

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МАСШТАБИРОВАНИЯ СЕТЕЙ Wi-Fi С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

А. С. Викулов^{1*}, А. И. Парамонов¹

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
* Адрес для переписки: asv012016@gmail.com

Аннотация

Одним из ключевых вопросов, возникающих при планировании сетей стандарта IEEE 802.11, является их масштабирование, т. е. соблюдение заявленных требований к качеству обслуживания в условиях изменения размера сети. В сетях с высокой плотностью пользователей (СВП) эта задача является особенно актуальной, поскольку особенности таких сетей состоят в нелинейном изменении их параметров (интерференция, использование канального ресурса, эффективность и пр.) при изменении масштаба сети. **Предмет исследования.** Статья посвящена рассмотрению вопросов учета клиентского состава в БЛВС с высокой плотностью пользователей, а также задаче увеличения пользовательской емкости сети и методам ее решения. **Метод.** В основу данной работы положены руководства по проектированию БЛВС, от компаний-производителей оборудования, рекомендации экспертов, а также более чем 5-летний личный опыт проектирования. **Основные результаты.** В работе рассмотрены вопросы учета смешанного клиентского состава и его влияния на планирование радиопокрытия в условиях задач СВП. **Практическая значимость.** Показаны возможности масштабирования СВП для смешанного клиентского состава, проанализированы методы повышения клиентской емкости и приведены практические оценки.

Ключевые слова

IEEE 802.11, пользовательский состав, масштабирование, Wi-Fi, высокая плотность пользователей.

Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 08.02.18, принята к печати 28.02.18.

Ссылка для цитирования: Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ особенностей масштабирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 1. С. 32–42.

THE SIZING ANALYSIS OF THE HIGH DENSITY Wi-Fi NETWORKS

A. Vikulov^{1*}, A. Paramonov¹

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

* Corresponding author: asv012016@gmail.com

Abstract—One of the key tasks in IEEE 802.11 networks design process is network sizing. Under sizing we understand the accordance to the initial requirements of service quality while taking into the consideration the network scale. In high density wireless networks this task is especially important because their characteristics (such as interference, channel resource usage, efficiency, etc.) are in nonlinear dependence of their scale. **Research subject.** The present work is devoted to the sizing process in the high density Wi-Fi design. It includes client devices count and their support of new IEEE 802.11 standard revisions as sizing parameters as well as client capacity increase methods in network design.

Method. The ground for this work are: Wi-Fi solution vendors design guides, recommendations of the experts and own more than 5-year design practice. **Core results.** The mixed client count in high density WLAN has been analyzed as well as its influence on the wireless network coverage planning.

Practical relevance. The scaling perspectives of the high density WLAN in the mixed client situation are shown. The methods of the client capacity increase have been analyzed and practical estimations have been provided.

Keywords—IEEE 802.11, sizing, high density, client count, Wi-Fi.

Article info

Article in Russian.

Received 08.02.18, accepted 28.02.18.

For citation: Vikulov A., Paramonov A.: The sizing analysis of the high density Wi-Fi Networks // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 1. pp. 32–42 (in Russian).

Введение

При планировании любой проводной или беспроводной ЛВС, задача ее масштабирования, т. е. соблюдения заявленных требований к качеству обслуживания при выборе фактического размера (масштаба) ЛВС с точки зрения количества пользователей и геометрического размера зоны покрытия является одной из важнейших. При этом в БЛВС с высокой плотностью пользователей (СВП) эта задача распадается на две подзадачи. С одной стороны, необходимо в условиях задаваемых физическим уровнем IEEE 802.11 обеспечить целевую пользовательскую емкость, а с другой необходимо учесть фактический клиентский состав. Одним из способов повышения пользовательской емкости являются технологии формирования точкой доступа геометрически направленной в сторону клиентского устройства передачи. Эти подходы оказывают заметное влияние на СВП, поскольку напрямую влияют на достижимую пользовательскую емкость. Обозначенным вопросам и посвящена данная работа.

Масштабируемость в свете смешанного клиентского состава

В реальных сетях Wi-Fi, полезная пропускная способность в расчете на приложение, которое интересует конечного пользователя, заметно отличается от скорости согласно индексу MCS (*Modulation and Coding Sequence*). Последняя представляет собой одну из номинальных скоростей передачи пакетов в среде передачи. Частью «накладных расходов» на передачу полезных данных является также служебный трафик Wi-Fi. Полезный трафик в конечном итоге представляет лишь часть общей нагрузки на сеть и с точки зрения длительности эфирного времени, его доля может падать до 40–50 %. Так, в табл. 1 показана средняя оценка пропускной способности для полезной нагрузки сети в нормальных радиочастотных условиях согласно работе [1].

Таблица 1.

Средняя оценка пропускной способности для полезной нагрузки сети

Протокол, режим работы	Пропускная способность (Мбит/с)
802.11b	7,2
802.11b/g	13
802.11g	25
802.11a	25
802.11n – HT20, 1SS, MCS7	25
802.11n – HT20, 2SS, MCS15	70
802.11n – HT40, 2SS, MCS15	160

В условиях реальной БЛВС, кроме ряда экзотических случаев (например, считыватели штрих-кодов в логистическом терминале), практически невозможно встретить ситуацию, в которой все клиентские устройства имеют идентичные с точки зрения своих характеристик радиомодули. Более того, от местонахождения клиентского устройства в пределах ячейки покрытия БЛВС сильно зависит затухание сигнала при его прохождении через пространство между ТД и клиентским устройством. Поэтому, номинальные скорости установленных соединений разнообразными клиентскими устройствами, поддерживающими разные ревизии стандарта 802.11, для одной ячейки БЛВС будут отличаться в разы. Что касается реальной скорости передачи пользовательских данных, то она будет очень сильно варьироваться в зависимости от занятости эфира, нагрузки со стороны приложений, используемых протоколов и множества других условий [2].

Для понимания масштабируемости БЛВС необходимо определить практический предел количества клиентских устройств, которые могут одновременно работать на одном канале, при сохранении целевой скорости передачи. Предельное число пользователей определяется скоростью ПД в сети в расчете на клиента (удельной скоростью ПД), которая соответствует выбранной целевой емкости сети с поправкой на смесь высокоскоростных и устаревших клиентов.

Некоторые производители пытаются упростить этот процесс, устанавливая формальные правила, например, такие как «не более 10 активных голосовых соединений или 25 абонентов, одновременно передающих данные». Такой подход оказывается, однако, трудноприменим в высокоплотных окружениях, когда необходимо обеспечить связью возможно большее число разнородных абонентов, сохраняя число радиомодулей в разумных пределах. Проектировщик сети, должен точно знать пределы распространения сигнала и, как следствие, - можно ли контролировать повторное использование каналов. Во многих случаях потребуется решение с узконаправленными антеннами, дорогое с точки зрения стоимости оборудования и трудоемкое в процессе ПНР.

Сети IEEE 802.11n и 802.11ac поддерживают помимо последних версий стандарта, еще и более старые ревизии 802.11g, 802.11b и 802.11a через особый защитный режим (*protected mode*). Он предусматривает автоматический ответ точками доступа и высокоскоростными клиентами в присутствии клиентов старых стандартов, которое определяется соответствующими полями management-кадров. Высокоскоростные устройства поддерживают работу с клиентами старых версий стандарта, путем передачи дополнительных management-кадров. Такая поддержка дает в конечном итоге значительное снижение пропускной способности для обеих сторон. При этом достаточно только присутствия такого клиента для задействования данного механизма контроллером.

Согласно исследованию Aruba Networks, предельное число пользователей в основном определяется соотношением числа устаревших 802.11a/b/g устройств и высокоскоростных устройств стандарта 802.11n/ac. И чем выше доля устройств, работающих в старой версии стандарта, тем ниже будет этот предел¹. Далее этот вопрос будет рассмотрен подробнее.

Используя характеристики скоростей ПД, покажем, как соотносятся пропускные способности в расчете на пользователя и на ячейку (табл. 2).

Таблица 2.

Пропускная способность в расчете на ячейку БЛВС [1]

Версия стандарта ²	Номинальная скорость передачи (Мбит/с)	Совокупная пропускная способность (Мбит/с)	Число пользователей	Удельная пропускная способность (Кбит/с)
802.11b	11	7.2	10	720
802.11b	11	7.2	20	360
802.11b	11	7.2	30	240
802.11b/g	54	13	10	1 300
802.11b/g	54	13	20	650
802.11b/g	54	13	30	430

¹ Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. Aruba VRD. 2010.

² IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2016.

Версия стандарта ²	Номинальная скорость передачи (Мбит/с)	Совокупная пропускная способность (Мбит/с)	Число пользователей	Удельная пропускная способность (Кбит/с)
802.11a	54	25	10	2 500
802.11a	54	25	20	1 250
802.11a	54	25	30	833
802.11n MCS7	72,2	35	10	3 500
802.11n MCS7	72,2	35	20	1 750
802.11n MCS7	72,2	35	30	1 160

В ячейке одновременно обрабатывающей трафик клиентов 802.11b и 802.11g скорость менее чем в два раза превышает скорость в ячейке с трафиком только 802.11b пользователей и примерно в два раза меньше чем в ячейке только с 802.11g пользователями. Аналогичный эффект наблюдается если сравнить подобную ситуацию с 802.11n и 802.11a/g. Внедрение 802.11n по сравнению с предыдущими обновлениями технологии WLAN привнес возможность агрегации 20 МГц каналов, одновременно сохраняя поддержку предыдущих версий стандарта. Однако механизм сосуществования версий 802.11b и 802.11g требует значительных «накладных расходов» в канале, поскольку устройство 802.11b должно быть информировано, что канал занят [1].

В большинстве случаев, обычно имеется смесь 802.11n, 802.11g, и даже 802.11b устройств, сосуществующих с «быстрыми» 802.11ac клиентами. Важнейшим ресурсом здесь является время использования канала (среды), поскольку клиент 802.11a с максимальной номинальной скоростью 54 Мбит/с снизит скорость работы 802.11n HT20 клиентов, работающих на номинальной скорости 150 Мбит/с в случае необходимости одновременной передачи. Тот же эффект наблюдается в диапазоне 2,4 ГГц. Таким образом, наличие даже одного активного в сети устройства старого стандарта заметно снизит совокупную пропускную способность канала, что в свою очередь снизит предельно достижимое число пользователей на канал.

Авторами ранее на практических примерах, в частности [3] было показано, что доля клиентов старых версий стандарта составляет до 50 % и иногда даже выше.

Очень сложно создать среду, в которой невозможно полностью исключить появление старых устройств. В Aruba Networks было проведено тестирование скоростей передачи при разном соотношении клиентов 802.11a и 802.11n. Постановка эксперимента включала 50 различных ноутбуков, с большим разнообразием операционных систем и адаптеров беспроводной сети. Для генерирования трафика использовался программный пакет Ixia IxChariot. В Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums³ показано, что когда 25 % клиентов работают в режиме 802.11a, а 75 % – в 5 ГГц HT20, удельная скорость ПД падает на 20–25 % в зависимости от числа клиентов. Увеличение доли клиентов 802.11a до

³ Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. Aruba VRD. 2010.

50 % дает падение удельной скорости ПД еще на 25 %. Эти результаты были получены при включенном режиме «Airtime fairness», в значительной мере сглаживающем негативный эффект от наличия медленных клиентов. При его отключении, падение производительности 802.11n клиентов будет гораздо сильнее.

На рис. 1 показано соотношение между занимаемым временем канала (среды) для кадра видеопотока H.264 с стандартным размером 1 316 байт. Для большей наглядности, взят режим CTS/RTS без агрегирования кадров. Такое допущение является с одной стороны достаточно грубым, с другой наглядно показывает соотношение между использованием канала (среды), занимаемым полезной нагрузкой, заголовками, а также служебными кадрами и межкадровыми интервалами. Данный расчет сделан для четырех версий стандарта исходя из определенной в IEEE Std 802.11⁴ длительности передачи различных кадров и межкадровых интервалов для соответствующих режимов работы.

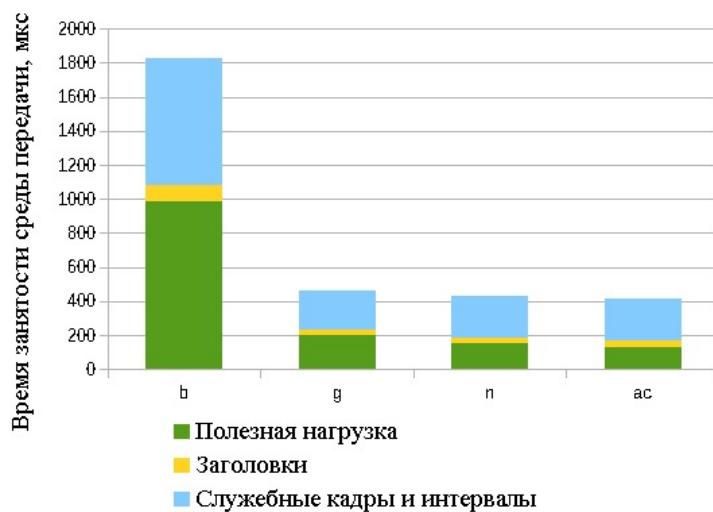


Рис. 1. Время занятости среды для различных версий IEEE 802.11

Поскольку только один кадр может передаваться в один момент времени, то чем быстрее он будет передан, тем большая эффективность среды будет достигнута. И наоборот, достижение целевой пропускной способности, с одновременной поддержкой 802.11b и 802.11g, потребует больше временных слотов и дополнительных методов разделения каналов для их более эффективного использования.

Для определения целевого числа одновременных пользователей Aruba Networks рекомендует выбрать предельное число пользователей для каждой точки доступа (5 ГГц, НТ20) при заданной целевой емкости по табл. 3.

Указанные в таблице значения пропускной способности являются довольно условными и выполнены для дополнений стандарта IEEE 802.11a/n, но вполне могут послужить ориентиром⁵.

⁴ IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2016.

⁵ Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. Aruba VRD. 2010.

Таблица 3.

Результаты двунаправленного теста масштабирования
для смешанного клиентского состава, Мбит/с

	Число клиентов в ячейке				
	10	20	30	40	50
100 % HT20	5,99	2,99	1,81	1,30	0,94
75 % HT20 / 25 % OFDM	4,69	2,20	1,46	1,03	0,77
50 % HT20 / 50 % OFDM	4,17	1,73	1,10	0,75	0,54
25 % HT20 / 75 % OFDM	3,96	1,72	1,07	0,68	0,56
100 % OFDM	1,50	0,75	0,50	0,36	0,28

Емкость сети

Известно немного способов увеличения клиентской емкости беспроводной сети. Поскольку емкость беспроводной сети определяется объемом доступного клиентам ресурса времени в радиоканале и скоростями передачи данных на которых они могут его использовать, основные подходы к повышению емкости беспроводной сети можно сгруппировать следующим образом:

- управление доступом к среде,
- пространственное разнесение радиомодулей,
- спектральное разнесение каналов,
- прочие второстепенные подходы, включающие в себя распределение клиентов, балансировку и динамическое управление частотами.

В первую очередь необходимо убедиться, что каждый канал радиочастотного спектра используется эффективно. Основными причинами низкой емкости сети являются внутриканальная интерференция и протокольные издержки борьбы за канальный временной ресурс. Очевидно, что увеличение числа клиентов точки доступа снижает доступную каждому клиенту пропускную способность сети.

Основные причины снижения совокупной пропускной способности:

- коллизии и повторная передача данных,
- адаптация (подбор) индекса MCS,
- издержки L2.

Доля повторов кадров из-за коллизий в сети является фактически величиной постоянной и не зависит ни от протоколов верхнего уровня, ни от ревизии стандарта IEEE 802.11, ни от ширины канала, ни от направления передачи, ни, что самое важное, – от нагрузки на сеть. Это стабильно 4–10 % передач для нормально спроектированной сети в отсутствие внешних радиочастотных вмешательств.

Что касается процесса адаптации скорости, т. е. подбора индекса MCS и связанных с этим «накладных расходов», то его влияние варьируется от незаметного до слабого. Объем соответствующих служебных кадров значительно не меняется, составляя 1–2 % [5].

Число кадров служебного трафика (control frames) под большой нагрузкой в условиях большого числа активных клиентов (табл. 3) растет очень заметно: более чем в 3 раза. Ниже в ряде примеров будет показано, что служебный трафик (*control frames*) может составлять 50–60 % от общего объема по числу кадров. Достаточно подробный разбор этого явления приведен в работе [5].

С ростом числа клиентов, их состязание за доступ к среде будет расти. Поэтому относительно больше времени будет тратиться на ожидание доступа к среднему на фактическую передачу, поскольку семейство стандартов IEEE 802.11 несет в себе наследие довольно неэффективных протоколов. CSMA/CA предполагает, что каждый клиент слушает среду в поиске свободного окна для передачи и, если среда занята, ожидает некий произвольный период времени. Причем с каждой последующей неудачной попыткой этот период ожидания растет экспоненциально. Это ведет к тому, что зависимость пропускной способности ячейки БВЛС как функция от числа активных клиентских устройств имеет выраженный максимум. Одной из основополагающих работ, посвященных этому вопросу, является [4].

Скорости передачи зависят от уровня принимаемого сигнала и соотношения сигнал/шум приемника (SNR). На практике не имеет смысла фиксировать определенную скорость передачи на радиомодуле, поскольку его внутренняя логика достаточно эффективно принимает решения, основываясь на имеющихся условиях среды. В то же время не от каждого клиентского устройства стоит ожидать подобной эффективности в условиях статической радиоинфраструктуры. Такие переменные факторы среды как чувствительность приемника, конфигурация антенн, версия драйвера, расположение клиента в пределах ячейки относительно разнообразных источников отражения и ослабления сигнала имеют существенный и вместе с тем нестационарный эффект на клиентское устройство. Планирование должно способствовать высокой эффективности радиосигнала в имеющейся радиосреде. Чем выше средний уровень приема и больше SNR, тем выше будет пропускная способность.

Ввиду таких принципиальных концепций как защитные интервалы, повышенные номинальные скорости и др., базовые трудности, с которыми сталкиваются сети Wi-Fi, продолжают сохранять свою актуальность и сегодня.

Способы повышения емкости

Пространственное разнесение

В данном контексте под пространственным разнесением понимается пространственное разнесение приемников и передатчиков сигнала для повторного использования каналов.

Чем дальше будут отнесены друг относительно друга радиомодули, работающие на одном канале и чем больше будет затухание сигнала между ними, тем большего повторного использования каналов можно достичь.

Принцип пространственного разнесения лежит в основе таких технологических подходов как MIMO и MRC (*Maximal Ratio Combining* – суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала)⁶, которые позволяют прини-

⁶ Aruba 802.11ac In-depth White paper. Aruba. 2014.

мать множественные сигналы, полученные разными пространственными маршрутами и путем процессорной обработки получать сигнал с большим SNR, чем отдельные, исходно принятые сигналы. Преимущества MIMO для сетей СВП будут детальнее рассмотрены ниже.

Разнесение в спектре

Традиционное планирование «микросотов» в сетях Wi-Fi с высокой плотностью пользователей предполагает выделение частотных каналов каждой имеющейся точке доступа и таким образом использует весь доступный спектр для обеспечения радиопокрытия. В случае необходимости расширения сетевой емкости, необходимо увеличить число точек доступа, но вместе с тем необходимо резко снизить уровень излучаемой мощности на точках для снижения внутриканальной (CCI) интерференции до приемлемого уровня. При таком подходе прирост пользовательской емкости сети при увеличении ее масштаба снижается, поскольку каждая дополнительная точка доступа способствует росту внутриканальной интерференции вместе с емкостью и в какой-то момент добавление точек доступа начнет сказываться отрицательно. Более детально, вопросы, связанные с частотным планированием будут рассмотрены в отдельной работе, посвященной частотному планированию.

Оценка общей емкости

Теоретически, если несколько радиомодулей, размещенных в одной точке пространства будут работать на разных непересекающихся каналах, то их зона покрытия обеспечит пропускную способность пропорционально большую. Однако, такой подход недопустим в СВП относительно большого масштаба, поскольку в таком случае, результатом будет покрытие всего доступного пространства вместо целевой площади.

Необходимо определить примерное число пользователей 2,4 ГГц диапазона и прогноз их роста. Для этого можно использовать следующие подходы:

Диапазон 5 ГГц предпочтителен по причине большей ширины спектра. В зависимости от регуляторного домена, в диапазоне 5 ГГц доступно до 5–7 раз больше рабочих частот, поскольку с большей шириной доступного спектра доступно больше непересекающихся каналов. С ростом числа доступных каналов увеличиваются возможности по их повторному использованию, что позволяет теоретически достичь коэффициентов повторного использования в 4, 7, 9, 12 и больше. Под коэффициентом повторного использования канала будем понимать число каналов с одинаковой частотой, применяемое в принятой схеме радиопланирования и отвечающее задаче масштабирования. Многократное использование каналов минимальной ширины дает значительно больший прирост к емкости сети, чем применение широких каналов с низким коэффициентом повторного использования.

Высокое повторное использование каналов имеет критическое значение для СВП, поскольку при этом снижается лимитирующий фактор – внутриканальная интерференция. Это дает возможность увеличить число точек доступа для достижения целевой емкости сети. Детальнее вопросы частотного планирования будут рассмотрены в отдельной работе.

Методы повышения избирательности приемника

Многие производители стараются улучшить характеристики принимаемого сигнала на клиентском устройстве путем формирования луча в его направлении (*Beamforming*). В стандарте 802.11ac была стандартизирована технология формирования луча TxBF (*transmit beamforming*).

Из проприетарных технологий, имеющих ту же цель, особо стоит выделить: Cisco ClientLink и Ruckus BeamFlex.

Технология Cisco ClientLink увеличивает избирательность для клиентов с 802.11a/g OFDM. Поскольку такие клиенты не поддерживают тех преимуществ, которые дает 802.11n, они являются собой наименее эффективных клиентов в сети. Использование ClientLink в СВП позволяет точке доступа улучшить SNR на уровне пакет-пакет примерно на 3–6 дБ для клиента, для которого такой режим возможен. В совокупности это дает эффект увеличения дальности и выравнивания скорости сети и дает возможность клиентам старого стандарта достичь приемлемой скорости работы в неблагоприятных условиях. Для СВП, основанной на решениях Cisco Systems, это заметное дополнение к сетевой архитектуре. Более детальный обзор преимуществ, предоставляемых технологией Cisco ClientLink, доступен в Cisco ClientLink^{7,8}.

В противовес Cisco Systems, использующим неявное формирование луча «на чипе», Ruckus Wireless применяет формирование луча «на антенне» – технологию под названием BeamFlex. По своей сути BeamFlex использует массив антенн (фазированная антенная решетка) и анализирует каждый пакет, чтобы оценить производительность передачи сигналов. В зависимости от конфигурации, точка доступа BeamFlex может настроить массив антенн в любую из многих возможных комбинаций. Точка доступа отслеживает соединения в реальном времени и модифицирует antennную конфигурацию прямо в процессе работы, с целью соответствия динамически изменяющимся условиям. Это позволяет получить прирост мощности сигнала до 10 дБ по направлению целевого луча, а также подавление помех на величину до 17 дБ на задних лепестках диаграммы направленности. Детальнее обзор преимуществ, предоставляемых технологией Ruckus BeamFlex доступен в Ruckus Wireless^{9,10}.

Однако, поскольку пока клиент не имеет возможности делать аналогичное формирование луча, принципиальным недостатком всех подобных решений является вносимый в той или иной мере дисбаланс в канал клиент-точка. Поэтому уровни сигнала, на которых клиент и точка принимают сигналы друг друга, в результате применения этих технологий могут заметно разниться. Это, хоть и в разной мере, но – априори плохо для сетей 802.11 и в свою очередь может привести к заметному несовпадению скоростей передачи как минимум служебного трафика, что может быть критичным для передачи данных в ряде конкретных приложений.

Важно обратить внимание, что некоторые производители, уже вносят учет TxBF в своих устройствах для некоторых регуляторных доменов, т. е. уровень

⁷ Cisco ClientLink: Optimized Device Performance with 802.11n. Cisco Systems. 2009.

⁸ Cisco ClientLink 3.0 at a Glance. Cisco Systems. 2012.

⁹ Beamflex feature sheet. Ruckus Wireless. 2015.

¹⁰ All Beamforming Solutions are Not Equal. Ruckus Wireless. 2013.

ЭИИМ (эквивалентная изотропно-излучаемая мощность) индицируется уже с учетом преимуществ технологии TxBF, стандартизированной в IEEE 802.11ac.

Выводы

1. В работе рассмотрены вопросы учета смешанного клиентского состава и его влияния на планирование радиопокрытия в условиях задач СВП.
2. Показаны возможности масштабирования СВП для смешанного клиентского состава и приведены практические оценки.
3. Проанализированы методы повышения клиентской емкости ячейки СВП в свете задачи корректного масштабирования БЛВС в целом. Приведены практические рекомендации.
4. Показаны различия в существующих технологиях формирования луча с целью повышения избирательности на стороне клиента и показана важность принятия их во внимание при планировании СВП

Литература

1. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A. C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems. 2017.
2. Correll P. Xirrus – Just so Different. Xirrus. 2014.
3. Викулов А. С., Парамонов А. И. Исследование клиентского состава в сети беспроводного доступа // VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». 2017. С. 136–139.
4. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18. Iss. 3. pp. 535–547.
5. Lukaszewski C. Aruba VHD 802.11ac Networks». Aruba Networks. 2015.

References

1. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A. C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems. 2017.
2. Correll P. Xirrus – Just so Different. Xirrus. 2014.
3. Vikulov A., Paramonov A. WLAN Client Diversity Analysis // VI International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference “Actual Problems of Education in Science and Education”. 2017. pp. 136–139.
4. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18. Iss. 3. pp. 535–547.
5. Lukaszewski C. Aruba VHD 802.11ac Networks». Aruba Networks. 2015.

Викулов Антон Сергеевич

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, asv012016@gmail.com

Парамонов Александр Иванович

– доктор технических наук, профессор, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, alex-in-spb@yandex.ru

Vikulov Anton

– Postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, asv012016@gmail.com

Paramonov Alexander

– Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, alex-in-spb@yandex.ru