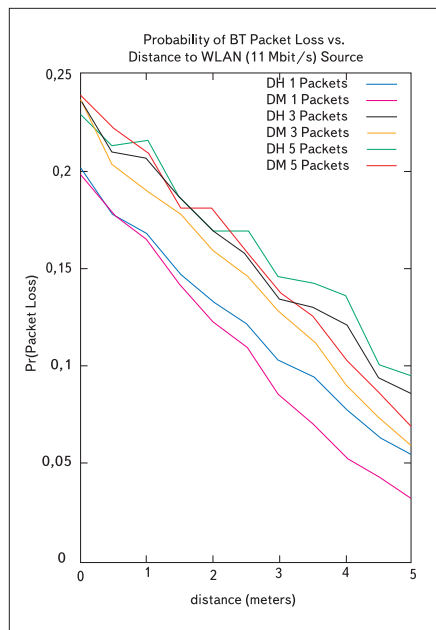


Рис. 5. Вероятность потери пакета BT в зависимости от расстояния до источника WLAN.

- Group H. W., HomeRF Shared Wireless Access Protocol Cordless Access (SWAP-CA) Specifications, May 2000.
- I. Howitt, V. Mitter, J. Gutierrez. Empirical Study for IEEE 802.11 and Bluetooth Interoperability, in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Spring 2001, May 2001.
- J. Zyren. Reliability of IEEE 802.11 WLANs in Presence of Bluetooth Radios, IEEE P802.15 Working Group Contribution, IEEE P802.15-99/073r0, Santa Rosa, California, September 1999.
- J. Lansford, R. Nevo, B. Monello, Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth Simultaneous Operation: Characterizing the Problem, Mobilian White Paper, www.mobilian.com, September 2000.
- J. Lansford, R. Nevo, E. Zehavi, MENTA: A method for coexistence between co-located 802.11b and Bluetooth systems, IEEE P802.15 Working Group Contribution, IEEE P802.15-00/360r0, November 2000.
- K. J. Negus, A. P. Stephens, J. Lansford. HomeRF: Wireless Networking for the Connected Home, IEEE Personal Communications, February 2000, p. 20-27.
- N. Golmie, Interference Aware Bluetooth Scheduling Techniques, IEEE P802.15 Working Group Contribution, IEEE P802.15-01/143r0, Hilton Head, NC, March 2001.
- N. Golmie, F. Mouveaux, Interference in the 2.4 GHz ISM band: Impact on the Bluetooth access control performance, Proceedings of IEEE ICC, Helsinki, Finland, June 2001.
- N. Golmie, R. E. van Dyck, A. Soltanian, Interference of Bluetooth and IEEE 802.11: Simulation Modeling and Performance Evaluation, Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWIM'01, Rome, Italy, July 2001.
- S. Shellhammer. Packet Error Rate of an IEEE 802.11 WLAN in the Presence of Bluetooth, IEEE P802.15 Working Group Contribution, IEEE P802.15-00/133r0, Seattle, Washington, May 2000.
- S. Zurbes, W. Stahl, K. Matheus, J. Haartsen, Radionetwork performance of Bluetooth, Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2000, vol. 3, New Orleans, LA, June 2000, p. 1563-1567.