 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i4.5317

IEEE 802.11be Core technology research of wireless LAN standard

Cheng Peng Xue Jiang* Bo Sun Ming Ye

Boding shihua (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing, 100096, China

Abstract

Wireless local area networks (WLANs) are an important branch of wireless communications. The IEEE 802.11 series of WLAN standards have been continuously evolving, driving the ongoing enhancement of wireless access capabilities. The latest generation, IEEE 802.11be, as a key version targeting Extremely High Throughput (EHT), features higher data rates, lower transmission latency, and improved spectral efficiency to meet the demands of emerging applications such as virtual reality and cloud computing. This paper systematically reviews the core technologies of the IEEE 802.11be standard, including ultra-wide bandwidth, high-order modulation, flexible multi-resource unit scheduling, multi-link operation (MLO), and enhanced EDCA parameter optimization, and analyzes their impact on network performance.

Keywords

wireless LAN; IEEE 802.11be standard; ultra-high speed

IEEE 802.11be 无线局域网标准核心技术研究

彭程 姜雪* 孙博 叶明

博鼎实华（北京）技术有限公司，中国 · 北京 100096

摘 要

无线局域网是无线通信领域中重要的分支之一，无线局域网的IEEE 802.11系列标准不断演进，推动无线接入能力持续升级。目前最新一代的IEEE 802.11be标准，作为面向极高吞吐量（EHT）的关键版本，具备更高的数据速率、更低的传输时延和更强的频谱利用效率，满足虚拟现实、云计算等新兴应用的需求。本文系统梳理了IEEE 802.11be标准的核心技术，包括超高带宽、高阶调制、多资源块灵活调度、多链路并发传输（MLO）以及增强的EDCA参数优化机制，并分析这些技术对网络性能提升的作用。

关键词

无线局域网；IEEE 802.11be标准；超高速率

1 引言

IEEE 802.11 系列标准和协议族是无线局域网技术的基础。在 IEEE 802.11ax 解决高密度使用环境下的并发问题之后 ,IEEE 希望在新一代的标准中实现超高的吞吐量性能，更低的时延和更高的网络效率以适应未来如虚拟现实、云计算、大数据等新型应用场景。因此最新一代的 IEEE 802.11be 标准在物理层和数据链路层都进行了相应的改进 [1]。本文主要分析和研究了 IEEE 802.11be 标准网络性能提升的核心技术。

2 IEEE 802.11 标准的发展历史及现状

IEEE 802.11 标准构建了无线局域网技术的基础。早期的 WLAN 标准主要是 IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11a/g 标准。IEEE 802.11a/g 数据速率提升到了 54Mbps。它引入了正交频分复用技术，带宽为 20MHz, 有 64 个子载波。这些为后续 IEEE 802.11 版本奠定了基础。IEEE 802.11n 在之前的基础之上引入了 MIMO，MAC 层聚合技术，支持的带宽也提升到了 40MHz。IEEE 802.11ac 继续提升 WLAN 网络的性能，其引入了 80MHz 和 160MHz 的带宽，但受限于频谱资源，所以只能在 5GHz 频段上实现。将空间流提升到了 8 条，同时又引入了 MU-MIMO 技术，在下载的过程中能够将不同的空间流分给不同的终端从而能够实现同一时刻并发技术。IEEE 802.11ax 在提升速率的同时更加专注于提升网络的效率。IEEE 802.11ax 将正交频分多址（OFDMA）引入到 IEEE 802.11 标准当中，这允许为终端分配最有效的时分频率资源部分，从而能够实现高密用户场景下的并发。同时该标准还引入了更加高阶的调制技术 1024-QAM 和上行 MU-MIMO。从而增加了网络性能的提升。

目前市场上主流 WLAN 产品标准主要是 IEEE 802.11n，IEEE 802.11ac 和 IEEE 802.11ax。在 IEEE 802.11ax

【作者简介】彭程（1984–），男，中国北京人，硕士，高级工程师，从事通信技术及无线网络安全研究。

的基础上，IEEE 继续演进该系列标准。推出了新一代的 IEEE 802.11be 标准。其主要设计目标就是拥有极高的吞吐量性能、更低的时延、更灵活的频谱利用率等。

3 IEEE 802.11be 物理层的提升

3.1 带宽的扩展

IEEE 802.11be 为了支持其超高速率的特性将最高带宽提升到了 320MHz。带宽的提升使其能够达到 30Gbps 及以上的速率。同时支持 240MHz 带宽以及像前几代的 WLAN 网络一样支持 20Mhz, 40MHz， 80MHz 以及 160MHz 的带宽。320Mhz 带宽的使用也 6GHz 频段的开放有很大的关系。美国 2020 年 4 月 23 日发布法规，将全部 6GHz 频段（5925MHz-7125MHz，共计 1.200MHz 带宽）用于免许可技术。欧洲开放 5925MHz—6425MHz 的 500MHz 频段用于免许可频段。拥有 6GHz 频段的支持，新一代的无线局域网技术能够使用连续的 320MHz 带宽进行传输。但需要指出的是 320MHz 带宽并不是适用于所有国家地区的网络。例如在我国目前对 WLAN 开放的频段主要是 2400-2483.5MHz，5150-5350MHz 以及 5725-5850MHz。相关的 6GHz 的频段目前仍未对 WLAN 开放。因此在我国目前无法使用 320MHz 连续的带宽支持 IEEE 802.11be 标准 [2]。

3.2 高阶调制增强

高阶调制一直是 IEEE 802.11 标准演进中的重要一环，IEEE 802.11n 中支持 64QAM，到 IEEE 802.11ac 支持 256QAM，每个符号可以携带 8 个比特位。性能提升 33%。到 IEEE 802.11ax 支持 1024QAM，每个符号位可以携带 10 比特位，性能提升 25%。IEEE 802.11be 继续通过高阶调制来提升速率，其最高支持 4096QAM。每个符号能够携带 12 个比特位符号，性能提升 20%。但 4096QAM 的高阶调制在实际使用中有较强的局限性，其 EVM 的要求达到 -38db。在实际用户的使用环境中很难达到这种苛刻的要求。即使结合了 Beamforming, 受到终端天线数的限制，其对使用环境的要求仍较为苛刻。

3.3 频谱效率的提升

IEEE 802.11be 继续沿用了 IEEE 802.11ax 中的 OFDMA 并发技术。并进行了适当的改进。IEEE 802.11ax 中引入了 OFDMA，OFDMA 通过 RU 划分信道。每个用户可以占用一组或多组 RU 以满足不同带宽需求的业务。一个 RU 可以包含 26,52,106,242,484,996 个子载波。以 20MHz 为例，其可以容纳 9 个 RU26,4 个 RU52,2 个 RU106,1 个 RU242。IEEE 802.11ax 中每个终端只能被分配到一个 RU。例如两个终端分享无线接入点的 80MHz 带宽。如果一个终端获得 242RU 的带宽，则另一个终端最多只能获得 484RU 的资源。这样会浪费 25% 的宽带资源。此外如果终端连接无线接入点 , 无线接入点在 40MHz 的副信道进行 20MHz 的前导码穿孔，则无线接入点只能分配 20MHz 的带宽给终端。浪费了有限的宽带资源。为了在 IEEE 802.11ax 的基础上再次提升频谱效率，IEEE 802.11be 引入了多 RU 的资源分配机制。将 RU 分为了两种类型，大型 RU 和小型 RU。 242 个子载波以下的被算作小型 RU。主要包括 26-RU, 52-RU 和 106-RU。大型 RU 主要包括 242-RU, 484-RU, 996-RU。IEEE 802.11be 中允许同类型的多 RU 组合，例如在 26-RU 可以和 52-RU 组合被分配给终端。242-RU 可以和 484-RU 分配给终端。利用多资源单元的灵活分配策略能够有效提升信道的利用率。

在改进多资源单元分配的同时，IEEE 802.11be 增强了前导码打孔技术。IEEE 802.11ax 中率先引入了前导码打孔技术。支持以 20MHz 在内的非连续信道捆绑。如果有子信道处于忙碌的状态，前导码打孔技术能够屏蔽忙碌的子信道。然后将非连续的空闲信道捆绑在一起进行数据发送，从而提升了信道利用率和吞吐量。但 IEEE 802.11ax 只支持无线接入点给终端发送数据下行方向的前导码打孔技术。在 IEEE 802.11be 中，对前导码屏蔽技术进行了增强。其以 RU 为单位，给终端分配不同数量的 RU。同时 IEEE 802.11be 在 IEEE 802.11ax 的基础上增加了对上行前导码的支持。例如无线接入点给终端分配了 80MHz 的带宽，若在上行流量的过程中发现 20MHz 的带宽处于忙碌状态，终端将屏蔽其带宽并在不连续的带宽上发送上行数据给无线接入点 [3]。

3.4 新型前导码的引入

IEEE 802.11be 使用了新的前导码格式，并需要兼容之前版本的 IEEE 802.11 协议。传统的 IEEE 802.11a 前导码包含一个 L-STF 和一个 L-LTF。 下一个 OFDM 符号携带传统信号字段（L-SIG），用于指示后续信号使用的 MCS 以及帧长度。IEEE 802.11n 在 L-SIG 之后增加了 HT-SIG1 和 HT-SIG2 字段。用于同步信号。IEEE 802.11ac 在 L-SIG 之后是 VHT-SIG1 和 VHT-SIG2 字段，用于网络同步和详细信息的传递。在 IEEE 802.11ax 中，它的 High Efficiency (HE) 信号字段包含两个 OFDM 符号。第一个符号用 QBPSK 调制，而第二个符号用 BPSK 或 QBPSK 调制。模运算的结果与 BPSK/QBPSK 选择相结合，可以识别出 IEEE 802.11ax 的四种帧类型。

IEEE 802.11be 增加了 EHT Preamble 部分，主要包括 U-SIG, EHT-SIG, EHT-STF, EHT-LTF。U-SIG 主要提供一些传统的信息用于保证前向版本的兼容性。主要信息包括物理层的标识符，上行 / 下行的标识，BSS 颜色标识的符号，每帧持续的时间、带宽信息等参数。之后的 ETH-SIG 字段会存储一些 IEEE 802.11be 独有的信息，例如 MCS 调制速率信息，空间流信息，编码信息，保护间隔时长等，RU 资源块的分配信息等。紧随 EHT-SIG 字段的是 EHT-STF 和 EHT-LTF 字段，在使用 MIMO 和 OFDMA 传输数据时用于精细的时间控制和频率调节。IEEE 802.11be 继承了上一代标准的 STF 和 LTF 的较长变量信息，这有利于扩展覆盖范围和更好的信道估算。

4 IEEE 802.11be 数据链路层的提升

4.1 多链路并发技术

IEEE 802.11be 中引入了多链路并发技术 MLO（Multi-Link Operation）来提升吞吐量性能、降低网络延迟并且提升

网络的可靠性。在传统的 MAC 层结构中，无线接入点和终端只能使用单一频段进行通信。如 2.4GHz 频段和 5GH 频段。MLO 技术能够在不同频段同时传输数据，以此来提升网络的效率和可靠性。IEEE 802.11be 标准将具备 MLO 的接入点和终端定义为多链路能力设备（MLD），其为上层提供唯一的 MAC 实例，同时保留每个接口的独立参数。为了实现在不同频段的传输，标准将 MAC 层进行了不同的划分。一般将 MAC 层划分为高 MAC 层和低 MAC 层。高 MAC 层与逻辑链路层对接，对数据报文进行成帧前的处理，或者接收下层上传的数据报文并做解析处理。例如 AMSDU 聚合，帧编号，帧加密、帧解密、帧排序等。它对应着多链路设备的 MAC 地址，称为 MLD MAC 地址。低 MAC 层对应着每一个物理链路，主要处理数据报文收发直接相关的流程以及控制帧收发。例如填充 A-MPDU 的发送和接收地址。根据地址过滤 AMPDU 的报文，发送 RTS/CTS 等控制报文等。

MLO 多链路同传技术中引入了两种不同的信道访问方法：异步模式和同步模式。在异步传输模式下，MLD 在多个链路上异步传输帧，而无需对起始时间进行时钟同步。相反在同步传输模式下起始时间需要在两个链路直接进行对齐。在任何模式下，链路都可以具有自己的主要信道和参数，包括数据包协议数据单元（PPDU）、调制和编码方案（MCS）、增强分布式信道访问（EDCA）等。

在两个链路中如果有很好的链路隔离措施可以使用 STR（Simultaneous Transmit and Receive）模式进行传输。该模式能够在不同链路上同时传输和接收数据。例如在链路一发送数据的同时链路二接收数据。STR 模式与传统的单链路和双频并发链路不同，MLD 关联的 STA 共享一个公共的发射机序列号（SN）和一个为不同链路分配的数据传输空间。如果多个链路的传输具有相同的服务类别这个特性使得 MLD 能够更快地在不同链路之间传输应用程序的数据包，因此能够提升吞吐性能降低时延。如果两条链路相互干扰严重则需要采用 NSTR 模式。NSTR 不能在不同链路上同时传输和接收数据。换句话说，不允许在链路之间发生重叠的传输和接收。为了促进多链路操作，NSTR 通过对齐或同步传输来避免设备间共存干扰。

多链路终端的连接过程也和传统无线局域网终端的连接过程一样也主要分为发现，连接和认证几个过程。在多链路的连接过程之中通过一条链路就能完成终端与无线接入点的连接操作。而不是每条链路都进行重复的连接操作从而提升了连接的效率。首先终端需要发现具备 MLO 功能的无线接入点。发现方式有两种 : 主动扫描和被动扫描。被动扫描是终端在一条链路上接收信标帧的广播信息，通过信标帧携带的多链路信息掌握多链路的情况。另一种是主动扫描方式，终端在一条链路上发送探测请求帧，通过探测响应了解多链路的信息情况。在发现之后无线终端发送认证请求管理帧到无线接入点。无线接入点回复认证响应管理帧。认证请求和认证响应的过程中除了传统字段外还包括 MLD 的 MAC 地址和 MLO 的信息字段。在认证之后就是相互关联的过程。无线终端发送关联请求，无线接入点回复关联响应。在关联请求和关联响应中，关联请求中包括 MLO element 的字段以及，MLD 的 MAC 地址，MLO 的能力信息，其他链路的配置信息等。最后进行四次握手的过程协商单播秘钥和组播秘钥，成功之后就能进行数据的传输。

4.2 服务质量的改进

IEEE 802.11be 的目标之一是希望能支持时间敏感性的应用比如游戏、语音等。时延是此类应用的关键指标。通常情况下高速率高带宽并不意味着低的延时。在实际使用场景中此类应用与视频流等应用混在一起，还要经受外部其他 WLAN 设备的干扰。经常会出现超大的时延导致卡顿、失真等情况的发生。因此在实际使用中需要控制最大时延的范围才能够支持相应的应用。IEEE 802.11be 通过 EDCA 参数的改进来降低时延。在传统网络中，获得 TXOP 后，STA 只能发送一个 AC 的数据。11be 可以允许使用任何 AC 的一个 TXOP 尽快发送 RTA 流量。此外，无线接入点可以暂时从任何关联的终端那里夺取 TXOP 所有权以传送 RTA 流量。如果无线接入点探测到某个终端有 RTA 流量，它还可以授予该终端信道访问权限。在 RTA 流量传输完毕后，无线接入点将 TXOP 返回给原始的 TXOP 所有者。

5 IEEE 802.11be 设备的配置参数

IEEE 802.11be 无线接入点的配置与 IEEE 802.11ax 相似。以美版的 TP-Link BE19000 无线路由器为例。在配置方面 2.4GHz 频段和 5GHz 频段中在模式选项中增加了 IEEE 802.11a/b/g/n/ax/be 选项。表示设备即支持最新的 IEEE 802.11be 标准也兼容之前的 IEEE 802.11 标准。在加密方式中有 WPA3-Persoanl 加密方式和 WPA3/WPA2 混合型的加密方式。某些终端只有在 WPA3 的加密模式中才能够使用 IEEE 802.11be 标准。在 6GHz 频段的带宽选项中增加了 320MHz 带宽的选项。在 6G 频段的模式选项中只支持 IEEE 802.11ax 和 IEEE 802.11be。此外相较于传统配置不同的是，增加了 MLO 选项。能够配置单独的支持 MLO 方式的无线基本服务集并且能够选择三频并发还是双频并发。

6 结语

IEEE 802.11be 是最新一代无线局域网的标准。本文从 IEEE 802.11be 的核心技术出发，主要分析了超高带宽，高阶调整，多资源块的分配，多链路并发传输、EDCA 参数改进等核心技术在 IEEE 802.11be 标准中所带来的网络侧的提升。未来 IEEE 802.11be 必将成为无线局域网的主流标准在无线应用领域发挥重要作用。

参考文献

[1] 成刚、蒋一名、杨志杰著 Wi-Fi7开发参考：技术原理、标准和应用，北京：清华大学出版社，2023.7

[2] 加斯特（美）著，802.11无线网络权威指南，南京：东南大学出版社，2007.12

[3] IEEE 802.11be/D3.0 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8:Enhancements for extremely high throughput（EHT）, January 2023.