

# 802.11ax 技术白皮书(Draft)



# 目 录

1 概述	1
1.1 产生背景	1
1.2 技术优点	1
2 关键技术介绍	2
2.1 更高的速率	2
2.2 OFDMA 技术	5
2.2.1 OFDMA 与非 OFDMA 对比	7
2.2.2 上行 MU OFDMA	8
2.3 上下行 MU-MIMO	9
2.4 空间复用 (Spatial Reuse)	10
2.5 Target Wake Times	12
3 总结	12
3.1 更适合高密场景	12
3.2 更可靠的室外传输	12
3.3 更高的节电效率	12
4 缩略语	13

# 1 概述

## 1.1 产生背景

回顾整个 802.11 协议标准的发展历程，每一代新的协议都在传输速率和数据吞吐率方面有着较大的提升，尤其是演进到 802.11ac 协议后，无线网络带宽与有线差距越来越小，基本可以满足大部分应用的需求。然而，尽管 802.11ac 协议中的理论速率已经高达 6.9Gbps，但这只是实验室环境下测出来的理论值。在实际应用场景中，常常是多个无线终端共享同一个无线空口信道，这样无线空口就会长期处于忙碌状态。同时，由于实际的业务报文大部分都很少有机会会聚合成较大规模的链路层聚合报文，因此实际能达到的有效带宽也会远远低于上述理论值，且并发用户数越多，实际的有效吞吐率就会越差。

## 1.2 技术优点

802.11ax 的关键字是高效率无线标准（HEW，High-Efficiency Wireless），该协议通过对物理层和链路层的优化实现了多用户并发效率的改进，解决了有效吞吐率低的问题，其最终目标是支持室内室外场景、提高频谱效率和密集用户环境下 4 倍实际吞吐量的提升。

表1-1 11ax 与 11ac 协议主要参数对比

参数描述	802.11ac	802.11ax
频段	5G	5G和2.4G
信道带宽	20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz, 80+80MHz	20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz, 80+80MHz
调制方式	OFDM, 最高支持256-QAM	OFDMA, 最高支持1024-QAM
子载波数	64 (20MHz带宽)	256 (20MHz带宽)
帧保护间隔	400ns, 800ns	800ns, 1600ns, 3200ns
最大速率	6.9Gbps (目前产品1.7Gbps)	9.6Gbps (目前产品4.8Gbps)
最大聚合长度	1048575字节	4194303字节
空间复用技术	不支持	支持
OFDMA技术	不支持	支持
MU-MIMO	只支持下行	下行、上行都支持
TWT技术	不支持	支持

为了实现上述惊人的性能提升，802.11ax 引进或者改进了多项新技术，例如更高的调制阶数（1024QAM）、上下行 OFDMA 技术、上下行 MU-MIMO 技术（其中下行 MU-MIMO 在 802.11ac 时引入）、空间复用技术等。

- 更高阶的调制技术（1024-QAM）：最高速率可达 9.6Gbps（160MHz 带宽，8 条流）。

- OFDMA 正交频分多址接入：增加全新的 OFDMA 机制，上下行都可支持，减少多用户之间退避导致的延时，提高多用户并发的效率。
- 上下行 MU-MIMO：在 802.11ac 协议的基础上，新支持上行 MU-MIMO 功能，可以和 OFDMA 技术共用，进一步提升多用户并发效率。
- 空间复用（SR）&BSS Color 着色机制：802.11ax 通过 BSS Color 着色机制实现空间重用，达到信道资源的共享利用，提高信道整体的使用效率。
- Target Wake Times：通过支持 AP 与 STA 协商休眠与唤醒时间，减少 STA 不必要的唤醒，达到节能的目的。

## 2 关键技术介绍

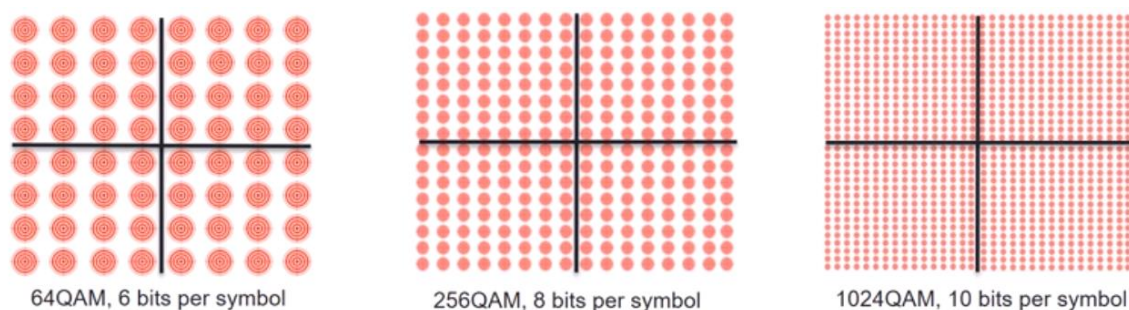
### 2.1 更高的速率

802.11ax 协议主要解决了多用户并发性能的问题，同时在速率上也比 802.11ac 有了更进一步的提升，最大理论速率可达 9.6Gbps，主要体现在以下两个方面：

#### 1. 调制方式的升级

802.11ac 协议采用最高 256-QAM 正交幅度调制，即每个符号可以传输 8bit 数据，而 802.11ax 协议采用最高 1024-QAM 正交幅度调制，即每个符号可以传输 10bit 数据， $10\text{bit}/8\text{bit}=1.25$ ，因此相对于 802.11ac 来说，802.11ax 的速率会提升 25%。

图2-1 不同调制方式星座对比图



802.11ac 协议最大理论速率为 6.9Gbps， $6.9\text{Gbps} \times 1.25 = 8.625\text{Gbps}$ ，而 802.11ax 协议最大理论速率为 9.6Gbps，那么额外的这 1Gbps 提升又来自于哪里呢，我们在下文中将给出详细的分析。

#### 2. 子载波划分方式的变化

在相同带宽、流数及编码方式的情况下，802.11ax 比 802.11ac 的理论物理速率更高，下面以 20MHz 带宽速率为例进行说明。

数据子载波（即有效载波数）的个数由 52 增加到了 234，虽然 OFDMA Symbol 变长为 4 倍，但子载波有效数据利用率更高，因此在相同带宽、流数及编码方式的情况下，速率也有所提升。

图2-2 802.11ac 20MHz 带宽 1 条流的速率表

**Table 22-30—VHT-MCSs for mandatory 20 MHz,  $N_{SS} = 1$**

VHT-MCS Index	Modulation	$R$	$N_{BPSCS}$	$N_{SD}$	$N_{SP}$	$N_{CBPS}$	$N_{DBPS}$	$N_{ES}$	Data rate (Mb/s)	
									800 ns GI	400 ns GI
0	BPSK	1/2	1	52	4	52	26	1	6.5	7.2
1	QPSK	1/2	2	52	4	104	52	1	13.0	14.4
2	QPSK	3/4	2	52	4	104	78	1	19.5	21.7
3	16-QAM	1/2	4	52	4	208	104	1	26.0	28.9
4	16-QAM	3/4	4	52	4	208	156	1	39.0	43.3
5	64-QAM	2/3	6	52	4	312	208	1	52.0	57.8
6	64-QAM	3/4	6	52	4	312	234	1	58.5	65.0
7	64-QAM	5/6	6	52	4	312	260	1	65.0	72.2
8	256-QAM	3/4	8	52	4	416	312	1	78.0	86.7
9	Not valid									

图2-3 802.11ax 20MHz 带宽 1 条流的速率表

**Table 28-71—HE-MCSs for mandatory 242-tone RU and mandatory non-OFDMA 20 MHz,  $N_{SS} = 1$**

HE-MCS Index	DCM	Modulation	R	$N_{BPCS}$	$N_{SD}$	$N_{CBPS}$	$N_{DBPS}$	Data rate (Mbps)		
								0.8 $\mu$ s GI	1.6 $\mu$ s GI	3.2 $\mu$ s GI
0	1	BPSK	1/2	1	117	117	58	4.3	4.0	3.6
	0		1/2		234	234	117	8.6	8.1	7.3
1	1	QPSK	1/2	2	117	234	117	8.6	8.1	7.3
	0		1/2		234	468	234	17.2	16.3	14.6
2	N/A		3/4		234	468	351	25.8	24.4	21.9
3	1	16-QAM	1/2	4	117	468	234	17.2	16.3	14.6
	0		1/2		234	936	468	34.4	32.5	29.3
4	1	16-QAM	3/4	4	117	468	351	25.8	24.4	21.9
	0		3/4		234	936	702	51.6	48.8	43.9
5	N/A	64-QAM	2/3	6	234	1 404	936	68.8	65.0	58.5
6			3/4				1 053	77.4	73.1	65.8
7			5/6				1 170	86.0	81.3	73.1
8		256-QAM	3/4	8			1 404	103.2	97.5	87.8
9			5/6				1 560	114.7	108.3	97.5
10		1024-QAM	3/4	10			1 755	129.0	121.9	109.7
11	5/6		2 340		195.0	143.4	135.4	121.9		

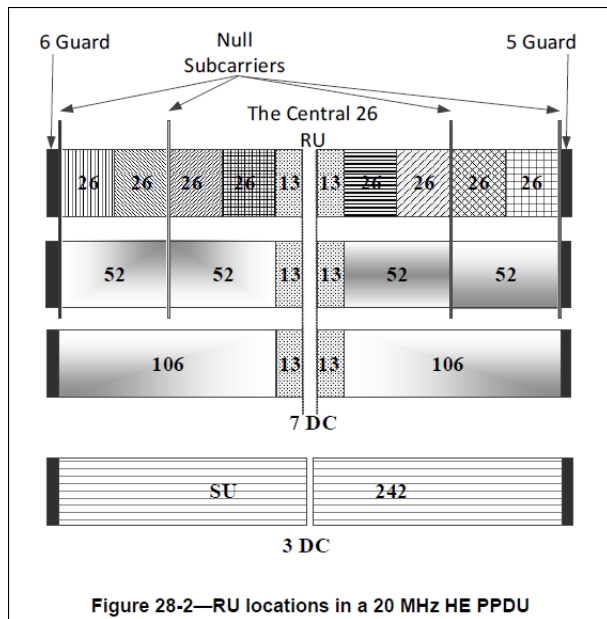
R: 编码率	$N_{BPCS}$ : 每个子载波编码bit数
$N_{SD}$ : 数据子载波的个数	$N_{SP}$ : 前导子载波的个数
$N_{CBPS}$ : 每个symbol携带的bit数	$N_{SS}$ : 流数
$N_{DBPS}$ : 每个symbol携带数据信息bit数	$N_{ES}$ : BCC编码器的个数
$N_{CBPS} = N_{BPCS} \times N_{SD} \times N_{SS}$	$N_{DBPS} = N_{CBPS} \times R$
GI: 保护间隔	

以 MCS8 为例，看看 802.11ac 和 802.11ax 在哪些方面发生了变化。

MCS8	Modulation	R	NBPCS	NSD	NCBPS	NDBPS	GI (ns)	Data Rate (Mbps)
802.11ac	256-QAM	3/4	8	52	416	312	800	78
802.11ax	256-QAM	3/4	8	234	1872	1404	800	103.2

- (1) 从表中可以看出数据子载波(即有效载波数)的个数由 52 增加到了 234，这是由于 802.11ax 的 OFDM Symbol 变为了 802.11ac 的 4 倍，因此 20MHz 带宽下子载波的个数也由 64 增加到 256，如图 2-4 所示。

图2-4 20MHz 带宽信道 RU 示意图



所以 802.11ac 的子载波有效利用率为  $52/64=0.8125$ ，而 802.11ax 是  $234/256=0.9140625$ 。因此虽然 OFDM Symbol 变长，但其子载波的有效利用率也变得更高。

- (2) 在 GI 同为 800ns 的情况下，802.11ac 每个 Symbol 的传输时间为  $(3.2+0.8)=4.0\mu s$ ，有效数据传输时间占比为  $3.2/4.0=0.8$ ，而 802.11ax 每个 Symbol 的传输时间为  $(12.8+0.8)=13.6\mu s$ ，有效数据传输时间占比为  $12.8/13.6=0.94$ 。由于 802.11ax 的 Symbol 变长，而 GI 不变的情况下，GI 所占总传输时间的比例也就减少了，有效数据传输的时间占比就会增多。

## 2.2 OFDMA技术

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, 正交频分多址接入) 是以 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用) 为基础，利用 OFDM 对信道进行父载波化后，再通过不同子载波同时为不同用户传输数据的一种多路访问技术。与 OFDM 技术不同的是，OFDMA 将同一个带宽下的所有子载波划分成若干个子载波组，每一个组被称作一个 RU (Resource Unit, 资源单元)，可以同时分配给不同的用户使用，这样就提高了用户数据速率并减少了延迟，特别适用于大量具有短帧或低数据速率要求的设备，如物联网设备。

在 OFDMA 中，一个 OFDM 信号是由多个子载波组成，这些子载波就组成了一个用户自己的带宽，每个用户可分配的 RU 大小可以是不同的。

子载波分为以下几种类型：

- Data 子载波：用来传输数据的；
- pilot 子载波：用来传输相位和轨迹参数的；
- unused 子载波：无用的载波，什么都不传输，一般用来做边界保护。

每一个 RU 里都会同时包含 data 子载波和 pilot 子载波，如最小的 26-tone RU 是由 24 个 data 子载波和 2 个子载波 pilot 组成，52-tone 的 RU 则包含 48 个 data 和 4 个 pilot 子载波，其他详细信息请

参见协议的详细介绍。如图 2-5 所示，以 20MHz 带宽为例可以看到，20MHz 带宽下共有 6 个 26-tone RU，其中 -69、-3~+3、+69 这些子载波属于空的不传输任何东西，同时在两侧还有 11 个边缘保护。

图2-5 RU Locations in a 20MHz HE PDU

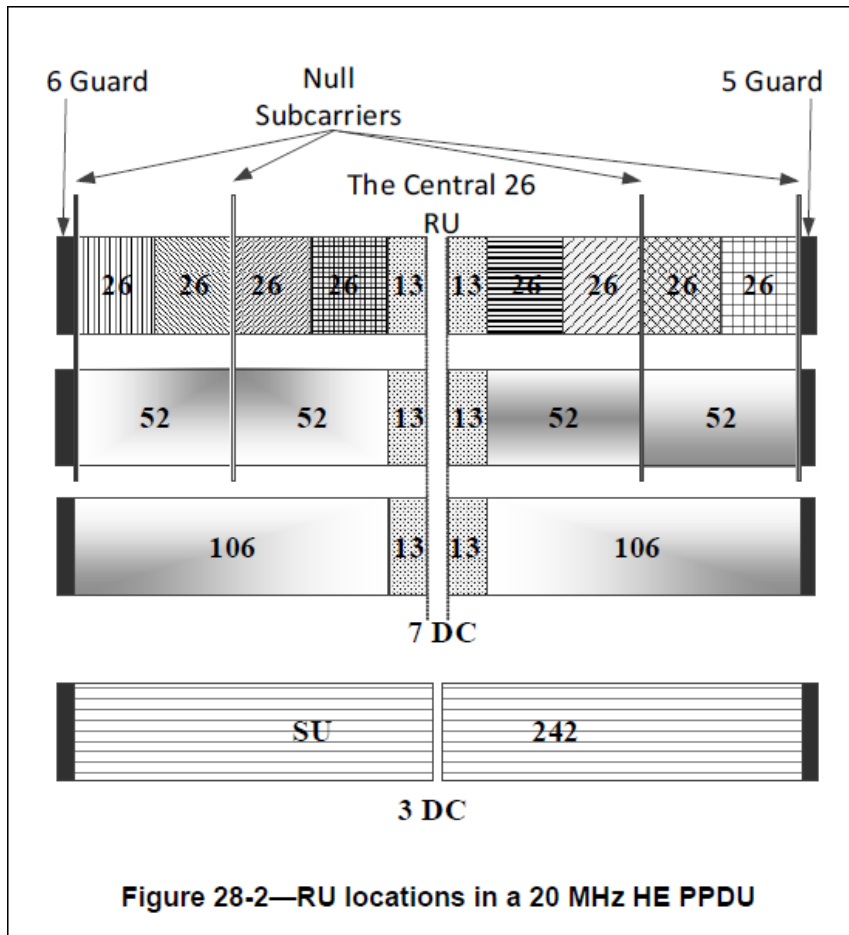


Figure 28-2—RU locations in a 20 MHz HE PDU

上下行传输都支持 26-tone RU，52-tone RU，106-tone RU，242-tone RU，484-tone RU，996-tone RU 和 2x996-tone RU。下面以 20MHz 和 40MHz 带宽为例，看一下 RU 是如何分布的。



图2-6 Subcarrier indices for RUs in a 20MHz HE PPDU

RU type					
26-tone RU	RU 1 [-121: -96]	RU 2 [-95: -70]	RU 3 [-68: -43]	RU 4 [-42: -17]	RU 5 [-16: -4, 4: 16]
	RU 6 [17: 42]	RU 7 [43: 68]	RU 8 [70: 95]	RU 9 [96: 121]	
52-tone RU	RU 1 [-121: -70]	RU 2 [-68: -17]	RU 3 [17: 68]	RU 4 [70: 121]	
106-tone RU	RU 1 [-122: -17]		RU 2 [17: 122]		
242-tone RU	RU 1 [-122: -2, 2:122]				

图2-7 Subcarrier indices for RUs in a 40MHz HE PPDU

RU type					
26-tone RU	RU 1 [-243: -218]	RU 2 [-217: -192]	RU 3 [-189: -164]	RU 4 [-163: -138]	RU 5 [-136: -111]
	RU 6 [-109: -84]	RU 7 [-83: -58]	RU 8 [-55: -30]	RU 9 [-29: -4]	
	RU 10 [4: 29]	RU 11 [30: 55]	RU 12 [58: 83]	RU 13 [84: 109]	RU 14 [111: 136]
	RU 15 [138: 163]	RU 16 [164: 189]	RU 17 [192: 217]	RU 18 [218: 243]	
52-tone RU	RU 1 [-243: -192]	RU 2 [-189: -138]	RU 3 [-109: -58]	RU 4 [-55: -4]	
	RU 5 [4: 55]	RU 6 [58: 109]	RU 7 [138: 189]	RU 8 [192: 243]	
106-tone RU	RU 1 [-243: -138]	RU 2 [-109: -4]	RU 3 [4: 109]	RU 4 [138: 243]	
242-tone RU	RU 1 [-244: -3]		RU2 [3: 244]		
484-tone RU	RU 1 [-244: -3, 3: 244]				

通过上图不难看出，不同带宽下对 RU 边界的划分是不同的，20MHz 带宽下的 26-tone 和 40MHz 带宽下的 26-tone 边界并不是对齐的，所以如果两种带宽下混合使用会出现信号能量重叠的问题，为了改善这种情况，一些和其他带宽下有冲突的 20MHz 带宽下的 RU 在 40、80、160 和 80+80 下不可以使用，例如 26-tone RU 在 40MHz 带宽下，RU5 和 RU14 不可以使用。

## 2.2.1 下行 OFDMA 技术

通过对比图来更加直观的看一下 OFDMA 与非 OFDMA 的不同。

图2-8 非 OFDMA 方式下行多用户交互时序图

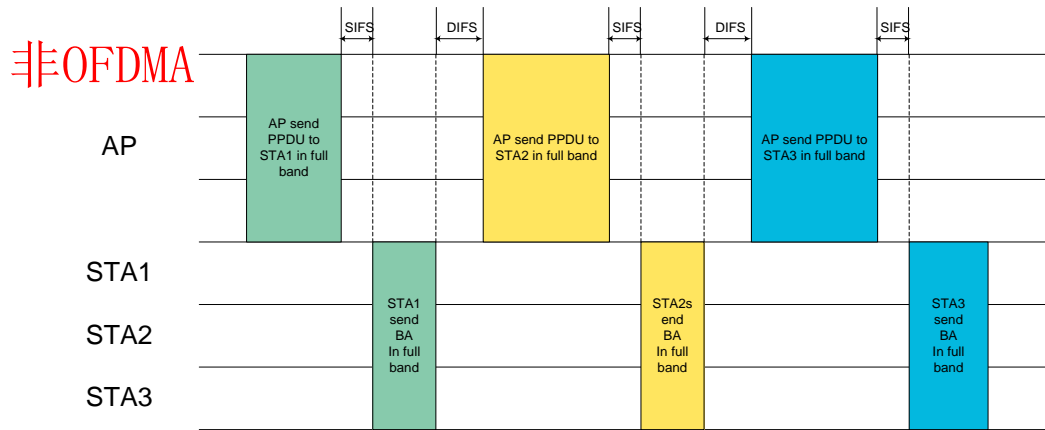
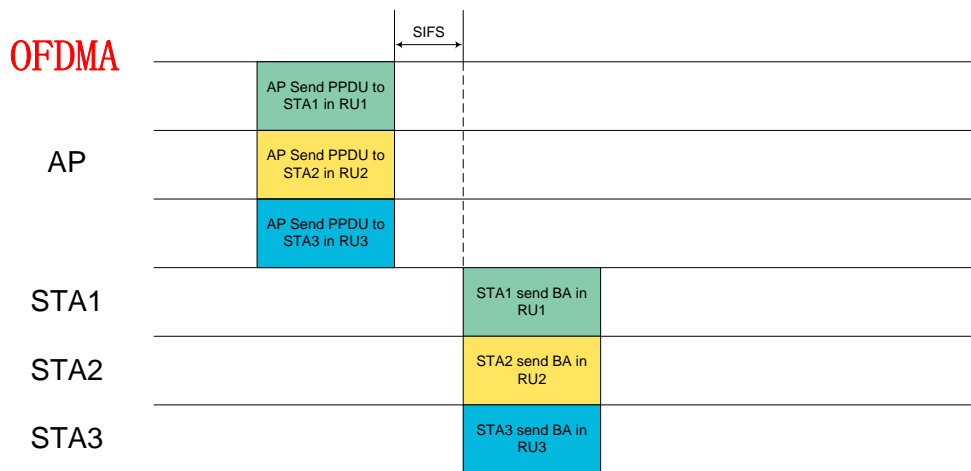


图2-9 OFDMA 下行多用户交互时序图



通过上述过程可以看到，在同样的带宽下，使用 OFDMA 方式的情况下，AP 可以在一次 TXOP（发送机会）中，同时使用不同的 RU 向多个用户传输报文，而使用 OFDM 方式则需要 3 次。

## 2.2.2 上行 OFDMA 技术

通过下面的时序图再来了解一下上行 MU OFDMA 过程。

- (1) STA 不会主动发一个 HE trigger-based PPDU，AP 通过发送 Trigger frame 来发起一次 UL MU 交互。
- (2) 在一个 SIFS 时间之后，STA 根据 Trigger frame 中指定的方式发送 HE trigger-based PPDU；
- (3) AP 对接收到的 PPDU 在一个 SIFS 时间之后（忽略当前媒介 busy/idle 状态），回复 BA 报文进行结果确认，可以通过在每一个 RU 内向各个 STA 发送单独的 BA，也可以使用 Multi-STA BA 一起回复。

图2-10 上行 MU OFDMA 多用户交互时序图 1

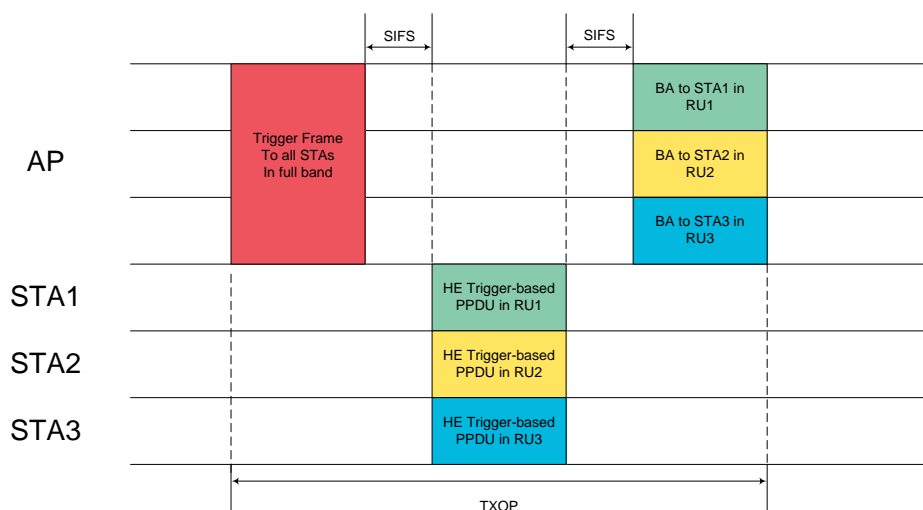
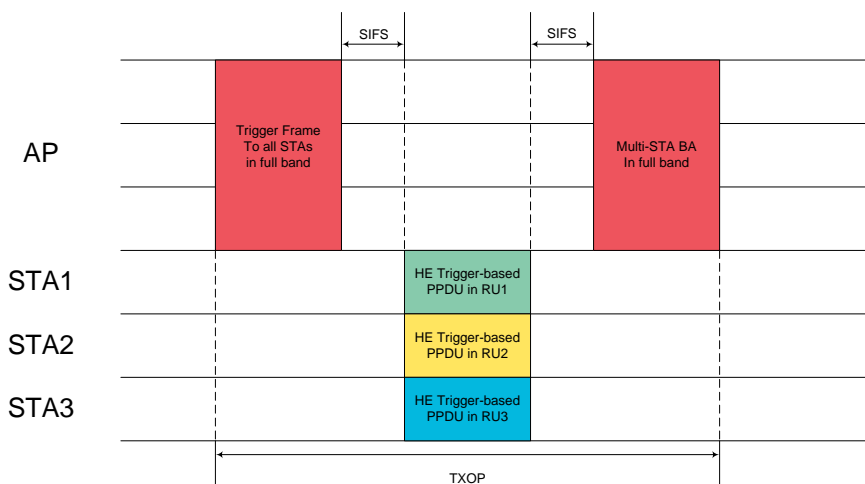


图2-11 上行 MU OFDMA 多用户交互时序图 2



通过上述流程对比可以看出，在多用户并发的时候使用 OFDMA 的方式，大大减少了多用户竞争退避导致的空口延时，增加了空口效率。

## 2.3 MU-MIMO技术

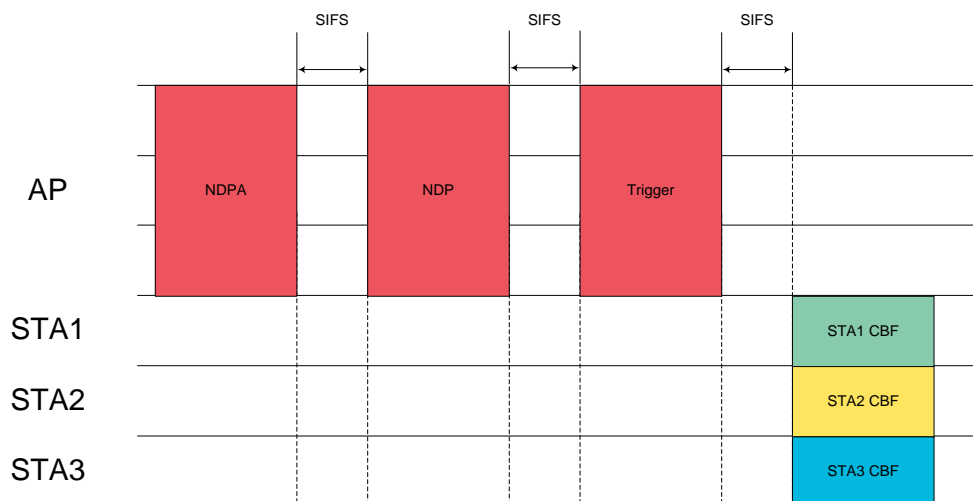
在 802.11ac 协议中只支持下行 MU-MIMO，实现了对多用户下行并发场景性能的提升，而 802.11ax 协议在支持下行 MU-MIMO 的基础上又新增支持了上行 MU-MIMO，并且 MU-MIMO 与 OFDMA 技术一起使用，可以使多用户并发性能进一步得到提升。

### 2.3.1 下行 MU-MIMO 技术

下行 MU-MIMO 的工作方式与 802.11ac 大致相同，不同点是 802.11ax 允许同时使用 OFDMA 和 MU-MIMO 技术。在信道评估阶段，使用 OFDMA 机制中的 trigger 方式来完成 AP 收集各 STA 的信

道 CBF (Compressed Beamforming Feedback, 压缩波束成形反馈信息) 信息, 进行信道质量评估, 交互过程如图 2-12 所示。与 802.11ac 最大的不同就是使用 OFDMA 在一次发送机会内将多个 STA 的 CBF 信息全部收集到, 收集完 CBF 信息之后, 后续的数据报文交互阶段与 802.11ac 类似。

图2-12 MU OFDMA 方式信道评估交互时序图



### 2.3.2 上行 MU-MIMO 技术

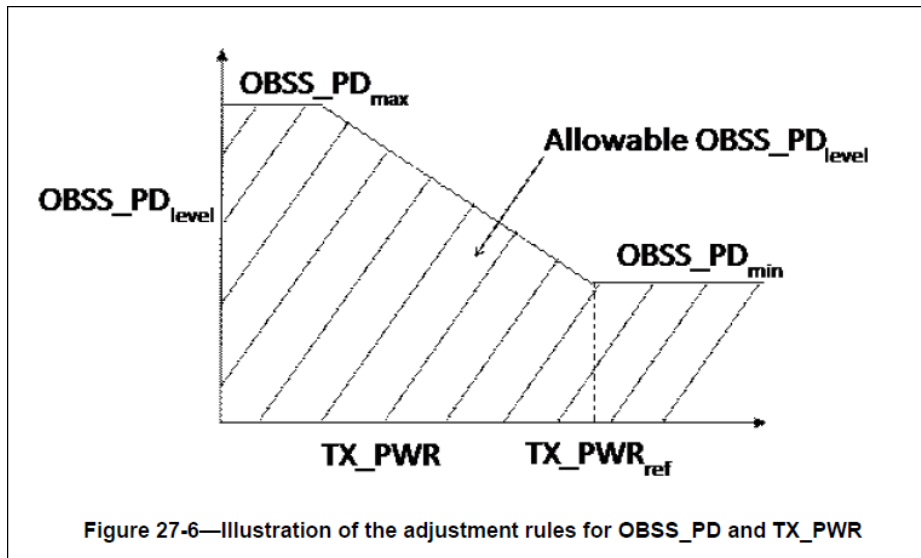
上行 MU-MIMO 收集完 CBF 信息之后, 会通过一个 trigger 报文来发起上行 MU-MIMO, 后续与上行 MU OFDMA 方式类似, 如图 2-10 和图 2-11 所示。

## 2.4 空间复用 (Spatial Reuse)

OBSS(Overlapping Basic Service Sets)\_PD-based spatial reuse, 这是一个空间重用的技术, 通过识别非关联 BSS 报文同时控制调整发射功率, 来解决同信道干扰问题, 以达到空间重用的效果。

802.11ax 协议在物理头 HE-SIG-A 中加入了一个 BSS Color 信息, 取值范围为 1~63, BSS color 是用来协助 STA 辨别接收到 PPDU 的 BSS 信息。如果 HE STA 接收到的 PPDU 中的 BSS\_COLOR 与关联 AP 的 BSS Color 相同, 对于 STA 来说该 BSS 是一个 Intra-BSS, 否则是 Inter-BSS。当 BSS\_COLOR 相同时, 则以 MAC address 判断 (此处可以看出 BSS Color 是要优于 MAC address 判断的)。对于 STA 来说, 实际上只需要接收 intra-BSS 的报文, 而忽略 inter-BSS 的报文, 通过调整 OBSS\_PD level 以及发送功率可以提升当前信道的整体吞吐以及空间复用, 如图 2-13 所示。

图2-13 信道复用 OBSS\_PD 级别及功率调整示意图

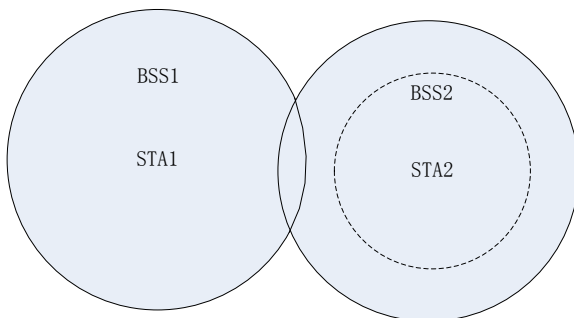


下面以 20MHz 带宽为例，说明一下各参数的含义及其取值，更高的带宽只是在数值上会有差异，原理是相同的。

- (1) OBSS\_PD level 定义的是一个接收到报文所携带功率的一个级别，  
OBSS\_PDmin\_default=82 dBm，OBSS\_PDmax\_default=62 dBm.
- (2) TX\_PWR 是 STA 发送时需要使用的功率值。TXPWRef=21 dBm
- (3) 当 STA 选定一个 OBSS\_PD level 之后，STA 发送报文的功率需要调整到低于使用该 OBSS\_PD level 算出来的 TX\_PWR。

所以，对于 STA 来讲，来自 Inter-BSS 的 PPDU 是并不需要去处理的，当接收到来自 Inter-BSS 的报文 RSSI 值低于 OBSS\_PD Level 的最大值，则 STA 可以完全忽略该报文，并且将自己的发送功率调整至合适的值，那么就可以达到空间复用了。在使用空间复用技术时的时候，每个报文都需要计算保留两个 NAV，分别是 inter-bss 与 intra-bss 的。

图2-14 空间复用技术示意图：



如图 2-14 所示，实线圈表示各 STA 无线信号发射可以达到的范围，STA2 在 BSS2 上线，对于 STA2 来说来自 BSS1 的报文并不需要关心，但由于双方信号有交集，在发报文的时候彼此之间都会产生退避行为，造成不必要的浪费。因此当 STA2 将功率调低至虚线圈的覆盖范围，两个 BSS 彼此之间就不存在上述问题，同时也并不影响 STA2 与 BSS2 的正常数据交互，达到空间复用的效果。

对于 STA 来讲，来自其他 BSS 的报文是并不需要去处理的，当接收到来自其他 BSS 的报文 RSSI 值低于其正常报文交互所需的最低门限值时，STA 可以完全忽略该报文，并且将自己的发送功率调整至合适的值，那么就可以完全达到信道重用了。

看了其他大部分关于 802.11ax 的介绍都把 BSS Color 和空间重用放在一起说，不免让人觉的不支持 BSS Color 空间重用就不能用了一样，但在协议里并没有这样的规定，通过 MAC 地址识别也可以实现空间重用的。

## 2.5 Target Wake Times

TWT (Target Wake Times, 目标唤醒时间) 技术，允许 AP 对 STA 的唤醒与休眠进行统一调度安排，不仅可以减少 STA 之间的冲突，更减少了 STA 不必要的唤醒次数，达到节能的目的。

在之前几代的 802.11 协议中，对于需要节能的 STA 需要每隔固定时间醒来侦听 Beacon，以确认是否需要进行报文接收，有报文接收则继续保持唤醒状态等待接收，无报文接收则继续休眠。在 802.11ax 协议中引入了 TWT 的节能机制，允许 STA 不再需要侦听 Beacon，可以与 AP 协商在特定时间唤醒以获取空口资源，这样就可以做到只有 STA 需要报文交互的时候才被唤醒。

# 3 总结

通过上述关键技术介绍我们可以看出，802.11ax 与以往的协议相比在如下场景应用中将会有更好的表现。

## 3.1 更适合高密场景

无论是 OFDMA 技术、空间重用以及更全面 MU-MIMO 功能的支持，都可以为多用户并发性能带来巨大的提升，因此 802.11ax 未来在机场、会展以及商场等高密场景中一定将会大放异彩。

## 3.2 更可靠的室外传输

802.11ax 中将子载波重新作了更小的划分，不仅能够更好的支持 OFDMA 技术，还附带获得了更高速率的效果（相同带宽、流数及编码方式下，比 802.11ac 的速率更高），同时由于相对带宽变的更窄，因此传输距离也会比 802.11ac 更远、干扰更少，再加上更大的帧间隔保护，802.11ax 在室外无线覆盖的范围、效率以及可靠性也将比 802.11ac 更加优秀。

## 3.3 更高的节电效率

TWT 技术的引入可以使客户端被唤醒的次数大大减少，同时空间重用技术中，客户端可以根据使用需求来调整自身的发射功率，不仅可以解决同信道干扰问题，也可以带来更佳的节能效果。

# 4 缩略语

表4-1 缩略语清单

缩略语	英文全名	中文解释
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址接入
HE	High Efficiency	高效率
PPDU	physical layer (PHY) protocol data unit	物理层协议数据单元
RU	Resource Unit	资源单元
OBSS	Overlapping Basic Service Sets	重叠基本服务集
SR	Spatial Reused	空间重用
TWT	Target Wake Times	目标唤醒时间