Wi-Fi на стероидах - 802.11ad

Введение

802.11ad – это очередная версия Wi-Fi, работающая в диапазоне 60 ГГц. Картина распределения спектра в диапазоне 2.4 и 5 ГГц давно знакома многим пользователям, но выделенный частотный план для 60-гигагерцового диапазона может показаться кому-то новым и удивительным. На рисунке 1 показано распределение спектра, выделенного для работы этого стандарта в разных странах.

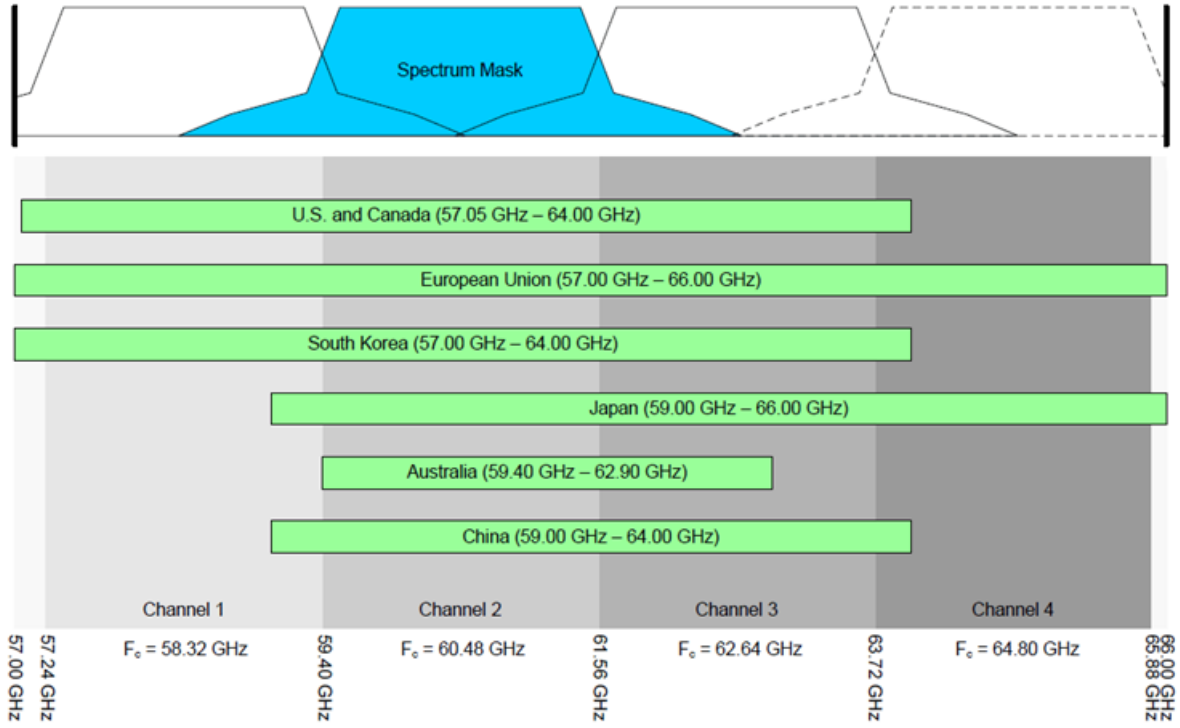

Рисунок 1

Диапазон также, как и 2.4 и 5 ГГц нелицензируемый, то есть для эксплуатации в нём оборудования не требуется получать разрешения в специализированных организациях. Для работы в этом диапазоне выделено четыре канала, каждый из которых имеет полосу пропускания в целых 2,16 ГГц. Для сравнения – это в 54 раза больше, чем объединённые в 40 МГц каналы, доступные на оборудовании 802.11n.

Технические решения в 802.11ad

Модуляция и кодирование. В "11ad" определено два метода модуляции: SC – Single Carrier, и OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing. OFDM используется для связи на больших расстояниях и соответственно при больших задержках при распространении сигнала, как ни странно, но именно при таких условиях OFDM проявляет себя наилучшим образом. OFDM реализуется совместно с SQPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляцией, при этом максимально достижимая скорость передачи данных на физическом уровне (PHY) составляет 6,756 Гбит/сек. SC модуляция рассчитана на работу с устройствами, имеющими небольшой форм-фактор и сравнительно низкий уровень потребления энергии. К такому типу устройств относятся, например, обычные сотовые телефоны и планшеты. SC использует p/2-B/SK, p/2-QPSK, and p/2-16-QAM модуляцию. Несмотря на это максимальная скорость передачи данных – до 4,620 Гбит/сек на физическом уровне. В этом стандарте используется LDPC кодер со скоростью кодирования 1/2, 5/8, 3/4 и 13/16.

Мультигигабитные скорости передачи данных на физическом уровне в стандарте 802.11ad достигаются благодаря использованию очень широкого спектра (порядка 2-х ГГц) с простыми схемами модуляции, такими как BPSK и QPSK. В то время как в стандарте 802.11ac используются технологии модуляции с куда большим уплотнением бит на символ (256-QAM), а также используется до восьми потоков одновременно передаваемых данных. Это приводит к тому, что скорость получатся значительно ниже, так как максимальная ширина канала составляет 160 МГц (с объединением до восьми каналов).

В таблице 1 приведены схемы модуляции и кодирования (Modulation and Coding Schemes - MCS), используемые в стандартах 802.11n/ac/ad для достижения мультимегабитных и мультигигабитных скоростей. Данные в таблице позволяют сравнить скорости передачи разных стандартов методы модуляции и кодирования, благодаря которым происходит достижение этих скоростей. Обратим

внимание на то, что в 11n и 11ac используется длинный защитный интервал в 800 нс между передачей двух символов, возможна даже работа с коротким защитным интервалом в 400 нс. В то время как защитный интервал в 802.11ad составляет всего 48,4 нс.

Таблица 1

Модуляция	Скор. кодирования	Чувствительность приемника (dBm)					EVM (dB)
		20 МГц (ширина канала)	40 МГц (ширина канала)	80 МГц (ширина канала)	160 МГц (ширина канала)	2.16 ГГц (ширина канала)	
BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73	-	-5
QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68	-	-13
16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61	-	-19
64-QAM	5/6	-64	-61	-60	-57	-	-27
256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48	-	-32
p/2-BPSK	1/2	-	-	-	-	-78	-6
p/2-BPSK	3/4	-	-	-	-	-64	-10
p/2-QPSK	3/4	-	-	-	-	-59	-13
p/2 16-QAM	3/4	-	-	-	-	-53	-21
64-QAM	13/16	-	-	-	-	-47	-26
Стандарт/ Скорости		802.11n/ 6.5-600 Мбит/сек				802.11ad/ 385-6700 Мбит/сек	
		802.11ac/ 6.5– 6933 Мбит/сек					

**EVM – Error vector Magnitude – физическая величина, характеризующая чувствительность приемника. Более высокая чувствительность приема означает, что более высокий уровень сигнала (или SNR) необходим для обнаружения. Более низкое значение EVM означает, что ошибки системы, например возникающие из-за фазового шума и нелинейные искажения должны контролироваться более точно.*

Данные в таблице 1 приведены для стандартов n и ac, использующих длинный защитный интервал. С использованием короткого интервала скорость передачи данных, естественно, увеличится, например для 802.11n максимальная скорость увеличится с 540 Мбит/сек до 600 Мбит/сек и для 802.11ac – с 6,240 Гбит/сек до 6,933 Гбит/сек.

Для стандарта 802.11n скорость передачи данных на физическом уровне может лежать в диапазоне от 6.5 до 600 Мбит/сек благодаря различным комбинациям схем модуляции, скорости кодирования, увеличению ширины канала, в зависимости от защитного интервала и количества пространственных потоков. В 802.11ac скорость передачи данных также начинается с 6.5, но заканчивается 6.933 Гбит/сек.

Если сравнивать 802.11ac с модуляцией QAM-256 и 802.11n с модуляцией 64-QAM, и при этом оба этих стандарта используют защитный интервал в 800 нс, ширину канала в 40 МГц и 4 пространственных потока (MIMO 4x4), то скорость передачи данных в "ac" составит 720 Мбит/сек, а в "n" – 540 Мбит/сек. Таким образом, 256 QAM модуляция дает прирост в скорости передачи на 33 процента по сравнению с 64 QAM.

Для 802.11ad скорость передачи PHY начинается со значения 385 Мбит/сек и заканчивается

значением в 6.7 Гбит/сек, это достигается комбинацией схемы модуляции и кодера. Для BPSK модуляции такая PHY скорость достигается благодаря использованию широкого канала в 2.16 ГГц, что по сравнению со стандартной шириной канала в 20 ГГц дает 58-кратное увеличение пропускной способности канала. И так как 11ad это первый стандарт Wi-Fi, работающий в диапазоне 60 ГГц, то обратная совместимость с ранее выпущенными стандартами не предусмотрена.

Beamforming - технология адаптивного формирования диаграммы направленности. Несмотря на то, что идея не новая, не сказать о ней в этом стандарте просто нельзя, ведь с ростом частоты радиосигнала beamforming становится неотъемлемой, так как на частотах в десятки гигагерц сигнал затухает очень быстро и не так хорошо может огибать препятствия. Таким образом, если приёмник и передатчик находятся не на прямой видимости, то вероятность получения пакета сильно уменьшается. Поэтому для повышения мощности радиосигнала в приёмнике, антенна разворачивается на источник сигнала. В основном beamfirming реализуется на фазированных антенных решетках, в которых форма диаграммы направленности задаются путём регулировки амплитудного и фазового распределения токов на элементах решётки, таким образом сосредотачивая мощность сигнала в нужном направлении.

Устройства 802.11ad

Сложности реализации устройств 802.11ad и их энергопотребление, сравнение с 11ac. Как ни странно, но 802.11ad устройства более просты в изготовлении по сравнению с теми же 802.11ac из-за более простой схемы модуляции и благодаря тому, что используется только 1 пространственный поток (то есть системы SISO взамен нашумевшей MIMO). Для сравнения, чтобы реализовать несколько независимых потоков данных в 802.11ac потребуется несколько радиочастотных цепей и несколько схем модуляции – это естественным образом приводит к удорожанию и усложнению оборудования. На практике же, для лучшей работы радиолинии количество приемных и передающих цепей может быть больше, чем число пространственных потоков, то есть составлять N – число независимых и отдельно закодированных сигналов передатчика или приемника. Это, в свою очередь, подразумевает N-кратное увеличение мощности при работе передающего устройства, схемы обработки сигнала и устройства в целом. Несмотря на то, что в современных беспроводных устройствах применяется интеллектуальное управление электропитанием цепей RX и TX, система MIMO все равно потребляет не менее чем в N раз больше энергии по сравнению с одиночной цепью RX. Кроме того, мощность обработки, которую требуется добавить для формирования MIMO-потока должен быть добавлен в общий бюджет мощности.

Форм-фактор устройств 802.11ad. В многоантенных системах MIMO соседние антенны должны быть разнесены на минимальное расстояние, приблизительно равное половине длины волны – это 27 мм для Wi-Fi, работающего на базе стандарта 802.11ac. Это условие необходимо для уменьшения взаимного валяния между антеннами и для успешного детектирования пространственных потоков. Для таких технических решений и устройств, в которых относительные размеры имеют существенное значение, это требование может стать ограничивающим фактором. Приходится уменьшать число антенн и, следовательно, число потоков. Это, в свою очередь, приводит к снижению максимальной скорости передачи данных.

В диапазоне 60 ГГц длина волны несущей составляет всего 5 мм, соответственно, относительно высокие коэффициенты усиления антенной системы могут быть реализованы в небольших размерах. Например, печатная антенная решётка с коэффициентом усиления в 13dB, выполненная на подложке с диэлектрической проницаемостью 2.2, имеет размеры всего 5x6 мм (ссылка на источник [1]). Таким образом, вместо того чтобы использовать дипольные антенны с коэффициентом усиления в 2 dBi (как в 802.11ac), компактную 60-гигагерцовую антенну можно установить на каждом конце линии связи, чтобы компенсировать дополнительные потери на трассе. Не смотря на преимущества в скорости работы технологии 802.11ad и малогабаритных размеров устройств, отдельно следует отметить ее стоимость. Для изготовления Wi-Fi радиомодулей используется технология CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) в РФ известная как КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник). В диапазонах 2.4/5 ГГц приемопередатчики могут быть синтезированы с помощью традиционной КМОП-технологии, в то время как в диапазоне 60 ГГц нужны очень современные КМОП технологии (65 нм, 40 нм и пр.). На сегодняшний день Технология КМОП 40 нм остается довольно дорогостоящей, что в свою очередь сказывается на увеличении стоимости устройств 802.11ad.

Заключение

С учётом всего, о чём было написано выше, отметим, для каких технических решений нам может пригодиться технология 802.11ad, а для каких можно использовать 802.11ac. Перед тем как ответить на этот вопрос, давайте получим более полное представление о том, на какое расстояние распространяются волны на частоте 5 ГГц и 60 ГГц. Естественно, что в 60-гигагерцовом диапазоне

радиосигналы очень подвержены затуханию при распространении в атмосфере, нежели 5-гиггерцовые частоты. Если сравнивать 60 и 5 ГГц количественно, то можно отметить, что затухания в свободном пространстве для диапазона 60 ГГц будут в 21 раз больше чем потери для 5 ГГц. То есть при распространении на 1 метр затухание сигнала 5 ГГц составит 47 дБ, тогда как для 60 ГГц оно будет равно 68 дБ. Существует общее правило, согласно которому потери сигнала на каждые 6 дБ в половину снижают дальность распространения радиосигнала в свободном пространстве. Кроме того, наличие препятствий на пути распространения такого высокочастотного сигнала также оказывают существенное воздействие на его уровень. В источнике [2] указано, что наличие человека на пути сигнала на такой частоте может привести к потерям в диапазоне от 20 до 40 дБ.

Таким образом, можно сделать вывод, что технологии 802.11ad в большей степени подходят для реализации радиосвязи на прямой видимости в масштабах одного помещения с малым радиусом действия, но в то же время с высокой пропускной способностью для организации мультимедийных услуг и для передачи больших объёмов данных. Устройства стандарта IEEE 802.11ad позиционируются как беспроводные девайсы с малым форм-фактором и низким энергопотреблением с гигабитным радиоинтерфейсом. Wi-Fi-оборудование этого диапазона имеет высокий коэффициент усиления и за счёт малых размеров может быть использовано в качестве связующих устройств на небольших сетях.

Литература

[1] B. Biglarbegian et al., "Optimized Microstrip Antenna Arrays for Emerging Millimeter-Wave Wireless Applications," IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. 59, no. 5, 2011, pp. 1742–47.

[2] M. Fakharzadeh et al., "CMOS Phased Array Transceiver Technology for 60 GHz Wireless Applications," IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. 58, no. 4, 2010, pp. 560–73.