

# ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СЕТЕЙ Wi-Fi С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

А. С. Викулов<sup>1\*</sup>, А. И. Парамонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: [asv012016@gmail.com](mailto:asv012016@gmail.com)

## Аннотация

При планировании сетей стандарта IEEE 802.11 с высокой плотностью пользователей (СВП) неизменно актуальным является вопрос корректного частотного планирования, т. е. выбора каналов в доступных к работе диапазонах, а также определение их типов, т. е. ширины спектра ими занимаемой. В данной работе проведено обобщение рекомендаций по данному вопросу, проанализированы основные подходы к частотному планированию СВП и разобраны ключевые параметры предиктивных моделей. **Предмет исследования.** Статья посвящена вопросам частотно-территориального планирования БЛВС с высокой плотностью пользователей, в свете задачи увеличения пользовательской емкости сети. **Метод.** В основу данной работы положены руководства по проектированию БЛВС от компаний-производителей оборудования, рекомендации экспертов, ряд научных работ, а также более чем 5-летний личный опыт проектирования. **Основные результаты.** Рассмотрены вопросы частотного планирования, выбора типов каналов и проанализированы возможные решения для СВП. **Практическая значимость.** Проведенный анализ дает конкретные практические рекомендации к построению предиктивных моделей радиопокрытия СВП.

## Ключевые слова

IEEE 802.11, частотно-территориальное планирование, Wi-Fi, высокая плотность пользователей.

## Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 12.04.18, принята к печати 01.07.18.

**Ссылка для цитирования:** Викулов А. С., Парамонов А. И. Частотно-территориальное планирование сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 2. С. 35–48.

# FREQUENCY AND DISTANCE PLANNING OF HIGH DENSITY Wi-Fi NETWORKS

A. Vikulov<sup>1\*</sup>, A. Paramonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: asv012016@gmail.com

**Abstract**—The question of the correct channel planning, i.e. the channel frequency and type choice, typically rises in the high density Wi-Fi LANs design process. This work includes the analysis of recommendations regarding this topic and key parameters of predictive models. Thus the main approaches for channel planning have been generalized. **Research subject.** The present work is devoted to the frequency and distance planning of the high density Wi-Fi networks with attention to client capacity of WLANs. **Method.** The ground for this work is: Wi-Fi solution vendors design guides, recommendations of the experts, some scientific works and own more than 5-year design practice. **Core results.** The analysis of the frequency planning, channel type choice and possible solutions for high density WLANs has been carried out. **Practical relevance.** The analysis gives practical recommendations for high density WLANs predictive modelling.

**Keywords**—IEEE 802.11, frequency planning, distance planning, high density, WLAN, Wi-Fi.

## Article info

Article in Russian.

Received 12.04.18, accepted 01.07.18.

**For citation:** Vikulov A., Paramonov A.: Frequency and Distance Planning of High Density Wi-Fi Networks // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 2. pp. 35–48 (in Russian).

## Введение

Радиопокрытие в сети высокой плотности достигается соответствующим размещением точек доступа. Для размещения большого количества точек, требуемых для организации сети Wi-Fi высокой плотности (СВП) на небольшом расстоянии друг от друга, с сохранением минимальной интерференции, необходимо следовать ряду принципов, соблюдая при этом физические ограничения реалий объекта: ограничения кабельной инфраструктуры, а также форму и размер помещений.

Примерами руководства по планированию сетей Wi-Fi являются Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums<sup>1</sup>, Avaya WLAN 8100 Design Guide<sup>2</sup>, Aruba Network Rightsizing Best Practices Guide<sup>3</sup>, Aruba Network Rightsizing Best Practices Guide<sup>4</sup>, в них отражены основные принципы и рекомендации по развертыванию сетей Wi-Fi. Однако, будучи составленными в 2009–2012 гг., они не содержат решений по высокоплотным Wi-Fi средам и современным подходам к их построению. Хронологически более новыми и актуальными на сегодня являются доку-

---

<sup>1</sup> Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. VRD. 2010.

<sup>2</sup> Avaya WLAN 8100 Design Guide. Avaya Inc. 2012.

<sup>3</sup> Aruba Network Rightsizing Best Practices Guide. 2009.

<sup>4</sup> Aruba 802.11n Networks VRD v6. 2011.

менты Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide 8.0<sup>5</sup>, Aruba 802.11ac In-depth White paper<sup>6</sup>, Cisco Systems. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi<sup>7</sup> [1].

Ниже будут рассмотрены основные принципы частотного радиопланирования СВП с целью достижения баланса между ограничениями, создаваемыми геометрией зоны покрытия, соблюдением требований к качеству обслуживания и стоимостью решения в целом. Прежде всего, рассмотрим параметры предиктивных моделей, построение которых в специализированном ПО, является неотъемлемой частью процесса проектирования БЛВС.

### **Скорость передачи**

Говоря о сетях Wi-Fi, пользователь в первую очередь думает о достижимой скорости передачи данных. Для дополнения стандарта 802.11n номинальные скорости передачи (*Data Rate*) могут достигать значений в 300 или 450 Мбит/с и более, а для стандарта 802.11ac теоретически достижимы и скорости свыше 1 Гбит/с. К сожалению, при проектировании, скорость передачи данных – это не самый лучший критерий оценки радиопокрытия, поскольку необходимо помнить, что *Data Rate* – это лишь скорость кодирования полезной нагрузки внутри кадра физического уровня. И даже если рассматривать гипотетический случай передачи только кадров с данными (без служебной информации и межкадровых интервалов), то ввиду того, что заголовки физического уровня передаются на минимальной обязательной скорости, даже в таком умоглядном примере совокупная пропускная способность никогда не будет равна номинальной скорости модуляции и кодирования (MCS). Тем не менее, этот параметр все же не стоит недооценивать, поскольку как вторичная характеристика зоны радиопокрытия (в первом приближении – как функция уровня приема сигнала и соотношения сигнал/шум) он является наглядной иллюстрацией модели БЛВС.

Существует множество факторов, играющих важную роль в определении реальной скорости передачи, включающих в том числе особенности окружающей среды и характеристики трафика. Мы же можем только оценивать теоретически максимальную скорость в текущей точке, основываясь на расчетном уровне сигнала. Стандарт IEEE 802.11<sup>8</sup> определяет номинальные скорости передачи, характеристики MCS, а также требования к характеристикам сигнала.

### **Уровень сигнала и соотношение сигнал/шум**

Уровень сигнала – это прямая характеристика принимаемого сигнала от целевой точки доступа (ТД), и потому уровень сигнала является одним из ключевых параметров при оценке качества радиопокрытия. Поэтому минимальные требования к уровню сигнала должны быть обязательным критерием проектирования беспроводной сети.

---

<sup>5</sup> Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide 8.0. Cisco Systems. 2016.

<sup>6</sup> Aruba 802.11ac In-depth White paper. 2014.

<sup>7</sup> Cisco Systems. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. Technical White paper. 2014.

<sup>8</sup> 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.

Пользовательские устройства обладают несколько различными требованиями к сигналу. Так, ноутбуки обладают Wi-Fi интерфейсами с более мощными передатчиками и более сложными антеннами по сравнению с планшетами и смартфонами. Более компактные устройства часто испытывают проблемы именно с производительностью радиоинтерфейсов, в частности ввиду зависимости от того как пользователь его держит в пространстве, а также из-за ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов.

Другой важной метрикой, которую необходимо принять во внимание при построении БЛВС, является соотношение сигнал/шум (ОСШ). Рекомендованное значение для БЛВС передающих только данные – 15 дБ и более. Для сетей, поддерживающих передачу голоса и видео, рекомендованные значения ОСШ – 20 дБ или более. Агрегирование частотных каналов дополнительно ужесточает требования к ОСШ. Это требует знания уровня шума на натурном объекте, что вызывает прямую необходимость проведения радиообследования.

Минимальные пороговые для соответствующих индексов MCS значения уровня сигнала и соотношения сигнал/шум приведены в стандарте IEEE 802.11. Однако, в документации на конкретное оборудование нередко эти значения несколько отличаются в большую сторону от приводимых в стандарте, например, ввиду различной внутренней логики реализации MRC, различных антенных конфигураций в режимах MIMO и др.<sup>9</sup>

Ряд работ специалистов, в частности<sup>10</sup> [2, 3], приводят типовую зависимость индекса MCS от ОСШ с незначительными отличиями в абсолютных значениях. Тем не менее, форма зависимости индекса MCS от ОСШ для одного выбранного режима в заданных условиях будет одна и та же. Так, например, в работах признанных экспертов-практиков [2, 3] приведены данные, основанные на большом практическом опыте работы с разнообразным оборудованием. Эти данные ценны тем, что обобщают практические реализации алгоритмов выбора индекса MCS, поэтому осознавая всю важность значений, приведенных в стандарте IEEE 802.11 удобно пользоваться обобщением, сделанном в [2, 3]. В целом производители ПО для моделирования покрытия рекомендуют ориентироваться на показатель ОСШ в 25 дБ как усредненную величину для сетей Wi-Fi, ориентированных на пользовательскую емкость<sup>11</sup>.

Большинство современных мобильных устройств используют реализацию 802.11n/802.11ac с одним пространственным потоком с ограниченным уровнем мощности и различными реализациями алгоритмов энергосбережения с целью продлить время работы от аккумулятора. Это в итоге отражается на планировании сети, поскольку уровень мощности излучения на ТД снижается для сохранения симметричной энергетики в радиоканале с клиентом.

### **Число доступных клиенту ТД**

Несмотря на то, что в каждый отдельный момент времени клиентское устройство проассоциировано только с одной ТД, в пределах его видимости

---

<sup>9</sup> Aruba 802.11ac In-depth White paper. 2014.

<sup>10</sup> Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide 8.0. Cisco Systems. 2016.

<sup>11</sup> Ruckus Wireless. Deploying very High Density Wi-Fi. Design and Configuration Guide for Stadiums. 2012.

должно быть больше одной ТД для обеспечения сервиса. Как много их должно быть – зависит от используемых приложений.

Для простой отказоустойчивости и обеспечения возможности хендовера клиентского устройства работы пользователей при передаче данных, еще одной ТД, доступной на уровне выше –80 дБм должно быть достаточно. В случае необходимости обеспечения работы приложений, передающих голос, каждому такому клиенту должна быть доступна основная точка доступа на уровне –65 дБм и еще одна на уровне не хуже –75 дБм. Это обычные рекомендации исходящие из необходимости обеспечить возможность передачи клиентской сессии между ТД, т. е. хендовер<sup>12,13</sup>. Отметим, однако, что порой стандарты крупных корпораций требуют обеспечения радиопокрытия с уровнем не ниже –60 дБм. В таблице приведены типовые значения необходимых уровней сигнала с учетом числа доступных ТД согласно упомянутым рекомендациям.

Таблица.  
Рекомендуемое число доступных ТД и предоставляемый сервис БЛВС

Сервис	Число ТД	Уровень сигнала, дБм
Передача данных с хендовером и резервированием каналов	2	–77
Передача голоса	2–3	–65
RTLS	4–6	–80

Обратим внимание, что решения для СВГ обычно де-факто отвечают требованиям RTLS (позиционирование) в основном по причине фактической прямой видимости большого числа ТД в зоне покрытия высокой плотности.

### Время передачи

Как уже отмечалось выше, клиенты, работающие на низких скоростях, в процессе передачи данных занимают большее время, относительно клиентов обладающих большими скоростными возможностями как позиции качества сигнала, так и с позиции возможностей радиомодуля. Т. е. клиенты, работающие на низких скоростях, будут дополнительно снижать общую совокупную пропускную способность ячейки БЛВС относительно максимальной теоретически достижимой. Поэтому время передачи, вне всякого сомнения, является ключевым ресурсом любой сети 802.11, необходимым для её работы. Необходимо помнить, что результатом состязания устройств за временной ресурс является компромисс, решающий очередность доступа.

Каждый частотный канал или ячейка сети, используемые в сети Wi-Fi, представляют собой отдельный компонент со своей полосой пропускания подобно Ethernet-линку между устройством и коммутатором доступа. В случае с Ethernet, концепция коммутации (*bridging* или *switching*) явилась следствием необходимости увеличить эффективность использования среды передачи путем

<sup>12</sup> Ekahau Site Survey User Guide. 2015.

<sup>13</sup> Cisco Voice over Wireless LAN 4.1 Design Guide. 2010.

уменьшения размеров доменов коллизий и (или) broadcast-домена до пределов физического порта.

Что касается сетей 802.11, то в отличие от проводных сегментов, в них нет возможности построить архитектуру на основе соединений «точка-точка» и все работающие станции делят один и тот же канальный ресурс. Поскольку в беспроводной среде невозможно определить факт коллизии, в технологии применен менее эффективный, по сравнению с проводным Ethernet, метод доступа CSMA/CA.

Ввиду разделяемой природы 802.11 сетей, проблемы, связанные с изменяющейся текущей скоростью передачи, обостряются из-за эффектов блокировки Head-of-Line Blocking (HoLB), поскольку невозможно остановить передачу больших, низкоприоритетных кадров, ради работы с небольшими, но высокоприоритетными. Некоторые клиенты могут быть подключены на низких скоростях, поэтому совокупная пропускная способность этого канала на точке доступа будет падать в те моменты, когда этим клиентам предоставляется время для передачи. Занимая большее время в канале, чем высокоскоростные клиенты, медленные устройства становятся своеобразными «сетевыми паразитами». Результатом этого являются большие задержки и низкая скорость, но при высокой загрузке канала<sup>14</sup>.

### **Размер ячейки**

Каждая дополнительная точка доступа в СВП повышает общую сетевую пользовательскую емкость, а потому число ТД в сетях СВП на единицу площади радиопокрытия значительно превышает аналогичное значение для сетей Wi-Fi, ориентированных на радиопокрытие. Следовательно, целью планирования должно быть получение возможно меньшей по размерам ячейки сети СВП, соблюдая при этом требования к радиопокрытию.

Небольшой размер ячейки требует плотного размещения точек доступа с обязательной геометрической (помимо частотной) изоляцией их друг от друга. С точки зрения размера ячейки, конечная цель радиопокрытия Wi-Fi в условиях высокой плотности размещения клиентов состоит в создании ячеек сети минимального размера с возможно более выраженными между ними границами. При этом размеры ячеек должны отвечать требованиям покрытия с точки зрения числа клиентов. В частности, пределом с точки зрения числа клиентских ассоциаций является 255 устройств на радиомодуль. Аналогичным образом, должно быть корректно оценено число одновременно активных клиентов в расчете на ячейку.

Таким образом, размер ячейки в условиях СВП это очень важный параметр, который необходимо контролировать как в процессе предиктивного моделирования, так и на всех этапах развертывания и обслуживания СВП.

### **Частотное планирование в диапазоне 2,4 ГГц**

Под частотным планированием в широком смысле понимается выбор номеров (частот) и типов (ширины) частотных каналов с целью обеспечения радио-

---

<sup>14</sup> Juniper Networks. Coverage or Capacity – making the best use of 802.11n. 2011.

покрытия с заданными в задаче характеристиками. Ниже рассмотрим более подробно, какие схемы являются наиболее удобными для использования в условиях СВП.

Основная идея частотного планирования состоит в том, чтобы получить сплошное покрытие целевой зоны покрытия ячейками сети таким образом, чтобы ячейки сети, работающие на одном канале, были максимально далеко разнесены друг от друга в пространстве. Т. е. применяется ячеистый принцип радиопокрытия, хорошо известный в сотовых сетях.

Частотные диапазоны 2,4 ГГц (ISM) и 5 ГГц (UNII) принципиально отличаются друг от друга доступной шириной электромагнитного спектра, что в значительной степени влияет на частотное планирование сети. Здесь и далее подразумевается, что 5 ГГц – это основной диапазон для подобных инсталляций. Однако все еще далеко не все клиентские устройства поддерживают работу в этом диапазоне [4], плюс в долгосрочной перспективе не предполагается отказываться от использования диапазона 2,4 ГГц [5]. Поэтому все зоны радиопокрытия СВП должны быть двухдиапазонными. В диапазоне 2,4 ГГц имеется только три непересекающихся канала шириной 20 МГц, доступные в большинстве регуляторных доменов (рис. 1).

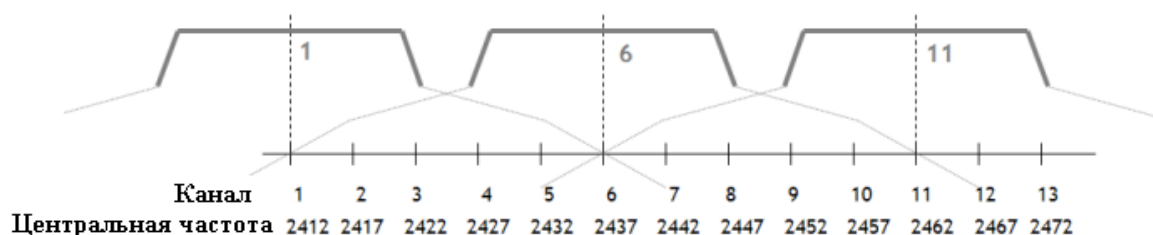


Рис. 1. Непересекающиеся каналы HT20 в диапазоне 2,4 ГГц [1]

Ввиду минимального доступного числа непересекающихся каналов диапазона 2,4 ГГц крайне важно оценить число радиомодулей, которые будут работать на одной частоте, и провести исследование приложений, которые будут использоваться в сети.

Емкость ячеек любой сети Wi-Fi физически ограничена доступной шириной спектра, при этом ввиду необходимости наличия связности между ячейками сети, должно иметь место перекрытие областей радиопокрытия между смежными ячейками сети. В условиях СВП нередко возможно совмещенное расположение ТД для обеспечения радиопокрытия для нужд большого числа клиентов на ограниченной площади. Все ТД и клиентские устройства, работающие на одном радиоканале, делят между собой временной ресурс канала по предусмотренному стандартом алгоритму. Поэтому простая расстановка большого числа точек доступа, работающих на одном канале в пределах одной площади, не может решить проблему сетевой емкости. Наоборот, эффект будет обратным – повышение загрузки канала и снижение полезной емкости.

Разнесение радиомодулей ТД по разным каналам, уменьшает размер доменов коллизий, что вызывает снижение конкуренции за доступ к среде передачи и увеличивает емкость отдельно взятой ячейки.

Ограничение сверху на совокупную пропускную способность создает общая доступная ширина доступного спектра. Спектральная емкость расходуется

как на предоставление радиопокрытия нужной абонентской емкости, в частности путем совмещенного расположения точек доступа, так и на предоставление достаточного числа непересекающихся каналов для радиопланирования с повторным использованием каналов и минимальной внутриканальной интерференцией. При этом первое актуально только для 5 ГГц диапазона, поскольку здесь возможно совмещенное расположение радиомодулей ввиду большей доступной спектральной полосы.

В диапазоне 2,4 ГГц с небольшим перекрытием спектральных масок, возможно применение 4-канальной схемы радиопланирования, однако ее применение в высокоплотном окружении категорически не рекомендуется из-за высокой межканальной интерференции. Возможность оперировать 4-канальным частотным планом рассматривается в документе Cisco Channel Deployment Issues for 2.4 GHz 802.11 WLANs<sup>15</sup>. Краткий вывод его состоит в том, что лучше иметь две ТД, работающие в одном канале, нежели иметь перекрывающиеся по краям ширины своих спектральных масок каналы. Связано это с тем, что две ТД, работающие на одном канале могут демодулировать передачи друг друга и приемлемо разделить временной ресурс между собой, в то время как пересекающиеся каналы создадут шум, коллизии, дублирование передач и деградацию ОСШ.

В связи с ограниченностью доступного спектра в диапазоне 2,4 ГГц, обычно число доступных частотных каналов недостаточно для совмещенной расстановки точек доступа для обеспечения высокоплотного радиопокрытия без повторного использования каналов и связанной с этим высокой внутриканальной интерференции. Таким образом, при проектировании высокоплотной сети, в диапазоне 2,4 ГГц допустим только один радиомодуль на ячейку сети. Отметим, что на практике, нередко часть радиомодулей диапазона 2,4 ГГц для СВП приходится выключать.

Минимизация (ввиду принципиальной невозможности свести к нулю) внутриканальной интерференции между смежными каналами диапазона 2,4 ГГц – важная задача при планировании сети высокой плотности.

### **Частотное планирование в диапазоне 5 ГГц**

5 ГГц диапазоны UNII, доступные в РФ, содержат 16 непересекающихся каналов. Они включают в себя 8 каналов поддиапазонов UNII-1 и UNII-2, а также часть поддиапазона UNII-2e и поддиапазон UNII-3 (см. рис. 2).

Т. е. в отличие от диапазона 2,4 ГГц, диапазон 5 ГГц предоставляет гораздо большую полосу спектра для сетей IEEE 802.11. Это облегчает возможно большее удаление ТД, работающих на одном частотном канале и позволяет построить лучший частотный план. В средах с высокой плотностью, радиомодули диапазона 5 ГГц могут быть физически совмещены для повышения емкости сети ввиду возможности их работы на разных каналах. Эти факторы делают диапазон 5 ГГц более удачным для построения высокоплотных сетей.

В целом, использование диапазона 5 ГГц будет нарастать. Современные клиентские устройства поддерживают работу в двух диапазонах. Эта тенденция

---

<sup>15</sup> Cisco Channel Deployment Issues for 2.4 GHz 802.11 WLANs. 2004.



будет усиливаться и можно ожидать, что новейшие устройства будут поддерживать работу только в частотном диапазоне 5 ГГц<sup>16</sup>.

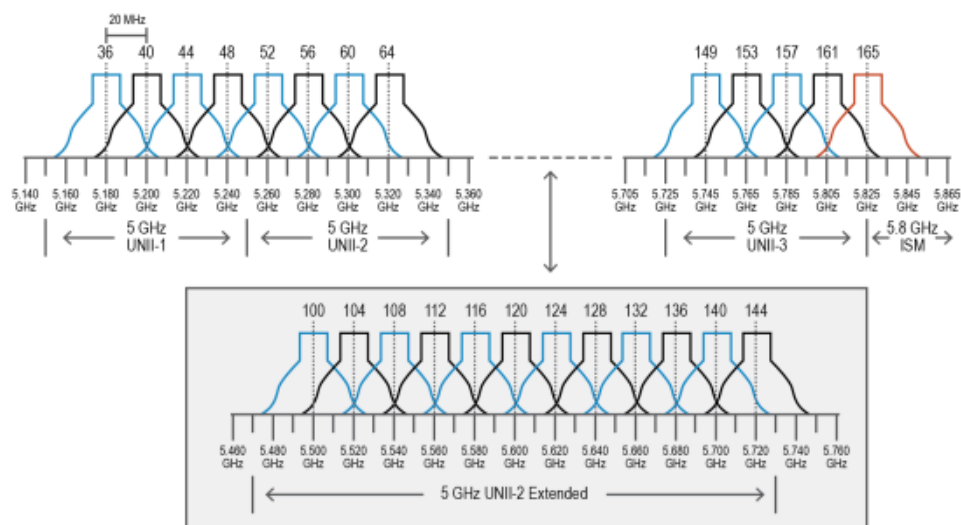


Рис. 2. Непересекающиеся каналы HT/VHT20 в диапазоне 5 ГГц [19]

Необходимо отметить, что поскольку частоты 5 ГГц диапазона с номерами каналов 132 и выше были открыты для использования сравнительно недавно, нередко ситуация, в которой клиентское устройство, не имеющее возможности обновления ПО для своего радиомодуля, считает эти частоты запрещенными к использованию и потому сигнализирует об отсутствии радиопокрытия.

### Повторное использование канала в СВП

Поскольку уровень приема целевого сигнала падает с расстоянием, отдельно взятый канал может быть повторно использован на некоторой дистанции. Эта концепция ранее начала широко применяться в сетях сотовой телефонии и сейчас является центральной в радиопланировании большинства архитектур сетей Wi-Fi. Во всех корпоративных БЛВС повторное использование каналов широко используется на больших площадях, где точки отделены друг от друга различными препятствиями. В этом случае цель повторного использования – обеспечение покрытия на всей целевой площади.

Повторное использование частоты часто является динамическим во времени и его невозможно оценить без детального радиообследования на натурном объекте. Результаты могут значительно варьироваться от отсутствия влияния на скорость передачи до скромного прироста и будут очень сильно зависеть от реальных условий конкретного объекта. Простое увеличение числа ТД в инфраструктуре уменьшит число пользователей на ячейку и создаст иллюзию лучшего радиопокрытия при незаполненном пользователями пространстве. Однако появление пользователей в таком случае создаст эффект «сверхячейки», покрывающей все пространство, с сильно ограниченной пропускной способностью и высокой нестабильностью соединений для всех пользователей. Такая

<sup>16</sup> Ruckus Wireless. Deploying very High Density Wi-Fi. Design and Configuration Guide for Stadiums. 2012.

проблема должна решаться путем физического ограничения распространения сигнала выбирая соответствующие антенны и места их расстановки. Это потребует индивидуального подхода к размещению каждой ТД.

В общем случае необходимо помнить, что каналы в диапазоне 5 ГГц не равноценны. Необходимо учитывать ограничения по мощности на краях диапазона, а также механизм DFS (динамический выбор частоты). В случае работы с 8 каналами, изоляция ячеек (расстояние между ячейками одного канала, выраженное в ячейках) сети 802.11 будет составлять 2 ячейки. В этом состоит принципиальная разница с работой в диапазоне 2,4 ГГц, где изоляция составляет 1 ячейку. Т. е. повторное использование частоты в диапазоне 5 ГГц – значительно более эффективно.

### **Агрегирование радиоканалов**

Сеть Wi-Fi стандарта 802.11n может работать в обоих диапазонах с каналами шириной 40 МГц, путем агрегирования двух 20 МГц каналов, что теоретически увеличивает пропускную способность. Однако в практике корпоративных сетей это имеет смысл только для 5 ГГц каналов ввиду проблем с CCI. В частотном диапазоне 2,4 ГГц можно создать только один канал шириной 40 МГц, что лишает всякого смысла агрегирование каналов в этом диапазоне [1]. Для дополнения стандарта 802.11ac доступны каналы шириной 80 и 160 МГц (VHT80 и VHT160 соответственно).

Более того, стандарт предусматривает механизм “fat channel intolerant”, цель которого состоит в том, чтобы в «вежливом» духе информировать песторонние сети IEEE 802.11n в диапазоне 2,4 ГГц, работающие в режиме HT40, что им следует перейти в режим HT20. Отметим, что этот режим в стандарте IEEE 802.11 является опциональным.

Агрегирование каналов является довольно привлекательной возможностью, поскольку увеличивается пропускная способность для клиентов, поддерживающих такую конфигурацию каналов. Однако, использование агрегированных каналов в высокоплотной сети имеет и обратный эффект в виде снижения числа доступных непересекающихся каналов, что снизит общую сетевую емкость.

Для высокоплотной сети возможность повторного использования каналов и сегментирование клиентских устройств в домены коллизий меньшего размера – это факторы гораздо большего значения, нежели теоретически высокое значение пиковой пропускной способности в расчете на клиентское устройство. Снижение числа каналов, путем увеличения их ширины – путь к снижению емкости сети.

Фактически в РФ, если рассматривать работу только в поддиапазонах UNII-1 и UNII-2, агрегирование каналов до ширины 40 МГц даст только 4 непересекающихся канала (36–40, 44–48, 52–56 и 60–64), что сведет к минимуму привлекательность диапазона 5 ГГц относительно диапазона 2,4 ГГц с позиции частотного планирования, ориентированного на пользовательскую емкость СВП. Использование же каналов шириной 80 и 160 МГц принципиально возможно, но полностью исключает возможность какого бы то ни было радиопланирования.

Следовательно, в диапазоне 5 ГГц для большинства площадок рекомендуется использование каналов шириной 20 МГц (VHT20). Использование агрегированных каналов шириной 40 МГц (VHT40) снижает их количество, что вынуждает каждую точку доступа обслуживать большее число пользователей. В общем случае предпочтительнее иметь 50 пользователей в каждом из двух каналов VHT20, чем 100 пользователей в одном канале VHT40. Плюс ко всему не все из абонентских устройств используют все возможности каналов VHT40 из-за слабой вычислительной мощности.

Другим недостатком агрегированных каналов является более высокие требования к ОСШ – в случае каналов 40 МГц – на 3 дБ, а для каналов 80 МГц – на 6 дБ<sup>17</sup>.

Основным преимуществом каналов VHT40 является потенциальная возможность пользователей в пике использовать максимальные скорости передачи. Однако в сети высокой плотности при заведомо высоком числе пользователей, на уровне исходных данных высокие пиковые скорости в расчете на одного пользователя не рассматриваются. Таким образом предпочтение должно быть отдано каналам VHT20 с целью поддержки максимального числа пользователей.

Тем не менее, в случае средней плотности клиентов и более высоких требований к скоростям, возможно применение каналов шириной 40 МГц<sup>18</sup>.

### **Специфика нововведений 802.11ac**

Здесь рассмотрим по порядку наиболее важные для СВП нововведения стандарта 802.11ac:

- Расширенная поддержка DFS имеет больше теоретическое значение, поскольку расширяет доступное число каналов. На практике – данный участок диапазона в РФ доступен очень ограниченно.
- Больше вычислительных ресурсов на точках доступа является несомненным достоинством, поскольку сети высокой плотности серьезно задействуют процессор и память на точках доступа.
- Поэтапный переход клиентов на поддержку двух пространственно-временных потоков теоретически является преимуществом, поскольку позволит более оперативно обрабатывать пиковые нагрузки и быстрее освобождать временной ресурс канала.
  - TxBF. Улучшает ОСШ в обоих направлениях, улучшает CSI<sup>19</sup>.
  - MU-MIMO является крайне актуальным для СВП нововведением, поскольку позволяет точке доступа работать с несколькими клиентами одновременно.

Вместе с тем, важные для традиционных сетей преимущества стандарта 802.11ac на практике не имеют эффекта в СВП:

- Агрегирование каналов до полос шириной 80 и 160 МГц фактически не оправдывается. Выше рассматривались вопросы агрегирования каналов

<sup>17</sup> 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.

<sup>18</sup> Meru Networks Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. 2012.

<sup>19</sup> Huawei WLAN MIMO Technical Whitepaper. 2012.

до полосы в 40 МГц. Применение еще более широких полос – является еще менее осмысленным.

- Введение модуляции 256-QAM не имеет реального значения, поскольку рабочие расстояния передачи в данном режиме ограничены единицами метров, в то время как на практике даже в ячейке минимального размера это условие выполняется довольно редко. Наличие, теоретически до 8 пространственных потоков, также не играет существенной роли в СВП. В обозримом будущем клиенты ограничены двумя пространственными потоками.

- Агрегирование кадров (A-MSDU и A-MPDU) имеет минимальный эффект, поскольку в большинстве случаев, в зонах высокой плотности покрытия, поток кадров имеет «взрывной» характер и небольшой размер отдельного кадра.

Помимо этого, в стандарте 802.11ac невозможно использование устаревших режимов аутентификации WEP и TKIP<sup>20</sup>. Более детальный обзор возможностей стандарта 802.11ac приведен в Aruba 802.11ac<sup>21</sup> и Cisco Systems. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi<sup>22</sup>.

### Влияние MIMO

MIMO использует SDM (*Spatial Division Multiplexing* – мультиплексирование при пространственном разделении) для передачи не просто одной и той же последовательности данных, а для передачи множественных последовательностей, которые при приеме будут объединены в один общий сегмент данных.

В документе Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums<sup>23</sup> показано, что при условии поддержки на стороне клиентского устройства, увеличение числа пространственных потоков пропорционально увеличивает пропускную способность. Необходимо отметить, что данный эффект не меняется в широком диапазоне как числа клиентских устройств, так и сетевой нагрузки. Это особенно важно, поскольку многие преимущества стандарта 802.11ac второй волны сильнее всего зависят от того насколько оправдаются надежды, возлагаемые на технологию MIMO.

Но есть и обратная сторона. Применение MIMO для СВП не несет однозначной выгоды. Радиомодули с поддержкой MIMO разработаны специально для работы в условиях множественных переотражений сигнала, и в целом они прекрасно справляются с задачей. Однако, в сетях СВП проектировщик чаще всего стремится избежать эффектов переотражений, в особенности, если речь идет о больших открытых пространствах с точно подобранными внешними антеннами.

Большее число антенн на точке доступа предоставляет больше возможностей по приему сигнала на больших расстояниях (из-за улучшенных возможностей MRC), в то время как большее число пространственных потоков дает большую пропускную способность. Вместе с тем существует ряд препятствий широкому распространению множественных пространственных потоков.

<sup>20</sup> 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.

<sup>21</sup> Aruba 802.11ac In-depth White paper. 2014.

<sup>22</sup> Cisco Systems. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. Technical White paper. 2014.

<sup>23</sup> Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. VRD. 2010.

Так, несмотря на заметный эффект, масштабируемость этой технологии пока ограничена. Выигрыш в емкости имеет место только для тех клиентов, которые поддерживают три пространственных потока. В то же время эффект с точки зрения покрытия заметен сразу, в основном за счет более производительных процессоров, используемых этими точками доступа, которые позволяют более эффективно демодулировать слабый сигнал.

Однако, самая большая проблема на данный момент – отсутствие широкой фактической поддержки MIMO на клиентских устройствах. Тому есть три основные причины:

- стоимость чипсетов, поддерживающих MIMO;
- низкая потребность пользователей в высоких скоростях;
- ограниченность работы от батареи, ввиду высокого энергопотребления процессоров в этих режимах<sup>24</sup>.

В сетях 802.11n и 802.11ac первой волны MIMO может быть использовано для работы только с одним пользователем в каждый конкретный момент времени. Стандарт 802.11ac второй волны улучшает эту ситуацию, поскольку вводится принцип MU MIMO – Multi User MIMO. Эта технология, представляющая собой пример SDMA, дает возможность точке доступа с 802.11ac передавать два пространственных потока (или более, в зависимости от количества доступных) к двум или более клиентским устройствам одновременно. Таким образом, возможности по повышению емкости сети WHD теоретически увеличиваются. Важно отметить, для работы MU-MIMO, во-первых, необходима поддержка на стороне клиентских устройств, и во-вторых имеются ограничения на относительное расположение клиентских устройств относительно ТД. В стандарте 802.11ac wave 2 поддерживается передача данных 4 клиентам одновременно в нисходящем потоке (и только в нем), хотя производители чипов утверждают, что производительность при MU-MIMO в расчете на трех одновременных клиентов более оптимальна<sup>25</sup>.

Преимущества подхода MU-MIMO (для поддерживающих его клиентов) для задач WHD очевидны:

- снижение времени ожидания передачи,
  - более эффективное использование временного и спектрального ресурса.
- И как следствие:
- более высокие скорости передачи данных,
  - повышенная емкость сети,
  - повышенная эффективность работы дешевых клиентов (например, две антенны вместо трех),
  - и косвенно: лучшая работа клиентов старых версий стандарта 802.11.

Важно помнить, что MU-MIMO работает только в диапазоне 5 ГГц и дополнительно усложняет логику работы ТД необходимостью планировать использование временного ресурса с учетом потребностей клиентов SU/MU-MIMO.

Кроме того MU-MIMO ограничивается в фактическом применении пространственным положением клиентов, поскольку для одновременной передачи нескольким клиентам, они должны геометрически находиться в различных направлениях по отношению к ТД.

<sup>24</sup> Juniper Networks. Coverage or Capacity – making the best use of 802.11n. 2011.

<sup>25</sup> Strategy Analytics. 802.11ac Wave 2 with MU-MIMO: The Next Mainstream Wi-Fi Standard. 2015.

## Выводы

1) В работе рассмотрены вопросы частотно-территориального планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей, проведен анализ основных параметров модели радиопокрытия.

2) Показаны доступные в актуальных версиях стандарта IEEE 802.11 возможности по организации частотных каналов, проанализированы возможности применения каналов различной ширины в задачах сетей высокой плотности.

3) Проанализированы нововведения последнего принятого дополнения стандарта IEEE 802.11ac, к решению задач построения СВП.

4) Проведен анализ технологии MIMO и MU-MIMO в свете задач 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. Von Nagy A. Visualizing How Wi-Fi SNR Helps Determine the Achievable MCS Data Rate. URL: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2014/08/visualizing-how-wi-fi-snr-helps.html>

3. Parsons K. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations. Part 6: Data Rate. URL: <https://www.ekahau.com/blog/2015/06/22/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-6-data-rate/>

4. Викулов А. С., Парамонов А. И. Исследование клиентского состава в сети беспроводного доступа // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. 2017. Т. 2. С. 136–139.

5. Викулов А. С., Парамонов А. И. Стандарт IEEE 802.11ax и перспективы его применения для интернета вещей // 2-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет Вещей и 5G». 2016. С. 38–41.

## 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. Von Nagy A. Visualizing How Wi-Fi SNR Helps Determine the Achievable MCS Data Rate. URL: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2014/08/visualizing-how-wi-fi-snr-helps.html>

3. Parsons K. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations. Part 6: Data Rate. URL: <https://www.ekahau.com/blog/2015/06/22/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-6-data-rate/>

4. Vikulov A., Paramonov A. WLAN Client Diversity Analysis // 6th International Conference on Advanced Infotelecommunication (ICAIT). 2017. Vol. 2. PP. 136–139.

5. Vikulov A., Paramonov A. The Overview of Main IEEE 802.11ax Novations // II International Conference on the Internet of Things and Its Enablers "IoT and 5G". 2016. PP. 38–41.

**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