

Wi-Fi: 802.11 物理层和 发射机测量概述

入门手册

入门手册

目录

引言	3	物理层调制格式	25
IEEE 802.11 标准和格式	4	直序扩频	25
IEEE 802.11-1997 或传统模式	4	正交频分复用 (OFDM)	28
IEEE 802.11b	4	数据调制和编码 (FEC) 组合	29
IEEE 802.11a	5	WLAN 工作流程	31
IEEE 802.11g	6	剖析 WLAN 设备	31
IEEE 802.11n	6	建立联系	32
IEEE 802.11ac	7	同步	33
协议结构概述	8	鉴权	33
信道分配和频谱模板	10	关联	33
信道带宽	10	交换数据	33
频谱模板	11	进行发射机测量	34
重叠信道	12	发射机测试条件	34
各国法规	15	发射机测试	34
物理层 (PHY) 帧结构	17	发射机功率	34
管理帧	18	发送频谱模板	34
控制帧	19	频谱平坦度	34
数据帧	19	发送中心频率容限	35
802.11b 包格式	20	发送中心频率泄漏	35
802.11a/g 包格式	21	发射机星座误差	35
802.11n 包格式	22	发射机调制精度 (EVM) 测试	35
802.11ac 包格式	24	符号时钟频率容限	35
		802.11 和 802.11b 发射机要求	36
		802.11a 发射机要求	37
		802.11g 和 802.11n 发射机要求	38
		802.11ac 发射机要求	39
		总结	40

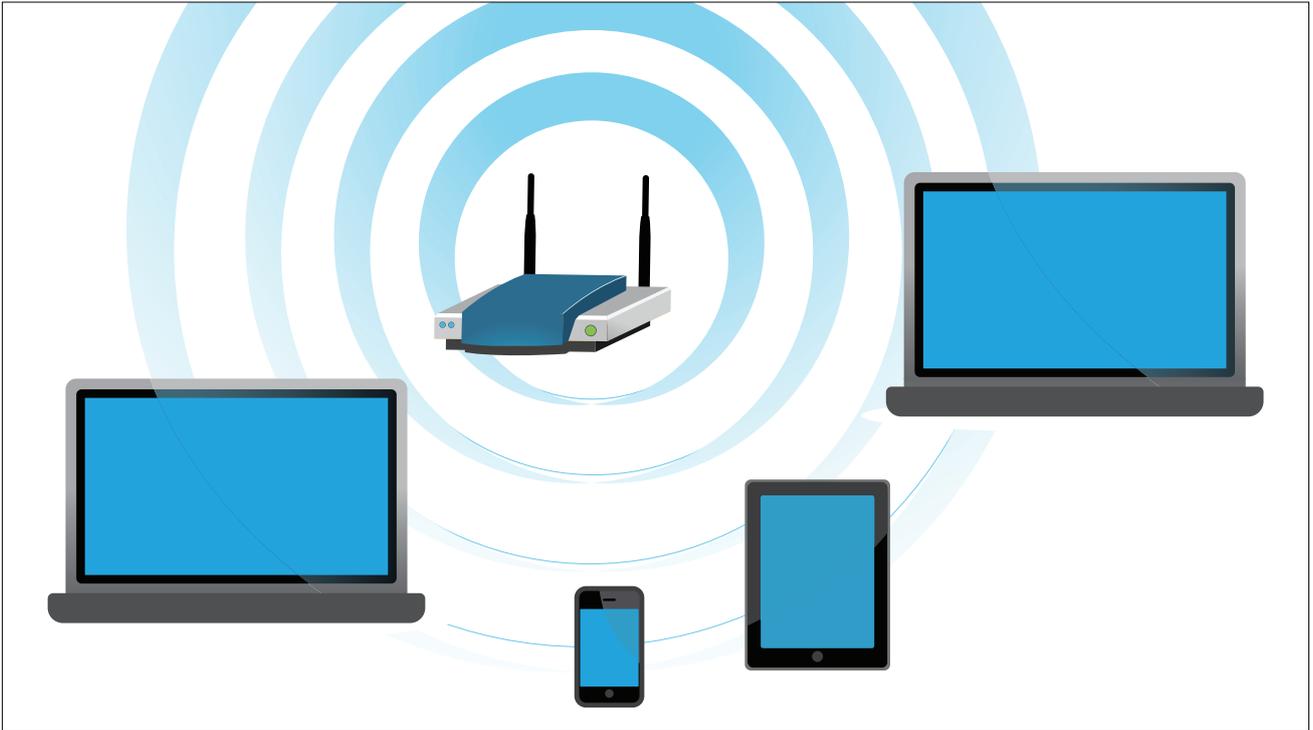


图 1. 802.11 标准已经使得数以百万计的电子设备能够使用无线电波以无线方式交换数据或连接互联网。

引言

Wi-Fi 是一种允许多台电子装置使用无线电波以无线方式交换数据或连接互联网的技术。Wi-Fi 联盟把 Wi-Fi 设备定义为任何“基于电气和电子工程师学会 (IEEE) 802.11 标准的无线局域网 (WLAN) 产品”。

IEEE 802.11 设备的主要优势是它们能够以更低的成本部署局域网 (LANs)。对把电缆敷设到每台设备不现实的地点，比如室外区域或机场，可以安装无线局域网。由于这些产品已经由 Wi-Fi 联盟打上“Wi-Fi Certified”标记，因此每个品牌的产品都能够在基本服务级互操作。

今天，世界上正在使用的 IEEE 802.11 设备要数以百万计，它们在相同的频段内运行，因此共存需求非常关键。尽管随着时间推移，老设备会退役，但某些消费者和企业仍会在未来多年内使用老的标准。对某些企业来说，原来的 802.11b 设备可以满足他们的需求，不必进行变动。因此，带宽更宽的 802.11 部署必须能够很好地与老标准“一起玩儿”，既要限制新设备对附近传统 WLAN 的影响，又要能够与传统电台进行通信。

本入门手册从整体上概括介绍了每项 802.11 标准、其物理层特点以及测试要求。在本文中，802.11 和 IEEE 802.11 这两个词可以互换使用。

IEEE 802.11 标准和格式

IEEE 802 是指处理局域网和城域网的一系列 IEEE 标准 (参见表 1)。IEEE 802 家族标准由 IEEE 802 局域网 / 广域网标准委员会 (LMSC) 维护。各个工作小组重点放在各自的领域。IEEE 802.11 是用来实现无线局域网 (WLAN) 通信的一套介质访问控制 (MAC) 和物理层 (PHY) 规范。802.11 家族是共享相同的基本协议的一系列空中调制技术 (表 2)。这些标准为使用 Wi-Fi 品牌的无线网络产品奠定了基础。802.11 使用的无线频段在各个国家是不同的。

IEEE 802.11-1997 或传统模式

最早版本的标准 IEEE 802.11 于 1997 年发布, 但目前已经基本淘汰。它规定了每秒 1 Mb/s 或 2 Mb/s 的信息速率, 并规定了三种可以选择的物理层技术:

- 以 1 Mbit/s 速度工作的散射红外线
- 以 1 Mbit/s 或 2 Mbit/s 工作的跳频扩频技术
- 以 1 Mbit/s 或 2 Mbit/s 速率工作的直序扩频技术

后两种无线电技术通过 2.4 GHz 工业、科学、医疗 (ISM) 频段采用微波进行传输。其规定的速率是通过红外线 (IR) 信号或通过跳频或直序扩频 (DSSS) 无线电信号进行传送的。红外线一直都是标准的一部分, 但并没有实际实现。

这种最初规范的缺点是, 它提供了太多的选择, 因此有时候面临着互操作能力挑战。它实际上更多的是“公测规范”, 而不是硬性规范, 在开始时各个产品厂商能够灵活地展现产品特色, 但很少或没有厂商之间的互操作能力。

IEEE 802 标准	
802.1	桥接和管理
802.2	逻辑链路控制
802.3	以太网 - CSMA/CD 接入方法
802.4	令牌传送总线接入方法
802.5	令牌环接入方法
802.6	分布式队列双总线接入方法
802.7	宽带局域网
802.8	光纤
802.9	综合业务局域网
802.10	安全
802.11	无线局域网
802.12	需求优先接入
802.14	中等接入控制
802.15	无线个人区域网
802.16	宽带无线城域网
802.17	弹性分组环

表 1. 802 家族标准。

1999 年, DSSS 版本的传统 802.11 迅速得到 802.11b 修订版补充 (和普及), 修订版把信息速率提高到 11 Mbit/s。在 802.11b 发布之后, 802.11 网络才得到了广泛采用。结果, 使用最初的 802.11-1997 标准实现的网络非常少。正因如此, 本文中多个章节没有进一步展开介绍传统模式。

IEEE 802.11b

802.11b 的最大原始数据速率为 11 Mbit/s, 使用的介质访问方法与原来的传统标准规定的方法相同。802.11b 产品于 2000 年初面市, 是最初标准规定的调制技术的直接延伸。802.11b 的吞吐量大幅度提高 (与原来的标准相比) 及价格大幅度下降, 导致 802.11b 成为无可争议的无线局域网技术, 并被迅速接受。

IEEE 802.11 PHY 标准						
发布日期	标准	频段 (GHz)	带宽 (MHz)	调制	高级天线技术	最大数据速率
1997	802.11	2.4 GHz	20 MHz	DSSS, FHSS	N/A	2 Mbits/s
1999	802.11b	2.4 GHz	20 MHz	DSSS	N/A	11 Mbits/s
1999	802.11a	5 GHz	20 MHz	OFDM	N/A	54 Mbits/s
2003	802.11g	2.4 GHz	20 MHz	DSSS, OFDM	N/A	54 Mbits/s
2009	802.11n	2.4 GHz, 5 GHz	20 MHz, 40 MHz	OFDM	MIMO, 最多 4 条空间流	600 Mbits/s
2013	802.11ac	5 GHz	40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	OFDM	MIMO, MU-MIMO, 最多 8 条空间流	6.93 Gbits/s

表 2. IEEE 802.11 PHY 标准。

802.11b 设备的一个缺点是，它们可能会给在 2.4 GHz 频段内工作的其他产品带来干扰问题。在 2.4 GHz 范围内工作的设备包括微波炉、无绳电话、蓝牙设备、婴儿监护器和其他业余爱好者无线设备。随着 Wi-Fi 日益流行，2.4 GHz 频段内的干扰问题和用户密度问题已经成为主要问题。

IEEE 802.11a

802.11a 标准于 1999 年被增加到最初标准中，并得到批准。802.11a 标准采用的核心协议与最初标准相同，是 802.11 家族里第一个在 5 GHz 频段中运行的标准。它采用 52 个副载波正交频分复用 (OFDM)，最大原始数据速率为 54 Mbit/s，一般会实现 20 Mbit/s 左右的吞吐量。今天，世界上许多国家正允许在 5.47 ~ 5.725 GHz 频段内运行。这将在整个 5 GHz 频段中增加更多的信道，明显提高整体无线网络容量。802.11a 不能与 802.11b 互操作，因为它们在不同的频段上运行。但是，大多数企业级接入点目前都有多频功能。

使用 5 GHz 频段为 802.11a 提供了一个明显优势，因为 2.4 GHz ISM 频段用量繁重。这些冲突导致的劣化会经常引发掉线和服务劣化。但是，更高的 5 GHz 频

率也有一些小的劣势，因为 802.11a 的有效范围略低于 802.11b/g。802.11a 信号的穿透力不如 802.11b，因为它们更容易被路径中的墙壁和其他固体物体吸收，同时信号强度的路径损耗与信号频率的平方成正比。另一方面，在高度多径环境中，如室内办公室中，较高的频率可以建立 RF 系统增益较高的小型天线，从而抵消较高工作频段的劣势，在这种情况下，OFDM 拥有基础传播优势。可用信道数量更高及附近没有其他干扰系统（微波炉、无绳电话、婴儿监护器）为 802.11a 提供了明显优于 802.11b/g 的带宽和可靠性。

人们经常弄混 802.11a 和 802.11b 的发布时间。802.11a 产品出货时间晚，要滞后于 802.11b 产品，因为 5 GHz 元器件制造难度要更大。此外，第一代产品性能很差，有许多问题。在第二代产品开始出货时，802.11a 在消费者领域还没有得到广泛采用，主要原因是价格较低的 802.11b 已经被广泛采用。尽管存在前期成本劣势，但 802.11a 后来明显渗透到企业网络环境中，特别是要求的容量和可靠性高于纯 802.11b/g 网络的企业。为此，本文的章节经常会先介绍 802.11b。

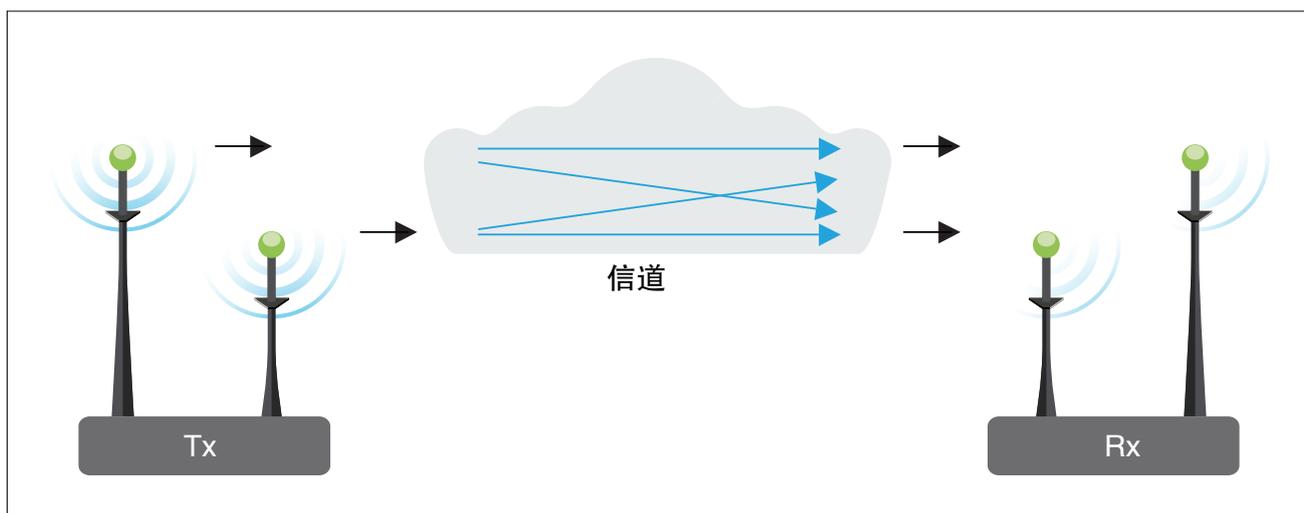


图 2. MIMO 使用多台天线，以相干方式解析的信息数量要超过使用一台天线。

IEEE 802.11g

802.11g 标准从 2003 年 1 月起迅速被消费者采用，这个时间远远早于其被批准的时间，因为市场渴望更高的速度及降低制造成本。到 2003 年夏天，大多数双频 802.11a/b 产品变成双频 / 三模，在一张移动适配器卡或一个接入点中支持 802.11a 和 b/g。

802.11g 在 2.4 GHz 频段中工作 (与 802.11b 一样)，但使用与 802.11a 相同的基于 OFDM 的传输方式。它的最大物理层信息速率为 54 Mbit/s，不包括前向纠错代码。802.11g 硬件完全向下兼容 802.11b 硬件。但在 802.11g 网络中有 802.11b 设备会明显降低整个 802.11g 网络的速度。

尽管是被接受的主要标准，但 802.11g 与 802.11b 一样在已经很拥挤的 2.4 GHz 范围内存在着干扰问题。此外，该标准的成功导致与市区拥挤有关的使用 / 密度问题。为防止干扰，美国及拥有类似法规的其他国家只有三条不重叠的可用信道 (信道 1、6、11，相距 25 MHz)，欧洲只有四条信道 (信道 1、5、9、13，相距仅 20 MHz)。即使是这样的距离，仍存在某些旁瓣导致的干扰，当然干扰相当弱。

IEEE 802.11n

802.11n 修订案包括许多增强功能，改善了 WLAN 范围、可靠性和吞吐量。它在物理层 (PHY) 增加了高级信号处理和调制技术，以利用多台天线和更宽的信道。在介质访问控制 (MAC) 层，协议扩展可以更高效地利用可用带宽。这些高吞吐量 (HT) 增强功能相结合，可以把数据速率提升到最高 600 Mbps - 比 54 Mbps 802.11a/g 提高了 10 倍。

802.11n 同时在 2.4 GHz 频段和 5 GHz 频段运行。可以选择支持 5 GHz 频段。IEEE 802.11n 在原来的 802.11 标准基础上，在物理层增加了多输入多输出 (MIMO) 和 40 MHz 信道，在 MAC 层增加了帧汇总功能。

大多数 802.11n 增强功能的背后是能够通过多台天线同时接收和 / 或发送信息。802.11n 规定了多种 "M x N" 天线配置，从 "1 x 1" 到 "4 x 4"。MIMO 使用多台天线，以相干方式解析的信息数量要超过使用一台天线。其实现方式之一是空分复用，即在空间中复用多条独立的数据流，并在一条频谱信道的带宽内同时传送这些数据流。随着解析的空间数据流数量提高，MIMO 可以明显提高数据吞吐量。每条空间流要求在发射机和接收机同时有一台离散天线。



图 3. 802.11 设备的广泛采用和成功创造了全新使用模式的需求，这些使用模式要求更高的吞吐量。

同时传送的数据流数量受到链路两侧使用的最低天线数量限制。但是，单独的无线电台通常会进一步限制可以承载独特数据的空间流的数量。 $M \times N = Z$ 这个符号有助于确定某个无线电台的功能。第一个字母 M 是无线电可以使用的最大发送天线数量。第二个字母 N 是无线电可以使用的最大接收天线数量。第三个字母 Z 是无线电可以使用的最大数据空间流数量。例如，如果一个无线电台能够在两台天线上发送信息，在三台天线上接收信息，但只能发送或接收两条数据流，那么结果为 $2 \times 3 : 2$ 。

另一个可选的 802.11n 功能是 40 MHz 信道。以前的 802.11 产品使用的信道大约宽 20 MHz。802.11n 产品可以选择使用宽 20 或 40 MHz 的信道，前提是接入点也有 40 MHz 功能。以 40 MHz 带宽工作的信道提供的物理层数据速率是一条 20 MHz 通道的两倍。2.4 GHz 或 5 GHz 模式可以实现更宽的带宽，但不得干扰使用相同频率的任何其他 802.11 或非 802.11 (如蓝牙) 系统。

IEEE 802.11ac

早期的无线局域网标准主要是为连接家中、办公室中的笔记本电脑及实现“路上”连接设计的。WLAN 的广泛接受和成功创造了全新使用模式需求，这些使用模式要求更高的吞吐量，比如：

- 无线显示
- 在家中分布 HDTV 和其他内容
- 从服务器快速上传 / 下载大文件
- 回程业务 (网格、点到点等)
- 园区和礼堂部署
- 车间自动化

IEEE 802.11ac (即 VHT 超高吞吐量) 是正在开发的、在 5 GHz 频段内提供吞吐量的一项标准。802.11ac 计划在可能的地方重复使用 802.11n (和 802.11a) 细节。这对保证向下兼容能力和共存是一个优势, 从而允许 802.11ac 开发者把重点放在实现吞吐量要求所需的新功能上。

802.11ac 规范已经预计至少 1 Gbps 的多站 WLAN 吞吐量及至少 500 Mbps 的单链路吞吐量。这通过扩展 802.11n 采用的空中接口概念来实现:

- 更宽的 RF 带宽 (最高 160 MHz)
- 更多的 MIMO 空间流 (最多 8 条)
- 多用户 MIMO
- 高密度调制 (最高 256-QAM)。

这一标准是 2011~2013 年之间开发的, 最终 802.11 工作组批准和出版的预计时间为 2014 年初。

所有 802.11ac 设备都必须支持 20、40 和 80 MHz 通道和 1 条空间流。此外, 802.11ac 中还规定了多种选配功能:

- 更宽的信道带宽 (80+80 MHz 和 160 MHz)
- 更高的调制支持 (选配 256QAM)
- 两条或更多的空间流 (最多 8 条)
- 多用户 MIMO (MU-MIMO)
- 400 ns 短保护间隔
- 空时分组编码 (STBC)
- 低密度奇偶性校验 (LDPC)

只采用强制性参数 (80 MHz 带宽、1 条空间流和 64-QAM 5/6) 的 802.11ac 设备将能够支持大约 293 Mbps 的数据速率。采用选配参数 (8 条空间流、160 MHz 带宽和 256-QAM 5/6 及短保护间隔) 的设备将能够实现近 7 Gbps 的数据速率。

OSI模型



图 4. OSI 模型描述了信息怎样从在一台联网计算机上运行的应用程序传送到在另一台联网计算机上运行的应用程序。

协议结构概述

开放系统互连参考模型或 OSI 模型是由国际标准化组织 (缩写为 ISO) 开发的。OSI 模型是一种分层模型, 它描述了信息怎样从在一台联网计算机上运行的应用程序传送到在另一台联网计算机上运行的应用程序。从本质上看, OSI 模型规定了通过传输介质从一台联网设备把数据传送到另一台联网设备使用的步骤。OSI 模型把网络通信流程分成七个单独的层, 如图 4 所示。

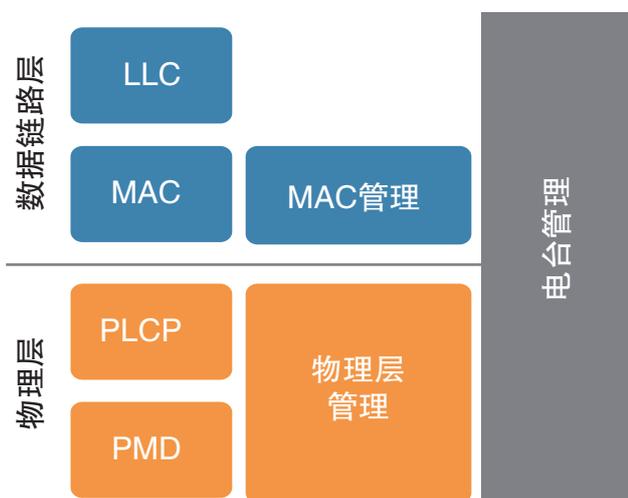


图 5. 802.11 标准的重点是 OSI 参考模型的数据链路层和物理层。

实用的无连接局域网始于预 IEEE 以太网规范，这是 IEEE 802.3 的前身。802.11 标准覆盖了无线网络的协议和操作。它只处理 OSI 参考模型两个最低的层：物理层和数据链路层（或介质访问控制层）。其目标是使所有 802.11 系列标准能够向下兼容，并在介质访问控制层 (MAC) 或数据链路层实现兼容。因此，各项 802.11 标准的差异只在于物理层 (PHY) 特点 (图 5)。

MAC 层为在网络实体之间传送数据、检测及可能校正物理层可能发生的错误提供了功能手段和程序手段。它可以访问不同类型的物理层上基于争用的业务或无争用的业务。在 MAC 层中，职责分成 MAC 子层和 MAC 管理子层。MAC 子层定义了访问机制和分组格式。MAC 管理子层定义了功率管理、安全和漫游服务。

物理层规定了设备的电气参数和物理参数。特别是，它规定了设备与传输介质之间的关系。物理层执行的主要功能和服务如下：

- 与通信介质建立连接及拆除连接。
- 参与在多个用户之间有效共享通信资源的流程，如争用解决和流量控制。
- 用户设备中数字数据表示与通过通信信道传送的相应信号之间的调制或转换。这些信号是在物理线缆（如铜缆或光纤）上或通过无线链路运行的信号。

物理层分为三个子层。

1. 物理层收敛程序 (PLCP) 作为适配层使用。
2. PLCP 负责无干扰信道评估 (CCA) 模式，为不同的物理层技术构建分组。
3. 物理介质相关 (PMD) 层规定了调制技术和编码技术。PHY 管理层负责信道调谐等管理问题。

电台管理子层负责协调 MAC 层与 PHY 层之间的交互。

本入门手册重点介绍 PHY 层，因为采用 802.11 标准的不同技术的设备硬件的设计要求在这里实现。

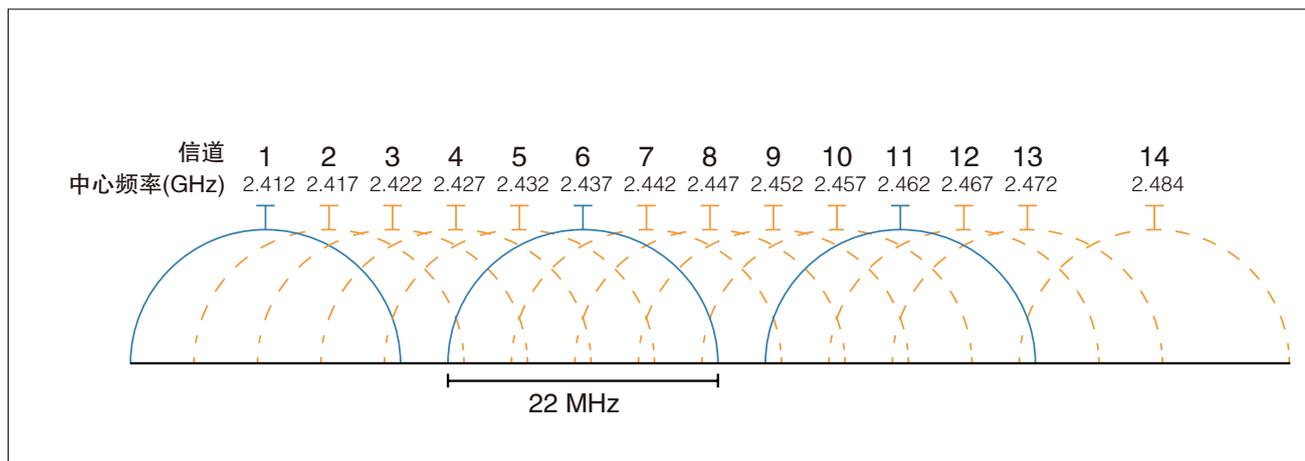


图 6. 2.4 GHz 频段分成 14 条重叠的信道。

信道分配和频谱模板

802.11b、802.11g 和 802.11n 标准的低频部分采用位于 ISM 频段中的 2.400 – 2.500 GHz 频谱。802.11a、802.11n 和 802.11ac 标准采用管制更加严格的 4.915 – 5.825 GHz 频段。这些频段通常称为“2.4 GHz 和 5 GHz 频段”。每个频谱都细分成多条拥有一个中心频率和带宽的信道，其方式与商用频谱细分方式类似。

2.4 GHz 频段分成 14 条相距 5 MHz 的信道，信道 1 的中心频率为 2.412 GHz (图 6)。由于各国之间的法规差异，5.725 – 5.875 GHz 频谱的信道编号直观度较差。

信道带宽

早期 802.11 产品使用大约宽 20 MHz 的信道。在美国，802.11b/g 无线电使用 2.4 GHz ISM 频段内 11 条 20 MHz 信道 (三条不重叠信道：1, 6, 11) 中的一条信道。在 OFDM PHY 被引入 802.11 时，信道带宽为 20 MHz，之后的修订案增加了 5 和 10 MHz 带宽支持。802.11a 无线电采用 5 GHz 无需牌照的国家信息基础设施 (UNII) 频段中 12 条不重叠的 20 MHz 信道中的一条信道。

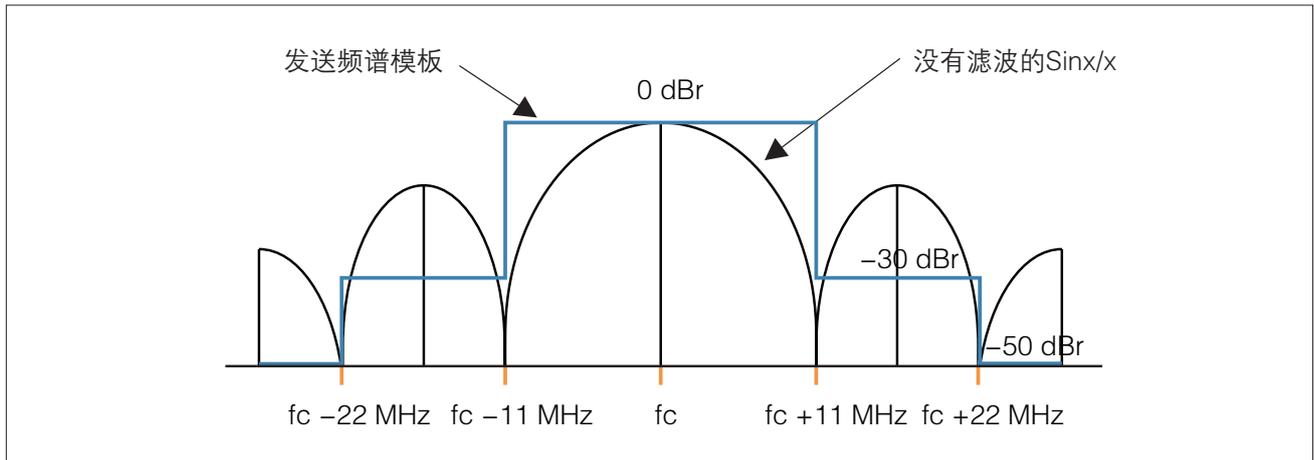


图 7. 802.11b 标准的频谱模板。

802.11ac 将包括支持 80 MHz 带宽，选配支持 160 MHz 带宽。802.11ac 设备必须支持 20、40 和 80 MHz 信道带宽接收和传输。80 MHz 通道将由两条相邻的不重叠的 40 MHz 信道组成。160 MHz 信道将由两条 80 MHz 信道组成，这两条信道可以相邻（邻接），也可以不相邻。在较新的标准中，它们被允许使用更宽的带宽，来提升吞吐量。

但必需认识到，2.4 和 5 GHz 频段不能变得更大了。所有 802.11 标准的产品都必须共享相同的带宽。只有在有可用的频谱时，才能使用更宽的带宽。正因如此，许多 802.11n WLAN 最后可能只使用 5 GHz 频段中的 40 MHz 信道。

频谱模板

802.11 标准指定了一个频谱模板，规定了每条信道中允许的功率分配。频谱模板要求信号以指定的频率偏置衰减到特定电平（从峰值幅度）。图 7 显示了 802.11b 标准使用的频谱模板。能量从峰值下落得非常快，但必需注意仍会辐射到其他信道的 RF 能量。我们在下一节中将进一步对此展开讨论。

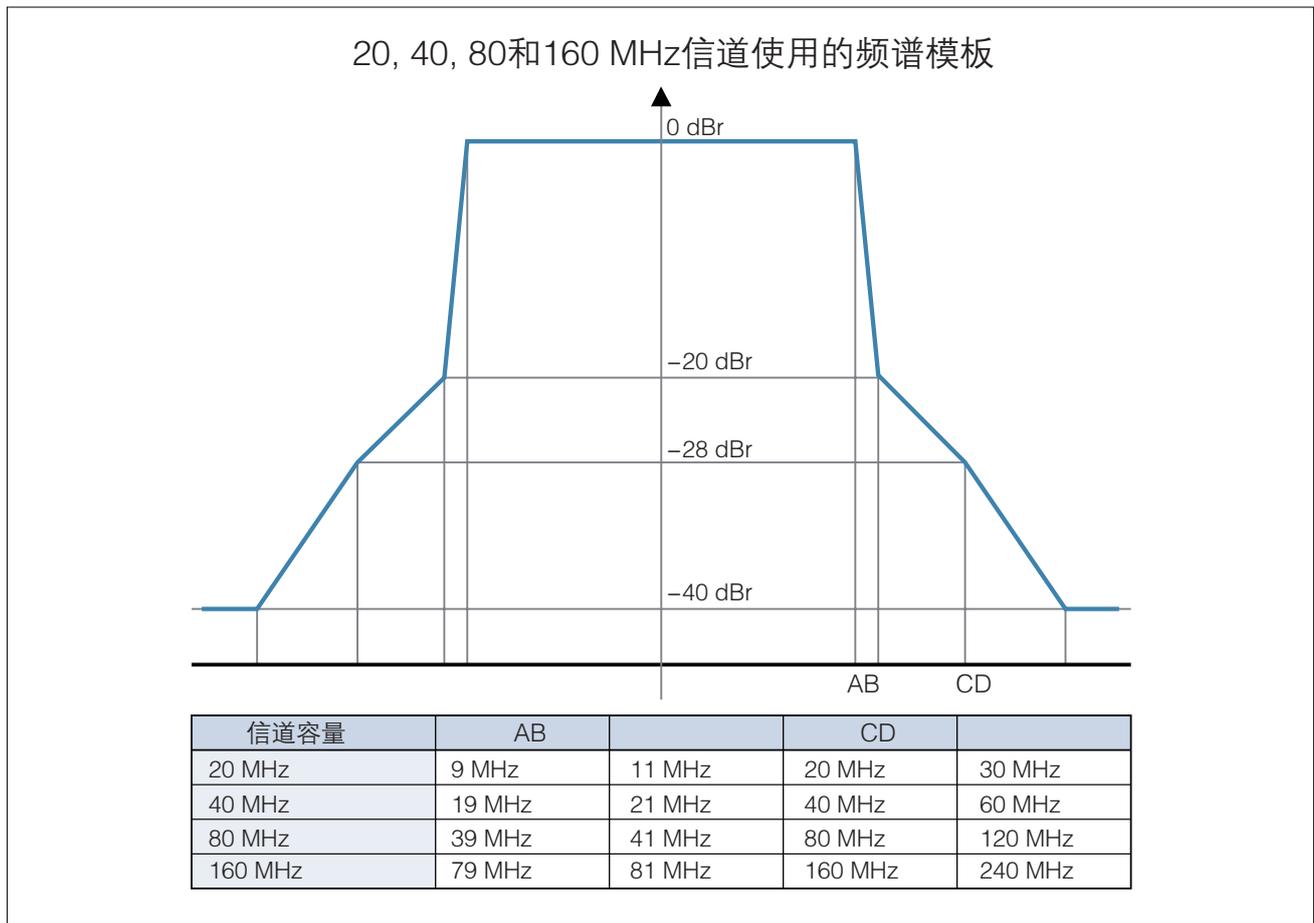


图 8. 802.11a/g/n/ac 使用的 OFDM 频谱模板。

对采用 OFDM 编码方式的 802.11a、802.11g、802.11n 和 802.11ac 标准来说，它们都有一个看上去完全不同的频谱模板 (图 8)。OFDM 可以实现更密集的频谱效率，从而实现高于 802.11b 中的 BPSK/QPSK 技术的数据吞吐量。

重叠信道

802.11 使用的“信道”一词经常会引起混淆。对无线电和 TV 频道来说，它们被分配到工作的特定频谱。

如图 6 及 802.11 频谱模板所示，可以明显看出，大量的 RF 能量正进入相邻信道。由于频谱模板只规定了特定频率偏置上的功率输出限制，因此通常假设信道的能量不会扩展到这些极限之上。更准确地说，鉴于信道之间的间隔，任意信道上的重叠信号应被足够衰减，以对任何其他信道上的发射机干扰达到最小。

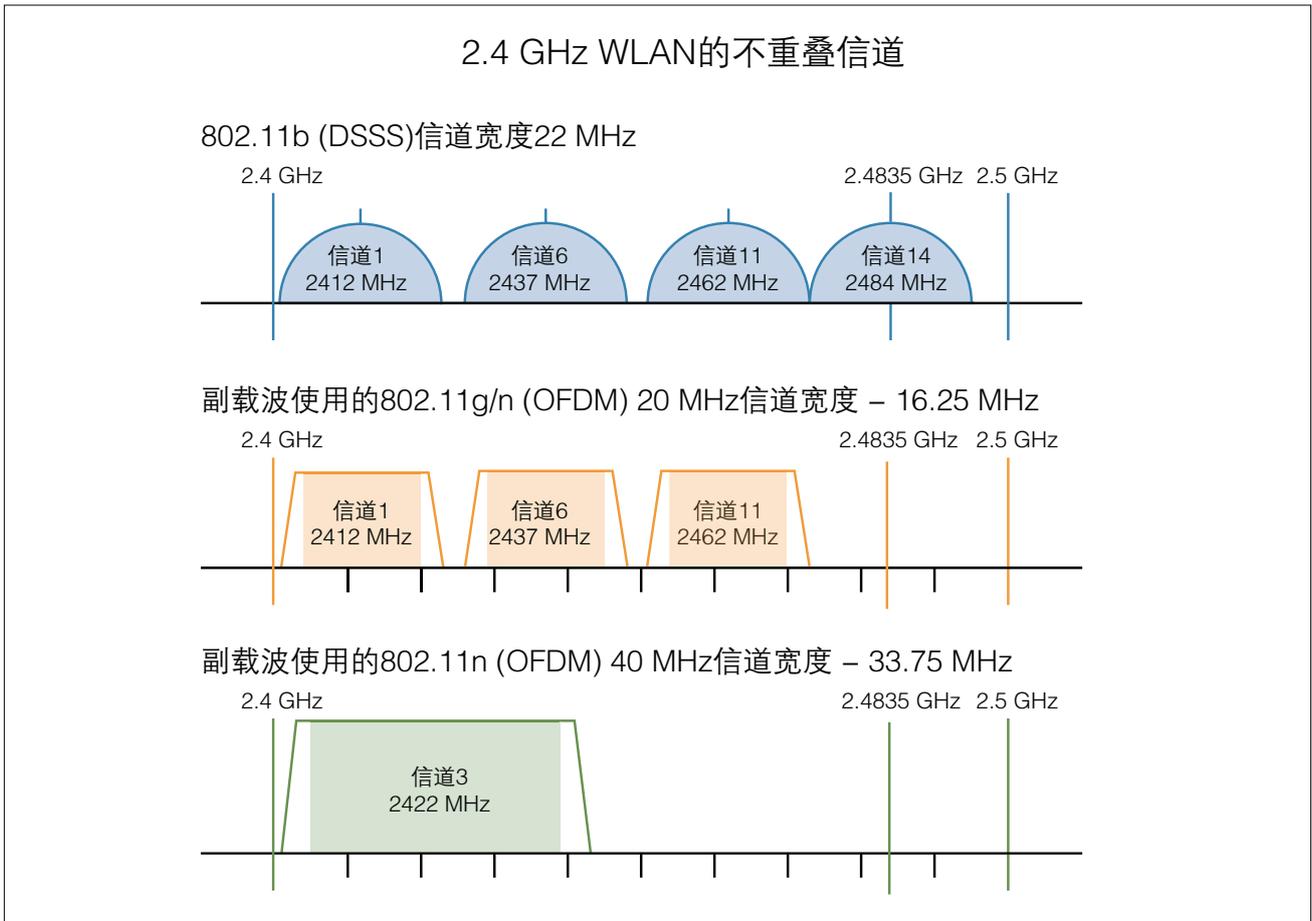


图 9. 对 802.11 标准，只有部分信道被视为不重叠。

发送设备之间要求的信道间隔经常出现混淆。802.11b 标准基于 DSSS 调制，采用 22 MHz 的信道带宽，得到三条“不重叠的”信道 (1、6 和 11)。802.11g 基于 OFDM 调制，采用 20 MHz 的信道带宽。这偶尔会导致有人认为 802.11g 存在四条“不重叠”的信道 (1、5、9 和 13)，但事实并非如此。图 9 重点

介绍了 2.4 GHz 频段中可能不重叠的信道。尽管“不重叠的”信道具有间隔或产品密度限制，但这一概念在限定环境中有一些优点。必须特别注意，要为接入点小区提供足够的间隔，因为信道之间重叠可能会导致信号质量和吞吐量不可接受地劣化。

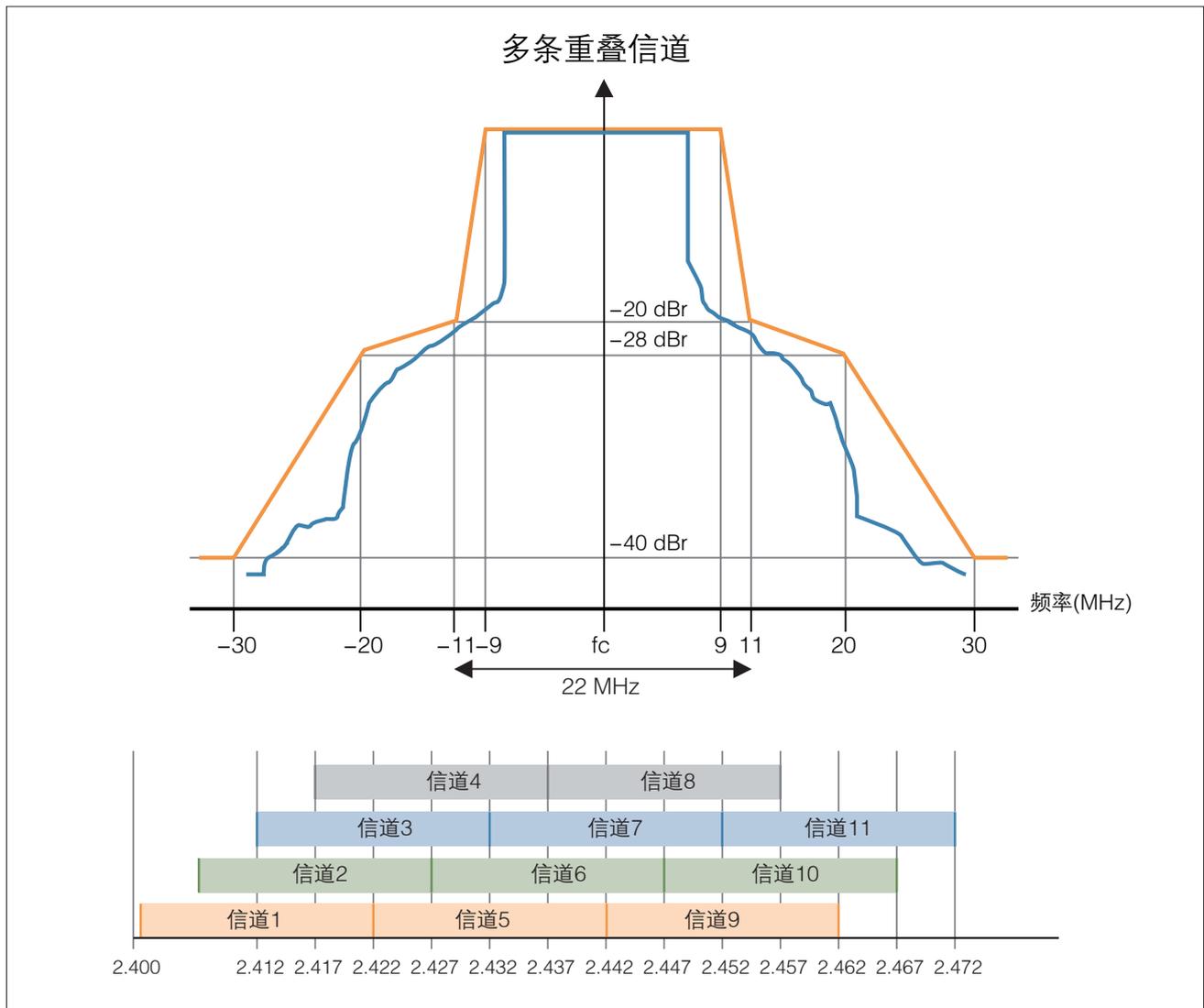


图 10. RF 能量“排放”到多条邻道的频率中，导致接入点可能实际占用多条重叠信道。

802.11b/g/n 信道重叠进一步提高了 ISM 使用的复杂度。在 802.11b/g/n 无线电传送信号时，被调制的信号设计成从信道中心频率落在其带宽内。但是，RF 能量最终会“排放”到多条邻道的频率中。结果，每个 802.11b/g/n 接入点实际上都会占用多条重叠信道（参见图 10）。在 ISM 频段的 40 MHz 802.11n 信道上

传送数据加剧了这种稀缺性，它占用 9 条信道：中心频率外加左右各 4 条信道。在拥挤的 ISM 频段中很少能找到没有使用的邻道，因此，40 MHz 802.11n 操作极可能会干扰现有的 802.11b/g 接入点。为解决这个问题，使用 40 MHz 信道的 802.11n 接入点必须侦听传统设备（或其他非 40 MHz HT），提供共存机制。

各国法规

802.11 信道的提供情况由各国规定，在一定程度上受到各国为各种服务分配无线电频谱的方式限制 (表 3 和表 4)。例如，日本允许 802.11b 使用全部 14 条信道，允许 802.11g/n-2.4 使用第 1-13 条信道。其他国家如西班牙一开始只允许使用信道 10 和信道 11，法国只允许使用信道 10、11、12 和 13，现在则允许使用信道 1-13。北美和部分中南美国家只允许使用信道 1-10。在美国，根据 FCC 规定和法规 Part 15，可以在没有牌照的情况下运行在 ISM 频段中工作的 802.11 标准。

规定的参数在 PHY 管理层发送，与 802.11 标准国家信息和法规等级附录中给出的信道开始频率一起使用。IEEE 使用“regdomain”一词表示法律规定的地区。不同国家规定不同水平的允许的发射机功率、可以占用信道的的时间以及提供的不同信道。IEEE 为美国、加拿大、ETSI(欧洲)、西班牙、法国、日本和中国规定了域代码。regdomain 设置通常很难或不可能改变，这样就不会与本地法规机构 (如美国的联邦通信委员会) 产生冲突。

各国提供的 802.11 2.4 GHz 信道				
信道	中心频率 (MHz)	北美	日本	世界上大多数国家
1	2412	是	是	是
2	2417	是	是	是
3	2422	是	是	是
4	2427	是	是	是
5	2432	是	是	是
6	2437	是	是	是
7	2442	是	是	是
8	2447	是	是	是
9	2452	是	是	是
10	2457	是	是	是
11	2462	是	是	是
12	2467	否	是	是
13	2472	否	是	是
14	2484	否	仅 11b	否

表 3. 各国可用的 802.11 2.4 GHz 频段信道 (宽 22 MHz)。

各国提供的 802.11 5 GHz 信道													
信道	中心频率 (MHz)	美国	欧洲	日本		新加坡	中国	以色列	韩国	土耳其	澳大利亚	南非	巴西
		40/20 MHz	40/20 MHz	40/20 MHz	10 MHz	40/20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	40/20 MHz	40/20 MHz	40/20 MHz	40/20 MHz
183	4915	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
184	4920	否	否	是	是	否	否	否	否	否	否	否	否
185	4925	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
187	4935	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
188	4940	否	否	是	是	否	否	否	否	否	否	否	否
189	4945	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
192	4960	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否	否
196	4980	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否	否
7	5035	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
8	5040	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
9	5045	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
11	5055	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否	否	否
12	5060	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
16	5080	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
34	5170	否	否	仅客户端	否	是	否	是	是	室内	否	室内	室内
36	5180	是	室内	是	否	是	是	是	是	室内	是	室内	室内
38	5190	否	否	仅客户端	否	是	否	是	是	室内	否	室内	室内
40	5200	是	室内	是	否	是	是	是	是	室内	是	室内	室内
42	5210	否	否	仅客户端	否	是	否	是	是	室内	否	室内	室内
44	5220	是	室内	是	否	是	是	是	是	室内	是	室内	室内
46	5230	否	否	仅客户端	否	是	否	是	是	室内	否	室内	室内
48	5240	是	室内	是	否	是	是	是	是	室内	是	室内	室内
52	5260	DFS	室内 /DFS/TPC	DFS/TPC	否	是	DFS/TPC	是	是	室内	DFS/TPC	室内	室内
56	5280	DFS	室内 /DFS/TPC	DFS/TPC	否	是	DFS/TPC	是	是	室内	DFS/TPC	室内	室内
60	5300	DFS	室内 /DFS/TPC	DFS/TPC	否	是	DFS/TPC	是	是	室内	DFS/TPC	室内	室内
64	5320	DFS	室内 /DFS/TPC	DFS/TPC	否	是	DFS/TPC	是	是	室内	DFS/TPC	室内	室内
100	5500	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
104	5520	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
108	5540	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
112	5560	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
116	5580	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
120	5600	否	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	否	是	DFS
124	5620	否	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	否	是	DFS
128	5640	否	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	是	DFS/TPC	否	是	DFS
132	5660	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	否	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
136	5680	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	否	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
140	5700	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	否	否	否	否	否	DFS/TPC	DFS/TPC	是	DFS
149	5745	是	SRD(25 mW)	否	否	是	是	否	是	否	是	否	是
153	5765	是	SRD(25 mW)	否	否	是	是	否	是	否	是	否	是
157	5785	是	SRD(25 mW)	否	否	是	是	否	是	否	是	否	是
161	5805	是	SRD(25 mW)	否	否	是	是	否	是	否	是	否	是
165	5825	是	SRD(25 mW)	否	否	是	是	否	是	否	是	否	是

表 4. 各国提供的 802.11 5 GHz 频段。中心频率被给予宽 20 MHz 或 40 MHz 的信道。80 MHz 信道建有多条相邻的 40 MHz 信道。160 MHz 信道建有多条相邻的 80 MHz 信道。80 MHz 和 160 MHz 的中心频率与本表提供的中心频率不同。

动态频率选择 (DFS) – 其目标是通过频率重复使用来实现每秒 / 每 Hz / 每个电台信息的最大系统频谱效率，同时仍保证一定的服务等级，避免附近信道的同道干扰和邻道干扰。

室内 – 信道只能用于室内。

仅客户端 – 信道只能用于客户端模式。

发送功率控制 (TPC) – 在通信系统中智能选择发送功率，在系统内实现优秀的性能。

短程设备 (SRD) – 规定了使用这条信道的设备允许的功率电平。

是 / 否 – 各国都规定了允许使用哪条信道。



物理层 (PHY) 帧结构

802.11 物理层使用突发传输或分组。每个分组包含一个前置码、包头和净荷数据 (图 11)。前置码允许接收机获得时间和频率同步, 估算信道特点、以实现均衡。这是一个位顺序, 接收机观察这个位顺序, 锁定到传输其余部分。包头提供了与包配置有关的信息, 如格式、数据速率、等等。最后, 净荷数据包含传送的用户净荷数据。

802.11 标准规定了数据传输及无线链路管理和控制使用的“帧”类型。在顶层, 这些帧分成三种功能: 管理帧、控制帧和数据帧。每个帧包含一个 MAC 包头、净荷和帧校验顺序 (FCS)。某些帧可能没有净荷。MAC 包头的前两个字节构成了一个帧控制字段, 指明了帧的形式和功能。帧控制字段进一步分成下列子字段:

- **协议版本:** 两位, 表示协议版本。目前使用的协议版本为零。其他值预留给将来使用。
- **类型:** 两位, 指明 WLAN 帧的类型。控制帧、数据帧和管理帧是 IEEE 802.11 中规定的不同帧类型。
- **子类型:** 四位, 进一步区分各个帧。类型和子类型一起识别具体帧。
- **ToDS 和 FromDS:** 每个长度都为二位。它们指明数据帧是否指向分布系统。控制帧和管理帧把这些值设置为零。所有数据帧都设置其中一个位, 但 IBSS 网络内部的通信一直把这些位设置为零。
- **More Fragments(更多段):** 在包分成多个帧传输时设置 More Fragments(更多段) 位。除包的最后的帧外, 每个帧都设置这个位。
- **重试:** 有时候帧要求重传, 为此有一个 Retry(重试) 位, 在重新发送帧时, 这个重试位设置成 1。这可以帮助消除重复的帧。
- **功率管理:** 这个位指明帧交换结束后发送方的功率管理状态。接入点必须管理连接, 永远不能设置节电装置位。
- **More Data(更多数据):** More Data(更多数据) 位用来缓冲分布式系统中收到的帧。接入点使用这个位, 便于电台使用节电模式。它表明至少有一个帧, 并能满足连接的所有电台。
- **WEP:** 在处理帧之后修改 WEP 位。在一个帧已经被解密时, 它拨到 1; 或者如果没有设置加密, 那么它已经是 1。
- **Order(较老):** 只有在采用“严格排序”传送时才设置这个位。帧和段并不是一直按顺序发送的, 因为它会引起传输性能代价。

下面两个字节预留给 Duration ID(持续时间 ID) 字段。这个字段可以采取三种形式之一：持续时间、无争用时间周期 (CFP) 和关联号 (AID)。一个 802.11 帧最多有 4 个地址字段。每个字段可以承载一个 MAC 地址。地址 1 是接收机，地址 2 是发射机，地址 3 用于接收进行过滤。

Sequence Control(顺序控制) 字段是一个两字节段，用来识别消息顺序，消除重复帧。前 4 个位用于段号，最后 12 个位是序列号。有一个可选的 2 字节服务质量控制字段，这是 802.11e 增加的字段。Frame Body(帧体) 字段长度是可变的，长度为 0 - 2304 字节外加来自安全封装的任何开销，它包含着来自更高层的信息。帧校验顺序 (FCS) 是标准 802.11 帧中最后 4 个字节。它通常称为循环冗余校验 (CRC)，允许校验检索的帧的完整性。要发送帧时，会计算和追加 FCS。在电台收到一个帧时，它可以计算帧的 FCS，并把它与收到的帧进行比较。如果两者匹配，则视为帧在传输过程中没有失真。

管理帧

管理帧用来维持通信。某些常用的 802.11 子类型包括：

- **鉴权帧：**802.11 鉴权过程首先使用无线网络接口控制器 (WNIC) 向接入点发送一个鉴权帧，其中包含其身份。在开放系统鉴权中，WNIC 只发送一个鉴权帧，接入点应答一个自己的鉴权帧，指明接受或拒绝。在共享密钥鉴权中，在 WNIC 发送初始鉴权请求后，它将从接入点中收到一个鉴权帧，其中包含质询文本。WNIC 把一个包含加密版质询文本的鉴权帧发送到接入点。通过使用自己的密钥解码，接入点确保文本使用正确密钥加密。这个流程的结果决定着 WNIC 的鉴权状态。
- **关联请求帧：**从一个电台发送，使得接入点能够分配资源及同步。这个帧承载与 WNIC 有关的信息，包括支持的数据速率及电台希望关联的网络的 SSID。如果请求被接受，接入点会预留内存，为 WNIC 建立一个关联号。
- **关联应答帧：**从接入点发送到电台，包含对关联请求的接受或拒绝信息。如果是接受，那么这个帧中将包含关联号及支持的数据速率等信息。
- **信标帧：**定期从接入点发出，宣称其存在，为范围内的 WNIC 提供 SSIC 和其他参数。
- **反鉴权帧：**从希望与另一个电台拆线的电台发出。
- **去关联帧：**从希望拆线的电台发出。它提供了一种优异的方式，允许接入点释放内存分配，从关联表中删除 WNIC。
- **探测请求帧：**在要求另一个电台提供信息时从一个电台发出。
- **探测应答帧：**在收到探测请求帧后从一个接入点发出，包含功能信息、支持的数据速率等。
- **再关联请求帧：**WNIC 在从当前关联的接入点范围掉线，并发现另一个信号更强的接入点时，它会发出再关联请求。新接入点协调转发以前接入点缓冲器中仍包含的任何信息。
- **再关联响应帧：**从接入点发出，包含对 WNIC 再关联请求帧的接受或拒绝。这个帧包含着关联要求的信息，如关联号和支持的数据速率。

控制帧

控制帧便于在电台之间交换数据帧。某些常用的 802.11 控制帧包括：

- **确认 (ACK) 帧**：在收到数据帧后，如果没有发现错误，接收站将向发送站发送一个 ACK 帧。如果发送站在预定的时间周期内没有收到 ACK 帧，那么发送站将重发这个帧。
- **发送请求 (RTS) 帧**：RTS 和 CTS 帧为拥有隐藏站的接入点提供选配的碰撞减少方式。在发送数据帧之前，电台先发送一个 RTS 帧，作为要求的双向握手的第一步。
- **发送清除 (CTS) 帧**：电台对 RTS 帧应答一个 CTS 帧。它为请求站发送数据帧提供清除功能。通过包括一个时间值，CTS 提供碰撞控制管理，在这个时间内，在请求站传送信息时，所有其他站都抑制传输。

数据帧类型划分			
帧类型	基于争用的服务	无争用服务	承载数据
Data	X		是
Data+CF-Ack		X	是
Data+CF-Poll		仅 AP	是
Data+CF-Ack+CF-Poll		仅 AP	是
Null	X	X	否
CF-Ack		X	否
CF-Poll		仅 AP	否
CF-ACK+CF-Poll		仅 AP	否

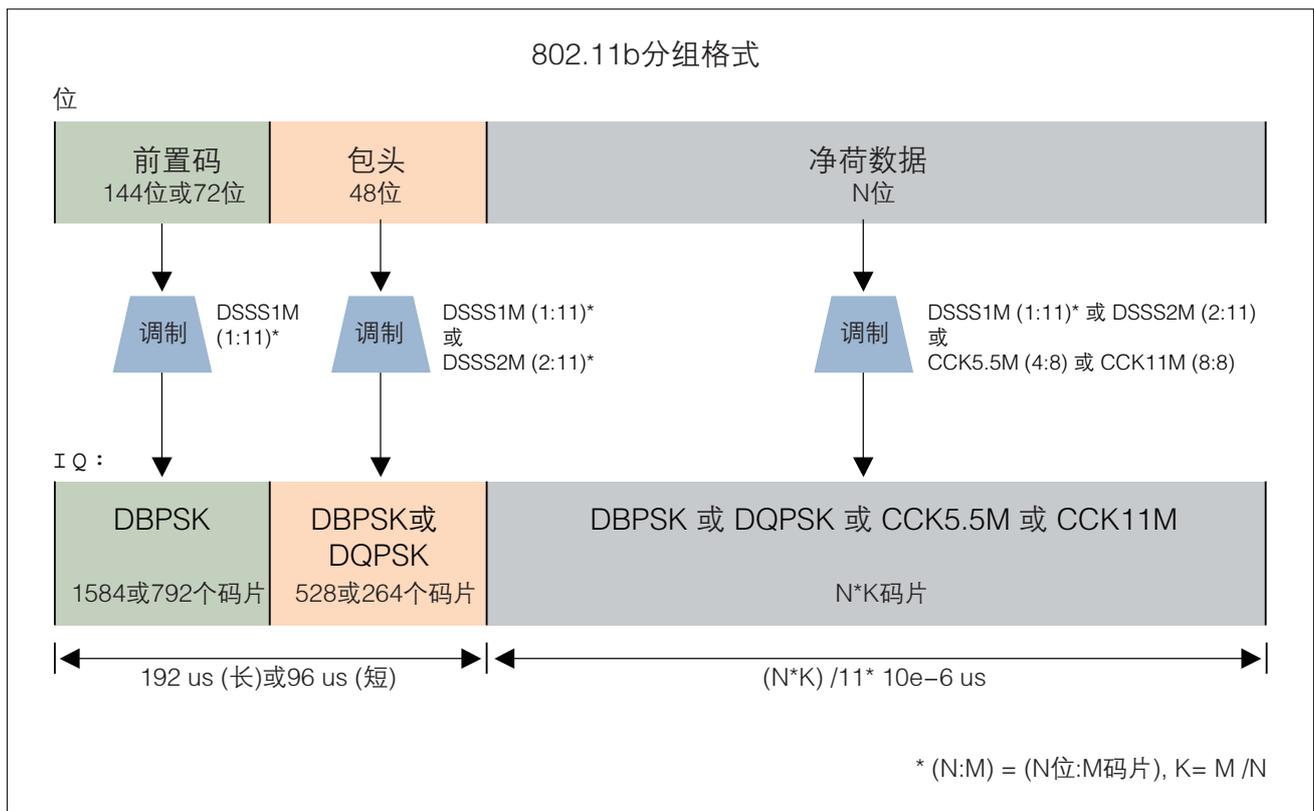
表 5. 数据帧类型划分。

数据帧

数据帧在帧体中承载更高级的协议数据。根据数据帧的特定类型，图中某些字段可能不会使用。可以根据功能对不同的数据帧类型归类。其中一种分类是基于争用的服务使用的数据帧与无争用服务使用的数据帧。只在无争用周期内出现的任何帧永远都不能用于独立基本服务集 (IBSS) 中。另一种分类方式是承载数据的帧与执行管理功能的帧。表 5 说明了可以怎样根据这些界限划分不同类型的帧。

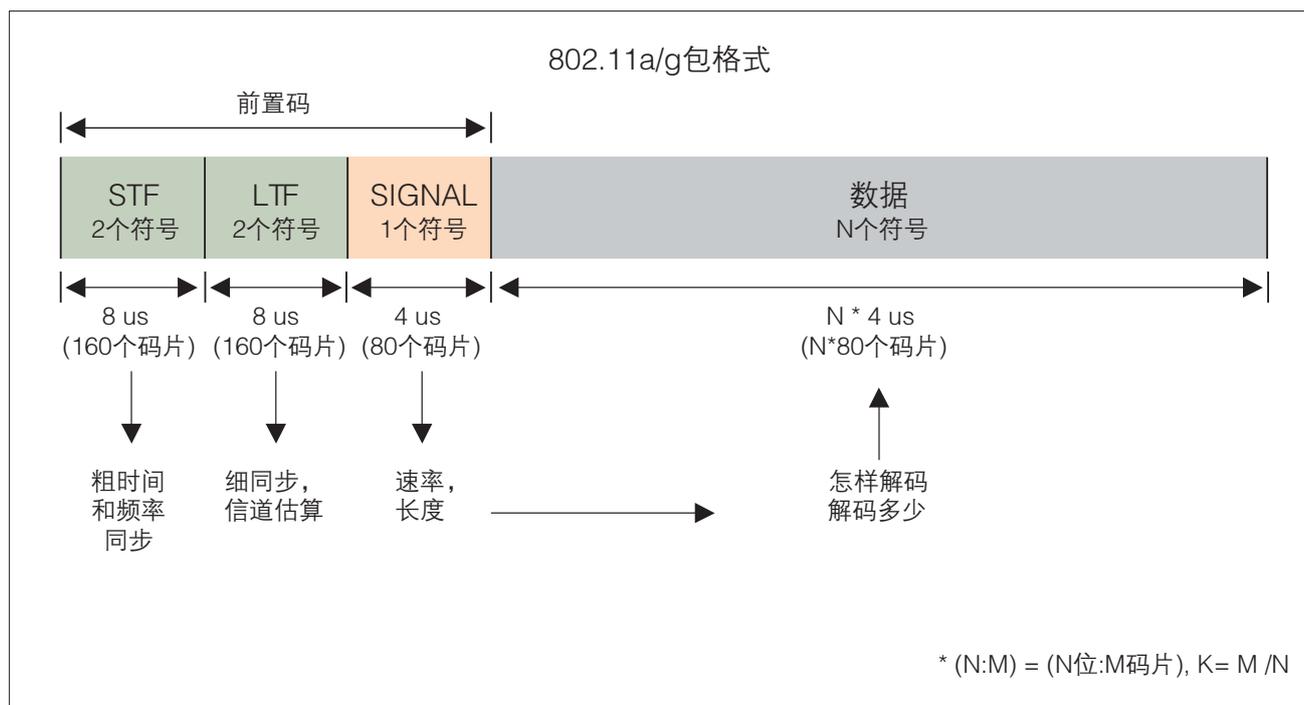
802.11b 包格式

802.11b 包格式 (参见下图)	
前置码和包头	长 (最初要求) 短 ("b" 中选配)
前置码	一直使用 DSSS1M 长前置码包含 144 位 (128 个加扰 1 + 16 个 SFD 标记位) 短前置码包含 72 位 (56 个加扰 0 + 16 个 SFD 标记位)
包头	长包头使用 DSSS1M, 短包头使用 DSSS2M 包含指明配置的 48 个位: 信号 (8 位): 指明净荷数据速率 (1, 2, 5.5 或 11 Mbps) 服务 (8 位): 额外的 HR 配置位 长度 (16 位): 净荷数据的长度, 单位: 微秒 CRC(16 位): 保护包头数据内容
净荷	使用 DSSS1M、DSSS2M、CCK5.5M, 或 CCK11M 调制的净荷数据



802.11a/g 包格式

802.11a/g 包格式 (参见下图)	
前置码	<p>STF: 短训练字段 (2 个符号)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 用在 1/4 的副载波上, 每 16 个码片重复一次。 - 初始定时同步和频率估算。 <p>LTF: 长训练字段 (2 个符号)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 使用全部 52 个副载波 (同数据符号)。 - 细时间和频率同步, 信道响应估算。 <p>信号: (1 个符号)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 编码与数据符号类似, 但一直使用 BPSK 调制。24 位配置数据。 - 字段: <ul style="list-style-type: none"> - RATE (4 位): 指明数据 FEC 编码和调制 (8 种组合), 即 "MCS" - LENGTH (12 位): 净荷中承载的 8 位字节 (字节) 数 - PARITY (1 位): 在 RATE+LENGTH 数据上进行偶数奇偶性校验 - TAIL (7 位): 用于 SIGNAL 符号 FEC 解码
净荷	<p>52 个副载波, 48 个数据副载波 + 4 个导频副载波</p> <p>数据副载波使用 BPSK、QPSK、16QAM 或 64QAM 调制。在所有符号中相同导频副载波 (仅 BPSK) 用来跟踪突发上的频率 / 相位和幅度变化</p>



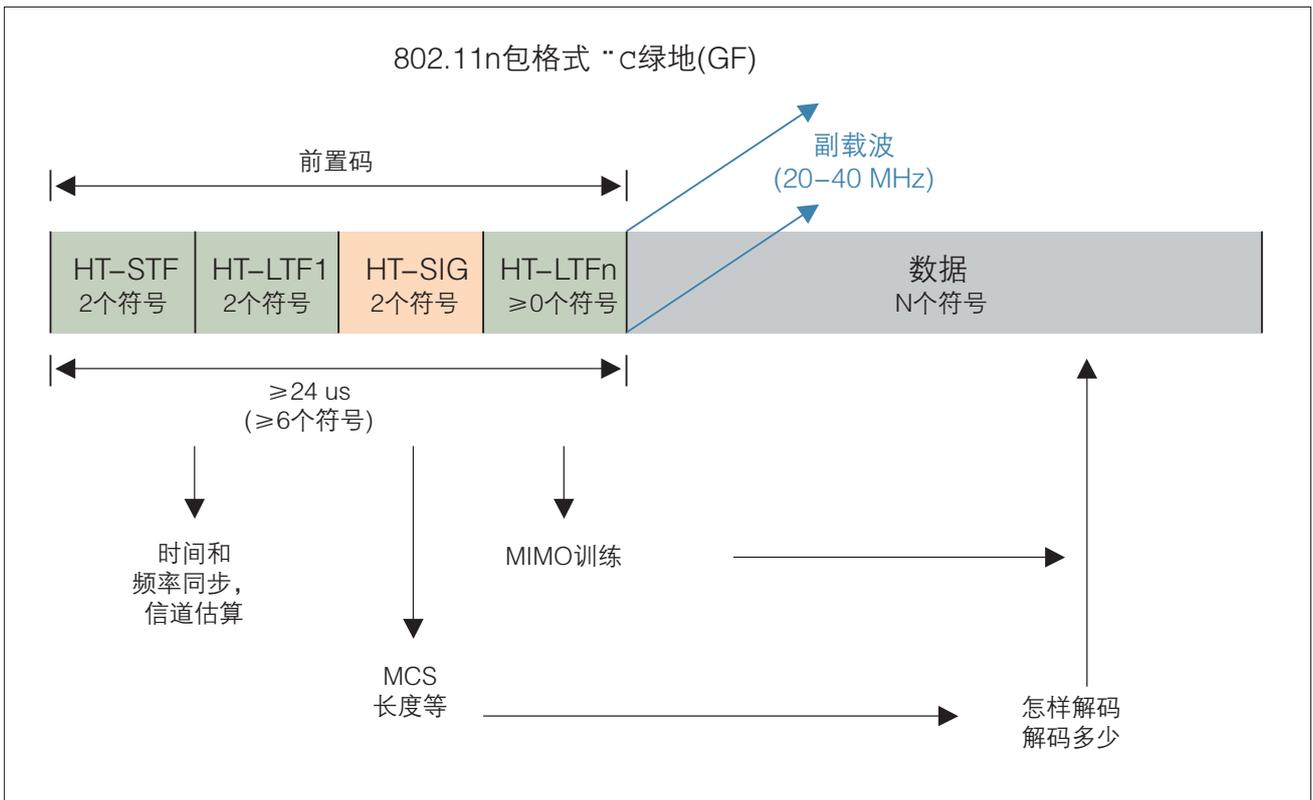
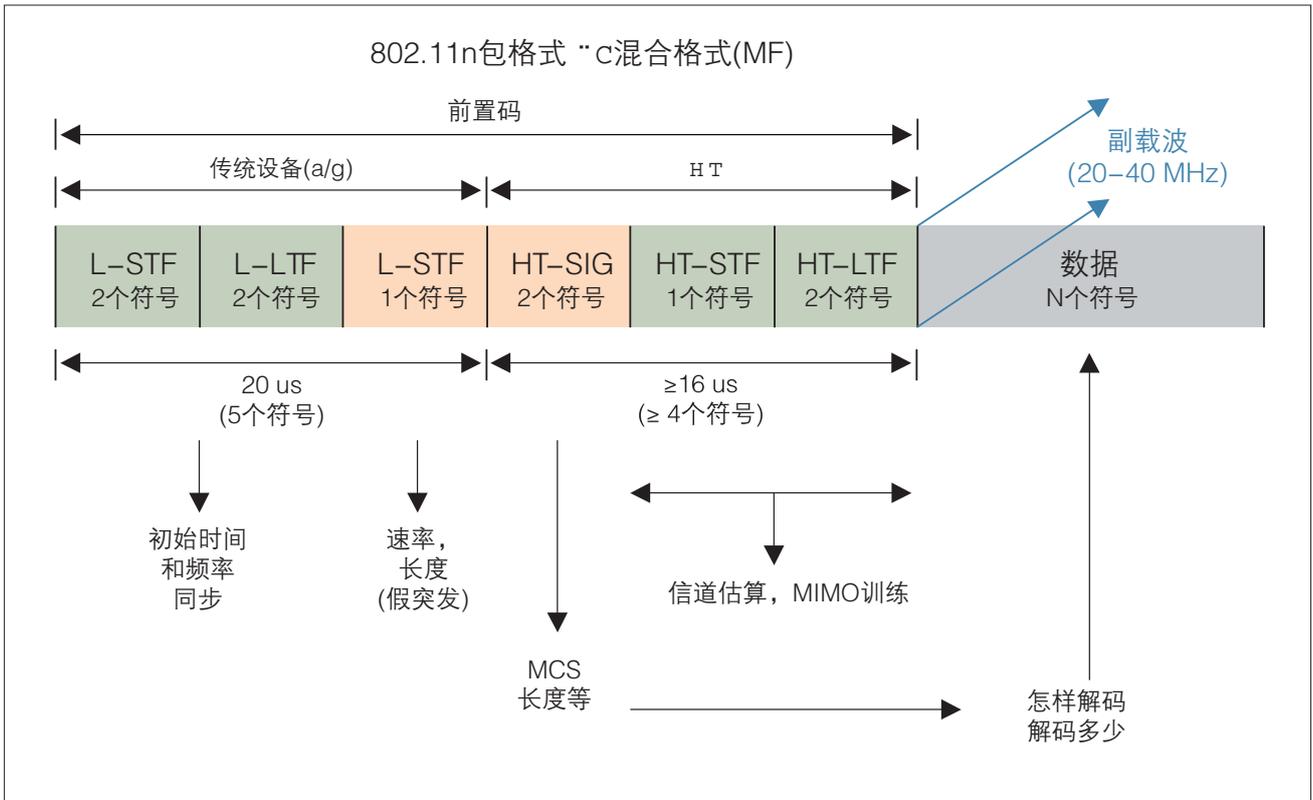
802.11n 包格式

有两种 802.11n 运行模式：绿地模式 (HT) 和混合模式 (非 HT)。绿地模式只能用于没有传统系统的环境中。HT 系统不能在绿地模式和混合模式之间切换，它们只能使用其中一种模式。采用非 HT 模式的 802.11n 接入点以老 802.11a/g 格式发送所有帧，从而传统电台能够理解这些帧。这种接入点必须使用 20 MHz 信道，本文中并没有介绍 HT 新功能。所有产品都必须支

持这种模式，以保证向下兼容能力，但采用非 HT 模式的 802.11n 接入点提供的性能不会优于 802.11a/g。

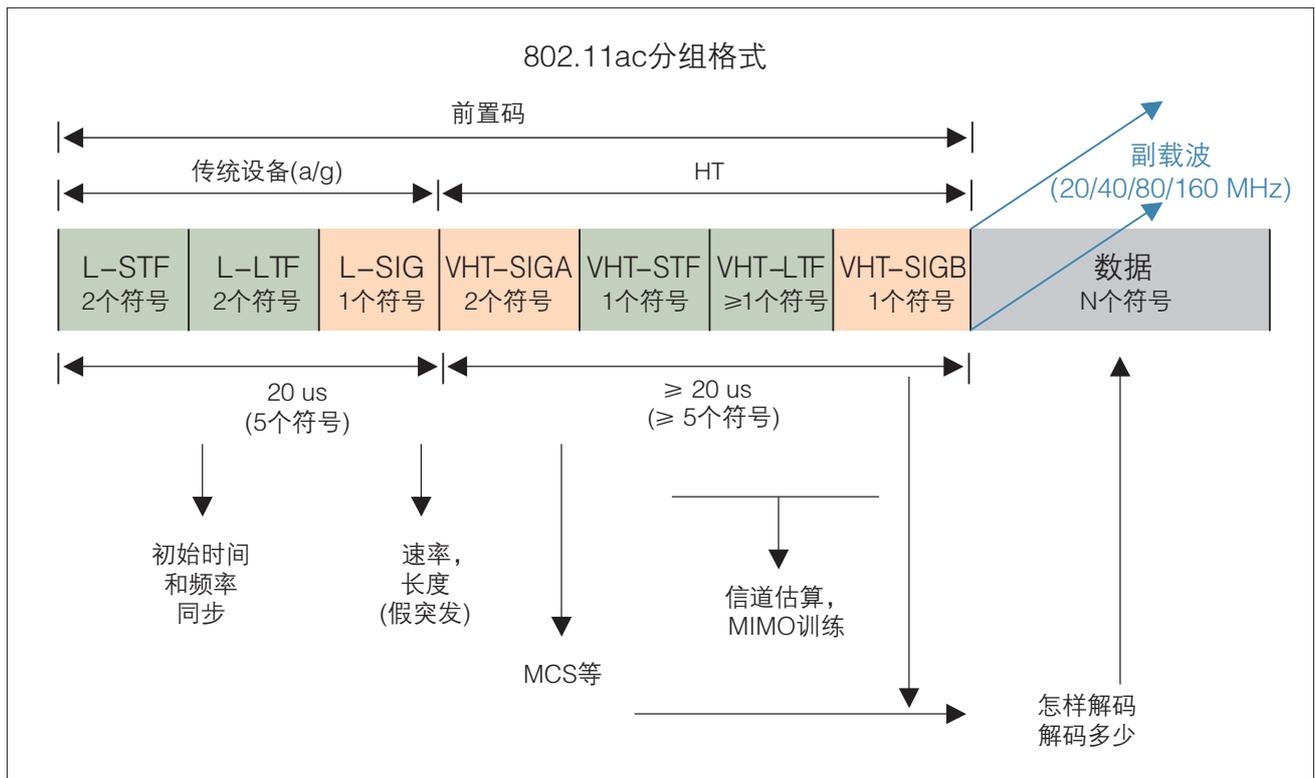
必须遵守的 HT 混合模式是最常用的 802.11n AP 工作模式。在这种模式下，HT 增强功能可以与 HT 保护机制同时使用，HT 保护机制允许与传统电台通信。HT 混合模式提供了向下兼容能力，但与绿地模式相比，802.11n 设备要付出明显的吞吐量代价。

802.11n 包格式 (参阅第 23 页图)	
前置码	<p>非 HT 传统模式</p> <p>L-STF、L-LTF、L-SIG 向下兼容 a/g 系统</p> <p>L-SIG 包含 RATE 和 LENGTH 值，告诉传统系统抑制下一个 Tx 企图多长时间</p> <p>HT 混合模式</p> <p>HT-SIG (2 个符号)：指明 MCS(调制和编码方式)、长度和其他 HT 特定参数</p> <p>HT-STF (1 个符号)、HT-LTF (≥ 1 个符号)：允许在 HT 带宽上实现同步和信道估算 (副载波数量超过 L-LTF)。</p> <p>MIMO 配置包括其他 HT-LTF 符号，以“发声”表明多条信道 (路径)</p>
混合模式	
绿地模式	<p>L-STF、L-LTF、L-SIG 被丢弃，HT-STF 和 HT-LTF 代替 L-STF/LTF</p> <p>其他地方与 MF 前置码类似</p> <p>- 字段：</p> <ul style="list-style-type: none"> - RATE (4 位)：指明数据 FEC 编码和调制 (8 种组合)，即 "MCS" - LENGTH (12 位)：净荷中承载的 8 位字节 (字节) 数 - PARITY (1 位)：在 RATE+LENGTH 数据上进行偶数奇偶性校验 - TAIL (7 位)：用于 SIGNAL 符号 FEC 解码
净荷	<p>56 个 (20 MHz) 或 114 (40 MHz) 副载波</p> <p>数据副载波使用 BPSK、QPSK、16QAM 或 64QAM 调制。在所有符号中相同</p> <p>导频副载波 (仅 BPSK) 用来跟踪突发上的频率 / 相位和幅度变化</p> <p>如果多路环境允许，可以选用短保护间隔</p>



802.11ac 包格式

802.11ac 包格式 (参见下图)	
前置码	单一前置码格式, 没有绿地类型
传统模式	L-STF、L-LTF、L-SIG 向下兼容 a/g 系统 L-SIG 包含 RATE 和 LENGTH 值, 告诉传统系统抑制下一个 Tx 企图多长时间
VHT 模式	VHT-SIGA (2 个符号): 指明 MCS (调制和编码方式) 和其他 VHT 特定参数 VHT-STF (1 个符号), VHT-LTF (≥ 1 个符号): 允许在 VHT 带宽上进行同步和信道估算 (副载波数量超过 L-STF/L-LTF)。 MIMO 配置模式包括其他 VHT-LTF 符号, 以“发声”表明多条信道 (路径) VHT-SIGB (1 个符号): 长度参数, MU-MIMO 支持
净荷	56/114/242/484 (20/40/80/160 MHz) 个副载波 (数据 + 导频) 数据副载波使用 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 或 256QAM 调制。在所有符号中相同 导频副载波 (仅 BPSK) 用来跟踪突发上的频率 / 相位和幅度变化 如果多路环境允许, 可以选用短保护间隔



物理层调制格式

物理层调制格式和编码速率决定着怎样在空中及以什么数据速率发送 802.11 数据。例如，直序扩频 (DSSS) 用于早期 802.11 标准中，正交频分复用 (OFDM) 则正在被许多之后的标准使用。一般来说，调制方式和编码速率越新，效率越高，保持的数据速率也越高，但其仍支持较老的调制方法和速率，以实现向下兼容能力。表 6 重点介绍了每项 802.11 标准的调制格式。这一节更详细地讨论了当前使用的两种主要调制技术：DSSS 和 OFDM。

直序扩频

对最初的传统 802.11 和 802.11b 标准，它们采用直序扩频 (DSSS) 调制技术。与其他扩频技术一样，发送的信号占用的带宽要超过调制载波或广播频率的信息信号。“扩频”一词源于载波信号发生在设备发送频率的整个带宽 (频谱) 上这一事实。

直序扩频传输把发送的数据乘以一个“噪声”信号。这个噪声信号是由 1 和 -1 两个值组成的伪随机序列，其频率远远高于原始信号。

得到的信号类似于白噪声，与“静态”的音频记录类似。然后可以使用这种类似噪声的信号，通过把它乘以相同的伪随机号 (PN) 顺序 (因为 $1 \times 1 = 1$ 和 $-1 \times -1 = 1$)，在接收端精确地重建原始数据。这个流程称为“反扩”，它以数字方式在发送的 PN 顺序与接收机认为发射机正在使用的 PN 顺序之间建立关联。增强信道上信噪比的效应称为处理增益。通过采用更

802.11 标准使用的调制技术	
传统	DSSS – DBPSK (1M) DSSS – DQPSK (2M)
802.11b	HR/DSSS – CCK (5.5M, 11M) HR/DSSS – PBCC (5.5M, 11M) (过时)
802.11g	ERP – PBCC (22M, 33M) (过时) DSSS – OFDM (6–54M) (废弃)
802.11a/g	OFDM (6–54M)
802.11n	HT20/40 (6.5 – 150M) (SISO 1x1:1) HT20/40 (13 – 600M) (MIMO, 最高 4x4:4)
802.11ac	VHT20/40/80/160 (6.5 – 867M) (SISO 1x1:1) VHT80+80 (58.5 – 867M) (SISO 1x1:1) VHT20/40/80/160 (13 – 6933M) (MIMO, 最高 8x8:8) VHT80+80 (117 – 6933M) (MIMO, 最高 8x8:8)

表 6. 802.11 标准使用的调制技术。

长的 PN 顺序及每个位更多的码片，可以进一步扩大这种效应，但用来生成 PN 顺序的物理设备会给可以实现的处理增益带来实际限制。

如果一台不希望的发射机在同一条信道上发送信号，但其采用不同的 PN 顺序 (或根本没有顺序)，反扩流程对该信号不会产生处理增益。这种效应是 DSSS 码分多址 (CDMA) 特性的基础，允许多台发射机在 PN 顺序交叉关联特点的极限范围内共享同一条信道。



图 12. 802.11b DSSS 发送的波形以载频为中心大体呈钟状。

图 12 显示了发送的波形图以载频为中心大体呈钟状，就像正常 AM 传输一样，但有一点除外，增加的噪声会导致分布远远宽于 AM 传输。

相比之下，跳频扩频以伪随机方式重新调谐载波，而不是在数据中增加伪随机噪声，后者会得到正态频率分布，其宽度由伪随机数字发生器的输出范围确定。

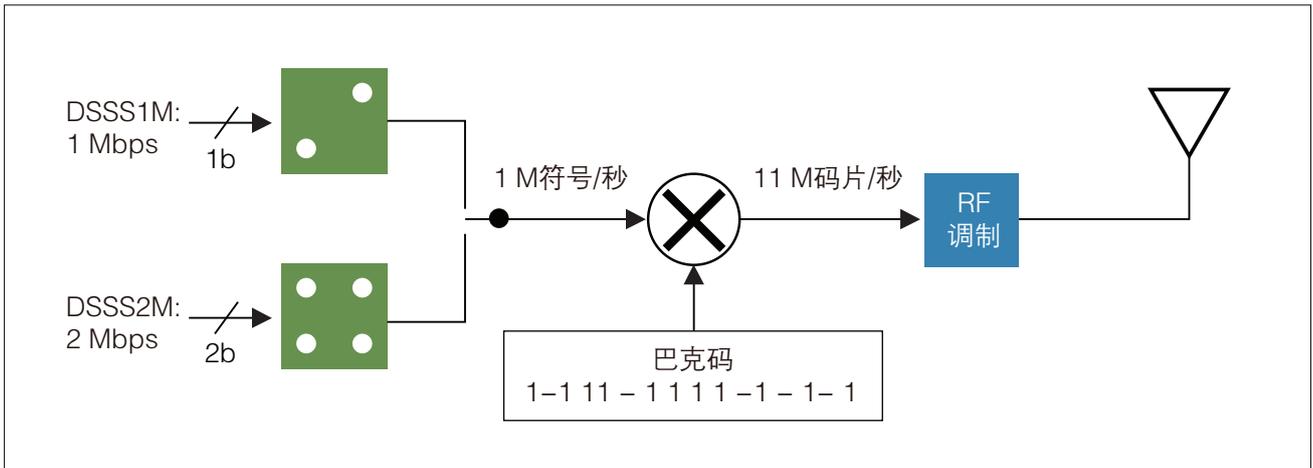


图 13. 802.11b 标准中使用的 BPSK/QPSK 调制技术。

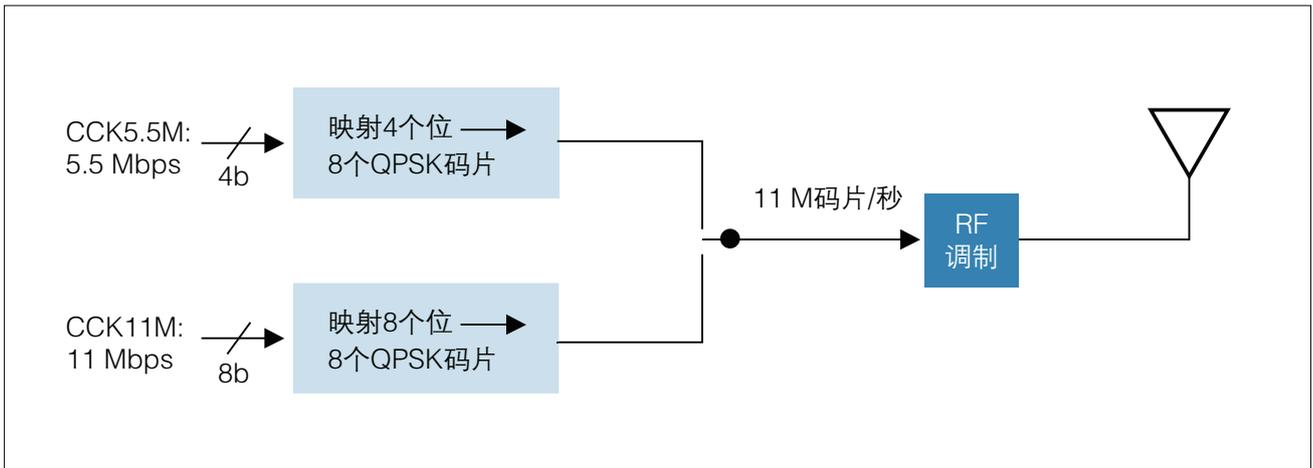


图 14. 802.11b 标准中使用的 QPSK/QPSK 调制技术。

802.11 DSSS 调制采用一种两阶段流程。在第一阶段，1 位或 2 位数据使用差分 BPSK (DBPSK) 或差分 QPSK (DQPSK) 方式编码。这两种编码方式都以 1 M 符号 / 秒的速度生成复数值 IQ 符号。由于 DBPSK 每个符号承载 1 个位，因此它会得到 1 Mbps 数据吞吐量，DQPSK 则得到 2 Mbps 吞吐量，把 DBPSK 的容量有效翻一番。DQPSK 更高效地使用频谱，但降低了抗噪声和抗其他干扰的能力。根据差分编码，其应用 11 码片巴克码扩展，把速率为 1 M 符号 / 秒的符号转换成 11 M 码片 / 秒的码片顺序。然后，这些码片在 RF 载波上调制并进行传输 (图 13)。

为把数据速率提高到 2 Mbps 以上，802.11b 还规定了互补键控 (CCK) 技术，其中包括适用于 5.5 Mbps 和 11 Mbps 数据速率的一套 8 片代码字。CCK 代码字拥有独特的数学属性，即使在存在明显噪声和多径干扰时，接收机仍正确把它们区分开来。5.5 Mbps 速率使用 CCK，每个符号编码 4 个比特；11 Mbps 速率每个符号编码 4 个比特。这两种速度都采用 QPSK 作为调制技术，可以实现更高的数据速率 (图 14)。

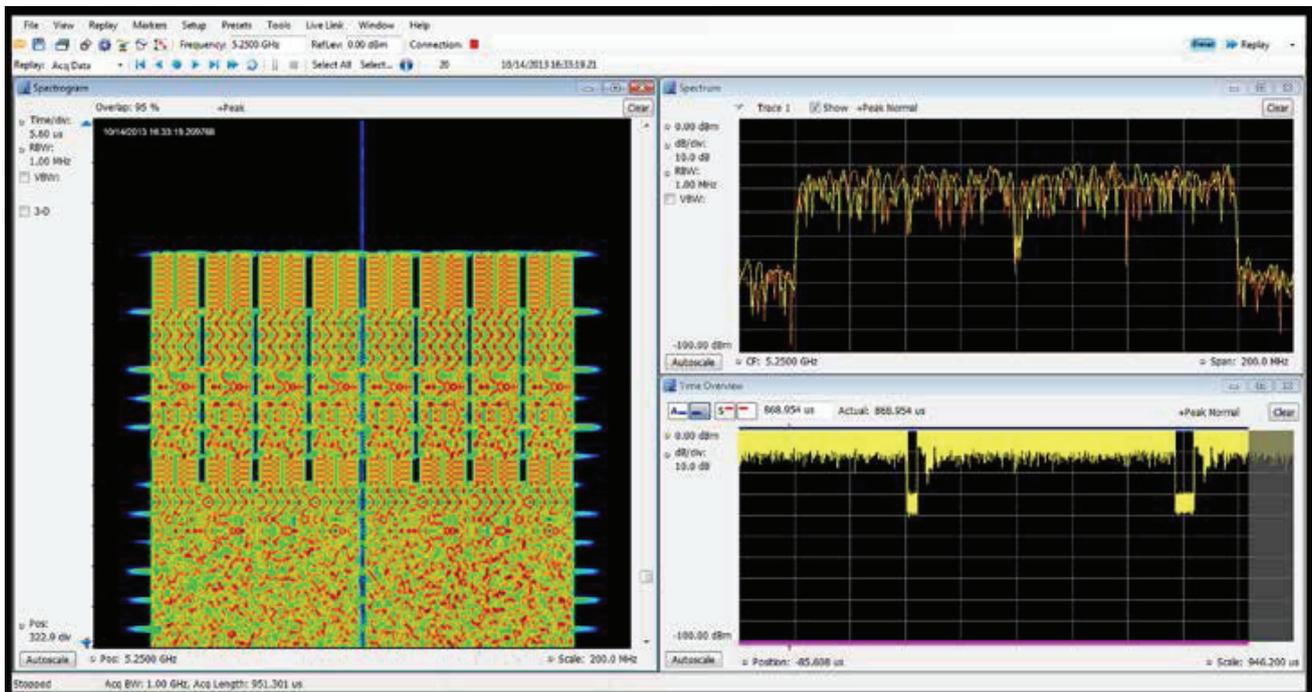


图 15. OFDM 调制技术提供了大量的选择，允许系统适应当前信号条件的最优数据速率。

正交频分复用 (OFDM)

正交频分复用 (OFDM) 是一种在多个副载频上编码数字数据的方法。通过把数据分成多条隔行扫描的、在一个单独副载波上调制的并行码流，OFDM 可以传输宽带高数据速率信息。这种调制技术为消除多路传播和符号间干扰 (ISI) 的负面效应提供了一个强健的解决方案。由于能够提供多种调制和编码方式，它可以简便地适应并改善信道质量。多种选择允许系统适应当前信号条件下最优的数据速率。图 5 显示了 802.11ac OFDM 信号实例。

过去，信道之间的间隔通常要高于符号速率，以避免频谱重叠。但在 OFDM 系统中，多个副载波重叠在一起，节约了带宽。使多个副载波相互保持正交可以控制副载波干扰。正交意味着多个副载波之间存在着数学关系。

在 OFDM 中，高速率数据信号被均等地分布在多个副载波中。这降低了数据速率，提高了副载波的符号持续时间，从而降低了多径延迟扩展在时间上导致的相对色散量。相位噪声和非线性失真给正交损耗的影响最大，导致了载波间干扰 (ICI)。它增加了一个保护间隔，帮助防止 ICI 及 ISI。数据速率较慢的信号耐多径衰减和干扰的能力更强。

OFDM 较单载波方案的主要优势是其能够处理严峻的信道条件 (如由于多径导致的频选衰落), 而不需使用复杂的均衡滤波器。信道均衡得到简化, 因为 OFDM 可以视为使用多个缓慢调制的窄带信号, 而不是迅速调制的宽带信号。低符号速率可以经济地利用符号之间的保护间隔, 可望消除符号间干扰 (ISI), 并采用回声和时间扩展, 实现分集增益, 即改善信噪比。

数据调制和编码 (FEC) 组合

前向纠错 (FEC) 或信道编码技术用来控制通过不可靠的或有噪声的通信信道传输数据时的错误。其中心理念是发送方使用纠错代码 (ECC), 以冗余方式对消息编码。冗余使得接收方可以检测消息中任何地方发生的数量有限的错误, 通常在不需重传的情况下校正这些错误。FEC 使得接收机能够校正错误, 而不需反向信道请求重传数据, 但其代价是占用固定的更高的前向信道带宽。

在数字通信中, 码片是直序扩频 (DSSS) 代码的一个脉冲。代码的码片速率是代码传送 (或接收) 的每秒脉冲数量 (每秒码片数)。码片速率大于符号速率, 也就是说, 多个码片代表一个符号。

调制和编码方式 (MCS): 这是高吞吐量 (HT) 物理层 (PHY) 参数的一个指标, 其中由调制顺序 (如 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) 和前向纠错 (FEC) 编码速率 (如 1/2, 2/3, 3/4, 5/6) 组成。

802.11b		
调制	符号 / 码片比	数据速率 (Mbps)
DBPSK	1/11	1
DQPSK	1/5	2
DQPSK	1/2	5.5
BPSK	1/2	5.5
DQPSK	1	11
QPSK	1/2	11
8PSK	1	22
8PSK	1	33

802.11a/g			
速率	调制	FEC 速率	数据速率 (Mbps)
1101 (13)	BPSK	1/2	6
1111 (15)	BPSK	3/4	9
0101 (5)	QPSK	1/2	12
0111 (7)	QPSK	3/4	18
1001 (9)	16QAM	1/2	24
1011 (11)	16QAM	3/4	36
0001 (1)	64QAM	2/3	48
0011 (3)	64QAM	3/4	54

802.11n 的调制编码方式和前向纠错率				
MCS	调制	FEC 速率	数据速率	
			20 MHz (Mbps)	40 MHz (Mbps)
0	BPSK	1/2	7.2	15.0
1	QPSK	1/2	14.4	30.0
2	QPSK	3/4	21.7	45.0
3	16QAM	1/2	28.9	60.0
4	16QAM	3/4	43.3	90.0
5	64QAM	2/3	57.8	120.0
6	64QAM	3/4	65.0	135.0
7	64QAM	5/6	72.2	150.0

802.11ac 的调制编码方式和前向纠错率						
MCS	调制	FEC 速率	数据速率			
			20 MHz (Mbps)	40 MHz (Mbps)	80 MHz (Mbps)	160 MHz (Mbps)
0	BPSK	1/2	7.2	15.0	32.5	65.0
1	QPSK	1/2	14.4	30.0	65.0	130.0
2	QPSK	3/4	21.7	45.0	97.5	195.0
3	16QAM	1/2	28.9	60.0	130.0	260.0
4	16QAM	3/4	43.3	90.0	195.0	390.0
5	64QAM	2/3	57.8	120.0	260.0	525.0
6	64QAM	3/4	65.0	135.0	292.5	585.0
7	64QAM	5/6	72.2	150.0	325.0	650.0
8	256QAM	3/4	86.7	180.0	390.0	780.0
9	256QAM	5/6	N/A	200.0	433.3	866.7

WLAN 工作流程

为连接到 WLAN 网络上，设备必须配备一个无线网络接口控制器。计算机和接口控制器的组合称为一个电台 (STA)。所有电台都共享一条无线频率通信信道。传送范围内所有电台都接收这条信道上传送的数据。每个电台在无线频率通信信道上不断调谐，以捡拾提供的传输。

在位于配置成允许连接的无线网络的范围内时，支持 Wi-Fi 的设备可以连接到互联网。一个或多个 (互连) 接入点的覆盖范围可以从最小几个房间的区域扩展到几平方英里的范围。更大面积的覆盖范围可能要求覆盖范围相互叠加的一组接入点。

构成联合的一组无线电台 (STA) 称为基本服务集或 BSS。BSS 有两种：特定 BSS 和基础设施 BSS。特定 BSS 在多个 STA 之间提供直接通信，但不包括中央控制。在基础设施 BSS 中，多个 STA 与一个接入点 (AP) 关联，接入点还可以连接到网络上 (图 16)。

本节概括介绍在 802.11 设备之间建立通信链路和传送数据的 WLAN 工作流程。

剖析 WLAN 设备

在 802.11 早期，通常会把专用 PC 卡插到桌面电脑和笔记本电脑中。而今天，所有移动计算机和绝大部分手机都设计有内嵌 WLAN 模块。此外，这些内嵌模块正广泛应用于各种各样的装置和非传统计算设备中。这些实时操作系统提供了简单的方式，使得拥有串行端口并通过串行端口通信的任何设备实现无线通信，进而可以设计简单的监测设备，如在家监护患者的便携式 ECG 设备。支持 Wi-Fi 的这种设备可以通过互联网通信。

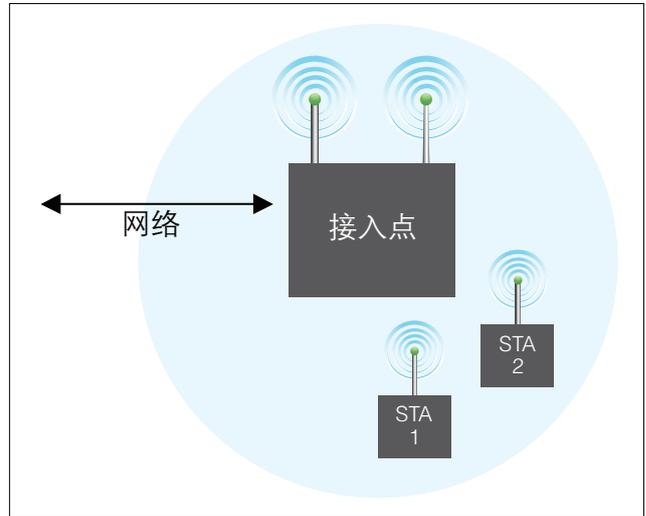


图 16. 基本服务集 (BSS) 是构成联合的一组无线电台 (STA)。

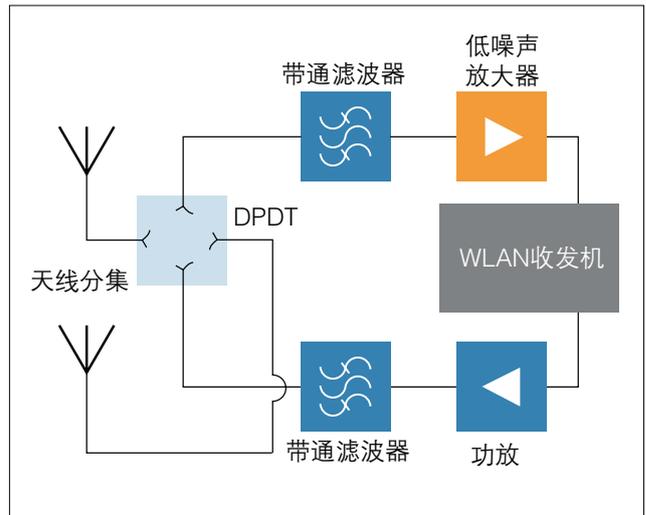


图 17. WLAN 设计的一个简单实例。

图 17 是是无线电系统简单的 WLAN 设计方框图。与大多数电子系统一样，无线电设计越新，集成度越高，但在性能上必须做出折衷。

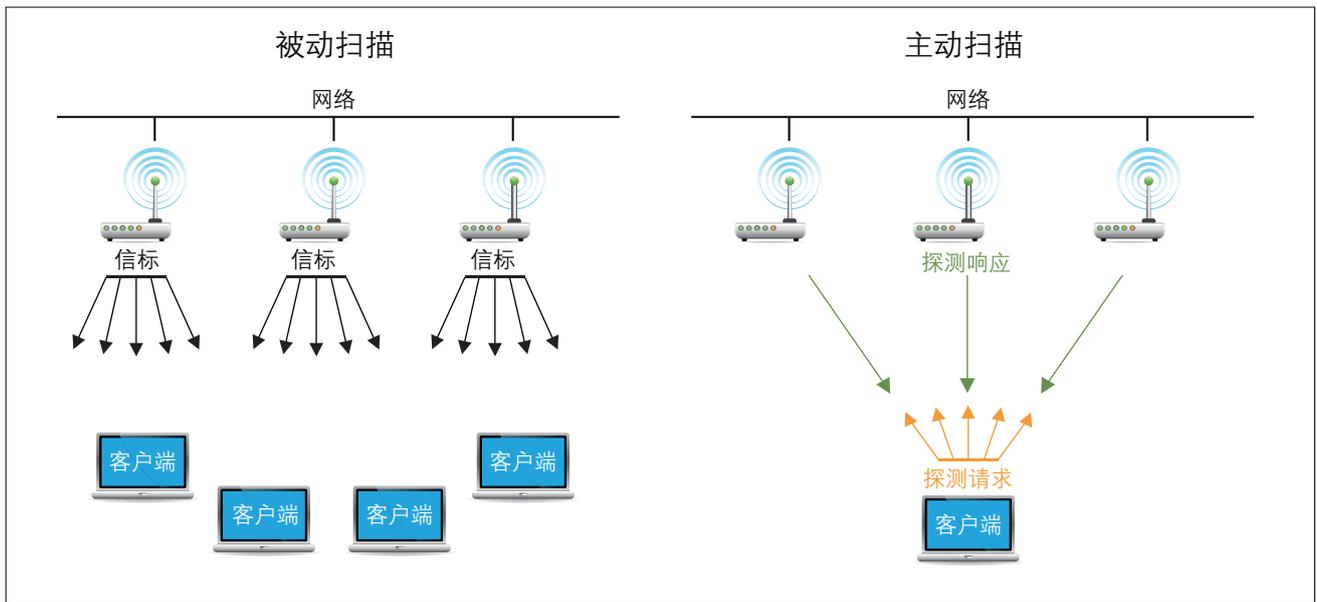


图 18. 802.11 设备可以与主动扫描或被动扫描建立联系。

接收机灵敏度非常重要，因为它决定着 WLAN 链路可以工作的最大范围。另外还有辅助的系统优势。如果一条链路由于错包率较低导致比另一条链路更快地结束传输，那么它可以降低电池耗电量，同时减少对其他用户的干扰。在真实世界环境中，干扰抑制和线性度将直接影响无线电的性能。在短训练序列中进行的接收信号强度指示 (RSSI) 测试决定着特定突发切换到哪条路径。

在发送一侧，通常必需包括一个外部功放 (PA)。成本、耗电量和线性度相结合，需要在进行这一选择时特别注意细节。尽管可以隔离测试模拟硬件，但它必需与基带电路的 DSP (数字信号处理) 结合在一起，才能构成一台完整的收发机。

建立联系

在设备第一次开机时，MAC 层上方的软件会激励设备建立联系。设备将使用主动扫描或被动扫描。

IEEE 规范支持不同的实现方式，因此设备之间的特点会有所差异。

被动扫描使用信标和探测请求。在选择一条信道后，扫描设备侦听来自其他设备的信标或探测请求。在被动扫描中，客户端要等待接收来自接入点的信标帧。信标从一个接入点传送，包含与接入点有关的信息及定时参考。与其他传输一样，它们要经过无干扰信道测试，因此可能会发生延迟。设备搜索网络，它侦听信道，直到发现一个可以加入的合适网络。

在主动扫描中，设备试图通过发送探测请求帧来定位接入点，并等待接入点发回探测响应。寻求建立联系的设备侦听无干扰信道，发送探测请求。探测请求帧可以是定向请求，也可以是广播探测请求。来自接入点的探测响应帧与信标帧类似。根据接入点的响应，客户端做出与连接接入点有关的决策。主动扫描建立联系的速度较快，但它耗用的电池电量较高。

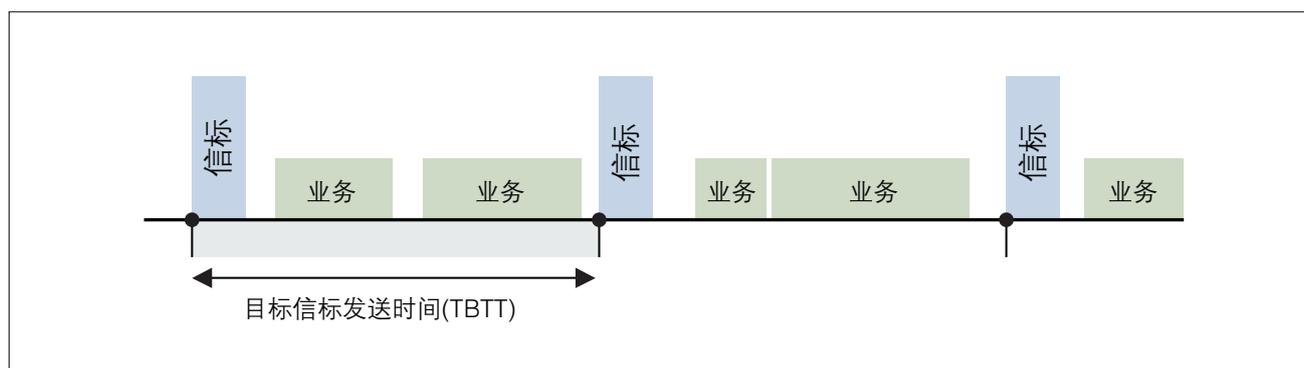


图 19. 接入点按定期间隔周期性地广播一个信标帧或包。

同步

接入点按定期间隔周期性地广播一个信标帧或包，一般为每 100 ms 一次，这称为目标信标发送时间或 TBTT。信标承载法规、功能和 BSS 管理信息，包括：

- 支持的数据速率
- SSID – 服务集合 ID (接入点的昵称)
- 时间标记 (同步)

接入点还使用信标宣称其功能，被动扫描的客户端使用这些信息，制订连接接入点的决策。这对保持所有客户端与接入点同步，以使客户端执行节能等功能必不可少。

鉴权

然后，接入点必需对电台鉴权，以便加入接入点网络。在开放网络中，设备发送一个鉴权请求，接入点发回结果。在安全网络中，有更正式的鉴权流程。802.1X 鉴权涉及三方：接入点、设备和鉴权服务器，鉴权服务器一般是一台主机，运行着支持要求的协议的软件。接入点提供安全功能，保护网络。只有设备的身份经过验证并得到授权时，才允许设备通过接入点接入网络受保护的一侧。如果鉴权服务器确定凭证有效，那么将允许请求方 (客户端设备) 接入位于网络上受保护一方的资源。

关联

鉴权之后是关联，它可以在设备和接入点之间传送数据。设备把一个关联请求帧发到接入点，接入点对客户端应答一个关联响应帧，要么允许关联，要么不允许关联。一旦关联成功，接入点会向客户端发行一个关联号，把客户端增加到其连接的客户端数据库中。

交换数据

只有在鉴权和关联之后，才允许传送数据。如果没有正确鉴权和关联就试图向接入点发送数据，会导致接入点应答反鉴权帧。数据帧会一直被确认。如果设备向接入点发送一个数据帧，那么接入点必须发送一个确认。如果接入点向设备发送一个数据帧，那么设备必须发送一个确认。接入点将把从客户端收到的数据帧转发到有线网络上要求的目的地。它还转发从有线网络定向到客户端的数据。接入点还可以在两个客户端之间转换业务，但这种情况并不常见。

进行发射机测量

发射机损伤会降低 WLAN 系统的性能，甚至阻碍 RF 设备协同工作。发射机测试具有重要意义，因为通过先分析发送的输出，可以迅速发现某些收发机问题。由于在发送侧和接收侧之间共享本振 (LO)，因此在发射机测试期间将看到影响接收机的任何本振问题。

本节重点介绍已经指定的、确保设备满足 802.11 标准及性能的测试。

发射机测试条件

IEEE 802.11 标准决定着发射机测试条件，但它不包括测试模式功能的任何空中控制。必须通过可以在 WLAN 设备或模块接入的测试端口来执行测试。

在测试设备时，要确认其没有与其他 WLAN 设备交互。此外，必需控制测试的特定标准 (a,b,g...)。通常需要特定设备软件或专有软件，控制设备完成特定测试模式。标准规定了各种测试模式，控制着无线电的工作状态和发射机参数。使用独立测试设备和软件控制这些设备要求测试工程师要特别注意测量触发和定时。

发射机测试

发射机功率

跳频扩频 (FHSS) PHY (14.7.14.2) 的 PMD 发送规范中规定了帧的标称发送功率。人们根据地区法规机构规定的作法测量允许的最大输出功率。否则，人们会作为整个分组上的平均功率完成测量，而不是信号类型。

发送频谱模板

每个标准变种都规定了发送频谱模板。这个模板提供了信道上允许分配的信号功率的极限。对 DSSS PHY, $f_c - 22 \text{ MHz} < f < f_c - 11 \text{ MHz}$ 和 $f_c + 11 \text{ MHz} < f < f_c + 22 \text{ MHz}$ 的发送频谱产物应小于 -30 dB (相对于 SINx/x 峰值的 dB)， $f < f_c - 22 \text{ MHz}$ 和 $f > f_c + 22 \text{ MHz}$ 的发送频谱产物应小于 -50 dB ，其中 f_c 是信道中心频率。图 7 显示了发送频谱模板。应使用 100 kHz 解析带宽和 30 kHz 视频带宽进行测量。对 OFDM PHY，发送频谱模板还可以由法规限制界定。在存在额外的法规限制时，设备必需同时满足法规要求及 IEEE 标准规定的模板，其辐射在任何频率偏置上不能高于法规和默认模板中规定的最小值。发送的信号发送频谱密度应落在频谱模板内，如图 8 所示。可以使用频谱模板诊断信号中存在的失真 (如压缩) 或到邻道的、可能损害邻道信号质量的任何泄漏。

频谱平坦度

频谱平坦度是衡量 OFDM 信号中副载波功率变化的指标。它应用来保证功率均匀扩展到信道中，检测输出滤波器性能问题。802.11n 标准 (HT PHY) 对频谱平坦度的规定如下：在 20 MHz 信道及 40 MHz 信道相应的 20 MHz 传输中，指数为 $+1$ 到 $+16$ 和 $+1$ 到 $+16$ 的每个副载波中的星座图的平均能量距其平均能量的偏移量不得超过 $\pm 4 \text{ dB}$ 。指数为 -28 到 -17 和 $+17$ 到 $+28$ 的每个副载波的平均能量距指数为 -16 到 -1 和 $+1$ 到 $+16$ 的副载波的平均能量的偏移量不得超过 $+4/-6 \text{ dB}$ 。

在 40 MHz 传输中 (不包括 MCS 32 格式和非 HT 复制格式)，指数为 -42 到 -2 和 $+2$ 到 $+42$ 的每个副载波中的星座图的平均能量距其平均能量的偏移量不得超过 $\pm 4 \text{ dB}$ 。指数为 -43 到 -58 和 $+43$ 到 $+58$ 的副载波的平均能量距指数为 -42 到 -2 和 $+2$ 到 $+42$ 的每个副载波的平均能量的偏移量不得超过 $+4/-6 \text{ dB}$ 。

在 MCS 32 格式和非 HT 复制格式下，指数为 -42 到 -33、-31 到 -6、+6 到 +31 和 +33 到 +42 的每个副载波中的星座图的平均能量距平均能量的偏移量不得超过 ± 4 dB。指数为 -43 到 -58 和 +43 到 +58 的每个副载波的平均能量距指数为 -42 到 -33、-31 到 -6、+6 到 +31 和 +33 到 +42 的副载波的平均能量的偏移量不得超过 $+4/-6$ dB。频谱平坦度要求的测试可以使用空间映射执行。

发送中心频率容限

发射机中心频率容限对 5 GHz 频段最大为 ± 20 ppm，对 2.4 GHz 最大为 ± 25 ppm。不同的发送链中心频率 (LO) 及每个发送链符号时钟频率均应从相同的参考振荡器中导出。

发送中心频率泄漏

某些发射机实现方案可能会导致中心频率成分泄漏。这些载波泄漏可能会由于 DC 偏置而发生在某些发射机中。这种问题在接收机一侧表现为发送中心频率的能量。基于 OFDM 的接收机系统通常采用某种方式，来消除载波泄漏。对 20 MHz 信道宽度中的传输，IEEE 强制要求发射机中心频率泄漏相对于整体发送功率不得超过 -15 dB，或相对于其余副载波的平均能量不得超过 +2 dB。对 40 MHz 信道宽度中的传输，中心频率泄漏相对于整体发送功率不得超过 -20 dB，或相对于其余副载波的平均能量不得超过 0 dB。对 40 MHz 信道中的上方或下方 20 MHz 传输，中心频率泄漏 (40 MHz 信道的中心) 相对于整体发送功率不得超过 -17 dB，或相对于其余副载波的平均能量不得超过 0 dB。对 802.11ac，除 RF LO 落在两个频段之外的不相邻的 80+80 MHz 以外，所有格式和带宽都应满足下述要求：

- 在 RF 本振位于发送带宽中心时，在使用 312.5 kHz 分辨率在传输带宽中心测得的功率不得超过发送的突发每个副载波的平均功率。

- 在 RF 本振没有在发送带宽的中心时，在使用 312.5 kHz 分辨率在传输带宽中心测得的功率相对于总发送功率不得超过 -32 dB，不得超过 -20 dBm。

对 RF 本振落到两个频段之外的 80+80 MHz 传输，RF 本振应遵守标准中规定的频谱模板要求。发送中心频率泄漏按每个天线规定。

发射机星座误差

发送调制测试包括检验星座图及测量误差矢量幅度 (EVM)。这些测试提供了与整个发送链中可能会影响信号质量的各类失真有关的关键信息。

发送星座误差 (也称为 EVM RMS) 是实际星座点距星座图中理想的无差错位置的 RMS 平均偏差 (用 % RMS 或 dB 表示)。RMS 误差在多个副载波、OFDM 帧和包上平均。这个指标可以检测压缩、动态范围、I/Q 误差、干扰和相位噪声等不理想特点。IEEE 强制要求在至少 20 个帧 (Nf) 上执行测试，每个帧至少长 16 个 OFDM 符号。这些符号使用随机数据。

发射机调制精度 (EVM) 测试

这一测试基本重复发射机星座误差。

符号时钟频率容限

符号时钟频率容限对 5 GHz 频段最大为 ± 20 ppm，对 2.4 GHz 频段最大为 ± 25 ppm。所有发送天线的发送中心频率和符号时钟频率应从相同的参考振荡器中导出。

802.11 和 802.11b 发送要求

802.11 和 802.11b 发送要求 ¹			
DSSS (802.11–2012, Section 16)			
杂散显示	16.4.6.6 17.4.6.9	Tx 和 Rx 带内和带外杂散 EM	没有规范 ("... 应遵守法规机构确立的带内和带外杂散辐射。")
通道功率显示	16.4.7.2 17.4.7.2	发送功率电平	没有规范 ("... 根据相应法规机构规定的方法测量。")
频谱辐射模板 (SEM)	16.4.7.5 17.4.7.4	发送频谱模板	dBr 频谱模板
摘要显示载频误差	16.4.7.6 17.4.7.5	发送中心频率容限	+/-25 ppm
摘要显示符号时钟误差	16.4.7.7 17.4.7.6	码片时钟频率容限	+/-25 ppm
开机 / 关机	16.4.7.8 17.4.7.7	发送开机 / 关机	10%– 90%, < = 2 us
摘要显示 IQ 原点偏置	16.4.7.9 17.4.7.8	RF 载波抑制	-15 dB w.r.t. sin(x)/x 形状
摘要显示 – EVM	16.4.7.10 17.4.7.9	发送调制精度	峰值 EVM (1000 个样点) <0.35

¹ 由 IEEE 802.11– 2012 修订版标准规定。

802.11a 发射机要求

802.11a 发送要求 ¹					
OFDM ("a") (802.11–2012, Section 18)					
杂散显示	18.3.8.5	Tx 和 Rx 带内和带外杂散 EM	没有规范 ("... 应遵守法规机构规定的带内和带外杂散辐射。")		
通道功率显示	18.3.9.2	发送功率电平	没有规范 ("... 根据相应法规机构规定的方法测量。")		
频谱辐射模板 (SEM)	18.3.9.3	发送频谱模板	dBr 频谱模板		
杂散显示	18.3.9.4	发送杂散	没有规范 ("... 应遵守法规。")		
摘要显示载频误差	18.3.9.5	发送中心频率容限	+/-20 ppm (20 MHz 和 10 MHz), +/-10 (5MHz)		
摘要显示符号时钟误差	18.3.9.6	符号时钟频率容限	+/-20 ppm (20 MHz 和 10 MHz), +/-10 (5MHz)		
摘要显示 IQ 原点偏置	18.3.9.7.2	发射机中心频率泄漏	-15 dBc 或 +2 dB w.r.t. 平均副载波功率		
频谱平坦度	18.3.9.7.3	发射机频谱平坦度	+/- 4 dB (SC=-16...16), +/-6 dB (其他)		
摘要显示 – EVM	18.3.9.7.4	发送星座误差	允许的相对星座误差对数据速率		
			调制	编码速率 (R)	相对星座误差 (dB)
			BPSK	1/2	-5
			BPSK	3/4	-8
			QPSK	1/2	-10
			QPSK	3/4	-13
			16-QAM	1/2	-16
			16-QAM	3/4	-19
64-QAM	2/3	-22			
64-QAM	3/4	-25			

¹ 由 IEEE 802.11–2012 修订版标准规定。

802.11g 和 802.11n 发射机要求

802.11g 和 802.11n 发送要求 ¹					
ERP (802.11–2012, Section 19)					
杂散显示	19.4.4	Tx & Rx 带内和带外杂散 EM	没有规范 ("... 应遵守法规机构规定的带内和带外杂散辐射。")		
通道功率显示	19.4.8.2	发送功率电平	没有规范 ("... 根据相应法规机构规定的方法测量。")		
摘要显示载频误差	19.4.8.3	发送中心频率容限	+/-25 ppm		
摘要显示符号时钟误差	19.4.8.4	符号时钟频率容限	+/-25 ppm		
频谱辐射模板 (SEM)	19.5.5	发送频谱模板			
		ERP-OFDM	遵守 18.3.9.3		
		ERP-DSSS	遵守 17.4.7.4		
OFDM/HT ("n") (802.11–2012, Section 20)					
频谱辐射模板 (SEM)	17.4.7.4	发送频谱模板	dBr 频谱模板		
频谱平坦度	20.3.20.2	频谱平坦度	+/-4 dB, +/-6 dB		
通道功率显示	20.3.20.3	发送功率	没有规范 ("... 根据相应法规机构规定的方法测量。")		
摘要显示载频误差	20.3.20.4	发送中心频率容限	+/-20 ppm (5GHz 频段), +/-25 ppm (2.4 GHz 频段)		
摘要显示符号时钟误差	20.3.20.6	符号时钟频率容限	+/-20 ppm (5GHz 频段), +/-25 ppm (2.4 GHz 频段)		
摘要显示 IQ 原点偏置	20.3.20.7.2	发射机中心频率泄漏	20 MHz: 遵守 18.3.9.7.2; 40 MHz: -20 dBc 或 0 dB w.r.t 平均副载波功率		
摘要显示 – EVM	20.3.20.7.3	发送星座误差	允许的相对星座误差对数据速率		
			调制	编码速率 (R)	相对星座误差 (dB)
			BPSK	1/2	-5
			QPSK	1/2	-10
			QPSK	3/4	-13
			16-QAM	1/2	-16
			16-QAM	3/4	-19
			64-QAM	2/3	-22
64-QAM	3/4	-25			
64-QAM	5/6	-27			

¹ 由 IEEE 802.11–2012 修订版标准规定。

802.11ac 发射机要求

802.11ac 发送要求 ¹					
OFDM/VHT ("ac") (802.11-2012, Section 22)					
频谱辐射模板 (SEM)	22.3.18.15	发送频谱模板	dBr 频谱模板		
频谱平坦度	22.3.18.2	频谱平坦度	+/-4 dB, +4/-6 dB (各种带宽, 20-160 MHz)		
摘要显示载频误差	22.3.18.3	发送中心频率容限	+/-20 ppm		
摘要显示符号时钟误差		符号时钟频率容限	+/-20 ppm		
摘要显示 IQ 原点偏置	22.3.18.4.2	发射机中心频率泄漏	对 20、40、80 和 160 MHz 且 CF 位于中心: < 每个副载波的平均功率 对 20、40、80 和 160 MHz 且 CF 不在中心: < 最大 (总功率 - 32dB, -20 dBm) 对 80+80 MHz: 满足频谱模板		
摘要显示 - EVM	22.3.18.4.3	发送星座误差	允许的相对星座误差对数据速率		
			调制	编码速率 (R)	相对星座误差 (dB)
			BPSK	1/2	-5
			QPSK	1/2	-10
			QPSK	3/4	-13
			16-QAM	1/2	-16
			16-QAM	3/4	-19
			64-QAM	2/3	-22
			64-QAM	3/4	-25
			64-QAM	5/6	-27
256-QAM	3/4	-30			
256-QAM	5/6	-32			

¹ 由 IEEE 802.11- 2012 修订版标准规定。

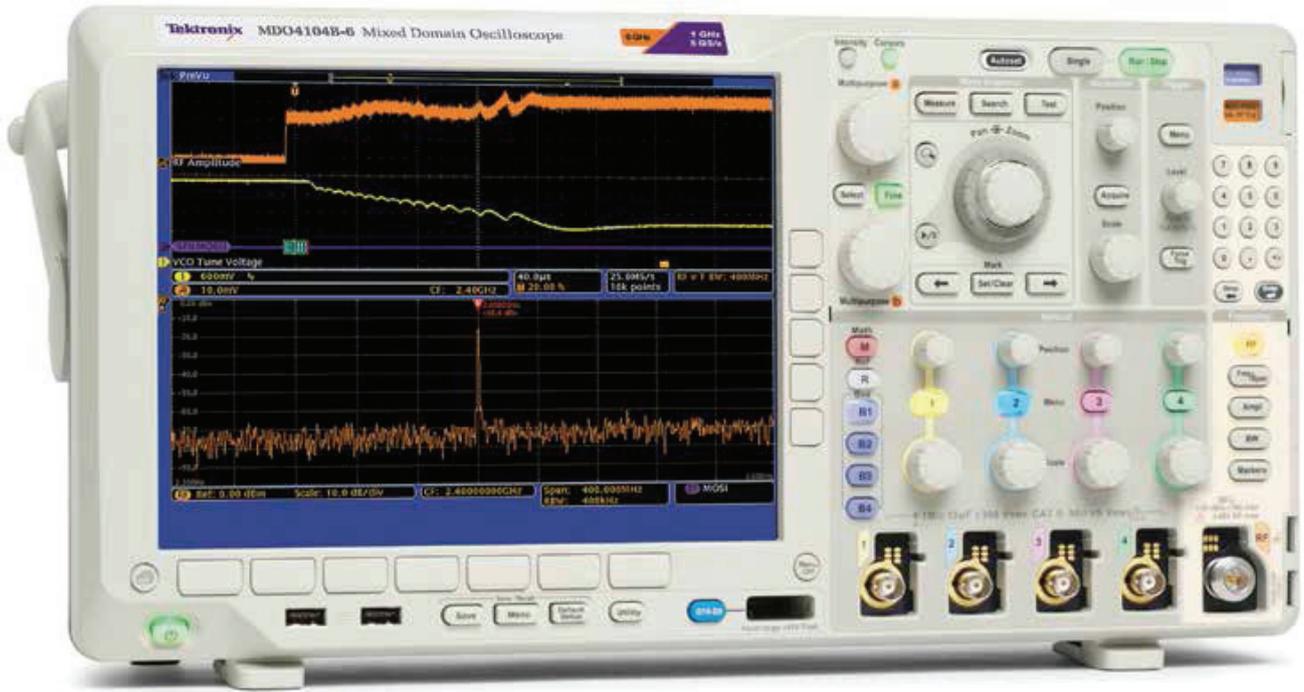


图 20. MDO4000B 系列可以捕获时间相关的模拟信号、数字信号和 RF 信号，在整个系统查看被测器件特点。

总结

为了满足您当前及未来的 802.11 规范测试需求，泰克提供了一整套工具来满足您的特定需求。

通过 RSA5000 和 RSA6000 实时频谱分析仪，您可以迅速检测、捕获和识别 RF 信号，如 802.11ac 信号。泰克在二十多年前发明实时频谱分析技术时就已经考虑到这一点。没有其他频谱分析仪家族能够比泰克为无线信号测试提供更多的信心。您可以获得检测概率最高的宽带信号搜索功能。

通过 MDO4000B 系列—世界上第一台内置频谱分析仪的示波器，您可以捕获时间相关的模拟信号、数字信号和 RF 信号，在整个系统级查看被测器件。您可以一目了然地查看时域和频域，在任何时点观察 RF 频谱，查看其怎样随时间或器件状态变化，迅速高效地解决最复杂的设计问题。在频谱分析仪及任意模拟通道或数字通道打开时，示波器显示画面分成两个视图。显示画面上半部分是时域的传统示波器视图。显示画面下半部分是频谱分析仪输入的频域视图。

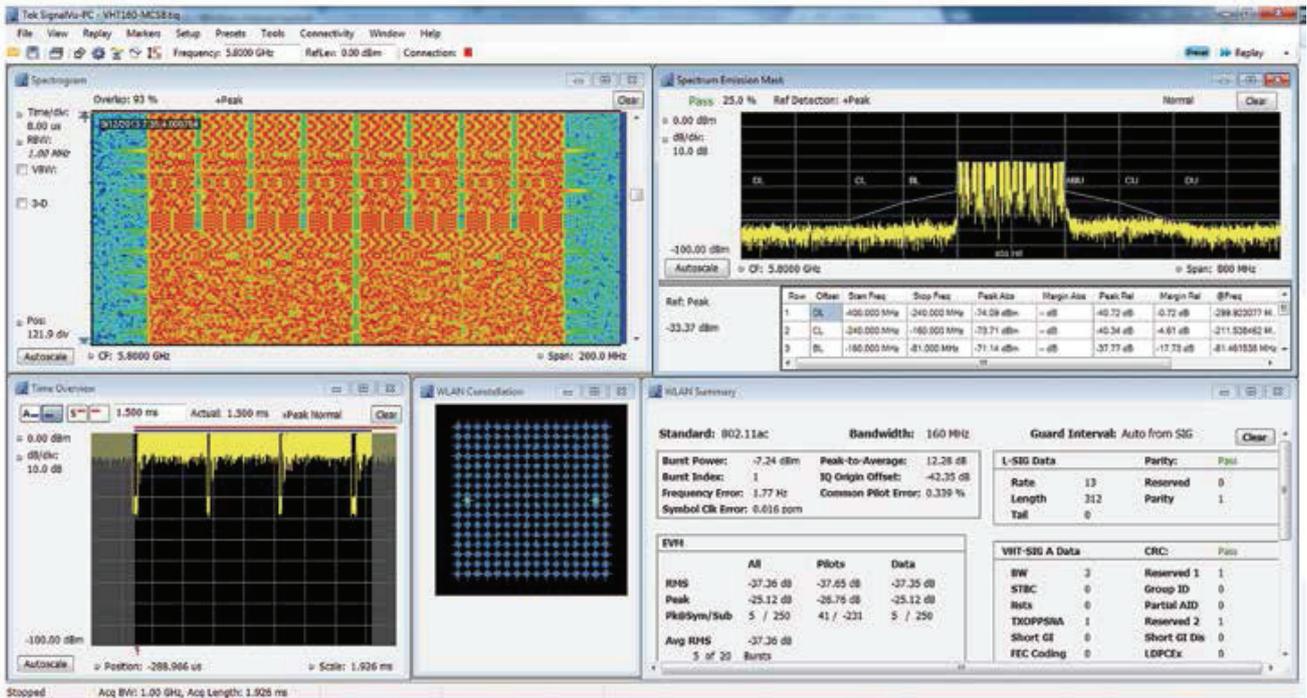


图 21. SignalVu-PC 在一个采集中提供了所有 802.11ac 测量。

注意，频域视图并不是仪器中简单的模拟通道或数字通道的 FFT，而是从频谱分析仪输入采集的频谱。

另一个主要差异是在使用传统示波器 FFT 时，您一般会得到所需的 FFT 画面视图，或得到关心的其他时域信号的所需视图，但不能同时兼得。通过 MDO4000B 系列，频谱分析仪有自己的采集系统，这个采集系统是独立的，但与模拟通道和数字通道采集系统时间相关。这可以优化配置每个域，为关心的所有模拟信号、数字信号和 RF 信号提供完整的时间相关的系统视图。

现在，通过 MDO4000B 和 SignalVu-PC 之间的实时链路，您可以在时域和频域中分析 RF 信号相位和幅度，并进行解调。此外，您可以判定 RF 信号质量，提取符号信息。另外还有多种专用选项，分析 Wi-Fi 信号，特别是宽带宽 IEEE 802.11ac 信号。由于 MDO4000B 能够一次采集 1 GHz，因此可以同时所有频谱测量、时域测量和调制测量。其他带宽较窄的信号分析仪必需进行扫描，才能捕获频谱辐射模板，因为这种测量要求 160 MHz 以上的带宽。

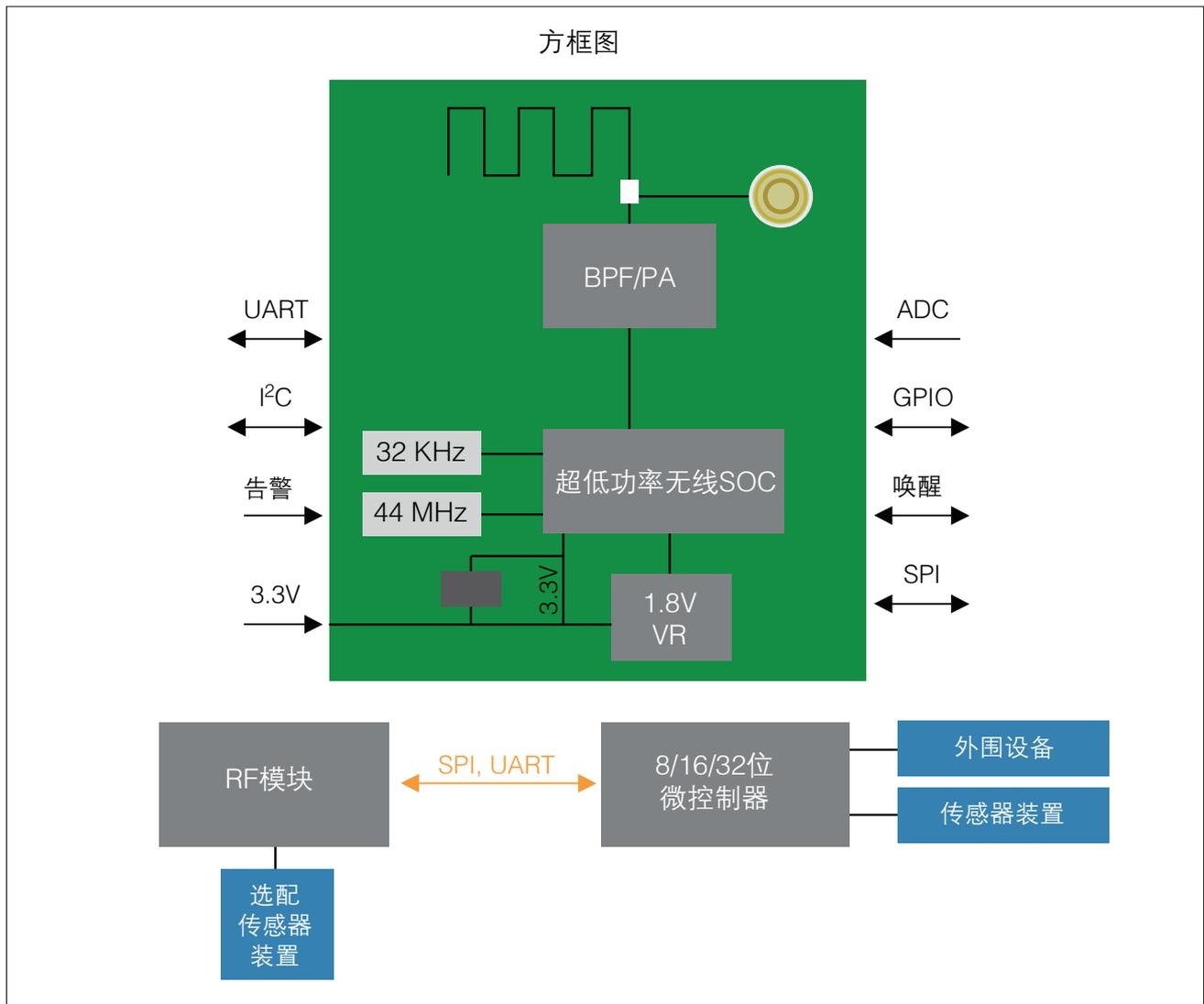


图 22. RF 模块及其使用的高级方框图。

嵌入式应用中使用的大多数 RF 模块都由一个微控制器通过串行数据总线类型的接口控制。频谱分析仪不能帮助调试 RF 模块与微控制器之间的接口，因此需要一种新型测试设备，必需使用一种工具，能够可视化 SPI 或 UART 总线上传送的控制信号，同时提供对 RF 无线传输的影响。只有 MDO4000B 与 SignalVu-PC 相结合，作为一个经济的工具提供了这种水平的调试功能。

MDO4000B 是唯一可以在一台仪器中查看进入 RF 模块和 RF 输出的控制信号的仪器。

如需更多信息，请访问我们的网站：www.tektronix.com/oscilloscope/mdo4000-mixeddomain-oscilloscope。

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21) 5031 2000
传真: (86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 5795 0700
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市徐汇区宜山路900号
科技大楼C楼7楼
邮编: 200233
电话: (86 21) 3397 0800
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市福田区南园路68号
上步大厦21层G/H/I/J室
邮编: 518031
电话: (86 755) 8246 0909
传真: (86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编: 610063
电话: (86 28) 6530 4900
传真: (86 28) 8527 0053

泰克西安办事处
西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层C座
邮编: 710065
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市解放大道686号
世贸广场1806室
邮编: 430022
电话: (86 27) 8781 2760/2831

泰克香港办事处
香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260

有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料，并不断予以充实，可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 cn.tektronix.com



©2013 年泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利及外国专利的保护。本文中的信息代替以前出版的材料中的所有信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。