

深入探究802.11ac技术

Underneath the Hood of 802.11ac

作者：David A. Hall NI 公司

在限最新的一项市场调查中，研究人员预计：到 2015 年，每年将有超过 10 亿台 IEEE 802.11ac 无线通信设备投入使用。这是一个相当惊人的数字，特别是考虑到 802.11ac 尚未成为官方标准的前提下。所以你可能会问：“什么是 802.11ac 协议，它跟当前的 Wi-Fi 有何区别？”

如果你还记得几年前，世界上最早出现的一些 802.11n Wi-Fi 产品曾被打上“草稿 -n”的标签。这些路由器和接入节点被冠以“草稿 -n”绰号，是有其特定的原因的：官方标准尚未形成。现在，802.11n 产品已经无处不在，作为一种先进的 Wi-Fi 标准被广泛接受。然而，就如同大多 802.11g 产品已经移至 802.11n 一样，下一代的 Wi-Fi 将会基于 802.11ac 规范。

新 802.11ac 规范的初衷是考虑到更高数据吞吐量的要求。就如同我们已经看到 Wi-Fi 从 802.11a/b 发展至 g 再到 n，802.11ac 的超高吞吐量（very high throughput, VHT）规范可以实现极高的数据传输速率。在此，我们将探讨其物理层中一些主要的技术特性，以及它如

何支持高数据吞吐量。此外，我们将特别分析一些不断演进的特性，例如应用更高的信道带宽、调制类型的改变、以及更多空间流 (Spatial stream) 的应用以实现更高的数据速率。

首先，我们比较一下过去的以及未来的 Wi-Fi 的基本的物理层规范，如图 1 所示。

如图 1 所示，802.11n 规范中最主要的新特性就是通过引入 4x4 MIMO 技术，使用了更多的空间流。发展至 802.11ac 后，可实现的最大的空间流可达 8x8 MIMO。此外还有其它的重要改变，包括：可选的 160 MHz 信道带宽，以及引入了 256 QAM 调制机制。

使用更高的信道带宽

追溯至 MIMO 技术起源，Shannon-Hartley 原理曾被认为是计算一个数字信道的数据吞吐量的主要理论模型。

$$\text{数据吞吐量} = \text{带宽} \times \log_2(1 + \text{SNR})$$

公式 1. 经典 Shannon-Hartley 信道吞吐量理论模型

根据这一理论，通过一个特定信道的数据传输速率仅能通过改变信道带宽或者信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 来提高。时至今日，Shannon-Hartley 理论已经无法计算多个空间流所实现的总数据吞吐量，但它依然能表明信道带宽与数据传输速率之间的相关性。

在一个 OFDM 系统中，人们可以很直观

	802.11a/g	802.11n	802.11ac
天线结构	1x1 SISO	4x4 MIMO	8x8 MIMO
最高阶调制	BPSK 至 64 QAM	BPSK 至 64 QAM	BPSK 至 256 QAM
信道带宽	20 MHz	20 MHz & 40 MHz	20, 40, 80, 80 + 80, 以及 160 MHz
发布时间	1999 (802.11a) 2003 (802.11g)	2009	2012 (预计)

图 1. 新一代 Wi-Fi 中的物理层规范的技术演进。

地看到，更高的带宽与更高的数据传输速率之间存在相关性。例如，在使用相同的子载波间距（也就是使用相同的符号率）时，增加子载波的数量将增加信道带宽。在 802.11ac 规范中，我们可以很清楚的看到信道带宽与数据

信道带宽	子载波间距	子载波总数 (IFFT 大小)	数据子载波	先导子载波
20 MHz	312.5 kHz	64	52	4
40 MHz	312.5 kHz	128	108	6
80 MHz	312.5 kHz	256	234	8
160 MHz*	312.5 kHz	512	468	18

图 2. 802.11ac 中可选的信道带宽。

子载波数量之间的关系。如图 2 所示，在所有带宽模型中，子载波的间距是不变的，只需增加子载波的数量就可增加带宽。

* 代表此模式在 802.11ac 中是可选的。

如图 2 所示，可选的 160 MHz 模式远远超过了 802.11n 所支持的最大带宽 (40MHz)。目前，具有 160MHz 可用频谱的 Wi-Fi 频带仅能在 5 GHz 频带中实现（而不是 2.4GHz）。因此，802.11ac 规范仅能用于 5GHz ISM 频带。

提高空间流数量

Shannon-Hartley 理论可以很合理地估计 SISO（单输入单输出）信道的理论吞吐量，但我们必须对其进行一些更改，才能合理的估计 MIMO（多输入多输出）信道的最大吞吐量。在一个具有充足多路径反射的物理信道中，数据传输速率在理论上的最大提升随着理论空间流的数量增加而线性增加。例如，在一个 2x2 的 MIMO 系统中，在同一个物理信道（即使用相同的频率）中使用两个独立的空间流，其所能实现的数据速率是传统的单输入单输出（SISO）系统的两倍。同样，相对于 SISO 信道，一个 4x4 MIMO 信道可以实现 4 倍的数据速率提升，而 8x8 MIMO 信道则可以实现 8 倍的数据速率提升。与其它新出现的无线通信规范（如 3GPP LTE Advanced）类似，802.11ac VHT 规范可以实现最高 8x8 MIMO 系统。

调制机制与码率的改进

802.11ac 提高数据吞吐量所使用的最有趣的方法之一，就是 256 QAM 调制机制。过去，随着 802.11a 的发展，64 QAM 调制曾被认为是所有无线通信标准中“最高阶”的调制模式。而 802.11ac 则是消费类电子领域中引入 256

QAM 的首个商用的无线标准，以满足不断增长的数据吞吐量要求。在公式 2 中，我们可以看到调制机制的“阶次”与每个符号所代表的比特位数之间的简单关系。

每个符号的比特位数 = $\log_2(\text{调制阶次})$
 公式 2. 每个符号的比特位数随着调制机制的复杂性而增加。

我们可以很容易地看到，简单的调制机制，例如 BPSK（二进制相移键控）使用两个符号，因此每个符号可以产生 1 个比特位。相比较而言，一个更加复杂的调制机制，例如 256 QAM 则拥有更高的“阶次”，从而可以实现更高的数据速率。事实上，256 QAM 中，每个符号可以产生 8 个比特位 ($\log_2(256)=8$)。比较 802.11ac 和 802.11n，我们可以看到：对于能够实现 256 QAM 的环境条件，与传统的 64 QAM 机制相比，可以将数据速率提高 33%。

有关调制阶次的一个有趣的问题是，我们可以看到发射机的调制质量与 Shannon-Hartley 原理之间关系紧密。要了解这一关系，一个简单的实例就是 802.11ac 规范中对发射机相对星座误差（我们可以理解为 EVM）的限制。在我们观察图 3 时可以看到，更高阶次的调制类型，例如 256 QAM，对于 EVM 的要求更为严格——这一点并

调制类型	码率	RMS EVM
BPSK	1/2	-5 dB
QPSK	1/2	-10 dB
QPSK	3/4	-13 dB
16 QAM	1/2	-16 dB
16 QAM	3/4	-19 dB
64 QAM	2/3	-22 dB
64 QAM	3/4	-25 dB
64 QAM	5/6	-27 dB
256 QAM	3/4	-30 dB
256 QAM	5/6	-32 dB

图 3. 发射机最低 EVM 要求。

不奇怪，因为 EVM 和 SNR 之间的关系非常紧密。

为了更好地说明 SNR 对调制阶次类型的影响，图 4 中展示了一个 256 QAM 信号在各种 SNR 环境中的星座图。

如 256 QAM 的星座图所示，32dB 的 SNR 对于 256 QAM 信号解调来说足矣，不会产生明显的比特误差以及帧误差。相对而言，在一个具有较低信噪比的环境中，

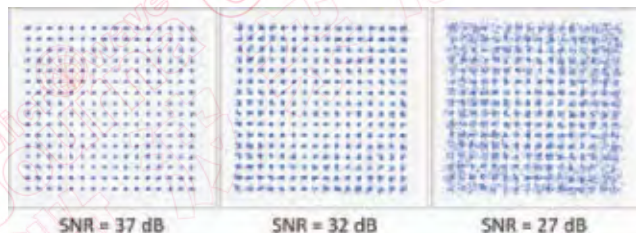


图 4. 更高的 SNR 可以实现更高层次的调制，如 256 QAM。

我们可以看到星座图中的拖尾效应，这在 27dB 或者更低信噪比的环境中尤为明显。在这些信道环境条件下，一个给定的 Wi-Fi 接入节点无法使用 256 QAM 模式维持通信，只能使用较低阶次的调制模式以维持一定范围内的帧误差率。这一示例表明了 Shannon-Hartley 原理中所描述的 SNR 与数据吞吐量之间的关系。

计算数据速率

凭借 802.11ac 规范所带来了关键技术改进，如更高的带宽、更多的空间流、以及更高层次调制类型，有人可能会猜想可选的高吞吐量特性会比 802.11n 提高一个数量级。事实上，由于 802.11n 的理论限制为 600Mbps，802.11ac 的数据速率增加将会比 802.11n 提高一个数量级。

为了正确地估计 802.11ac 的最大理论吞吐量，我们必须考虑一些关键的因素，例如：调制类型、子载波个数、码率、符号率，以及空间流的个数。为了确定总数据速率，我们首先确定任意时刻一次发出的编码数据的位数。之前的 802.11ac 规范草案将此定义为“子载波比特位数”（Number of data bits per subcarrier, N_{DPSC} ），其中包含所有空间流的比特位。从数学角度考虑， N_{DPSC} 是通过每个符号的位数、码率以及子载波的个数等因素决定的。

在公式 3 中，可以看到 N_{DPSC} 的数学表示。

$$N_{\text{DPSC}} = \text{每个符号的比特位数} \times \text{数据子载波的个数} \times \text{码率}$$

公式 3. 每个符号的比特位数与码率等因素对整个空间流编码的比特位数的影响。

例如，在一个 20MHz 的 802.11ac 信号发射时，64 个子载波中的 52 个将被用于数据，而其余的则用于保护性频带、空子载波以及先导频率信号。如果使用 QPSK 调制模式以及 $\frac{1}{2}$ 的码率，则 N_{DPSC} 将会等于 26 比特（1 x

信道带宽	空间数据流	调制机制	码率	总子载波数	数据子载波	N_{DPSC}
20 MHz	1	256 QAM	3/4	64	52	312
40 MHz	2	256 QAM	5/6	128	108	1440
80 MHz	4	256 QAM	5/6	256	234	6240
160 MHz	8	256 QAM	5/6	512	468	24960

图 5. N_{DPSC} 随着带宽大小和空间数据流的数量增加呈指数性增加。

52 x 0.5)。如图 5 所示，我们对多个带宽以及空间流组合，计算其在 256 QAM 调制模式下的 N_{DPSC} 。

知道了每个空间流中的总比特位数，我们就可以通过将 (N_{DBPS}) 与空间流的个数、符号率、以及符号使用率相乘，就可以计算 802.11ac 物理层的最大理论吞吐量。在此示例中，符号率等于子载波间隔，即为 312.5 kHz 或者 312,500 符号 / 秒。其中的关系如公式 4 所示。

$$\text{数据速率} = N_{\text{DBPS}} \times \text{符号率} \times \frac{T_{\text{DFT}}}{T_{\text{SYM}}}$$

公式 4. 数据速率是 N_{DPSC} 、符号率以及符号使用率的函数。

如公式 4 所示，符号使用率即为数据符号周期与符号总间隔的比值，其中：

$$T_{\text{DFT}} = \text{DFT/IDFT 符号周期} = 3.2 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{SYMS}} = \text{短 GI 符号间隔} = 3.6 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{SYML}} = \text{长 GI 符号间隔} = 4.0 \mu\text{s}$$

因此，在使用短防护间隔的配置中，符号使用率为 $3.2/3.6 = 88.9\%$ 。

同样，在使用长防护间隔的配置中，符号使用率为 $3.2/4.0 = 80\%$ 。

在公式 5 中，我们可以估计 802.11ac 通信信道的最大理论吞吐量。在确定 802.11ac 的最大理论吞吐量时，我们将会考虑使用 8x8MIMO、160 MHz 信道带宽、256 QAM 调制机制以及短防护间隔。在此示例中，理论最大数据吞吐量如公式 5 所示。

$$\begin{aligned} \text{数据速率} &= 24960 \text{ 比特} \times 3125000 \frac{\text{Sym}}{\text{sec}} \times \\ &\frac{3.6 \mu\text{s}}{4.0 \mu\text{s}} = 6.933 \text{ Gbps} \end{aligned}$$

公式 5. 802.11ac 的最大理论吞吐量超过 6.9 Gbps。