



Васильев В.Г.

Юнидата

Применение оборудования Wi-Fi стандарта IEEE 802.11a/b/g/n в сетях фиксированного БШД

Июнь 2010, редакция 2.

Введение

1. Основные характеристики каналов связи на оборудовании Wi-Fi.
2. Условия эффективного применения оборудования Wi-Fi в сетях БШД.
3. Результаты испытаний работы оборудования Wi-Fi в различных условиях эксплуатации.

Введение

Несколько лет назад ведущий производитель Wi-Fi чипсетов компания Atheros Communications разработала дизайн аппаратной платформы AR2315 с интегрированным радиомодулем IEEE 802.11a/b/g высокой мощности 25-27 dBm. В конце 2008- начале 2009 появилось также оборудование стандарта IEEE 802.11n, реализующее технологию MIMO, обеспечивающее беспрецедентную для оборудования такого класса скорость передачи данных. Это позволило производителям наводнить рынок высокоскоростными (декларируется до 150-300 Mbps), недорогими (до \$100) с высокой излучаемой мощностью (до 0.5 Ватт) Wi-Fi устройствами в outdoor исполнении с встроенными антеннами и возможностью подключения внешних антенн.

Устройства данного типа, несмотря на свое outdoor исполнение, представляют собой самые обычные Wi-Fi точки доступа, технологически предназначенные для построения офисных и домашних беспроводных локальных сетей класса Wireless LAN. Outdoor исполнение предполагает работу на улице вне зданий, однако данные устройства не содержат какой-либо отличной от WirelessLAN функциональности, позволяющей им эффективно работать в сетях БШД класса Wireless MAN.

Тем не менее, как стандартные Wi-Fi устройства, так и программно доработанные проприетарные устройства на базе IEEE 802.11a/b/g радио, много лет активно используются с

определенными ограничениями при построения сетей БШД класса Wireless MAN для поддержки доступа “последней мили” (last mile access). Особенности и ограничения применения Wi-Fi устройств стандарта IEEE 802.11a/b/g для построения каналов РТР точка-точка, а также РМР точка-многоточка сетей БШД, в принципе, известны. Применение устройств нового стандарта IEEE 802.11n для данных целей аналогично использованию обычного Wi-Fi оборудования, но при этом добавляются как новые возможности, так и дополнительные ограничения на условия эффективной работы технологии ММО, обусловленные особенностями работы протокола IEEE 802.11n в сетях БШД.

В данной статье проведен анализ возможностей и ограничений использования стандартных устройств Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g/n, а также проприетарного оборудования на базе Wi-Fi радио при построении сетей БШД.

1 . Основные характеристики каналов связи на оборудовании Wi-Fi

Основными характеристиками каналов связи являются в сетях БШД являются:

- максимальная скорость передачи данных (пропускная способность Throughput полезного user-level, application) на Ethernet интерфейсе;

- пакетная производительность оборудования packets per second (pps), определяющая максимальное количество пакетов в секунду, которое устройство может пропустить через свои wireless и Ethernet интерфейс.

- задержка пакетов данных (delay);

- колебание задержки пакетов данных jitter;

- битовая ошибка BER. Поскольку для измерения значения BER необходимо использовать специализированное оборудование, то на практике обычно применяют производные от BER параметры качества канала связи такие, как, например, процент потерянных пакетов (lost data);

- значение параметра MOS разборчивости речи при передаче VoIP трафика, и др.

Рассмотрим, какая скорость передачи данных, параметры качества канала связи и при каких условиях могут быть получены на оборудовании Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n.

В Таблице 1 приведены данные расчетов пропускной способности устройств стандарта IEEE 802.11a/b/g в default конфигурации без применения проприетарных методов повышения производительности на однонаправленном (симплекс) UDP/TCP трафике с пакетами длиной 1500 байт./Methodology for testing Wireless LAN performance with Chariot. Atheros Communication 2003/.

Таблица 1. Пропускная способность Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g

	Number of Channels	Modulation	Maximum Link Rate	Maximum TCP Rate	Maximum UDP Rate
802.11b	3	CCK	11 Mbps	5.9 Mbps	7.1 Mbps
802.11g (with 11b)	3	OFDM/CCK	54 Mbps	14.4 Mbps	19.5 Mbps
802.11g (11g-only mode)	3	OFDM/CCK	54 Mbps	24.4 Mbps	30.5 Mbps
802.11a	19	OFDM	54 Mbps	24.4 Mbps	30.5 Mbps
802.11a TURBO	6	OFDM	108 Mbps	42.9 Mbps	54.8 Mbps

Стандартные IEEE 802.11a/g Wi-Fi устройства при работе на модуляции 64QAM ³/₄, соответствующей символьной скорости кодирования данных (data rate, link rate) 54 Mbps, обеспечивают максимальную агрегативную (downlink+ uplink) скорость передачи данных на Ethernet интерфейсе 25-30 Mbps в канале шириной 20 MHz (12-15 Mbps в дуплексе). В некоторых устройствах данного типа путем программной агрегации пакетов в фреймы и уменьшения временных интервалов между пакетами данных (backoff) удается разогнать агрегативную скорость передачи данных на Ethernet интерфейсе до 42 Mbps (21 Mbps в дуплексе) в канале шириной 20 МГц, что следует считать теоретико-физическим максимумом пропускной способности канала, построенного на чипсете стандарта IEEE 802.11a/g.

Технология MIMO стандарта IEEE 802.11n за счет:

- одновременной передачи данных по двум каналам (chain) в разной поляризации,
- возможности применения более высокой модуляции 64QAM5/6,
- агрегации пакетов данных в фреймы,

позволяет получить максимальную скорость передачи данных на Ethernet интерфейсе:

- до 55 Mbps Mbps в дуплексе на модуляции 64QAM5/6 в канале шириной 20 МГц MIMO 2x2, data rates (скорость кодирования данных) 130 Mbps (HT 20, MSC15);
- до 85 Mbps в дуплексе на модуляции 64QAM5/6 в канале шириной 40 МГц MIMO 2x2, data rates (скорость кодирования данных) 270 Mbps (HT 40, Modulation Coding Scheme (MSC) 15);

Приводимые производителями цифра скорости передачи данных, например, 300 Mbps, является data rates – скоростью кодирования данных в канале 40 МГц MIMO 2x2 (HT 40, MCS 15, Guard Interval 400 ns), и не соответствует реальной пропускной способности канала связи throughput данного оборудования.

Приведенные цифры максимальной пропускной способности на Ethernet интерфейсе Throughput устройств Wi-Fi :

- во-первых, значительно меньше скорости кодирования data rate на wireless интерфейсе оборудования Wi-Fi, которая обычно указывается в спецификациях на оборудование;

- во-вторых, пропускная способность Throughput устройств Wi-Fi очень сильно зависит от длины пакетов данных. Например, пропускная способность Wi-Fi на пакетах длиной 64 байт (голосовой UDP трафик) может быть в десяток раз меньше максимальной пропускной способности устройств Wi-Fi на трафике копирования файлов FTP с длиной пакетов 1500 байт.

- в-третьих, пропускная способность Wi-Fi сильно зависит от дальности связи и других многочисленных факторов, влияние которых мы и рассмотрим в настоящей статье.

Приведенные выше значения максимальной пропускной способности могут быть получены в лабораторных условиях на стенде при соединении устройств коаксиальным кабелем с аттенюаторами или при работе в офисных условиях на трафике с длинными пакетами данных (порядка 1000-1500 байт).

Основной причиной значительно более низкой скорости передачи данных (throughput) на Ethernet интерфейсе по сравнению со скоростью кодирования data rate на wireless интерфейсе оборудования Wi-Fi и сильной зависимости пропускной способности устройств Wi-Fi от параметров трафика является высокий overhead – большая доля служебной информации по сравнению полезными данными (payload) в пакете Ethernet стандарта IEEE 802.11 a/b/g.

Высокий overhead приводит к тому, максимальная пропускная способность Wi-Fi оборудования стандарта IEEE 802.11a/g на длинных пакетах порядка 1000-1500 байт составляет примерно половину от максимальной скорости кодирования символов 54 Mbps. При уменьшении длины пакетов данных негативное влияние overhead увеличивается так, что, например, пропускная способность оборудования Wi-Fi 802.11a/g на мелких пакетах длиной 64 байт составляет примерно 16% от пропускной способности на длинных 1000-1500 байт пакетах, то есть не превышает величины 4.5 Mbps (2.2 Mbps в дуплексе).

На рис.1 приведена зависимость расчетной пропускной способности устройства стандарта IEEE 802.11a от длины пакета данных полезного трафика (payload)/ Y. Kim, S. Choi, K. Jang, H. Nwang. “Throughput Enhancement of IEEE 802.11 WLAN via Frame Aggregation”. 2004/. На графике видна значительная деградация пропускной способности устройств Wi-Fi при уменьшении длины передаваемых пакетов данных, обусловленная значительным overhead используемого протокола канального уровня стандарта IEEE 802.11a.

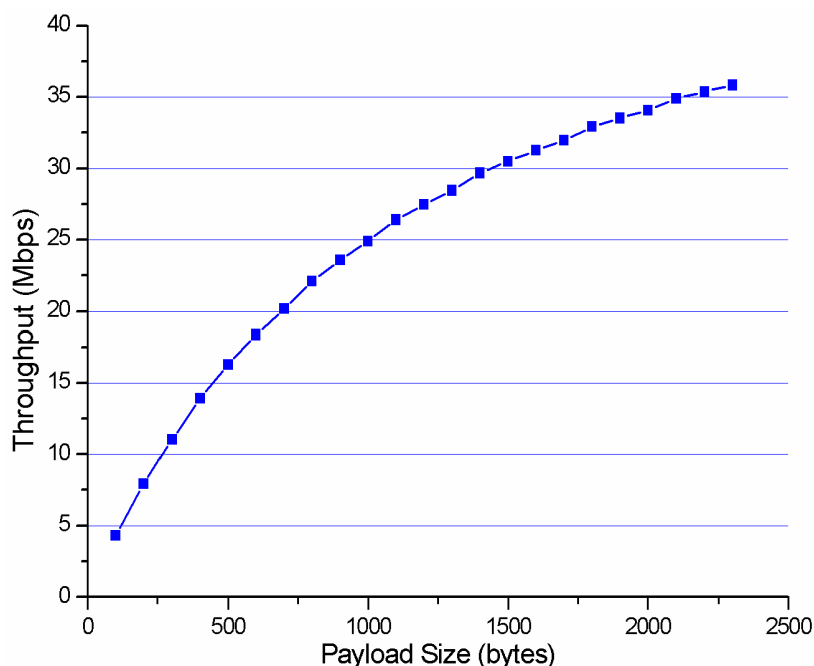


Рис.1 Зависимость пропускной способности устройств стандарта IEEE 802.11a от длины пакета данных.

Пропускную способность стандартных Wi-Fi устройств на мелких пакетах невозможно повысить сверх ее теоретического максимума (ограниченного кривой на Рис. 1) путем применения более мощных аппаратных платформ.

В Таблице 2 приведена таблица зависимости Throughput пропускной способности Wi-Fi устройства стандарта IEEE 802.11a на платформе Atheros AR 2315 (Ubiquiti NanoStation 5, Atheros MIPS 4KC, CPU 180MHz) от размера пакетов данных packet size полезного (payload) UDP трафика. Data rate – скорость кодирования данных на wireless интерфейсе. Данные получены программой Iperf, запущенной на двух PC, подключенных к Ethernet интерфейсам тестируемых устройств NS5 по схеме PC-Ethernet-NS5- Wireless –NS5 –Ethernet-PC в сквозном канале Ethernet Bridge -Wireless WDS при испытаниях устройств NS5 в офисных условиях.

Таблица 2. Пропускная способность Wi-Fi на платформе AR 2315 стандарта IEEE 802.11a

Packet size, Byte, UDP	Throughput, Duplex, Mbps	Data rate, Mbps
1470	14.75	54
256	3.8	54
128	2.23	54
64	0.96	54

Из Таблицы 2 видно, что с увеличением длины пакета пропускная способность канала связи приближается к своему максимальному значению вследствие того, что доля служебной информации по отношению к полезным данным payload в общем Ethernet пакете данных уменьшается. С уменьшением размера пакетов данных пропускная способность канала падает.

Помимо высокого overhead протокола передачи данных стандарта IEEE 802.11 другой основной причиной низкой пропускной способности Wi-Fi на мелких пакетах является низкая производительность используемых аппаратных платформ.

Обычно устройства Wi-Fi, предназначенные для построения офисных и домашних беспроводных ЛВС, имеют малобюджетную аппаратную платформу и, как следствие, низкую производительность. Это приводит к тому, что данные устройства не справляются с высокой пакетной нагрузкой даже на относительно небольшом трафике из мелких пакетов. Поэтому большинство малобюджетных устройств Wi-Fi (за 100 USD) имеет пропускную способность на пакетах, например 64 байт UDP, порядка 1 Mbps в дуплексе (см Таблицу 2), что соответствует пакетной производительности порядка 4K pps (packets per second).

В Таблице 2 видно, что вследствие использования слабой аппаратной платформы AR 2315 пропускная способность данного устройства NS5 на мелких пакетах несколько ниже максимально достижимых на том же типе трафика расчетных значений (Рис.1). Тем самым пропускная способность устройств, например, на платформе AR 2315 стандарта IEEE 802.11a ограничена низкой пакетной производительностью, равной 4K pps.

Заметим, что низкая производительность аппаратной платформы снижает пропускную способность устройства на мелких пакетах, однако применение самой мощной платформы не может дать пропускную способность выше ее теоретического максимума, ограниченного параметрами overhead (кривой на Рис.1), при работе в стандартном режиме IEEE 802.11a/b/g.

Высоким overhead стандартного MAC протокола IEEE 802.11 a/b/g объясняется одна из известных в истории беспроводных коммуникаций загадок Wi-Fi. В начале применения Wi-Fi в сетях БШД было замечено, что на FTP трафике (пакеты TCP длиной 1500 байт) можно получить скорость передачи данных 25 Mbps, но при обслуживании большого количества сессий от множества пользователей со средней длиной пакетов менее 500 байт пропускная способность канала деградирует до величин в несколько Mbps. Причина данного явления -высокий overhead достаточно быстро была установлена и были предложены решения данной проблемы путем использования проприетарных протоколов агрегации пакетов в фреймы. Такие протоколы были разработаны в конце 1990-х годов, в частности, первым из них был проприетарный поллинговый протокол TurboCell фирмы KarlNet, ныне после некоторой доработки получившей название Outdoor Router Protocol, и применяемый в устройствах серии MP Proxim Wireless. Помимо TurboCell/Outdoor Router также получил известность протокол Nstreme фирмы Mikrotik и протокол устройств серии Revolution/Infilink фирмы Infinet.

Данные проприетарные протоколы на канальном MAC уровне агрегируют мелкие пакеты в фреймы большего размера. Максимальная длина агрегированного фрейма протокола Outdoor Router составляет 2048 байт, протокола Nstreme-3200 байт. За счет агрегации значительно

уменьшается overhead пакета данных служебной информацией, что приводит к увеличению пропускной способности Wi-Fi устройств, но при этом теряется совместимость со стандартным IEEE 802.11 a/b/g оборудованием.

Программная агрегация пакетов в устройствах на базе радио стандарта IEEE 802.11a/g снижает overhead и повышает пакетную производительность данных проприетарных устройств, но является ресурсоемкой операцией. Поэтому для повышения пропускной способности такого оборудования на трафике с мелкими пакетами необходимо использовать устройства с достаточно мощной и поэтому дорогой аппаратной платформой. Если используемая аппаратная платформа не справляется с высокой пакетной нагрузкой на мелких пакетах мультисервисного трафика, то в сети увеличиваются задержки пакетов и jitter, что приводит к невозможности поддержки мультисервисного обслуживания в сети БШД.

В устройствах Wi-Fi нового стандарта IEEE 802.11n применяется аппаратная, выполняемая на радиокarte, агрегация пакетов в фреймы Aggregated MAC Service Data Unit (A-MSDU) длиной 4-8К байт и программная, выполняемая процессором системного модуля, агрегация в фреймы Aggregated MAC Packet Data Unit (A-MPDU) с максимальным размером 64К байт. В связи с этим устройства IEEE 802.11n имеют большую пакетную производительность и, как следствие, большую пропускную способность, в том числе на мелких пакетах, по сравнению с устройствами стандарта IEEE 802.11a/g.

В Таблице 3 приведена таблица зависимости Throughput пропускной способности Wi-Fi устройства с радиокartой R52Hn (Atheros AR9220) стандарта IEEE 802.11n на достаточно мощной платформе Router Board 411AH, (AR7161 680MHz, RAM 64 MB), Mikrotik v.4.6, а также UNBT Rocket M5 (Atheros MIPS 24KC, 400MHz) от размера пакетов данных packet size полезного (payload) дуплексного и симплексного UDP трафика.

Таблица 3. Пропускная способность Wi-Fi устройств RB411AH и Rocket M5 IEEE 802.11n

Packet size, Byte, UDP	Throughput, RB411AH/R52Hn duplex, Mbps		Throughput, Rocket M5 Duplex, Mbps			
	BW=20MHz, 1 chain, SISO Tx/Rx Rate 130/130 Nstreme Off	BW=20MHz, MIMO 2x2 Tx/Rx Rate 130/130 Nstreme Off	BW=20 MHz, MIMO 2x2 Tx/Rx Rate 130/130		BW=40 MHz, MIMO 2x2 Tx/Rx Rate 243/243	
			Aggregation On	Aggregation Off	Aggregation On	Aggregation Off
1470	23.9	49.1	39.1	17.3	77.1	21.9
256	17.2	17.9	20.4	4.2	21.4	4.5
160	13.2	12.6	13.3	2.6	14.2	2.8
64	7.6	6.8	5.7	1.2	6.0	1.2

Данные получены программой Iperf, запущенной на двух PC, подключенных к Ethernet интерфейсам тестируемых устройств по схеме PC-Ethernet-Wi-Fi -Wireless –Wi-Fi –Ethernet-PC. Устройства Wi-Fi соединены по wireless интерфейсу коаксиальным кабелем с аттенюаторами.

Результаты измерений показали, что агрегация пакетов в длинные фреймы значительно увеличивает пакетную производительность устройств стандарта IEEE 802.11n и пропускную способность на мелких пакетах данных по сравнению с устройствами стандарта IEEE 802.11a/g. Однако достигаемая пропускная способность является по-прежнему недостаточной для обработки мультисервисного трафика современных сетей БШД. Кроме того, как мы увидим далее, агрегация пакетов в суперфреймы большой длины резко снижает стабильность и помехоустойчивость работы беспроводной сети.

В Таблице 3 видно, что пропускная способность устройств IEEE 802.11n на мелких пакетах практически не зависит от ширины каналов связи и использования одного канала (1 chain SISO) или двух каналов MIMO 2x2.

Для выяснения причины данного явления было измерена пропускная способность между wireless интерфейсами устройств RB411AH с помощью внутреннего Bandwidth test и проведено тестирование устройства IEEE 802.11n на более мощной аппаратной платформе RB800 (CPU 800 MHz, RAM 256 MB) в режиме работы Ethernet 100 BaseT.

На внутреннем тесте Bandwidth test между wireless интерфейсами IEEE 802.11n устройств RB411AH/R52Nn максимальная скорость передачи данных на пакетах длиной 64 байт составляет порядка 23 Mbps дуплекс и достигается при максимальной 95% загрузке процессора. Если трафик идет в обычном рабочем режиме через wireless и ethernet интерфейсы (или второй wireless), то пропускная способность и пакетная производительность устройств с интерфейсом 100 BaseT резко падает и на пакетах длиной 64 байт составляет всего 7 Mbps в дуплексе, что соответствует производительности порядка 28 kpps.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что пропускная способность устройства IEEE 802.11n ограничивается не производительностью процессора, а в основном производительностью шин Wireless и Ethernet интерфейсов. Использование аппаратных платформ с мощными процессорами сверх определенного уровня не дает повышения пакетной производительности в устройствах Wi-Fi IEEE 802.11n.

Тем самым, пропускная способность устройств IEEE 802.11n ограничивается на интерфейсных шинах при реализации протокола передачи данных MAC уровня. Это приводит к тому, что пропускная способность устройств IEEE 802.11n на мелких пакетах мультисервисного трафика практически одинакова для каналов шириной 20 и 40 МГц и режимов с одним chain (SISO) и двумя chain MIMO 2x2.

Для изучения причины торможения пакетной производительности между интерфейсами Wi-Fi устройств был проведен эксперимент. На типовую аппаратную платформу ALIX 3.2c (x86 CPU Geode 500 MHz) с Ethernet 100 BaseT и радиокартой Wistron CM9 IEEE 802.11a вместо ПО с драйвером протокола IEEE 802.11 было загружено firmware MAXBridge 50 PTP TDD с

реализацией синхронного протокола TDD. Данное TDD устройство показало значительно большую пакетную производительность 39 Kpps по сравнению с производительностью 7Kpps того же устройства, но с прошивкой с драйвером IEEE 802.11a.

Это свидетельствует о том, что проблемы с пакетной производительностью все же кроются в реализации протокола IEEE 802.11n на типовых аппаратных платформах устройств Wi-Fi.

Тестируемые аппаратные платформы сами по себе имеют значительно более высокую (выше 100 Kpps) пакетную производительность на трафике, проходящем через Ethernet интерфейсы. Пакетная производительность же устройств Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n на данных платформах тормозится на MAC канальном уровне при преобразовании форматов пакетов данных стандарта IEEE 802.11n в формат пакетов данных MSDU IEEE 802.3 на Ethernet интерфейсе (или второй wireless интерфейс) и обратно.

Таким образом, увеличение размера фрейма агрегации снижает overhead и уменьшает различия в величинах скорости кодирования символов Data rate и пропускной способности канала Throughput. Однако бесконечно увеличивать размер фрейма нельзя. Работа канала связи с большим фреймом агрегации имеет обратный эффект, связанный с увеличением вероятности потерь или искажения длинных фреймов данных (снижение надежности доставки данных и увеличение потерь data loss) на протяженных линиях БШД, особенно в условиях интерференции. Потеря или искажение фрейма данных требует его повторной передачи, что с увеличением размера фрейма ведет к значительной деградации пропускной способности устройств, увеличению задержек и jitter при работе в реальных сетях БШД.

Фрейм A-MSDU стандарта 802.11n имеет одну контрольную сумму на все входящие в него пакеты MSDU общей длиной 4-8К байт. Поэтому при искажении в процессе передачи по каналу связи фрейма A-MSDU приходится повторять передачу всех входящих в этот фрейм пакетов MSDU. Для работы в реальных сетях БШД с пониженной по сравнению с офисными условиями надежностью доставки данных на большие расстояния, в том числе при наличии интерференции, оптимальная максимальная длина фрейма в проприетарных протоколах агрегации MSDU обычно не превышает 2-3К байт. Как следствие, устройства IEEE 802.11n менее устойчивы к воздействию внешних помех, к переотражениям собственного радиосигнала от препятствий на трассе линка по сравнению с устройствами IEEE 802.11a/g.

Каждый пакет агрегации A-MPDU в отличие от аппаратной агрегации A-MSDU имеет свою контрольную сумму. Поэтому A-MPDU агрегация в сверхдлинные фреймы длиной 64К байт не ведет к заметной деградации пропускной способности при снижении надежности доставки данных в канале связи (увеличении потерь data loss). Фрейм A-MPDU имеет общий пакет ACK группового подтверждения успешности приема для всех входящих в него пакетов MPDU. Тем самым, при потере или отсутствии группового подтверждения успешности доставки

фрейма A-MPDU, считается, что произошла коллизия доступа, и после определенного случайного промежутка времени backoff потерянные пакеты MPDU фрейма A-MPDU передаются заново. Тем самым, большие размеры фрейма A-MPDU в условиях понижения надежности доставки данных и увеличения потерь пакетов данных влияют на величину задержки и jitter.

Длина 4-8К байт фрейма A-MSDU и 64К байт A-MPDU по стандарту IEEE 802.11n оптимизирована на условия домашнего и офисного применения для скоростной передачи видео при отсутствии интерференции. Применение устройств IEEE 802.11n с большим размером фреймов агрегации при наличии помех и переотражений радиосигнала в сетях БШД сопровождается высокими потерями пакетов данных, увеличением задержек и значительной деградацией пропускной способности каналов связи.

Таким образом, относительно высокие максимальные скорости передачи данных на оборудовании Wi-Fi могут быть получены только на трафике с длинными пакетами данных, к которому можно отнести сервис копирования файлов по протоколу FTP. Реальная пропускная способность Wi-Fi устройств на трафике из мелких и средних по длине пакетов в десятки раз меньше, чем максимальные скорости передачи данных, получаемые на тестах по копированию файлов.

Если еще год-два назад реальный трафик состоял в основном из сервисов копирования файлов ftp и web броузинга http со средним размеров пакетов более 500-600 байт, то современный мультисервисный трафик состоит преимущественно из мелких пакетов. Например, трафик сервисов, таких как VoIP, торренты, игры состоит из мелких UDP пакетов длиной менее 250 байт. Например, UDP пакеты VoIP Skype имеют длину 71 байт, VoIP G.711 –214 байт UDP, uTP торрент – вплоть до 150 байт UDP.

В Таблице 4 приведены данные распределения размеров пакетов данных на магистральном канале связи доступа в Интернет одного из крупных операторов г. Киева по состоянию на май 2010 г.

Таблица 4. Распределение размера пакетов данных

Длина пакета Ethernet , байт	64	128	256	512	1024	1518
% от общего трафика	17%	14%	11%	22%	21%	15%

Таким образом, третья часть современного мультисервисного трафика имеет размер пакета меньше 128 байт и потребляет более 90% ресурсов производительности устройств Wi-Fi.

В Таблице 5 приведены результаты измерения пропускной способности на пакетах длиной 64 байт и пакетной производительности различных Wi-Fi устройств, выполненных на базе IEEE 802.11a/n радио, и для сравнения аналогичные данные для оборудования RTP точка-точка RADWIN-2000 C, также построенное на базе IEEE 802.11n радио, но реализующее проприетарный синхронный протокол TDD.

Таблица 5. Пропускная способность и пакетная производительность устройств.

Тип	Ширина канала, MHz	Throughput UDP 64 bytes duplex, Mbps	Max PPS Packets per second
UBNT NS 5 IEEE 802.11a	20	0.96	4K
RB411AH/CM9 802.11a Nstreme Frame Policy 3200	20	9.7	39k
RB411AH/R52Hn 802.11n MIMO 2x2 Nstreme Frame Policy 3200	20	4.5	18 K
UBNT NS M5 802.11n MIMO 2x2	20	5.1	28K
UBNT NS M5 802.11n MIMO 2x2	40	5.6	28K
UBNT Rocket M5 802.11n MIMO 2x2	20	5.7	28K
UBNT Rocket M5 802.11n MIMO 2x2	40	6.0	28K
RB411AH/R52Hn IEEE 802.11n SISO	20	7.6	28K
RB411AH/R52Hn IEEE 802.11n MIMO 2x2	40	6.8	28K
RB800/R52Hn IEEE 802.11n, MIMO2x2, 100 BaseT	40	6.9	28K
RB800/R52Hn IEEE 802.11n, MIMO2x2, 1000 BaseT	40	14.8	60K
Radwin 2000 C, 100 BaseT TDD, MIMO 2x2	20	51.41	200K

Из Таблицы 5 видно, что стандартные Wi-Fi устройства IEEE 802.11a/g при работе на трафике из мелких пакетов длиной 64 байт имеют низкую пропускную способность. Это означает, что и на реальном мультисервисном трафике, где 30% пакетов имеют длину меньше 128 байт, пропускная способность этих устройств также невысока.

Типовое Wi-Fi устройство, например, UBNT Nanostation 5 с пакетной производительностью 4Kpps имеет максимальную пропускную способность всего лишь 6 Mbps дуплексного трафика с распределением размеров пакетов согласно Таблице 4. Устройство UBNT Rocket M5 IEEE802.11n MIMO 2x2 с пакетной производительностью 28 Kpps, получаемой за счет аппаратной пакетной агрегации имеет максимальную пропускную способность (одинаковую для канала шириной 20 МГц и 40 МГц) около 25 Mbps дуплексного трафика с распределением размеров пакетов согласно Таблице 4, что недостаточно для обслуживания backhaul каналов современных мультисервисных сетей.

В Таблице 4 видно, что программная пакетная агрегация протокола Nstreme в фреймы длиной 3200 байт (Frame Policy 3200) на производительной аппаратной платформе и радиокартах IEEE 802.11a обеспечивает более высокую пакетную производительность порядка 39Kpps, чем аппаратно-программная агрегация в стандартных устройствах IEEE 802.11n,

дающая пакетную производительность порядка 28 Kpps. А вот применение протокола Nstreme на радиокартах в стандарте IEEE 802.11n не имеет положительного эффекта, то есть Nstreme в тестируемой текущей версии v 4.6 эффективно не работает.

Тем самым, несмотря на более низкую максимальную скорость передачи данных (получаемую при копировании файлов FTP) устройств на базе радиокарт IEEE 802.11a с проприетарным протоколом, например Nstreme, по сравнению с устройствами стандарта IEEE 802.11n, в реальной сети на мультисервисном трафике проприетарные устройства IEEE 802.11a на хорошей аппаратной платформе имеют более высокую пропускную способность, чем устройства IEEE 802.11n.

Проприетарный протокол программной агрегации пакетов в фреймы на базе IEEE 802.11 a/g радио хотя и дает большую пакетную производительность по сравнению с аппаратно-программной агрегацией в Wi-Fi устройствах стандарта IEEE 802.11n, но имеет обратную негативную сторону своего применения. При недостаточной производительности аппаратной платформы программная агрегация в фреймы съедает более 70% ресурсов процессора, что тормозит поддержку других функций устройства, например, бриджинга или роутинга, что ведет к увеличению задержек и деградации канала связи.

Аппаратная агрегация пакетов в фреймы A-MSDU IEEE 802.11n выполняется не процессором устройства, а чипсетом радиокарты, что высвобождает ресурсы аппаратной платформы для поддержки функций доступа. Однако работа устройств стандарта IEEE 802.11n в сетях БШД также имеет негативный эффект, вызванный агрегацией пакетов. Но причина здесь кроется не в недостаточной производительности аппаратной платформы, а в неоправданно длинных для применения в сетях БШД фреймах, потери и искажения которых ведут к увеличению задержек и снижению пропускной способности канала связи.

В отличие от Wi-Fi проприетарный синхронный TDD протокол в оборудовании RADWIN 2000 С имеет низкий overhead, что обеспечивает на мощной аппаратной платформе данного устройства высокую пакетную производительность порядка 200 Kpps и пропускную способность (см Таблицу 5), практически не зависящую от длины пакета данных трафика.

Выводы:

1) Стандартные Wi-Fi устройства IEEE 802.11a/b/g вследствие особенностей реализации своего канального MAC уровня (высокий overhead) имеют крайне низкую пакетную производительность, могут обслуживать преимущественно ftp, http трафик и не в состоянии обеспечивать эффективное мультисервисное обслуживание в современных сетях БШД.

Использование более мощных аппаратных платформ Wi-Fi не решает данную проблему

2) Большинство устройств на базе hardware IEEE 802.11a/b/g с проприетарным протоколом агрегации пакетов в фреймы имеют более высокую по сравнению со стандартными

оборудованием Wi-Fi пакетную производительность, которой, тем не менее, на типовых аппаратных платформах недостаточно, чтобы обеспечить эффективное мультисервисное обслуживание в современных сетях БШД.

3) Устройства Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n за счет использования аппаратно-программной пакетной агрегации и технологии MIMO 2x2 имеют более высокую пакетную производительность и значительно более высокую максимальную скорость передачи данных по сравнению с Wi-Fi стандарта IEEE 802.11a/g. Однако высокие показатели скорости передачи данных могут быть получены только на трафике, состоящем из преимущественно длинных пакетов, например на FTP при копировании файлов. На мелких пакетах мультисервисного трафика в современных сетях БШД применение Wi-Fi устройств IEEE 802.11n не дает существенного повышения пропускной способности каналов связи и, в целом, малоэффективно. Кроме того, из-за использования чрезмерно длинных фреймов данных Wi-Fi оборудование IEEE 802.11n подвержено значительной деградации параметров канала связи при увеличении дальности связи, наличии препятствий на трассе линка, присутствии интерференции в сетях БШД.

2. Условия эффективного применения устройств Wi-Fi в сетях БШД.

Пропускная способность оборудования Wi-Fi в сетях БШД на дальностях в несколько километров значительно меньше максимальной пропускной способности, получаемой в лабораторных и офисных условиях.

Причина деградации скорости передачи данных Wi-Fi устройств при работе в сетях БШД заключается в том, что условия функционирования сетей БШД принципиально отличаются от офисных условий (внутри помещений) для работы в которых, как уже говорилось, и проектировалось оборудование Wi-Fi.

Рассмотрим основные различия в условиях применения офисных сетей WLAN и сетей БШД, влияющие на параметры каналов связи, построенных на оборудовании Wi-Fi.

1) Дальность связи в сетях БШД составляет от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров, что значительно выше дальности связи локальных сетей WLAN.

На больших дальностях связи пропускная способность Wi-Fi устройств деградирует в несколько раз по сравнению с офисными Wi-Fi сетями. Причина снижения пропускной способности состоит в следующем:

а) В Wi-Fi устройствах используется протокол доступа к среде CSMA/CA ACK. Один из параметров данного протокола - допустимая временная задержка пакета ACK подтверждения успешного приема переданного пакета данных ориентирована на условия офисного применения, т.е. на малую дальность связи в условиях офиса.

На больших дальностях, если время прихода пакета АСК превышает допустимое значение, система Wi-Fi ошибочно считает, что переданный пакет данных потерян, что делает невозможным работу таких Wi-Fi в сетях БШД. Большинство современных систем Wi-Fi позволяют регулировать величину ожидания АСК в зависимости от дальности связи. При этом увеличение времени ожидания подтверждения успешности приема приводит к увеличению временных интервалов между передаваемыми пакетами данных, что снижает скорость передачи данных. Некоторые системы допускают отключение механизма АСК, что дает положительный эффект только при высокой надежности доставки данных (вероятности успешной доставки пакета данных). При высоких потерях пакетов данных и отсутствии информации об этом на канальном MAC уровне, система Wi-Fi обнаруживает потери данных и осуществляет повтор передачи на более высоком TCP/IP уровне сети, что в итоге оборачивается более значительной деградацией скорости передачи данных.

б) CSMA/CA является протоколом случайного коллизийного доступа, который во многом близок к протоколу локальных проводных Ethernet сетей. При увеличении дальности связи и снижении надежности доставки данных увеличиваются потери пакетов данных. При этом протокол CSMA/CA системы Wi-Fi рассматривает факт потери пакета данных как обычную предусмотренную стандартом коллизию множественного доступа. Поэтому вместо того, чтобы немедленно повторить передачу, протокол заставляет систему ждать случайный период времени backoff в ожидании освобождения канала связи, который на самом деле не занят. Поэтому повышение дальности связи увеличивает продолжительность циклов ожидания передачи пакетов данных, что значительно снижает пропускную способность устройств Wi-Fi.

в) с увеличением дальности связи снижается надежность канала связи. Устройства Wi-Fi рассчитаны на работу в офисе с высокой надежностью успешной доставки пакетов данных и поэтому не имеют точной информации о величине потерь пакетов в радиоканале (кроме малоинформативного параметра CCQ) и не проводят эффективную адаптацию параметров своей работы в зависимости от состояния канала связи. Поэтому устройства Wi-Fi принципиально не приспособлены к работе в сетях БШД на больших дальностях.

Негативное влияние факторов, связанных с увеличением дальности связи, снижается путем замены на программном уровне стандартного протокола CSMA/CA проприетарным протоколом доступа поллингового типа. Данный протокол помимо рассмотренной выше агрегации пакетов данных и собственно реализации поллинга (polling), применяемого в топологии multipoint для поддержки множественного доступа с разделением времени, реализует на MAC уровне проприетарный протокол обмена данными канального уровня. Это превращает стандартные Wi-Fi устройства в проприетарное оборудование БШД, несовместимое со стандартным оборудованием Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n.

Данный проприетарный протокол обмена данными канального уровня поддерживает адаптивную модуляцию в зависимости от величины ошибок в канале и неколлизионные механизмы повтора передачи потерянных и искаженных пакетов, что значительно увеличивает дальность и пропускную способность канала связи.

Максимальная дальность связи любого радиоборудования, и в том числе Wi-Fi, определяется энергетическими параметрами устройств, затуханием радиосигнала на трассе линка и может быть получена путем расчета бюджета линка. См Решение www.unidata.com.ua. При этом дальность связи на оборудовании Wi-Fi, в отличие от, например, оборудования TDD/TDMA, дополнительно зависит от многих других факторов, учесть которые в расчетах практически невозможно.

Дальность реальных линков на оборудовании Wi-Fi по приведенным выше причинам, как правило, значительно меньше расчетных величин. Поэтому дальность связи на оборудовании Wi-Fi непредсказуема и не поддается точному расчету и прогнозу.

2) Устройства Wi-Fi, как и любые другие РЭС, обычно вынуждены работать в условиях интерференции, создаваемой переотражениями радиоволн от препятствий на трассе канала связи.

Переотражения радиоволн от препятствий на трассе линка вызывает многолучевое распространение радиосигналов, приводящее к так называемым замираниям на входе приемника РЭС, в том числе Wi-Fi устройств. Радиосигнал OFDM, используемый в устройствах Wi-Fi, как известно, устойчив к негативному влиянию многолучевого распространения радиоволн. Однако параметры OFDM радиосигнала устройств Wi-Fi ориентированы на эффективное подавление переотражений при их применении в условиях офиса.

Характер переотражений в сетях БШД отличается от переотражений радиосигнала в офисных сетях Wireless LAN. В частности, такой параметр, как величина частотного разноса (Guard Interval) между поднесущими OFDM радиосигнала стандарта IEEE 802.11a/b/g/n, рассчитана на эффективное подавление замираний (межсимвольной интерференции Inter Symbol Interference – ISI), вызванных переотражениями (multipath) от стен при работе в офисных условиях. При работе на улице в сетях БШД временные задержки радиосигнала, вызванного переотражениями от различных препятствий, находящихся на трассе канала связи, очевидно, значительно больше значений задержек при офисном применении. Поэтому Wi-Fi OFDM радиосигнал не может эффективно подавлять ISI межсимвольную интерференцию уличного типа и подвержен замираниям (fading) при outdoor применениях в сетях БШД.

Многие обращали внимание, что уровни сигнала в приемнике Wi-Fi устройств при работе в реальных условиях на улице “прыгают” в достаточно высоких пределах (5-10 и более dB). Это является следствием негативного влияния переотражений уличного типа.

Влияние переотражений радиосигнала на канал связи Wi-Fi зависит от условий на трассе прохождения линка. При наличии прямой видимости (на трассе линка нет существенных препятствий, зона Френеля полностью открыта) имеющие место переотражения радиоволн на трассе линка вызывают замирания радиосигнала, не приводящие к деградации канала связи.

В случае работы сети Wi-Fi в условиях nearLOS (оптическая видимость, препятствия на трассе частично закрывают зону Френеля) переотражения радиосигнала приводят не только к замираниям, но и к искажению и потере пакетов данных, деградации пропускной способности и качества канала связи.

Нередко приходится иметь с, казалось бы, странной ситуацией, когда, несмотря на наличие оптической видимости, и невысокую дальность линка, например, 3-4 км, на оборудовании Wi-Fi бывает невозможно построить канал связи даже на минимальной скорости передачи данных. Данная проблема связана как раз с особенностями работы Wi-Fi оборудования в условиях nearLOS.

Классическим примером негативного влияния переотражений на устройства Wi-Fi, являются большие потери пакетов данных и, в целом, нестабильность Wi-Fi линка, проходящего над водной поверхностью. Эффективно противостоять интерференции от подстилающей, особенно водной, поверхности на сегодняшний день способны только системы WiMAX.

Устойчивая работа устройств Wi-Fi в сетях БШД в условиях отсутствия прямой видимости nonLOS (зона Френеля закрыта так, что нет оптической видимости), как правило, невозможна.

Для борьбы с замираниями в радиоканале необходимо обеспечить запас по мощности радиосигнала, поступающего на вход приемника системы, называемый fade margin. Запас по замираниям fade margin при работе Wi-Fi устройств в условиях LOS и незначительного закрытия зоны Френеля составляет порядка 12-15dB. Необходимость обеспечения такого высокого fade margin для Wi-Fi систем снижает энергетический бюджет линка и уменьшает максимальную дальность связи в сетях БШД по энергетике линка.

Для сравнения заметим, что в отличие от Wi-Fi, например, в системах WiMAX сигнал OFDM рассчитан на эффективное подавление замираний при multipath как раз уличного типа, и значение fade margin равно 1-3 dB. Поэтому дальность связи на высоких модуляциях, например, 64QAM 3/4 при одинаковых параметрах выходной мощности передатчика и усиления антенн у систем WiMAX в три-пять раз выше, чем у систем Wi-Fi.

Применение проприетарных протоколов доступа на канальном уровне не способно устранить межсимвольную ISI интерференцию, имеющую место на более низком физическом (радио) уровне, но повышает устойчивость работы оборудования за счет использования эффективных механизмов повтора передачи при потере или искажении пакетов данных от воздействия интерференции.

Эффективным методом борьбы с замираниями вследствие переотражений радиосигнала является увеличение энергетического бюджета линка за счет применения устройств Wi-Fi с более высокой выходной мощностью передатчика, применения антенн с более высоким коэффициентом усиления.

Устройства Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n, работающие по технологии MIMO 2x2, помимо влияния обычных рассмотренных выше замираний, также подвержены негативному воздействию так называемых кроссполяризационных замираний cross fading.

Для систем Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n MIMO 2x2 наличие LOS – полностью открытой зоны Френеля, имеет особо важное значение (не путать с реализацией WiMAX MIMO, специально предназначенной для эффективной работы в условиях nonLOS). Дело в том, что при переотражениях от препятствий радиоволна может менять свою поляризацию. Это приводит к тому, что два параллельно работающих в разных поляризациях канала связи Wi-Fi MIMO 2x2 (в реализации IEEE 802.11n) под воздействием переотражений от препятствий создают друг другу взаимную кроссполяризационную (cross fading) интерференцию и мешают работе друг друга. Обычная для города помеха в канале MIMO или препятствие в виде заводской трубы, строительного крана, стоящего рядом здания, может разбалансировать Wi-Fi MIMO систему вплоть до полной потери связи. Водная преграда большой протяженности для устройств MIMO в реализации стандарта IEEE 802.11n также является серьезным и зачастую непреодолимым препятствием.

Тем самым, в типичных городских условиях или пригороде система IEEE 802.11n MIMO 2x2 помимо негативного влияния межсимвольной интерференции ISI также дополнительно подвержена влиянию кроссполяризационной интерференции. Это приводит к тому, что в режиме MIMO 2x2 система Wi-Fi нередко может иметь скорость передачи данных даже ниже, чем при работе в стандарте IEEE 802.11 a/g.

Использование в устройствах IEEE 802.11n MIMO проприетарного протокола поллингового типа не может решить проблему снижения кроссполяризационной интерференции и повысить устойчивость канала MIMO к работе в условиях nearLOS.

Эффективная работа устройства Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n в режиме MIMO 2x2 возможна при высокой кроссполяризационной развязке между каналами в приемнике системы не менее 25 dB.

Это вызвано тем, что для нормальной работы, по крайней мере, модуляции 64QAM3/4, отношение (сигнал/шум+интерференция $C/N+I$) между мощностью сигнала на входе приемника одного канала (chain) MIMO к мощности кроссполяризационной интерференции, создаваемой радиосигналом другого MIMO канала, должно составлять не менее 21-24 dB.

Такое соотношение $C/N+I$ обычно обеспечивается при работе устройств Wi-Fi IEEE 802.11n в офисных условиях при применении обычных dual polarization (MIMO 2x2) антенн. При работе на улице в сетях БШД уровни радиосигналов на входе двух приемников MIMO устройства Wi-Fi 802.11n вследствие замираний “плавают” в значительных пределах. Чем больше колебание уровней радиосигналов в каналах MIMO, тем выше негативное влияние кроссполяризационной интерференции на каждый такой MIMO канал связи. Тем самым, для устойчивой работы устройств Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO на улице требуется обеспечить запас мощности сигнала по отношению к кроссполяризационной интерференции cross fading margin, равный 6-10 dB для условий LOS и более 10 dB в случае частичного закрытия зоны Френеля на трассе линка.

Таким образом, для устойчивой работы (без значительных потерь в канале связи) устройства IEEE 802.11n в сети БШД каждый канал MIMO 2x2, помимо запаса мощности по замираниям fade margin 12-15 dB относительно уровня чувствительности приемника, должен иметь дополнительный 6-10 dB и более запас мощности cross fading margin по отношению к уровню интерференции, проникающей в его приемник со стороны передатчика параллельно работающего соседнего канала MIMO.

В системах Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO2x2 этот дополнительный запас, очевидно, невозможно обеспечить путем повышения энергетического бюджета линка, например одновременного повышения выходной мощности Tx power двух MIMO передатчиков. Требуемую кроссполяризационную развязку в 27 -35 dB и более между двумя каналами MIMO можно получить только за счет применения соответствующих dual polarization антенн.

Тем самым, для работы оборудования IEEE 802.11n MIMO в сетях БШД на высоких модуляциях, например 64QAM3/4, без значительных потерь пакетов данных в обоих каналах MIMO 2x2, необходимо применение мощных высококачественных MIMO антенн. Обычные dual polarization антенны имеют кроссполяризационную развязку cross pol isolation в 20-25 dB и могут относительно успешно применяться для устройств IEEE 802.11n MIMO, например, в офисе.

При применении Wi-Fi устройств стандарта IEEE 802.11n в сетях БШД для предотвращения потерь пакетов в MIMO каналах вследствие кроссполяризационной интерференции следует использовать качественные dual polarization MIMO антенны с параметром cross pol isolation:

- не менее 27-30 dB для условия LOS (зона Френеля полностью открыта);
- выше 35 dB для условий nearLOS (оптическая видимость с частично закрытой зоной Френеля).

Применение в сетях БШД устройств Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO с интегрированными антеннами с усилением 14-18 dB (известных в широких кругах, как “мыльницы”) в реальных

условиях LOS, и тем более nearLOS, не позволяет получить стабильные с низким уровнем ошибок каналы связи.

Применение параболических прямофокусных dual polarization антенны типа dish с cross pol isolation выше 35 dB позволяет “выжать” максимум, на что сегодня способна технология MIMO в реализации стандарта IEEE 802.11n. При этом наличие препятствий на трассе линка увеличивает кроссполяризационную интерференцию в MIMO каналах, что ведет к увеличению потерь и деградации канала связи даже при применении самых лучших и мощных антенн.

Применение устройств на базе IEEE 802.11n MIMO 3x3, которые, как рекламируется, теоретически могут обеспечить скорость передачи данных на радиointерфейсе свыше 300 Mbps, в сетях БШД лишено всякого смысла. Высокие потери пакетов данных, вызванных кроссполяризованной интерференцией, несмотря на применение самых совершенных на сегодняшний день антенн MIMO 3x3, приводят к полной деградации всех трех MIMO каналов и, в целом, невозможности работы системы в сетях БШД.

Таким образом, пропускная способность канала связи устройств Wi-Fi в сетях БШД, в отличие от, например, оборудования TDD/TDMA, очень сильно зависит от условий на трассе линка. Поэтому реальная пропускная способность канала связи в сетях БШД, построенных на оборудовании Wi-Fi, непредсказуема и, как правило, значительно меньше величин, получаемых при работе в офисных условиях,

3) Оборудование Wi-Fi в сетях БШД в отличие от офисных WLAN обычно работает в условиях интерференции от соседних РЭС.

При работе оборудования Wi-Fi в сетях БШД практически всегда присутствует интерференция – радиопомехи от рядом работающих РЭС. Любая значительная помеха или даже высокий фоновый уровень “шума” способны полностью положить Wi-Fi канал связи.

Низкая устойчивость Wi-Fi систем к помехам вызвана несколькими причинами:

а) наличие интерференции, превышающей уровень внутреннего шума приемника, составляющего для Wi-Fi систем в полосе 20 МГц примерно -95 dBm, приводит к деградации уровня чувствительности системы. Сильная помеха или фоновый шум выше этого уровня понижают уровень чувствительности приемника системы, что требует адекватного увеличения величины запаса мощности радиосигнала. Поскольку, как было отмечено выше, величина fade margin при работе Wi-Fi систем в уличных условиях и без того завышена, то выполнение требований дополнительного повышения энергетического бюджета линка Link Budget по мощности сигнала при наличии помех, зачастую невыполнимо.

Использование Wi-Fi устройств с высоким уровнем мощности передатчика системы Wi-Fi, позволяющим обеспечить требуемое значение сигнал/шум по отношению к уровню интерференции, очевидно, является временным решением данной проблемы. Многие помнят,

как развивалась борьба с помехами в диапазоне частот 2.4 ГГц в начале 2000-х годов. Все начиналось с использования 100 мВт усилителей, а закончилось через пару – тройку лет тем, что усилители в 4 Ватт были уже бессильны обеспечить нормальную работу Wi-Fi канала связи. Аналогично происходит сейчас с Wi-Fi устройствами повышенной мощности уже в диапазоне 5 ГГц. Широкое, но малоэффективное применение устройств стандарта IEEE 802.11n с мощностью 0.5 Вт с шириной канала 40 МГц, очевидно, значительно ускорит этот процесс.

б) устройства Wi-Fi не проектировались для работы в условиях помех и не имеют механизмов на уровне протоколов канального уровня для борьбы с интерференцией. Как уже было отмечено, протокол случайного доступа CSMA/CA системы Wi-Fi рассматривает факт потери пакета данных вследствие интерференции как обычную предусмотренную стандартом коллизия множественного доступа. Поэтому вместо того, чтобы немедленно повторить передачу, протокол заставляет систему ждать случайный период времени в ожидании освобождения канала связи от помех. В итоге, при воздействии регулярной интерференции, особенно, от синхронизированных по времени TDD/ TDMA систем, например, систем WiMAX, устройства Wi-Fi могут находиться в состоянии бесконечного ожидания начала передачи данных, то есть, фактически, нормально не работать.

Как уже было отмечено, устройства Wi-Fi при работе в условиях интерференции не имеют точной оценки о величине потерь пакетов в радиоканале и не адаптируют свою работу, в частности, не поддерживают адаптивную модуляцию в зависимости от величины потерь в канале. Поэтому несоответствие параметров работы Wi-Fi оборудования текущим условиям внешней обстановки приводит к деградации сети БШД. Постоянный мониторинг работы Wi-Fi и внешней среды и ручная регулировка параметров работы оборудования, очевидно, неприемлемо в сетях БШД.

Оборудование Wi-Fi с проприетарным протоколом доступа имеет механизмы адаптации параметров канала связи в зависимости от величины потерь в канале связи, что является важным преимуществом использования данного оборудования в сетях БШД.

в) устройства Wi-Fi нового стандарта IEEE 802.11n еще менее устойчивы к воздействию интерференции, чем Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g. Агрегация пакетов в фреймы значительно повышает скорость передачи данных, а также пакетную производительность устройств. Однако при наличии интерференции и увеличении потерь аппаратно-программная агрегация пакетов, как было рассмотрено выше, приводит к значительной деградации пропускной способности оборудования и повышению задержек в канале.

Применение на программном уровне проприетарных протоколов доступа поллингового типа, содержащих свои собственные механизмы агрегации и повтора передачи при потере переданного фрейма данных, адаптивной модуляции повышают помехоустойчивость системы Wi-

Fi систем стандарта IEEE 802.11 a/b/g. А вот для систем стандарта IEEE 802.11n замена стандартного аппаратного-программного протокола агрегации пакетов, рассчитанного на условия офисного применения, эффективным аппаратно-программным протоколом агрегации, параметры которого оптимизированы для условий уличного применения, является пока нерешенной проблемой.

г) устройства Wi-Fi также не проектировались для работы в качестве многоканальных систем распределительного типа, и поэтому они имеют высокий уровень внеполосного излучения в передатчике и не имеют фильтров на входе приемника для подавления внеполосной интерференции. Понятно, что если оборудование поддерживает канал шириной 40 МГц, то это означает отсутствие фильтров при работе в канале шириной 20 МГц. Поэтому системы Wi-Fi создают взаимную интерференцию друг другу при работе на соседних каналах связи, что например, приводит к тому, что невозможно построить эффективно работающую двухсекторную Wi-Fi базовую станцию 2x 20 МГц в полосе частот шириной 40 МГц без значительного (десятков метров) территориального разнесения антенн. Отсутствие входных фильтров также приводит к низкой устойчивости Wi-Fi систем к воздействию работающего на соседних каналах близко расположенного другого радиооборудования, и особенно, TDD/TDMA систем, в том числе WiMAX.

Понятно, что применение проприетарного протокола доступа поллингового типа на канальном уровне не способно разрешить данную проблему, существующую на физическом (радио) уровне оборудования Wi-Fi.

Более подробно с данными вопросами можно ознакомиться в разделе: Решения. Влияние интерференции на канал связи. Технология фиксированного доступа WiMAX. www.unidata.com.ua.

Таким образом, параметры каналов связи Wi-Fi устройств в сетях БШД подвержены значительной деградации в условиях присутствия даже незначительной интерференции. Расчет влияния интерференции на работу Wi-Fi устройств в сетях БШД практически невозможен. Поэтому спрогнозировать, как будут работать устройства Wi-Fi в реальных условиях сетей БШД при наличии интерференции проблематично.

4) Работа устройств Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n в топологии точка-многоточка обеспечивается протоколом CSMA/CA АСК коллизионного множественного доступа.

В сети Wi-Fi каждая абонентская станция (АС) осуществляет передачу пакетов данных в адрес устройства доступа Access Point (AP) в случайные моменты времени. Если происходит коллизия, когда устройство доступа AP в момент передачи очередного пакета данных от некоторого абонентского устройства оказывается занятым приемом пакета данных от другой АС, то данная

абонентское устройство не получает подтверждения АСК об успешном приеме, и после ожидания в течении некоторого случайного промежутка времени backoff производит повторную передачу данных. Эта процедура повторяется до момента успешного приема пакета данных.

Для уменьшения коллизий в протоколе доступа CSMA/CA реализуется механизм оповещения устройств сети о занятости и освобождении канала связи.

Протокол CSMA/CA АСК обеспечивает эффективный разделяемый доступ множества абонентов к ресурсам точки доступа в условиях, когда абоненты находятся в зоне радиослышимости друг друга, как, например, это имеет место в офисной локальной сети Wireless LAN. В сетях БШД условия наличия радиослышимости между абонентами, как правило, не выполняется. Если абонентские Wi-Fi устройства не “слышат” друг друга, что имеет место при большом радиусе обслуживания, то в работе сети БШД проявляется так называемая проблема скрытого узла “hidden node”. Проблема скрытого узла заключается в неравномерном распределении ресурсов канала между АС и в возможности монопольного захвата отдельными АС ресурсов среды передачи данных.

При отсутствии радиослышимости для устройств сети протокол CSMA/АСК обеспечивает относительно приемлемое по эффективности разделение ресурсов при множественном доступе относительно небольшого количества АС, работающих на одинаковых или близких модуляциях и имеющих примерно одинаковую невысокую загрузку трафиком uplink канала связи. Для выполнения этих условий рекомендуется ограничивать радиус обслуживания точки доступа и скорость передачи данных в uplink канале связи для каждого АС.

Увеличение скорости исходящего uplink трафика АС, близко расположенных к точке доступа, приводит к деградации качества каналов связи наиболее удаленных АС. В таких условиях близкие к устройству доступа АС монопольно захватывают каналные ресурсы, а дальние абоненты ждут и не могут начать передачу, пока ближние АС не закончат свою работу.

Неравномерность загрузки трафиком абонентских устройств уменьшает максимальное количество обслуживаемых абонентов, при котором начинается деградация параметров каналов связи.

Увеличение радиуса обслуживания точки доступа создает неравные энергетические условия обслуживания для разных АС, что при увеличении сетевого трафика ведет к деградации каналов связи наиболее удаленных АС.

Увеличение количества обслуживаемых абонентов приводит к снижению эффективности разделения ресурсов при множественном доступе, увеличению задержек в сети, потерям пакетов и снижению качества каналов связи

Определить более менее точные предсказуемые граничные возможности Wi-Fi оборудования в сети БШД по максимальному количеству обслуживаемых клиентов, максимальной дальности связи, пропускной способности и другим параметрам канала связи для каждой конкретной конфигурации сети и условий ее функционирования не представляется возможным. Поведение оборудования Wi-Fi в сети БШД зависит от многих рассмотренных выше факторов. Результаты суммарного воздействия этих факторов на функционирование Wi-Fi сети БШД не поддаются расчету и более или менее точному прогнозу. Имеются лишь частные закономерности (рассмотренные в данной статье), которые следует учитывать при применении оборудования Wi-Fi в сетях БШД.

По опыту применения Wi-Fi устройств в сетях БШД можно сказать, что в типовой конфигурации сети точка-многоточка с радиусом обслуживания до 3 км и ограничением на скорость передачи данных в uplink канале порядка 128-256 kbps устройство доступа может одновременно обслуживать обычно до 15-20 абонентских станций.

Количество одновременно обслуживаемых АС может увеличиться и до 20-30, если абоненты пользуется только web сервисом и downlink FTP. Если же снять ограничения на скорость передачи данных, то например, работа одного- двух клиентов с uTP торрентами может полностью положить Wi-Fi сеть даже с небольшим количеством обслуживаемых абонентов.

Таким образом, условия работы устройств Wi-Fi в сетях БШД принципиально отличаются от офисных условий, для работы в которых предназначено оборудования Wi-Fi. Различия в этих условиях, рассмотренные выше, и являются теми решающими факторами, определяющими параметры работы каналов связи на оборудовании Wi-Fi в сетях БШД.

Итак, при outdoor применении в сетях БШД оборудование Wi-Fi стандарта IEEE 802.11/a/b/g/n может относительно эффективно работать (удовлетворять требованиям по пропускной способности и качеству канала связи) при следующих условиях:

- невысокая дальность связи, как правило, до 5-10 км. На более высоких дальностях пропускная способность и параметры качества канала связи Wi-Fi устройств подвержены значительной деградации. В идеальных условиях (полный LOS, отсутствие помех) при достаточном по энергетике бюджете линка дальность связи в топологии точка-точка может составлять 20 –30 и более километров ;

- наличие прямой видимости LOS. При отсутствии прямой видимости пропускная способность и параметры качества канала связи Wi-Fi устройств в сетях БШД деградируют в значительных пределах, их величина нестабильна и непредсказуема;

- отсутствие интерференции. При наличии интерференции пропускная способность и параметры качества канала связи Wi-Fi устройств в сетях БШД деградируют в значительных непредсказуемых пределах;

Относительно эффективная работа устройств Wi-Fi IEEE 802.11/a/b/g/n в сетях БШД в топологии точка-точка возможна при следующих ограничениях :

- максимальное количество одновременно обслуживаемых точкой доступа Wi-Fi абонентских станций следует ограничить 10-15 устройствами. Увеличение количества обслуживаемых станций приводит к увеличению задержек в сети, потерям пакетов и снижению качества каналов связи. При этом неравномерность загрузки трафиком абонентских устройств уменьшает максимальное количество обслуживаемых абонентов, при котором начинается деградация параметров каналов связи;

- скорость передачи данных в uplink каналах каждой абонентской станции следует ограничить величиной 128-256 Kbps. Увеличение скорости входящего трафика свыше данной величины для абонентской станции, близко расположенных к точке доступа, приводит к деградации качества каналов связи и потерям пакетов наиболее удаленных абонентов;

- рекомендуется ограничивать радиус обслуживания точки доступа примерно до 3 км. Увеличение максимальной дальности связи приводит к неравномерности загрузки трафиком абонентских станций, что ограничивает максимальное количество одновременно обслуживаемых абонентов и приводит к деградации качества каналов связи наиболее удаленных абонентских станций.

Значительно увеличить эффективность работы Wi-Fi оборудования в сети БШД в топологии точка-многоточка позволяет использование в устройствах поллингового (маркерного) протокола множественного доступа. Работа поллингового протокола заключается в том, что устройство доступа поочередно по так называемому алгоритму диспетчеризации round-robin опрашивает все абонентские станции о готовности к работе и выделяет каждому устройству определенный квант времени для приема или передачи данных. То есть, в поллинговом протоколе применяется временное разделение сеансов работы (каналов) АС. Данный протокол доступа по принципу своей работы близок к протоколу временного разделения множественного доступа TDMA.

Применение в устройствах Wi-Fi поллингового протокола доступа вместо стандартного протокола CSMA/CA позволяет:

- увеличить пропускную способность канала за счет агрегации пакетов данных в фреймы;
- увеличить количество одновременно обслуживаемых абонентов до 20-30 за счет более равномерного распределения ресурсов устройства доступа между обслуживаемыми АС ;

- значительно снизить ограничения на максимальную скорость передачи данных в uplink абонентских каналах;

- увеличить дальность связи за счет использования устойчивого к потерям пакетов данных протокола передачи данных.

Протокол поллинга предполагает последовательную обработку запросов от клиентов с предоставлением примерно одинаковых ресурсов для обслуживания каждого из них. Его эффективность снижается при существенных различиях в потребных ресурсах для обслуживания каждого запроса. Например, существенная разница в скорости передачи данных у нескольких абонентов приводит к росту задержек в канале при обслуживании устройством доступа всех своих абонентских станций.

Несмотря на значительное улучшение параметров работы оборудования применение протокола поллингового типа не решает многих проблем работы Wi-Fi в сетях БШД. Программная реализация в устройствах Wi-Fi данного протокола требует значительной производительности аппаратной платформы как устройств доступа, так и абонентских станций. Это приводит, к увеличению стоимости устройств доступа и клиентских устройств. Применение данного протокола превращает обычные Wi-Fi устройства в оборудование класса проприетарного БШД (BWA), также известного для диапазона частот 5 ГГц как preWiMAX. При этом данное оборудование теряет свою главную привлекательность – низкую цену и переходит в другую весовую категорию -сегмент рынка оборудования фиксированного WiMAX, с которым уже не может конкурировать ни по цене, ни по производительности и, в целом, по эффективности доступа.

Главным недостатком использования Wi-Fi устройств с поллинговым протоколом множественного доступа в сетях БШД в топологии точка-многоточка является зависимость пропускной способности каналов и других параметров каналов связи от объема и типа трафика, загруженности устройства доступа и абонентских станций. При загрузке устройства доступа или хотя бы одной абонентской станции относительно высоким трафиком, обслуживание большого количества подключенных абонентов, перегрузки процессора и переполнения памяти устройства выполнением различных задач, например, маршрутизации, коммутации и др., поддержка поллинга и других функций доступа начинает тормозиться. Это проявляется в увеличении задержки пакетов до несколько сотен и тысяч миллисекунд, значительном колебании величины задержки jitter, к которым чувствительны, например, приложения телефонии, появлении потерь пакетов данных.

Мультисервисное обслуживание в современных сетях БШД требует не только высокой пропускной способности, но и гарантированных параметров качества каналов связи, которое ни стандартное, ни проприетарное оборудование Wi-Fi обеспечить не может.

3. Результаты испытаний работы оборудования Wi-Fi в различных условиях эксплуатации сетей БШД.

При обеспечении рассмотренных выше условий работы оборудования Wi-Fi в сетях БШД можно получить приемлемые по параметрам качества каналы связи, пригодные, например, для работы приложений доступа в Интернет.

Ниже в таблицах приведены данные пропускной способности и значения параметров качества канала связи точка-точка, полученные при тестировании программами Iperf и Chariot стандартных и проприетарных устройств Wi-Fi при:

1) наиболее благоприятных условиях: дальность 3.5 км, “полный” LOS – первые три зоны Френеля полностью открыты, частотный диапазон 5.2 ГГц

2) неблагоприятных условиях: дальность 13.5 км, оптическая видимость, near LOS – первая зона Френеля частично закрыта, частотный диапазон 5 ГГц.

В Таблице 6 приведены результаты измерений максимальной скорости передачи данных (пропускной способности) оборудования Wi-Fi IEEE 802.11n, дальность 3.5 км., прямая видимость LOS на пакетах 1500 байт.

Таблица 6. Пропускная способность устройств Wi-Fi IEEE 802.11 n , дальность 3.5 км, LOS.

Тип	Ширина канала, МГц	Data rates, Tx/Rx Mbps	UDP DL/UL simplex, MBps	UDP DL/UL duplex, MBps	TCP DL/UL simplex, MBps	TCP DL/UL duplex, MBps	Overall CCQ %
IEEE 802.11n MIMO 2x2	20	117/117	76.8/77.8	36.1/34.1	38.2/44.3	34/20.6	70-100%
IEEE 802.11n MIMO 2x2	40	216/243	81.7/87.0	54.0 /63.1	NA	NA	75%

Представленные данные по линку 3.5 км LOS получены по результатам испытаний наиболее производительных на сегодняшний день аппаратных платформ ALIX 3.2c (x86 CPU Geode 500 MHz), RB 433AH (CPU 680 MHz, MIPS 24K V7.4), радиокарт стандарта IEEE 802.11n SR71a Atheros AR9160, OS Mikrotik v.4.3 , панельных антенн 23 dBi(MIMO 2x2 , cross-polarization isolation min 25 dB).

Устройства стандарта IEEE 802.11n MIMO 2x2 в канале шириной 20 МГц на линке 3.5 км LOS поддерживают скорость передачи данных до 35 Mbps UDP/TCP дуплекс с высоким процентом потерь радиопакетов в канале - CCQ (Client Connection Quality) 70%.

Низкий CCQ вызван собственной кроссполяризационной интерференцией между каналами MIMO при отсутствии внешних помех noise floor -95 dBm. Высокие потери и повторы передачи радиопакетов, в свою очередь, приводят к относительно низкой и нестабильной (по сравнению с UDP) скорости передачи TCP пакетов данных.

Кроссполяризационная интерференция между каналами MIMO2x2 вызвана недостаточно высокими параметрами cros polarization isolation 25 dB у использованных при испытаниях MIMO антенн.

Таким образом, одновременная передача данных по двум каналам MIMO 2x2 позволяет в почти идеальных условиях LOS на невысокой дальности увеличить на длинных пакетах максимальную пропускную способность по сравнению с работой в стандарте 802.11a, примерно, в 1.7 раза. Дальнейшее увеличение в два раза ширины канала до 40 МГц также приводит в условиях LOS к увеличению пропускной способности канала связи на длинных пакетах также примерно в 1.7 раза - до 65 Mbps UDP в дуплексе. Скорость 90 Mbps UDP в симплексе вызвана ограничением на пропускную способность Ethernet интерфейса 100 BaseT. В канале 40 МГц 802.11n MIMO скорость передачи данных TCP трафика нестабильна и поэтому в таблице не отражена (Not Available).

Ниже в Таблице 7 приведены характеристики качества канала связи 3.5 км, LOS, построенного на оборудовании Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO 2x2, при передаче мультисервисного 64VoIP G.711+ 2 Mbps duplex FTP трафика. Для сравнения в Таблице 7 представлены также характеристики качества канала связи, полученные на том же линке при идентичных условиях на TDMA оборудовании Fixed WiMAX MAXBridge 50.

Таблица 7. Параметры качества канала связи 3.5 км, LOS

Type	MOS Average	MOS Minimum	One-Way Delay Average (ms)	One-Way Delay Max (ms)	RFC 1889 Jitter Average (ms)	Percent Bytes Lost
Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO, 40 МГц 64VoIP + 2Mbps	4,03	1,00	10	36	4,874	1,067
Wi-Fi IEEE 802.11n MIMO, 20 МГц 64VoIP + 2Mbps	4.37	3.88	3	8	2.215	0.001
Fixed WiMAX MAXBridge 50, 10 МГц 160 VoIP UGS 6Mbps + 2 Mbps FTP BE	4,38	4,13	12	16	1,247	0,141

При работе в стандарте IEEE 802.11n MIMO 2x2 при ширине канала связи 40МГц характеристики качества канала связи при передаче мультисервисного трафика VoIP +FTP даже на небольшой дальности 3.5 км и при почти идеальных условиях LOS неудовлетворительны. Так например, при загрузке канала шириной 40 МГц 802.11n MIMO трафиком 64x VoIP G.711 плюс 2 Mbps FTP duplex (полезная загрузка канала всего 6 Mbps дуплекс) значение показателя разборчивости речи MOS для VoIP снижается до неприемлемой величины 1.0, что означает, что некоторые каналы VoIP не работают. При этом задержка в среднем 10 ms и плавает до 36 ms, а потери lost data достигают 19%.

При ширине канала связи 20 МГц качество канала связи на оборудовании IEEE 802.11n MIMO значительно лучше. Минимальное значение MOS 3.88 удовлетворяет требованиям к качеству канала VoIP.

Для сравнения оборудование TDMA фиксированного WiMAX при передаче мультисервисного трафика 160VoIP плюс 2 Mbps FTP дуплекс обеспечило значения минимального MOS 4.13, стабильные значения задержки 12 ms, максимально 16 ms, и jitter 1.247 ms.

Таким образом, применение устройств Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n на коротких расстояниях в топологии точка-точка в условиях полного LOS (зона Френеля полностью открыта) в канале шириной 20 МГц с использованием MIMO антенн с cross pol isolation не менее 25 dB дает в два раза более высокую по сравнению с устройствами IEEE 802.11a/g пропускную способность с приемлемыми параметрами качества канала связи. Данные условия полного LOS и дальности до 5 км в топологии точка-точка являются идеальными, что, впрочем, встречается в практике строительства сетей БШД достаточно редко.

Применение устройств IEEE 802.11n при ширине канала 40 МГц в условиях LOS на невысокой дальности 3.5 км. оказалось неприемлемым по качеству канала связи.

При этом применение оборудования Wi-Fi IEEE 802.11n даже в идеальных условиях полного LOS и невысокой дальности значительно уступает оборудованию TDMA фиксированного WiMAX по параметрам качества канала связи.

На линке 13.5 км nearLOS (наличие оптической видимости с частичным закрытием многоэтажными зданиями первой зоны Френеля см. Рис 2) тестировались устройства RB433AH с радиокартами R52Hn, проприетарное оборудование PTP MIMO 300 Mbps 5 ГГц. При испытаниях были использованы панельные антенны 23 dBi(MIMO 2x2 , cross-polarization isolation min 25 dB). Для сравнения полученных результатов на том же линке были проведены испытания 5 ГГц TDMA оборудования Fixed WiMAX MAXBridge 50, TDD оборудования точка-точка RADWIN-2000 L (синхронный протокол TDD на базе радио IEEE802.11n) и прототипа оборудования точка-точка MAXBridge PTP TDD (синхронный протокол TDD на базе радио IEEE802.11a).

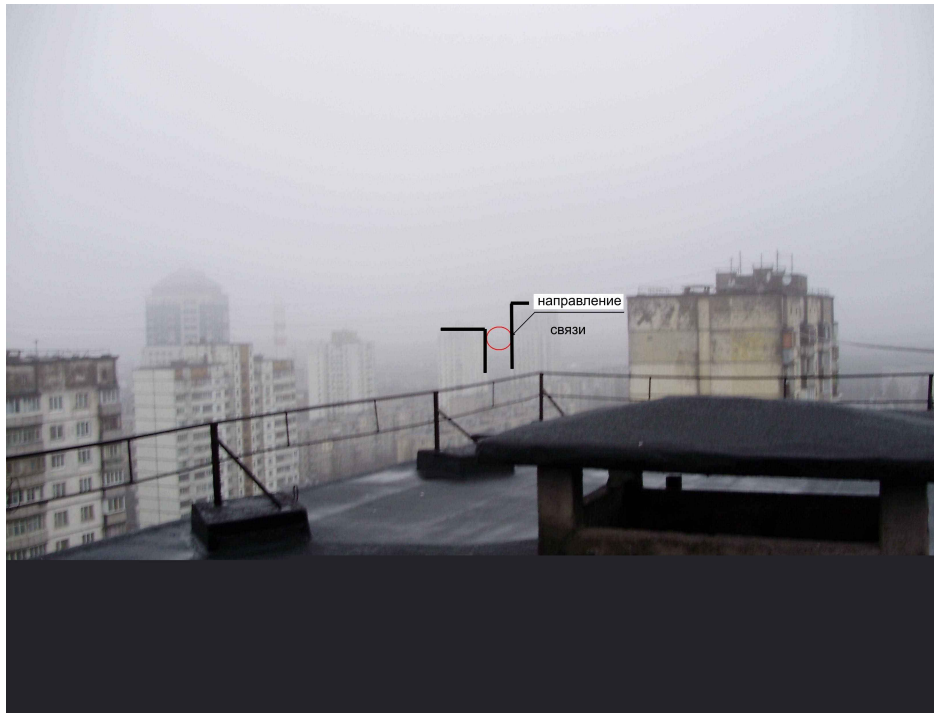


Рис 2. Условия nearLOS на трассе канала связи

В данных условиях 13.5 км nearLOS (рис. 2) тестируемые радиоустройства Wi-Fi имели примерно одинаковые энергетические параметры линка (Tx power 18 dBm, антенны с одинаковым усилением 23 dBi). При этом среднее измеренное значение уровня RSSI (мощность сигнала на входе приемника) оборудования Wi-Fi составило -71-72 dBm, текущий измеряемый уровень RSSI был нестабилен, плавал в условиях nearLOS в очень значительных пределах. При этом расчетная величина уровня RSSI (Rx level), полученная калькулятором энергетического бюджета линка без учета условий nearLOS, равна -67 dBm.

При испытаниях оборудования RB 411AH/R52Hn Mikrotik V.4.6 канал связи на дальности 13.5 км nearLOS при работе в стандарте IEEE 802.11n в канале шириной 20 МГц поднялся на модуляции HT20 MCS 11 (16QAM 1/2, data rates 52 Mbps), CCQ 100% (без трафика), при работе в стандарте IEEE 802.11a в канале шириной 20 МГц - на модуляции 16QAM 2/3, data rates 36 Mbps, CCQ 100% (без трафика).

Под нагрузкой дуплексным трафиком данного канала связи на устройствах RB411AH/R52Hn Mikrotik V.4.6 при работе как в стандарте IEEE 802.11n, так и в стандарте IEEE 802.11a, уровень показателя качества канала CCQ понижался до 10-20%, рабочая модуляция падала до BPSK, и канал связи практически не работал. Очевидная причина полной деградации канала связи при отсутствии внешних помех – интерференция от переотражений радиосигнала от препятствий на трассе линка (см. рис 2).

При включении проприетарного протокола поллингового типа Nstreme в режиме IEEE 802.11a канал связи на RB411AH/R52Hn работал более стабильно с пропускной способностью 8 Mbps в дуплексе (16 Mbps в симплексе). Включение протокола Nstreme в режиме IEEE 802.11n

не привело к улучшению параметров канала связи на RB411AH/R52Hn по сравнению с работой на стандартном протоколе CSMA/CA IEEE 802.11n. Тем самым поллинговый протокол Nstreme Mikrotik (по состоянию Rev 4.6) на радиокартах IEEE 802.11n фактически не работал.

При испытаниях оборудования PTP MIMO 300 Mbps (с проприетарным протоколом поллингового типа) канал связи на дальности 13.5 км nearLOS поднялся на модуляции NT20 MCS 11 (16QAM 1/2, data rates 52 Mbps). С увеличением трафика рабочая модуляция не понижалась. При попытках установки вручную более высокой модуляции наблюдался высокий рост ошибок.

Энергетический бюджет линка на оборудовании MAXBridge 50 за счет использования на базовой станции MAXBridge 50 (Tx power 18 dBm) секторной антенны с коэффициентом усиления 14 dBi был на 4 дБ меньше бюджета линка устройств Wi-Fi. Тем не менее, за счет более стабильных значений измеряемого уровня RSSI и низкого fade margin 3 dB (у устройств Wi-Fi fade margin 12-15 dB) канал связи на оборудовании MAXBridge 50 поднялся на модуляции 64QAM 3/4- 64QAM 2/3. Переотражения на трассе линка не имели такого деструктивного воздействия на канал связи на оборудовании Fixed WiMAX, как это имеет место для оборудования Wi-Fi.

Таким образом, оборудование Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 /b/g/n в данных условиях оказалось практически неработоспособным и в тестировании качества канала связи приняли участие:

- проприетарное оборудование PTP MIMO 300 Mbps (радио IEEE 802.11n и проприетарный протокол поллингового типа);
- оборудование RADWIN 2000 L (радио IEEE 802.11n и проприетарный протокол TDD),
- прототип оборудования MAXBridge PTP TDD (радио IEEE 802.11a и проприетарный протокол TDD),
- оборудование Fixed WiMAX MAXBridge 50 (IEEE 802.16-2004/ 2009)

Тестирование качества канала связи проводилось при передаче мультисервисного дуплексного UDP+TCP трафика: 160 пар VoIP G.711 (80 двухсторонних сессий) + дуплексный TCP трафик (имитация FTP).

На оборудовании PTP MIMO 300 Mbps трафик VoIP имел приоритетное обслуживание. На оборудовании Fixed WiMAX оба трафика были разделены по разным Service Flow. Трафик VoIP подавался с качеством обслуживания QoS UGS с параметром CIR 6 Mbps , а TCP трафик с QoS Best Effort. На оборудовании RADWIN 2000 L, MAXBridge PTP TDD трафик VoIP и FTP подавался в общем канале.

В условиях nearLOS на дальности 13.5 км. оборудование PTP MIMO 300 Mbps и RADWIN-2000 показало результаты, приведенные в Таблице 8. Для сравнения в Таблице 8 также

приведены результаты испытаний на том же линке и при тех же условиях оборудования Fixed WiMAX MAXBridge 50, MAXBridge PTP TDD.

Таблица 8. Параметры канала связи 13.5 км, nearLOS

Параметры	Fixed WiMAX MAXBridge 50 IEEE 802.16-2004	PTP MIMO 300 Mbps IEEE 802.11n +polling	Radwin-2000L IEEE 802.11n TDD	MAXBridge PTP IEEE802.11a TDD
Частота, ГГц	5.2	5.2	5.2	5.2
Ширина канала, МГц	10	20	20	40
Модуляция	64QAM ³ / ₄ - 64QAM 2/3 (DL/UL)	16 QAM1/2, HT20 MCS11	64QAM2/3	64QAM3/4
Усиление антенн, dBi	14/23	23/23 MIMO	23/23 MIMO	23/23
Tx power , dBm	18/20	18	20	18
Средняя скорость передачи данных UDP, Mbps	25.9/ 23.0 simplex	20.3/19.5 Simplex	36.8 duplex	33.4 duplex
Средняя задержка one way delay	10	11	6	4
Макс. задержка one way delay	11	32	-	-
Среднее колебание задержки jitter RFC 1889	1.07	4.27	4.33	3.16
Минимальный MOS 160 VoIP	3.99	2.39	4.37	4.2

Испытания показали, что в условиях nearLOS (оптическая видимость с значительным закрытием зоны Френеля) оборудование Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n вследствие наличия интерференции от переотражений от препятствий на трассе линка практически не работает.

Применение протоколов поллингового типа в устройствах IEEE 802.11 a/g/n позволяет получить относительно работоспособный канал связи.

На дальности 13.5 км в условиях nearLOS (оптическая видимость, значительное частичное перекрытие первой зоны Френеля) пропускная способность канала связи на оборудовании PTP MIMO 300 Mbps (на базе IEEE 802.11n) деградирует почти в 10 раз по сравнению с работой в лабораторных условиях. При этом работа данного проприетарного оборудования практически не имеет преимуществ в пропускной способности по сравнению с проприетарным оборудованием на базе IEEE 802.11a радио.

Для сравнения максимальная скорость передачи данных в канале связи на TDMA оборудовании Fixed WiMAX MAXBridge 50 на том же линке 13.5 км и тех же условиях nearLOS практически не отличается от результатов, полученных в лаборатории. В результате пропускная способность оборудования MAXBridge 50 в данных условиях nearLOS при ширине канала 10 МГц значительно превышает пропускную способность проприетарного PTP MIMO (декларируемого по спецификациям 300 Mbps) оборудования на базе устройств Wi-Fi IEEE 802.11n в канале шириной 20 МГц в режиме MIMO 2x2.

Также отметим, что пропускная способность оборудования RADWIN -2000 L с применением тех же MIMO антенн на том же линке составило 36.8 Mbps в дуплексе. Тем самым

условия nearLOS привели к понижению пропускной способности синхронного MIMO 2x2 канала связи на TDD оборудовании (построенного на базе IEEE 802.11n радио) всего на 20%. Пакетная производительность Radwin -2000 L на коротких пакетах 64 байт составила 85 Kpps.

Также испытания на том же линке и при тех же условиях прототипа оборудования MAXBridge PTP TDD, построенного на базе IEEE 802.11a, использующего синхронный TDD протокол показали пропускную способность в канале шириной 40 МГц равную 33.4 Mbps в дуплексе. Тем самым, условия nearLOS не привели к понижению пропускной способности синхронного канала связи на TDD оборудовании (построенного на базе IEEE 802.11a радио). Пакетная производительность прототипа MAXBridge PTP TDD, выполненного на платформе ALIX 3.2c (x86 CPU Geode 500 MHz), радио miniPCI R5H IEEE 802.11a на коротких пакетах 64 байт составила 39 Kpps.

Высокая устойчивость работы оборудования Radwin 2000 и MAXBridge PTP TDD к условиям nearLOS и их высокая пакетная производительность объясняется использованием на канальном уровне синхронного по таймингу протокола обмена с короткими пакетами данных с низким overhead, более устойчивого к переотражениям от препятствий и внешним помехам, чем стандартное и проприетарное (поллингового типа) оборудование Wi-Fi.

Высокие параметры канала связи WiMAX при работе в условиях nearLOS объясняются применением радиосигнала OFDM с 256 поднесущими, устойчивого к переотражениям радиосигнала (многолучевому распространению радиоволн) уличного типа.

Характеристики качества канала связи, построенного на оборудовании PTP MIMO, на мультисервисном трафике VoIP +FTP в условиях nearLOS 13.5км неудовлетворительны. Так например, при загрузке канала шириной 20 МГц MIMO смешанным трафиком 160x VoIP G.711 плюс 6 Mbps FTP duplex (суммарная загрузка канала всего до 9 Mbps дуплекс) значение показателя разборчивости речи MOS для VoIP опускается до неприемлемой величины 2.39, что означает, что некоторые каналы VoIP не работают. При этом задержка в среднем 11 ms и плавают до 32 ms.

Для сравнения минимальное значение показателя разборчивости речи MOS в Fixed WiMAX канале связи на оборудовании MAXBridge 50 составило 3.99. Данное значение MOS=3.99 свидетельствует о высоком качестве всех 80 VoIP каналов (160 сессий), передаваемых в условиях nearLOS по Fixed WiMAX каналу связи в отдельном сервисном потоке SF с QoS UGS с CIR 6Mbps, гарантированными параметрами по задержке и минимальному колебанию задержки jitter.

Детально с результатами данных испытаний можно ознакомиться в разделе Испытания. www.unidata.com.ua.

Таким образом, увеличение дальности связи при значительном частичном перекрытии зоны Френеля (nearLOS), приводят к значительной деградации параметров по пропускной способности и качеству канала связи как на стандартном IEEE 802.11n оборудовании, так и устройствах IEEE 802.11n с протоколом передачи данных поллингового типа. Как было рассмотрено выше, основными причинами данного явления являются:

- значительное повышение потерь пакетов большой длины A-MSDU с увеличением дальности связи ;
- увеличение потерь пакетов при многолучевом распространение радиосигнала вследствие воздействия переотражений от препятствий в условиях nearLOS;
- увеличение потерь пакетов в каналах MIMO 2x2 от воздействия кроссполяризованных переотражений cross fading от препятствий в условиях nearLOS;
- высокие издержки на повторную передачу искаженных или потерянных фреймов A-MSDU большой длины.
- понижение рабочей модуляции и соответствующей скорости data rate для снижения потерь пакетов.

Фактически применение как стандартных, так и проприетарных устройств на базе IEEE 802.11n MIMO 2x2 в сетях БШД в условиях nearLOS на средней дальности не дает никаких преимуществ по сравнению с использованием стандартных устройств IEEE 802.11a/g.

Итак, при применении оборудования Wi-Fi в сетях БШД можно получить при определенных условиях приемлемые результаты. Однако следует иметь в виду, что стабильность параметров каналов связи, качество предоставляемого клиентам сервиса и затраты на обслуживание сети БШД на оборудовании Wi-Fi непредсказуемы. Надо быть готовым к тому, что в любой момент канал связи Wi-Fi может упасть (возможно, с отсутствием перспектив его восстановления) по причине, например, появления помех, частичного перекрытия зоны Френеля строящимися зданиями, появления листьев на деревьях, выпадения снега, появления тумана, дождя, обледенения антенн и др. Заметим, что эти же причины влияют на любое радиооборудование, однако в отличие от Wi-Fi оборудование, например, TDD/TDMA, в частности WiMAX, гораздо более устойчиво к изменению условий функционирования сети и внешних факторов окружающей среды. Поэтому TDD оборудование и TDMA оборудование Fixed WiMAX в сетях БШД в отличие от устройств Wi-Fi имеет прогнозируемые и стабильные параметры каналов связи.

На рис 3. показана качественная зависимость параметров канала связи от условий применения для оборудования разного типа.

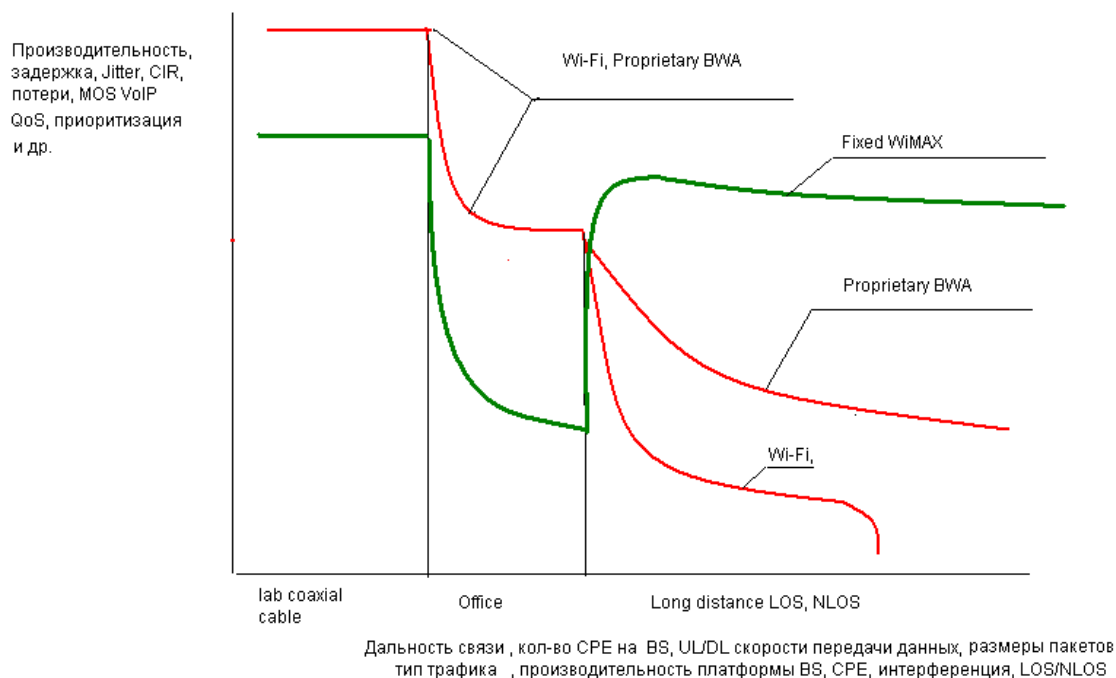


Рис 3. Качественная зависимость параметров канала связи от условий применения

Оборудование любого типа прекрасно работает в лабораторных условиях при соединении коаксиальным кабелем. Особо хорошие результаты показывает при этом оборудование Wi-Fi, что и понятно, поскольку мы фактически имеем дело с проводным Ethernet. В офисных условиях Wi-Fi также работает лучше всех, что также понятно, поскольку именно для работы в таких условиях это оборудование и предназначено. При этом, например, фиксированный WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004 в офисе работает очень плохо, поскольку мешают переотражения от стен, на обработку которых радиосигнал OFDM WiMAX не рассчитан. А вот при работе на улице WiMAX работает эффективно в широком диапазоне условий, как в LOS, так и в nearLOS.

Оборудование Wi-Fi может работать на улице относительно эффективно при определенных рассмотренных выше условиях. Тем самым, в сетях БШД (как в топологии multipoint, так и point-to-point), построенных на оборудовании Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g/n, сервис широкополосного мультисервисного доступа предоставить невозможно.

Проприетарное оборудование на базе Wi-Fi радио с поллинговым протоколом доступа работает в сетях БШД значительно лучше, чем Wi-Fi, но его эффективность также сильно зависит от параметров функционирования сети. Очень часто бывает, что сегодня сеть, построенная на данном оборудовании, работает нормально, а завтра подключится новый абонент со специфичным трафиком и обвалит всю сеть.

К сожалению, неадекватность оборудования решаемым задачам становится очевидной только по прошествии времени с достижением сети определенных размеров и наполнением ее абонентским трафиком. При предпроектном тестировании сети на базе одного-двух устройств доступа и пары абонентских станций трудно увидеть все недостатки того или иного решения.

Заблуждения о применимости Wi-Fi для эффективного решения задач доступа последней мили в сетях БШД вызваны тем, что оборудование Wi-Fi в уличных сетях БШД то поры до времени работает почти также как и в офисе - то есть достаточно хорошо. Но проблемы с Wi-Fi, а также с проприетарным оборудованием Wi-Fi, начинаются после прохождения определенных критических точек в параметрах функционирования сети БШД, таких как - количество обслуживаемых клиентов, дальности до клиентов, уровни сигналов, скорости передачи данных, тип и объем клиентского трафика, наличие и характер помех и масса других факторов. Проблемы проявляются в увеличении до недопустимых величин задержек в канале, пропадании пингов, потере соединений, зависании устройств, деградации пропускной способности каналов и др. Например, еще вчера все было хорошо, но подключился новый клиент, или старый клиент начал работал с новым типом сервиса (например с торрентом) - вся сеть стала плыть.

Если есть понимание глубинных причин данных явлений, основные из которых мы попытались осветить в данной статье, то деградацию Wi-Fi сети можно до поры до времени предотвратить. Однако не на все критичные факторы можно влиять и рано или поздно сеть БШД, построенная на оборудовании Wi-Fi, перестанет работать и инвестиции в сеть будут потеряны.

Работа оборудования TDD, TDMA также критична к многим факторам, но эта зависимость принципиально другая и не такая чувствительная как у Wi-Fi. Поэтому поведение сетей TDD, TDMA предсказуемо в отличие от сетей Wi-Fi и сети БШД, построенные на оборудовании TDD, TDMA, и в частности, оборудовании fixed WiMAX, значительно более производительны, стабильны и надежны.

Выводы:

1. Устройства Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n с технологической точки зрения (по протоколу доступа и параметрам радиосигнала) предназначены для построения indoor внутриофисных беспроводных локальных сетей Wireless LAN. Применение данных устройств, в том числе в outdoor исполнении, в сетях БШД, в целом, малоэффективно.

2. Оборудование Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g вследствие особенностей реализации протокола канального уровня и низкой пакетной производительности имеет крайне низкую пропускную способность на мультисервисном трафике с мелкими пакетами данных и не обеспечивают требуемые для мультисервисного обслуживания параметры канала связи в современных сетях БШД.

3. Стандартные устройства Wi-Fi IEEE 802.11n могут применяться в сетях БШД на невысоких дальностях, при наличии прямой видимости LOS (полностью открытой зоной Френеля), отсутствии помех. При этом при работе в реальных городских условиях и пригороде при наличии препятствий на трассе канала связи обеспечиваемая скорость передачи данных

нестабильна, а качество канала связи пригодно только для работы некритичных к качеству сервиса приложений доступа в Интернет.

4. Использование устройств стандарта IEEE 802.11n в режиме MIMO 2x2 с высококачественными MIMO антеннами с высокой развязкой по кроссполяризации позволяет значительно увеличить максимальную скорость передачи данных на длинных пакетах в условиях LOS на малой дальности по сравнению с устройствами Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g. При этом зависимость стабильности параметров MIMO канала связи на устройствах Wi-Fi IEEE 802.11n от условий применения оборудования (наличия препятствий на трассе линка – условия nearLOS) значительно выше, чем у стандартных устройств Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g.

5. Применение технологии MIMO 2x2 (в том числе применение dual polarization MIMO антенн) и канала связи шириной 40 МГц не дает повышение пропускной способности по сравнению с обычным режимом SISO в канале 20 МГц на мультисервисном трафике вследствие низкой производительности типовых аппаратных платформ устройств стандарта IEEE 802.11n. Поэтому применение устройств стандарта IEEE 802.11n в мультисервисных сетях БШД малоэффективно.

6. Применение как стандартных, так и проприетарных устройств на базе IEEE 802.11n MIMO 2x2 в сетях БШД в условиях nearLOS (частично закрытой зоны Френеля) вследствие высоких потерь пакетов от воздействия переотражений от препятствий не дает никаких преимуществ по сравнению с использованием стандартных устройств IEEE 802.11a/g.

7. Работа устройств стандарта IEEE 802.11n в сетях БШД значительно менее устойчива к воздействию помех по сравнению с устройствами стандарта IEEE 802.11a/g. Присутствие интерференции приводит к значительной деградации канала связи на оборудовании IEEE 802.11n по пропускной способности и увеличению задержек выше допустимых норм.

8. Работа стандартного Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g/n оборудования в топологии точка-многоточка вследствие особенностей используемого протокола множественного доступа сильно зависит от параметров функционирования беспроводной сети (величины и типа трафика, дальности связи, количества абонентов в сети, уровня интерференции и др). В большинстве случаев сеть на оборудовании Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g/n в топологии точка-многоточка пригодна только для предоставления доступа в Интернет нетребовательным к качеству сервиса индивидуальным пользователям на малых дальностях.

10. Применение проприетарных протоколов доступа поллингового типа в устройствах IEEE 802.11a/b/g/n несколько повышает эффективность работы оборудования в сетях БШД. Однако в сетях БШД точка-многоточка, построенных на данном оборудовании, помимо зависимости параметров каналов связи от параметров функционирования беспроводной сети (величины и типа трафика, количества абонентов в сети, уровня интерференции и др.), также имеется

высокая зависимость эффективности сети от производительности используемой аппаратной платформы.

Бюджетное малопроизводительное оборудование данного типа не обеспечивает требуемые для мультисервисного обслуживания параметры канала связи в современных сетях БШД.

В целом, Wi-Fi оборудование может применяться для фиксированного широкополосного доступа в Интернет в топологии точка-многоточка с ограниченным радиусом обслуживания ограниченного количества пользователей с предоставлением ограниченного сервиса (web браузеринг, почта, скачивание файлов по FTP).

Wi-Fi оборудование может применяться для организации бюджетных каналов точка-точка невысокой дальности в условиях полной прямой видимости LOS с ограничениями на пакетную производительность канала связи.

Wi-Fi оборудование не пригодно для предоставления в сетях БШД мультисервисного фиксированного широкополосного доступа.

В данной статье были рассмотрены в основном технические вопросы применения оборудования Wi-Fi в сетях БШД. С экономической же точки зрения применение устройств Wi-Fi для построения сетей БШД операторского класса нерентабельно. Например, чтобы обслужить хотя бы 200 абонентов с крыши одного здания с радиусом обслуживания 7-10 км в в типовом районном центре или пригороде областного центра необходимо использовать порядка 10-15 базовых станций (точек доступа) Wi-Fi и порядка 250-300 МГц лицензионного (в СНГ) частотного спектра (с учетом защитных интервалов между частотными каналами шириной 20 МГц). Получить лицензию на такую полосу частот в СНГ невозможно. Более того, регистрация и ежегодная плата за мониторинг этих 10-15 передатчиков со стороны служб частотного надзора будет стоить астрономических сумм. Значительно более рентабельно обслужить те же 200 абонентов трех-четырёх секторной базовой станцией фиксированного WiMAX, или любым другим современным TDMA оборудованием (что потребует всего лишь 30-40 МГц частотного спектра), что с учетом стоимости легализации и эксплуатационных расходов будет значительно дешевле, и несопоставимо лучше по сравнению с стандартным и проприетарным Wi-Fi по пропускной способности и другим параметрам каналов связи и, в целом, по типам и качеству предоставляемых сервисов.