



# Wi-Fi HaLow™ 技术概述

2020 年 5 月

本文及本文所含有有关 Wi-Fi Alliance 各项计划及预计发布日期的信息，可能随时修改或取消，恕不另行通知。本文是以“现况”、“可提供性”和“连同本身具有之一切瑕疵”为基础提供的。关于本文及本文所含信息的有用性、质量、适用性、真实性、准确性或完整性，Wi-Fi Alliance 不提供任何陈述、担保、条件或保证。

# 引言

Wi-Fi®连接加速了物联网 (IoT) 应用的兴起, 例如, 在仓库中帮助跟踪设备位置的传感器、健康监察器、气候控制传感器等应用越来越多。为了满足日益增长的 IoT 市场的独特需求, Wi-Fi Alliance®推出了 Wi-Fi HaLow™。基于 IEEE 802.11n 标准的 Wi-Fi 4 是一项成熟的技术, 提供了电子邮件、互联网购物、向智能电视机传送内容等应用所需的数据速率和覆盖范围。

[Wi-Fi CERTIFIED 6™](#)是最新一代基础 Wi-Fi 连接, 可降低设备功耗, 能够针对某些环境支持 IoT 功能, 同时还可满足带宽密集型应用的需求。不过, 很多 IoT 环境需要更长的连接距离、需要穿透多重墙壁的能力并要求设备一次充电就能够运行数月或数年。

Wi-Fi HaLow 基于 IEEE 802.11ah 标准, 提供了 IoT 环境所需的覆盖范围、数据速率、穿透性和低功耗。IoT 环境包括用于工业、农业和智慧城市以及住宅和楼宇自动化的产品。Wi-Fi HaLow 在低于 1GHz 的频段运行, 这使 Wi-Fi 能够更普遍地用于各种地点并提高了 Wi-Fi 的安全性, 因而可满足更多 IoT 环境的需求。其原生 IP 支持为简化互联网及云应用访问提供了方便, 因为无需额外增加昂贵的基础设施, 例如额外增加集线器、转发器或网关。

本篇技术概述详述了白皮书“[Wi-Fi HaLow™: 面向 IoT 应用的 Wi-Fi®](#)”的要点, 就 Wi-Fi HaLow 为何能成为日益增长的 IoT 市场的良好解决方案提供了更深入的背景信息, 包括:

- 基本无线技术特性, 例如低于 1GHz 的频率、网络带宽、调制和编码方案;
- 为 Wi-Fi HaLow 定义的创新节能功能, 例如“目标唤醒时间 (Target Wake Time, 简称 TWT)”、“受限访问窗口 (Restricted Access Window, 简称 RAW)”和“扩展的最长空闲时间 (Extended Max Idle Periods)”;
- Wi-Fi HaLow 安全保障方法。

此外, 本篇技术概述还就电池寿命、覆盖范围、数据速率、可扩展性等重要特性比较了 Wi-Fi HaLow 与其他技术, 包括非授权“低功率广域网 (Low Power Wide Area Network, 简称 LPWAN)”、“授权 WAN (Licensed WAN)”、“无线个人域网 (Wireless Personal Area Networks, 简称 PAN)”和“局域网 (Local Area Network, 简称 LAN)”。读者将通过本文了解到, Wi-Fi HaLow 为什么应该视为多种 IoT 环境的首选。

## 技术概述

### 低于 1GHz 和窄频段

电磁与通信理论定律规定, 在功率、传播距离和射频 (RF) 信号可靠性之间需要相对权衡。通常, 以任何特定频率传送较长距离需要采用更大的信号发送功率或采用更低的数据速率。就任何给定发送功率而言, 在 2.4GHz 和 5GHz 频段发送的无线电波不如在 915MHz 等较低频率上发送的无线电波的传播距离远。由于这个原因, Wi-Fi HaLow 专注于在低于 1GHz 的频段上运行。

决定长距离 RF 信号成功发送的另一个因素, 是能量集中于其中的频道的宽度。在给定频率范围内, 较窄的频道可以携带较集中的发射能量, 相比于相同频率范围内较宽的频道, 传播距离更远。如图 1 所示, 与 2.4GHz 频率范围内的较宽频道相比, 在低于 1GHz 频率范围内的较窄频道运行模式提供了更长的传播距离。

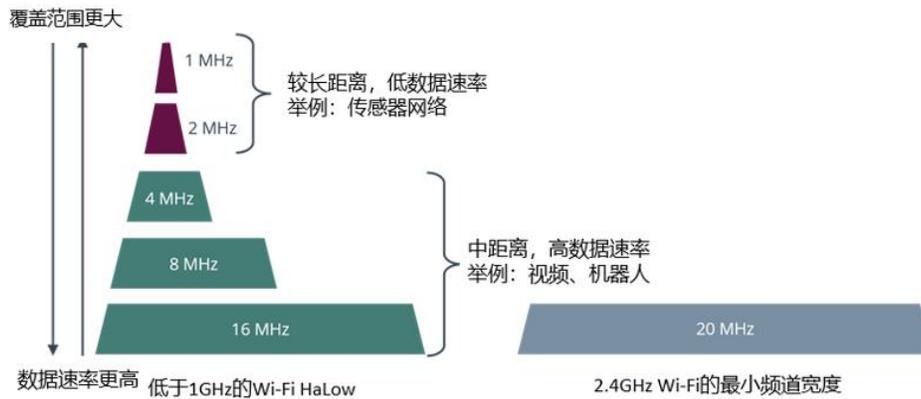


图 1: Wi-Fi HaLow 在低于 1GHz 的频率范围内以 1 至 16MHz 的频道运行。

准确地说，Wi-Fi HaLow 究竟使用 1GHz 以下频段的哪一部分，不同国家情况不同，视监管要求而定。美国目前使用 902MHz 至 928MHz。澳大利亚和新西兰使用 915MHz 至 928MHz。欧洲在 800MHz 频段和 900MHz 频段划分出 7MHz 频谱。设备制造商应该咨询当地监管机构，以了解 1GHz 以下频段的哪一部分是准许使用的。为了支持面向全球部署的产品开发，Wi-Fi Alliance 积极倡导 Wi-Fi HaLow 在全球统一使用 915MHz 至 925MHz 范围的频谱。

### 较低频率和较窄频道可改善链路预算

一种决定哪一种 IoT 无线技术能够最好地满足应用需求的方法是，评估可用的链路预算。基本上，链路预算是用以分贝 (dB) 为单位的发送功率与传送增益和损耗来确定在给定距离上接收的传送功率。IEEE 802.11ah 标准规定，有效频道宽跨度选择为 1MHz、2MHz、4MHz、8MHz 和 16MHz。以美国为例，在将 Wi-Fi 作为 IoT 无线技术选择的情况下，与在 2.4GHz 频段运行、采用 20MHz 频道宽度的 Wi-Fi 相比，Wi-Fi HaLow 通过在低于 1GHz 的频段运行以及采用窄频道宽度，获得了 8dB 至 12dB 的优势。

Wi-Fi HaLow 在低于 1GHz 的频段上运行时，传送数据的距离较长，从而既有效满足了大量 IoT 及工业 IoT (IIoT) 应用的需求，又能够免于占用其他 Wi-Fi 频段的容量。这使 Wi-Fi HaLow 对 Wi-Fi 技术组合起到了出色的补充作用，由于 Wi-Fi 有多种多样的形式，因此几乎能够支持从小带宽 IoT 网络到带宽密集型应用的任何用途。

信标，即 AP 广播的、用以同步该 AP 所服务的客户端设备的数据包，设定了网络覆盖范围的上限。Wi-Fi HaLow 在 1MHz 频道上采用“调制编码方案 0 (Modulation Coding Scheme 0, 简称 MCS 0)”<sup>1</sup>或 300Kbps 速率，相比于在 20MHz 频道上以 6Mbps 速率发送的信标，Wi-Fi HaLow 信标有 10dB 优势。以上效果结合起来产生了约 20dB 的链路预算优势，这与 2.4GHz Wi-Fi 相比，大约相当于 10 倍的覆盖范围优势。

在最远距离限制为 1 公里左右时，Wi-Fi HaLow 可以运行于 MCS 10 模式，这种模式以 300Kbps 的速率在 1MHz 频道中复制数据，实际上数据速率是 150Kbps。这种有目的的冗余为接收设备额外提供了纠正数据错误的机会，并再次改善了 Wi-Fi HaLow 链路预算。就这样的数据速率与覆盖范围组合而言，Wi-Fi HaLow 超越了其他很多无线 IoT 技术。

<sup>1</sup> 本文稍后会谈到 Wi-Fi HaLow MCS 速率

## 正交频分复用 (OFDM) 调制和前向纠错 (FEC)

Wi-Fi HaLow 采用“正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 简称 OFDM)”调制, 自 802.11g 以来, 各个 Wi-Fi 版本一直采用这种调制方法。如图 2 所示, 用强大的“前向纠错 (Forward Error Correction, 简称 FEC)”代码给待发送数据编码, 可增加宝贵的冗余校验信息, 且已编码数据流是在分布于工作频道上的 26 个或更多副载波上同时发送的。在有频道失真的情况下, 编码数据流分布在多个副载波上有助于实现可靠接收, 而在有干扰和噪声的情况下, 冗余改善了待接收信号的链路预算。与 Z-Wave 或其他专有 IoT 设备采用的简单

“频移键控 (Frequency Shift Keying, 简称 FSK)”型无线方案相比, OFDM 和强大的 FEC 相结合, 可提供更可靠的解决方案。Wi-Fi HaLow 采用 OFDM 并与“相移键控 (Phase Shift Keying, 简称 PSK)”或“正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, 简称 QAM)”相结合, 可在给定时间段内承载比其他无线技术更多的数据。在没有很宽的 1GHz 以下“工业、科学和医疗 (Industrial, Scientific and Medical, 简称 ISM)”频段可用以及在对传感器设备的占空比有某些限制的国家, Wi-Fi HaLow 提供的这种频谱利用率尤其重要。在很多国家, 使用 ISM 频段无需许可。Wi-Fi HaLow 在这段频谱上能够提供的数据速率比其他可选 IoT 技术高出几个数量级, 例如 Sigfox、LoRaWAN、Zigbee、Z-Wave、蓝牙低功耗

(Bluetooth Low Energy)、NB-IoT 以及其他专有 FSK 无线系统, 如下表所示。

有多个副载波的 OFDM 频道

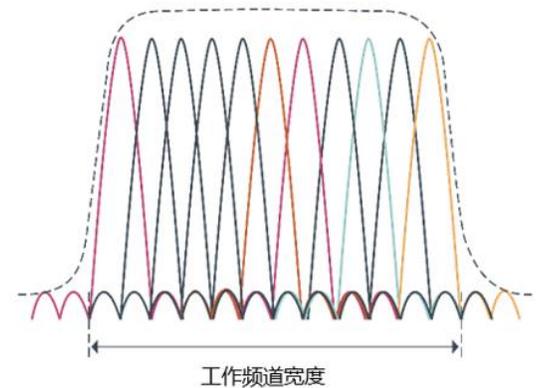


图 2: 有多个副载波的 OFDM 频道举例, 通常是 26 个或更多。←

参数	Wi-Fi HaLow	蓝牙低功耗	Z-Wave	Zigbee	Wi-SUN	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
频率	低于 1GHz	2.4 GHz	低于 1GHz	2.4GHz/低于 1GHz	低于 1GHz	低于 1GHz	低于 1GHz	需授权
数据速率 (bps)	150K-86.7M <sup>2</sup>	125K – 2M	9.6K - 100K	250K	6.25K – 800K (默认值为 50k)	100 或 600	300 – 27 k 200 – 27K	20K – 127K
距离 (米)	>1K	< 100	< 30	< 20	<1K	<40K	<10K	< 10K
调制方法	BPSK 之上的 OFDM、 QPSK、 16/64/256 QAM	GFSK	GFSK	BPAK/ OQPSK	MR-FSK / MR-OFDM / MR-OQPSK	DBPSK/ GFSK	CSS	QPSK
电池寿命	多年	多年	多年	多年	多年	多年	多年	多年
安全技术	WPA3™	CCMode 下的 128 位 AES	Security 2 (S2)	CCMode 下的 128 位 AES	IEEE 802.1X	会话级安全 技术	CCMode 下的 128 位 AES	3GPP 安 全技术

<sup>2</sup> 在 16MHz 频道和短保护间隔情况下, 采用 MCS 9 时, 86.7Mbps 是可能的; 结果视监管要求及厂商实现方法的不同而有所不同。

OTA 固件更新	支持	支持	-	-	-	-	-	-
是否需要订阅	否	否	否	否	否	是	是	是
TCP/IP (互联网)	支持	-	-	-	-	-	-	-
网络拓扑	星形/中继	P2P*/网格	网格	网格	网格	星形	星形	星形
开放标准	IEEE 802.11ah	蓝牙 SIG	专有	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4g	专有	专有	3GPP LTE Cat-NB1/NB2

\*点对点

本表中使用的信息均是公开发表的

## 调制与编码方案 (MCS)

Wi-Fi HaLow 的“调制与编码方案 (Modulation and Coding Schemes, 简称 MCS)”表是从 IEEE 802.11ah 规范得出的。该表描述了所允许的调制类型组合、频道宽度、符号间保护间隔 (Inter-Symbol Guard Intervals, 简称 GI) 以及所得出的可用于通信的数据吞吐量。Wi-Fi 4、Wi-Fi 5 和 Wi-Fi 6 也有这样的 MCS 表。通常, IEEE 802.11ah 表的数据速率规定为 IEEE 802.11ac MCS 表的 1/10, 且最多可支持 4 路空间流。虽然最初的 Wi-Fi HaLow 实现方案可能仅面向单流设备, 但已有将来通往 4 流多输入多输出 (4x4 MIMO) Wi-Fi HaLow 解决方案的途径。

两个设备之间的距离和 RF 条件可能有所变化, 各种可选 MCS 都考虑了这个问题。与其他 Wi-Fi 技术一样, Wi-Fi HaLow 可以适应条件的变化。AP 和客户端设备加入网络时, 会广播它们的功能。它们可以根据需要自动调整为最佳 MCS。例如, 如果一个 AP 的关联客户端以 300Kbps 速率在 1MHz 频道上采用 MCS 0 运行, 而且这两个设备都确定, 双方之间的 RF 频道条件适合在 4MHz 频道上支持 MCS 4, 那么这两个设备就可以商定, 更改它们的 MCS 和频道带宽, 以用 9Mbps 速率传送数据。

提供多种 MCS 选择的好处是, 管理员可以调整特定应用的数据速率, 可以允许混合在一起的多种类型的设备自动优化以适应条件的改善。例如, 一个在长距离传送时仅需要 150Kbps 数据速率的传感器可以与附近需要 10Mbps 速率的摄像机共用一个 AP。通常, 设备越靠近 AP, 就越能获得以更快的 MCS 速率传送数据的好处, 也越节能。

下表显示了面向单流连接的 MCS。请注意, MCS 10 在长距离连接时支持最慢的有效速率, 而 MCS 0 至 MCS 9 的数据速率则依次提高。

MCS 序号	空间流	调制类型	数据速率 (Mbps)									
			1MHz 频道		2MHz 频道		4MHz 频道		8MHz 频道		16MHz 频道	
			长 GI <sup>3</sup>	短 GI	长 GI	短 GI						
0	1	BPSK	0.30	0.33	0.65	0.72	1.4	1.5	2.9	3.3	5.9	6.5
1	1	QPSK	0.60	0.67	1.3	1.4	2.7	3.0	5.9	6.5	11.7	13.0
2	1	QPSK	0.90	1.00	2.0	2.2	4.1	4.5	8.8	9.8	17.6	19.5
3	1	16-QAM	1.2	1.3	2.6	2.9	5.4	6.0	17.6	19.5	35.1	39.0
4	1	16-QAM	1.8	2.0	3.9	4.3	8.1	9.0	17.6	19.5	35.1	39.0

<sup>3</sup> 保护间隔 (GI) 指的是在被发送的符号 (字符) 之间插入的时间延迟, 插入 GI 旨在避免干扰。长 GI 可确保传送准确度, 而短 GI 可提高吞吐量。

5	1	64-QAM	2.4	2.7	5.2	5.8	10.8	12.0	22.3	23.6	48.6	52.0
6	1	64-QAM	2.7	3.0	5.9	6.5	12.2	13.5	26.3	29.3	52.7	58.5
7	1	64-QAM	3.0	3.3	6.5	7.2	13.5	15.0	29.3	32.5	58.5	65.0
8	1	256-QAM	3.6	4.0	7.8	8.7	16.2	18.0	35.0	39.0	70.2	78.0
9	1	256-QAM	4.0	4.4	不适用	不适用	18.0	20.0	43.3	43.3	78.0	86.7 <sup>4</sup>
10	1	BPSK	0.15	0.17	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用

## 介质访问控制 (MAC) 效率与节能

Wi-Fi HaLow 技术的主要设计标准之一是低功耗, 以使电池供电的 IoT 设备能够运行多年。新的“介质访问控制 (Medium Access Control, 简称 MAC)”功能使 Wi-Fi HaLow 网络中的设备能够降低功耗、减少拥挤并提高容量和设备密度。通常, 发送无线信号比接收信号消耗的功率多。减少设备的发送次数通常可以节能。实现低功耗的关键因素是, 确保无线设备能够在长时间内可靠地保持休眠, 而不会被 AP 断开或解除关联。通过允许 Wi-Fi 设备将更多时间用于休眠, 可以显著降低这类设备的平均能耗。处于休眠或被动收听状态的设备释放出的可用频谱, 可供主动型客户端设备发送数据之用。下面列出了实现高效率和节能的关键 Wi-Fi HaLow 功能。

### 非流量指示图 (TIM) 模式

在某些无线局域网 (WLAN) 中, 设备必须频繁唤醒, 以监测和响应 AP 每秒多次通过信标帧发送的“流量指示图 (Traffic Indication Map, 简称 TIM)”。TIM 用来指示哪些客户端设备应等待进站数据。通过以可选非 TIM 模式运行, Wi-Fi HaLow 设备能够降低功耗, 在这种模式下, 设备不必保持唤醒状态以主动监测信标帧。这一功能使 Wi-Fi 客户端设备无需定期检查信标信息。让 Wi-Fi HaLow 摆脱 TIM 模式可以实现节能, 从而使 Wi-Fi HaLow 能够与其他 IoT 传感器网络技术相竞争。

请注意, 非 TIM 模式是可选功能, 是否选用该功能取决于设备和网络。Wi-Fi HaLow 也支持 TIM 模式。Wi-Fi HaLow AP 可以同时支持这两种功能, 以服务多种设备。

### 目标唤醒时间 (TWT)

希望长时间休眠的客户端设备可以与 AP 协商“目标唤醒时间 (Target Wake Time, 简称 TWT)”合同。AP 会存储发往该客户端的所有流量, 直到协商好的唤醒时间为止。当客户端设备在规定时间内唤醒后, 就收听其信标, 并在返回休眠状态之前, 让 AP 接收和发送所需的任何数据。唤醒时间间隔是客户端设备与 AP 商定的, 可以从很短 (几微妙) 到很长 (数年) 时间。

### 受限访问窗口 (RAW)

“受限访问窗口 (Restricted Access Window, 简称 RAW)”是另一种规划方法, 用于安排一组客户端设备的通信。就活动时间可预测的系统而言, AP 可以向一部分客户端设备授予 RAW 特权以传送其数据, 同时可以强制其他客户端设备进入休眠状态或缓冲非紧急数据, 或者同时执行这两种操作。后一部分客户端设备节省了功耗, 并为其他对时间要求严格的流量留出了更多网络容量。

通过结合 TWT 和 RAW 功能, 网络设计师可以最大限度减少频道争用, 并降低整个系统的功耗。

<sup>4</sup>在 16MHz 频道和短保护间隔情况下, 采用 MCS 9 时, 86.7Mbps 是可能的; 结果视监管要求及厂商实现方法的不同而有所不同。

## 扩展的最长空闲时间

“扩展的最长空闲时间 (Extended Max Idle)” 功能延长了在 AP 断开与客户端设备的关联之前，允许客户端设备休眠的时间。如果没有这一功能，功率敏感型传感器被断开关联后，就必须重新进行身份验证，而保留休眠状态使传感器能够避免为重新进行身份验证而浪费能量。该功能规定了 5 年以上的最长空闲时间。在实用中，空闲时间的长短取决于实施方案和应用的要求。

## 分级流量指示图

“分级 TIM (Hierarchical TIM)” 是一种对上述 TIM 进行更高效编码的方法，采用这种方法可以减少 TIM 的广播时间并容纳大量客户端设备。这种方法定义了不同的编码模式，以使大量处于休眠模式的客户端设备得到有效管理。

## 短 MAC 报头

去掉数据包起始部分中不必要的报头字段可以减少发送和接收的广播时间及相关功耗。例如，发送一个 100 字节小数据包的开销可以减少 8%，从 40%降低到 32%。

### “空数据 PHY” 协议数据单元 (NDP 帧)

“空数据 PHY (Null Data PHY)” 协议数据单元 (又称 NDP 帧) 在 PHY 层信号字段中纳入了 MAC 层信息。相对于传统管理和控制帧，这么做减小了数据包，减少了发送时间。例如，在 1MHz 频道上采用 MCS 10 时，用于 NDP 确认的广播时间约为 0.56 毫秒，而采用传统方法时，确认则需花费 1.34 毫秒。

## 短信标选择

信标通常以最低的 MCS 速率发送，以到达覆盖范围内最远端的客户端设备，但这需要很长的传送时间。Wi-Fi HaLow 可以识别 AP 发送的两种信标：不经常发送的完整信标；短信标，这种信标携带保持站点同步所需的最低限度的信息，占用较少的发送时间，但是发送更加频繁。较短的信标可降低收听设备的功耗，并减少对频谱中宝贵的广播时间的占用。

## 基本服务集 (BSS) 着色

“基本服务集 (Basic Service Set, 简称 BSS)” 着色为各个 AP 或一个 AP 上的各个 BSS 分配不同的“颜色”。这种颜色编码是一种简单的指示符，可使客户端设备注意与其 BSS 颜色匹配的数据传送，而忽略来自相邻网络、不打算指向其 BSS 的数据传送，即与其关联 BSS 的颜色不匹配的数据传送。这种方法旨在减少介质争用开销并扩大总体容量，尤其是在密集型 IoT 网络中。

## 安全性

### 身份验证与加密

Wi-Fi HaLow 支持最新和最先进的可用 Wi-Fi 安全技术：基于“机会性无线加密 (Opportunistic Wireless Encryption, 简称 OWE)” 的 [Wi-Fi CERTIFIED WPA3™](#) 和 [Wi-Fi CERTIFIED Enhanced Open™](#)。后者可在设备需要访问云中服务器的公共环境中提供隐私保护。随着 Wi-Fi Alliance 的安全技术随着时间推移而不断发展，Wi-Fi HaLow 也将不断接纳 Wi-Fi Alliance 安全技术的改进。

### 高速对称数据传送支持无线固件更新

Wi-Fi HaLow 的最低有效 MCS 10 速率为 150Kbps，适用于较长的连接距离。数 10Mbps 的较高速率适用于附近的设备。如果设备需要新的固件以继续高效、安全地运行，那么 Wi-Fi HaLow 可以快速提供更新信息并减少停机时间。与 PAN 和无线 WAN 相比，Wi-Fi HaLow 在这方面有多项优势，PAN 和无线 WAN 的数据速率低得多，低至 100bps。对于那些需要将安全更

新以无线方式推送给现场数千个设备的网络而言，这么低的数据速率无法提供对安全威胁的快速反应能力。采用这类技术的设备可能需要很长的停机时间，或者因需要派人到每个设备那里现场进行手动更新而导致较高的维护成本。Wi-Fi HaLow 拥有以最少的停机时间支持无线更新所需的安全性、容量、覆盖范围和数据速率。

## IoT 技术的竞争力分析

Wi-Fi Alliance 对 Wi-Fi HaLow 和其他可选 IoT 技术进行了一次比较，分析了数据速率、覆盖范围、电池寿命、IP 网络的易于集成性、效率和可扩展性。下表给出了对这些特性的定义。

特性	如何测量
数据速率	最高 PHY 数据速率相对比较
覆盖范围	农村地区最大覆盖范围比较
电池寿命	以月计的电池寿命，假定传送间隔为 10 分钟
IP 网络的易于集成性	基于协议转换要求、OS 支持、发现协议启用等因素进行的定性比较
安装和运行效率	包含 1 万个设备的网络运行 2 年的最终用户成本
可扩展性	每 BSS/AP 容量和 AP 支持大量设备的能力

所分析的技术包括：

- 非授权低功率 WAN：LoRaWAN、Sigfox 和 Wi-SUN；
- PAN 和 LAN：Zigbee、蓝牙低功耗、Z-Wave 和 2.4GHz Wi-Fi；
- 授权 WAN：NB-IoT、LTE-M。

在 Wi-Fi HaLow 之前，无线 IoT 系统的设计一般是以牺牲其他参数为代价，重点满足一个关键运行参数要求，例如：以较长连接距离、简单性或高数据吞吐量为代价，满足长电池寿命要求。用蓝牙、Zigbee、Z-Wave 或专有无无线电技术等 PAN 技术实现的低功率系统牺牲了距离、速率或网络简单性。

本文以下部分给出了如何通过这特性比较 Wi-Fi HaLow 与其他 IoT 技术。对此次分析而言，图中连线上的特性点越靠近中心，该技术这项特性的表现就越差。连线上的特性点距中心越远，这项特性的比较结果就越好。

### 低功率 WAN 系统

图 3 显示，LoRaWAN、Sigfox 等“低功率 WAN (LPWAN)”系统可提供长距离连接，但在数据速率、规模、能效、IP 集成简便性或安全性方面却表现不佳。

在分析中，代表 LoRaWAN 的浅蓝色线显示，它是惟一在连接距离、电池寿命和可扩展性方面接近 Wi-Fi HaLow 的技术，但是在数据速率和 IP 网络集成方面还有很多需要改进的地方。同样，Sigfox 在连接距离方面也表现很好，但是在本次分析中，与其他技术相比，它在所有其他方面都表现不佳。

在 6 项特性中，Wi-Fi HaLow 有 5 项都好于其他 LPWAN 技术。过去，人们一直认为，Wi-Fi 无法用于 IoT，因为它的能效不高。不过，Wi-Fi HaLow 一出世，这种看法就过时了。开发 Wi-Fi HaLow 的目的是，

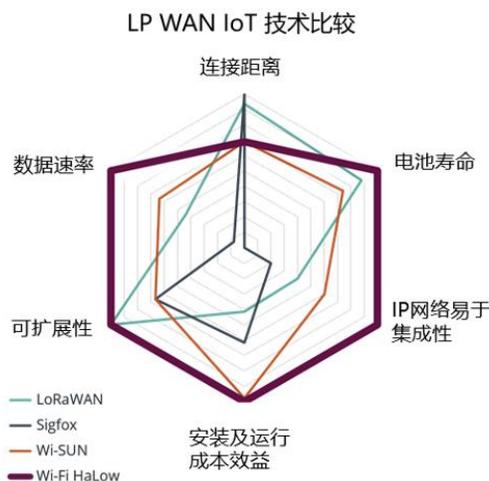


图 3: 在所测量的大多数特性中，Wi-Fi HaLow 都优于其他低功率 WAN。

专门利用前述专用于设备节能的功能来提高设备效率，使包括币形电池在内的设备电池能够持续使用数年。

## PAN 和 LAN 网络

很多类型的 PAN 网络都是为短距离连接而设计的。这类网络试图利用网格架构实现更长的连接距离。网格架构<sup>5</sup>需要在设备之间建立多条通信通路。尽管网格架构可以减轻用户的初始安装负担，但是在 IoT 环境中额外增加了复杂性、延迟和成本问题。网格中转发其他节点流量的 Zigbee 设备耗费更多电池能量，且数据吞吐量限制为 250Kbps。网格架构的瓶颈和延迟会妨碍这类网络系统实现 Wi-Fi 简单性。Z-Wave 网格网络限制为最多容纳 232 个设备；而 Wi-Fi HaLow 每个 AP 允许连接 8191 个设备，且不需要专有网关即可访问 IP 网络。

图 4 显示，尽管 PAN/LAN 类别的每种技术在安装及运行成本效益方面都表现很好，但其中惟一可与 Wi-Fi HaLow 相比的技术是运行于 2.4GHz 频段的 Wi-Fi。这时候就需要管理员评估 IoT 环境的主要目标是什么了。当最重要的因素是更大的覆盖范围和电池寿命、墙壁穿透能力、易于安装性以及可扩展至容纳更多客户端设备时，Wi-Fi HaLow 是显然的选择。在 AP 覆盖范围以内，从 IP 网络易于集成性和数据吞吐量方面看，应该选择 2.4GHz Wi-Fi，因为该技术是成熟的，且目前很多 AP 已经采用了该技术。将 Wi-Fi HaLow 增加到 Wi-Fi 4、Wi-Fi 5 或 Wi-Fi 6 网络中，用户就能够在相同的 IT 基础设施上满足几乎任何需求而不会受到干扰。

## 授权 WAN 技术

NB-IoT 或 LTE-M 等 WAN 技术运用运营商或移动电话服务提供商拥有的授权频谱。这类系统尽管承诺提供无处不在的网络覆盖范围，但是由于使用移动蜂窝基础设施需要订购数据计划，所以给 IoT 网络增加了重复发生的成本负担。

与 LTE-M 相比，对于 AP 覆盖范围以内的客户端设备，Wi-Fi HaLow 实现的数据速率显著高于 LTE-M，使用 5MHz 带宽时达到 4Mbps 最大下行链路数据速率，使用 180KHz 带宽时，达到 127Kbps 数据速率。在这次分析中，除了覆盖范围，Wi-Fi HaLow 在每一方面都好于本次分析的这两种技术（参见图 5）。在 1 公里的覆盖范围内，Wi-Fi HaLow 有可能满足很多企业内部 IoT 用例的要求。

当设备位于 AP 覆盖范围以内时，Wi-Fi HaLow 为应用提供成本更低的解决方案，并提供电池寿命更长、IP 网络易于集成和数据速率更高的优势。在低功率客户端设备稠密的环境中，用 Wi-Fi HaLow 汇聚流量然后将其发送到互联网是更好的选择。如果运营商网络不可用，那么 Wi-Fi HaLow 网络可继续作为 LAN 运行。

<sup>5</sup> 本节提到的网格架构不同于目前消费市场上被称为网格 Wi-Fi 系统的多 AP 系统。

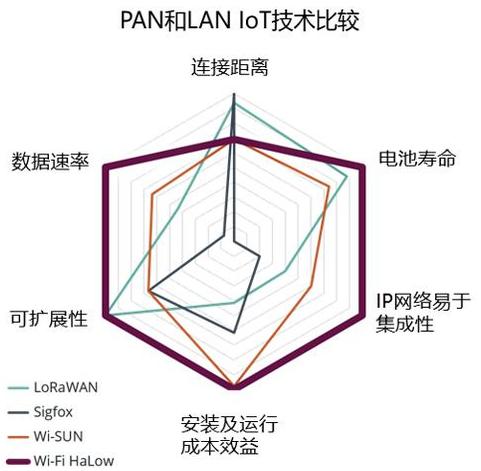


图4：与其他可选IoT技术相比，Wi-Fi HaLow满足关键要求。



图5：Wi-Fi HaLow的成本效益、可扩展性和原生IP支持使其成为替代昂贵的授权或专有IoT技术的绝佳选择。

## IoT 设备能效比较

IMEC Research Group 为比较低于 1GHz 的无线技术的能耗进行了一项研究<sup>6</sup>。该机构运行两种不同的方案。一种比较长距离技术 NB-IoT、LoRaWAN 和 Sigfox，另一种比较基于 IEEE 802.15.4 Zigbee 技术的 Wi-SUN 和 Wi-Fi HaLow。

为了对这 5 种解决方案进行客观公正的比较，该项研究设定，每 10 分钟发送一个 12 字节的数据包。功耗是在每个系统运行时测量的。请注意，12 字节数据包对于 Wi-Fi HaLow 而言是极小的，之所以这么设定，是因为这项研究要比较的技术中包括 Sigfox<sup>7</sup>。在真实应用中，Wi-Fi HaLow 能够以比 Sigfox 快 15 倍的速率传送最大 1500 字节的数据包。

### IMEC 研究的设定条件

下表列出了计算 IMEC 模拟结果中的电池寿命时所用的设定条件。以 10 分钟发送间隔条件下产生的能耗为基础进行计算：使用选定的示例“无线电+微控制器 (MCU)” 半导体解决方案，每 600 秒发送一条信息。请注意，其他 Wi-Fi HaLow 技术厂商可能会展示不同的结果。

技术	无线模块	MCU	功耗 (mA) Rx/Rx/空闲/休眠	有效载荷大小	Tx 功率 (dBm)
Sigfox	Atmel ATA8520E	ARM Cortex M3*	10.4 / 32.2 / 0.05 / 0.00015	12 字节	14
NB-IoT (MCS9)	uBlox SARA N210	ARM Cortex M3*	46 / 220 / 6 / 0-.003	12 字节	20
LoRaWAN (SF7)	SEMTECH SX1272	ARM Cortex M3*	11.2 / 125 / 1.4 / 0.0001	12 字节	23
Wi-SUN IEEE 802.15.4g	Atmel AT86RF215	ARM Cortex M3*	28 / 62 / 6,28 / 0.03	12 字节	14
Wi-Fi HaLow IEE 802.11ah	Atmel AT86RF215	ARM Cortex M3*	28 / 62 / 6.28 / 0.03	12 字节	14

\* ARM Cortex MCU/32MHz (3.88mA 功耗)

由于欧盟的占空比限制 (对 STA 而言为 2.8%)，LoRaWAN 和 SigFox 无法实现 10 分钟最小 Tx 间隔。

电池样例:	
AA	2850 mAh/1.5V 直流、4.2Wh
币形电池	200 mAh/2V 直流、0.45 Wh
锂电池	500 mAh/3.6V 直流、1.8 Wh

### 能效 (比特/焦耳)

这项研究通过 1 焦耳能量能够发送或接收的比特数来定义能效。图 6 显示，当设定 10 分钟发送间隔时，对这些 IoT 技术比较后发现，Wi-Fi HaLow 能效远高于其他技术，因为其发送时间相对较短。在该



图 6: 与其他几种大家熟知的 IoT 技术相比, Wi-Fi HaLow 的能效至少高 4 倍。↔

<sup>6</sup> IoT 设备的长寿命: 比较低于 1GHz 的无线技术的能耗, Famaey, Jeroen, 2018 年

<sup>7</sup> Sigfox 将数据包大小限制为最大 12 字节

项研究中，其他技术发送同样长度的数据包花费的时间长得多。例如，Wi-Fi HaLow 每焦耳发送 22.4Kb，而 NB-IoT 则为 3.7Kb/焦耳。Wi-Fi HaLow 这 6 倍的优势可以转换成长得多的设备电池寿命。

该项研究还显示，就简单网络而言，Wi-Fi HaLow 的效率比 LoRaWAN 和 Wi-SUN 高 4 倍。在给网络增加更多节点时，Wi-SUN 的效率略有下降，而 Wi-Fi HaLow 的效率相对保持不变。

已经证明的是，Wi-Fi HaLow 的能效比该项研究中所考虑的其他技术高得多。

## 电池寿命

### 基于电池容量

通过了解每种 IoT 技术的能耗就可以预测，就每种技术而言不同容量的电池的寿命。电池中存储的能量（以焦耳为单位）与其额定容量是成比例的，而额定容量通常以毫安时（mAh）表示。

图 7 中左侧的柱形图显示了对各种不同的电池容量而言，Wi-Fi HaLow 的预测电池寿命。很多常见的 3V 币形电池的容量为 250mAh。典型的 1.5V AA 碱性电池可用于外形尺寸较大的设备，其平均额定容量为 2000mAh。该项研究结果表明，在这种富有挑战性的 IoT 用例中，在每 10 分钟传送一次数据时，Wi-Fi HaLow 用一颗币形电池可以支持超过一年半的运行时间。该项研究显示，Wi-Fi HaLow 可支持由各种尺寸的小型币形电池供电的 IoT 设备，且对很多应用而言，Wi-Fi HaLow 都优于其他技术。

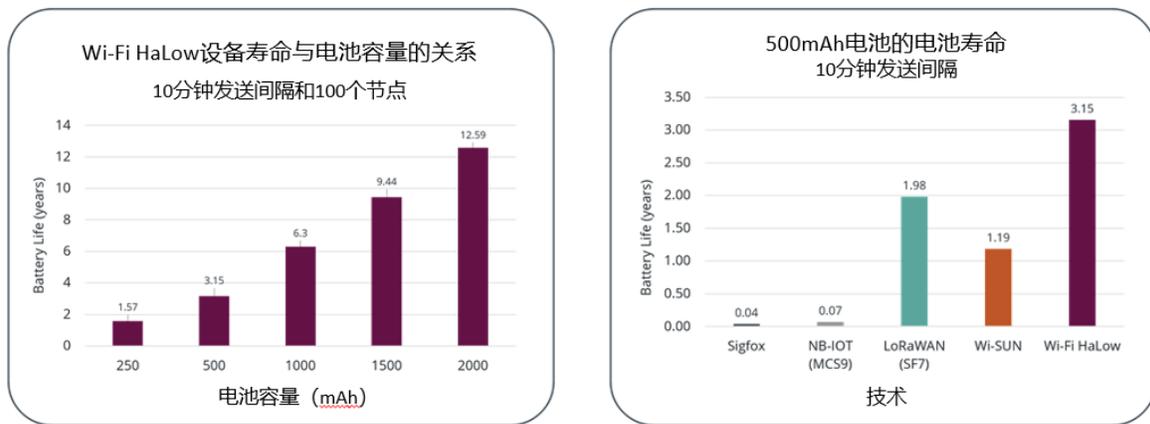


图 7：基于电池容量的 Wi-Fi HaLow 电池寿命（左图）和发送频率（右图）。←

### 基于发送频率

这项研究的重点是，在发送间隔为 10 分钟的情况下，对各种技术进行比较。需要在数据传送之间进行更频繁通信的技术将遭遇电池寿命缩短的问题。Wi-Fi HaLow 显示，它能够将休眠时间延长很多。TWT、“BSS 扩展的最长空闲时间（BSS Extended Max Idle）”等功能使 Wi-Fi HaLow 设备能够在唤醒运行之间休眠数小时、数天、数月甚至数年时间。

## 模拟研究的结论

在比较带宽、数据速率和拓扑时，Wi-Fi HaLow 比 Sigfox、NB-IoT、LoRaWAN 和 Wi-SUN 表现出明显优势。在类似用例中，与这些技术相比，Wi-Fi HaLow 是能效最高的。IMEC Research Group 评估后确定，Wi-Fi HaLow 不仅能效比其他被广泛认为可提供长距离连接的技术高 4 倍，而且还提供比其他 IoT 技术更高的数据吞吐量。该机构还确定，使用典型 AA 碱性电池的 Wi-Fi HaLow 设备可以持续运行超过 10 年时间，这长于典型的电池存放寿命。

## 总结

Wi-Fi HaLow 显然满足而且在很多情况下超越了 IoT 连接和应用的主要需求。能够适合大量连接距离、数据速率和能效要求不同的 IoT 用例，对 IoT 技术的成功至关重要。Wi-Fi HaLow 能够在低于 1GHz 的频段和窄频道上运行，因此可支持更长的连接距离（约 1 公里），并改善了对墙壁和障碍物的穿透能力。其独特的节电功能套件可降低设备能耗，因此提高了能效，该套件还使电池能够运行多年，并支持币形电池。Wi-Fi HaLow 支持各种数据速率，适合从低数据速率的传感器网络到高数据速率的视频系统等各种用例。新的 Wi-Fi HaLow PHY 和 MAC 功能支持每 AP 连接数千个设备，同时改善了无线电频谱的使用。

因为 Wi-Fi HaLow 是 IEEE 802.11 和 Wi-Fi 技术组合的一部分，所以它是开放标准，无需专有控制器、集线器或网关，就可提供更高效率的安装和更高的运行成本效益。在存在 Wi-Fi 4、Wi-Fi 5 和 Wi-Fi 6 网络的情况下，Wi-Fi HaLow 网络依然可以部署，且不会干扰这些网络的 RF 性能。原生 IP 支持和先进的 WPA3™ 安全性使得访问云应用和进行无线更新更简便、更安全。

相关比较研究显示，Wi-Fi HaLow 的能效比其他无线技术高很多倍，每焦耳能量可以传送更多数据，从而可确保更长的设备电池寿命。其提供长距离连接的星形架构消除了网格网络造成的数据瓶颈和延迟。作为 Wi-Fi 技术组合的一部分，Wi-Fi HaLow 提供了一种更加全面的连接方式，将 Wi-Fi 覆盖范围扩展到难以到达的地点，例如车库、地下室、阁楼、仓库、工厂和大片室外区域。Wi-Fi HaLow 使网络设计师能够采用单一的、基于标准的、支持 IP 的可靠架构部署 IoT 网络，而不必牺牲简便性和效率。

如需了解更多有关 Wi-Fi HaLow 的信息，请访问：<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>。

## 关于 Wi-Fi Alliance®

[www.wi-fi.org](http://www.wi-fi.org)

Wi-Fi Alliance® 是全球联网的企业共同为您提供 Wi-Fi® 服务。我们的合作论坛成员来自整个 Wi-Fi 生态系统，秉承共同的“随时随地互联万事万物”的企业愿景，同时提供最佳的用户体验。自 2000 年以来，Wi-Fi Alliance 已经认证了超过 50,000 多项产品，带有 Wi-Fi CERTIFIED™ 批准印章的产品均符合互操作性、兼容性和最高的行业标准安全保护措施。如今，在不断扩张的各种应用程序中，Wi-Fi 承载着一半以上的互联网流量。数十亿人每天都依赖于 Wi-Fi，Wi-Fi Alliance 将继续推动它的普及和发展。

Wi-Fi® and Wi-Fi Alliance® 是 Wi-Fi 联盟的注册商标。Wi-Fi CERTIFIED™、Wi-Fi Protected Setup™、Wi-Fi CERTIFIED WPA3™、WPA3™、Wi-Fi HaLow™、Wi-Fi CERTIFIED Enhanced Open™、Wi-Fi CERTIFIED 6™ 和 Wi-Fi 联盟的标识都是 Wi-Fi 联盟的商标。