



Wi-Fi 7 开发参考

技术原理、标准和应用

成 刚 蒋一名 杨志杰◎著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书以 Wi-Fi 7 专业技术介绍为主,同时介绍 Wi-Fi 7 技术的新产品开发方案和测试,以及 Wi-Fi 7 在行业及家庭场景中的应用,旨在让读者系统地掌握 Wi-Fi 关键技术全貌、开发新产品和实际应用部署。全书共 8 章,前 3 章从 Wi-Fi 的基本原理入手,介绍传统 Wi-Fi 关键技术和 Wi-Fi 6 的核心技术演进,然后重点介绍 Wi-Fi 7 标准制定、关键技术和创新内容;第 4 章介绍基于 Wi-Fi 7 的产品开发和测试方法;第 5 章介绍 Wi-Fi 相关的行业联盟或组织对 Wi-Fi 技术的支持、认证和技术商业化的推动;第 6 章介绍 Wi-Fi 7 在行业或家庭不同场景下的应用;第 7 章介绍 Wi-Fi 7 与移动 5G 技术融合;第 8 章展望 Wi-Fi 最新技术发展趋势。

本书适合对 Wi-Fi 进行产品开发和应用的行业人士、希望了解 Wi-Fi 新技术或应用的各行业非专业人员及各大院校本科生或研究生。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989,beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

Wi-Fi 7 开发参考:技术原理、标准和应用/成刚,蒋一名,杨志杰著. —北京:清华大学出版社,2023.7
ISBN 978-7-302-63671-7

I . ① W… II . ①成… ②蒋… ③杨… III . ①无线网—基本知识 IV . ① TN92

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 100624 号

责任编辑:王中英

封面设计:杨玉兰

版式设计:方加青

责任校对:徐俊伟

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-83470000

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市科茂嘉荣印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23.25

字 数:550 千字

版 次:2023 年 8 月第 1 版

印 次:2023 年 8 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:094786-01

推 荐 语

Wi-Fi 标准发展迅速，每过几年就推出新的技术，是使能全球泛在无线通信最主要的手段。诺基亚的成刚等专家在 Wi-Fi 通信领域深耕多年，在该书中给领域同行系统介绍了即将商用的 Wi-Fi 7 的技术特点，强烈推荐这一力作给相关领域的学生和科研技术人员。

张大庆

北京大学讲席教授，欧洲科学院院士，IEEE Fellow

Wi-Fi 技术已经与人们的日常生活深度融合，Wi-Fi 6 在短短 3 年时间内在各行各业广泛应用。Wi-Fi 技术的每一次突破革新，都会给人们的工作和生活带来巨大便捷。本书作为 Wi-Fi 技术前沿资料，回顾了 Wi-Fi 标准的演进发展和 Wi-Fi 6 技术的性能转型，并详细阐述了 Wi-Fi 7 的技术原理与创新，从技术分析到产品开发测试，从场景化应用到与其他领域技术融合，对 Wi-Fi 相关从业者具有极高的参考价值。希望读者通过此书能够对 Wi-Fi 7 有更加清晰的认识，并从中获得启迪与帮助。

张沛

中国联通智网创新中心总监

工欲善其事，必先利其器。Wi-Fi 作为主流的短距离无线通信技术，随着其标准和性能不断迭代升级，在数字经济中的作用也越来越突出。成刚及其团队作为宽带技术领域的资深专家，克服新型冠状病毒感染的诸多影响，潜心钻研，编写了此书。在本书中，对 Wi-Fi 技术从基础原理、发展路标到产品应用进行了深入浅出的介绍，是了解数字产业化通信不可多得的好书。

徐赤璘

保利华信专项研发中心总经理

After more than two decades since its introduction, Wi-Fi is taking a giant leap forward in order to meet the growing household needs regarding communications. Wi-Fi 7 triples the throughput of its predecessor and offers many new features as well as supports, for example, virtual reality, low-latency gaming and high-quality streaming. This book provides a holistic insight on the new standard for both interested consumers and technical experts, highly recommended reading!

自 Wi-Fi 推出二十多年以来，这个技术正在取得巨大的飞跃，以满足不断增长的家庭

通信需求。Wi-Fi 7 的吞吐量是之前标准的 3 倍，并提供许多新功能，支持更多新业务，如虚拟现实、低时延游戏和高质量流媒体。本书为感兴趣的消费者和技术专家提供了有关新标准的整体见解，强烈推荐阅读！

米卡博士

芬兰国家商务促进局贸易和创新领事，中国区创新负责人

Wi-Fi 已经成为我们生活中不可或缺的一部分。作为全球著名通信厂家的技术专家，作者从 Wi-Fi 的技术发展史出发，对 Wi-Fi 技术标准、技术原理、产品开发、产品应用、5G 融合等方面进行了详细的阐述。作者具有资深的产品设计和开发经验，在本书中探讨了如何利用新技术开发产品和测试，并结合应用进行方案介绍，有哪些场景，如何进行技术分析，需要多少设备，达到怎样的性能。本书可作为行业人员和项目开发的必备参考书目。十分期待这本书给读者带来不一样的体验。

周俊鹤教授

同济大学电子与信息工程学院副院长

本书全面介绍了 Wi-Fi 的技术原理、演进路线和产品开发知识，并且把专业性的技术与产品开发、应用场景相结合，具有深入浅出、系统性强的特点。本书不仅适用于对 Wi-Fi 技术感兴趣的普通读者，而且对行业内的专业技术人员有很好的指导作用。

张杰

上海剑桥科技股份有限公司董事兼宽带事业部总经理

推荐序一

在数字化经济和千兆接入网络不断发展的今天，Wi-Fi 技术在各个行业的作用已经变得越来越重要。不管是家庭中的远程办公、远程教学、影音娱乐、网络游戏等，还是机场、酒店、商场等公共场合，Wi-Fi 都是得到广泛普及和非常重要的短距离无线数据通信技术。

甚至中国空间站也安装了 Wi-Fi 设施，让航天员与地面人员或者家人进行视频通话。而飞向火星的天问一号火星探测器也装有 Wi-Fi 设施，在深空中，抛出带有拍摄功能的分离测量传感器，把天问一号精彩的“自拍照”再通过 Wi-Fi 技术传回飞行的探测器。

毫不夸张地说，Wi-Fi 技术是近二十多年来在各行业应用中取得显著成功的关键通信技术之一。

而 Wi-Fi 的技术标准仍在以 5 年左右的周期更新换代，带宽、性能、用户体验等持续提升，也对应着数字经济发展、宽带接入技术演进、各种高带宽业务涌现。

近几年，国内支持 Wi-Fi 6 的宽带接入产品和家庭路由器正处于方兴未艾阶段，而新一代的 Wi-Fi 7 技术也悄然来临。Wi-Fi 7 有更多的创新和性能的突破，最高速率是 Wi-Fi 6 的 3 倍，支持多频段捆绑等新的核心技术，可以预见，它必然为智能家居、智慧城市、智能交通等领域的应用提供更加完美的体验。

除此之外，随着元宇宙技术的兴起，具有高性能的 Wi-Fi 7 也将在元宇宙中扮演越来越重要的角色。Wi-Fi 7 将为元宇宙中的虚拟现实、增强现实、空间交互等应用提供更加快速和稳定的网络支持，为用户提供更加极致的体验和互动。

目前国内系统性地介绍 Wi-Fi 技术相关的专业图书还不多，大多数国内读者还不了解新一代 Wi-Fi 7 技术的发展情况，本书的出版恰逢其时，很好地把 Wi-Fi 原理、Wi-Fi 技术演进、Wi-Fi 7 的关键技术和产品开发、Wi-Fi 7 场景应用等各方面都结合起来，给国内专业人士及技术爱好者提供了一本既深入浅出又很具专业性的图书。

本书作者是宽带接入、家庭网关和 Wi-Fi 技术等领域的资深专家，所带领的团队在 Wi-Fi 领域有很多创新和实际产品的开发经验，深知 Wi-Fi 7 技术的重要性和潜力，也深信 Wi-Fi 7 技术将在未来的数字化经济中继续发挥巨大的作用。因此，作者以及团队的专家将技术的理解、经验和心得分享给更多的读者，希望能够为 Wi-Fi 技术的发展和推广做出自己的贡献。

吴忠胜

上海诺基亚贝尔执行副总裁
基础网络业务集团负责人

推荐序二

Wi-Fi 7 是无线连接技术的最新标准，它比以前的任何一代都更快、更稳定、更智能。它将改变我们与互联网、设备和彼此之间的互动方式。

诺基亚成刚等专家在这本书中分享了对 Wi-Fi 7 技术的深入见解和丰富知识。该书从基础原理开始，介绍了 Wi-Fi 技术演进、Wi-Fi 6 技术特点，然后深入探讨了 Wi-Fi 7 技术的创新、核心技术、新产品开发，以及各种场景下的应用和建议，例如居家体验、体育馆、企业办公等，帮助读者利用 Wi-Fi 7 技术提升自己生活和工作中的连接品质和效率。

如果问 21 世纪什么是对人类生活影响最大的通信科技，答案可能是 Wi-Fi。Wi-Fi 几乎是所有终端连接互联网的最后一里路，从互联网网关、网络中继器，到电子终端，所有 21 世纪新型态产品大概率都配有 Wi-Fi。对高比例掌控 Wi-Fi 市场的厂商而言，世界每增加一项新产品，支持 Wi-Fi 便能增加市场销售额，背后的商机非常可观。对于有采购 Wi-Fi 需求的公司与个人来讲，如何挑选有生态影响力，并且具备互联互通能力的厂商，变得越来越重要。

Wi-Fi 产品规格、每一代演进是推进 Wi-Fi 经济规模增长的最主要动力，Wi-Fi 的每一代演进规格看似复杂，但其实主要有三个重点：

（1）速度越来越快：14 年时间速度提高 60 倍，方法不外乎增加频道、增加频宽、增加信号压缩比。

（2）稳定需求越来越高：从 1 对 1 到 1 对多，许多新规格如 MU-MIMO、OFDMA、MLO、MRU 陆续出现。

（3）使用者对不断网的需求越来越明显：1 台路由器不够，需要 2 台甚至更多。而无线电功率也不能无限制上升，像 Mesh、多天线等的创新就越来越多。

本书详细介绍了 Wi-Fi 7 的技术特性、产品开发以及在家庭环境、城市公共区域、行业领域等场景中的应用，并且分析了 Wi-Fi 7 与 5G 之间的融合与协同关系。这本大作不仅适合无线通信相关行业人员阅读，也适合任何想要了解 Wi-Fi 7 技术及其影响力的普通读者。

许皓钧

联发科技智慧联通事业部总经理

前 言

在互联网广泛普及的今天，Wi-Fi 早已是家喻户晓的室内无线连接技术。因为 Wi-Fi 的商业化程度很高，所以很多人认为 Wi-Fi 技术已经很成熟。即使是通信或计算机行业的专业人员，可能也会觉得 Wi-Fi 技术没有什么潜力可以挖掘。但实际上 Wi-Fi 技术以比移动通信几乎快一倍的迭代速度不断演进，而每一代 Wi-Fi 技术的新产品都会给用户带来新的业务体验。

从 1999 年 Wi-Fi 系列标准正式起步，每隔四五年就有一个新的 Wi-Fi 标准被制定，对应的速率从开始的 1Mb/s，到 54Mb/s，再到 600Mb/s，今天用户的上网速率已经可以超过 1Gb/s。在办公室，无处不在的 Wi-Fi 是公司必备的基础设施；在家里，Wi-Fi 就像水、电、煤气一样，成为人们日常生活必不可少的基本需求。在疫情流行阶段，人们在家远程办公和在线学习，短距离通信技术 Wi-Fi 所发挥的作用显得格外突出。

根据 Wi-Fi 联盟的报告，2021 年，估计 Wi-Fi 的全球经济价值为 3.3 万亿美元，而到 2025 年，这一数字预计将增长到 4.9 万亿美元，经济价值估算的时候考虑了消费者和企业的通信需求、技术发展、可用频谱增加等经济影响。在经过了二十多年的技术发展和标准更迭后，Wi-Fi 已经成为当今数字经济的主要经济引擎之一。

当前被广泛使用的 Wi-Fi 标准是 Wi-Fi 6。2019 年 Wi-Fi 联盟建立了 Wi-Fi 6 认证的测试标准之后，紧接着，不管是宽带接入的电信运营商，还是各种品牌的无线路由器的设备商，或者是各种智能终端的厂家，很快就把基于 Wi-Fi 6 技术的设备作为自己的主流产品，在市场中不遗余力地大力推广。

而作为 Wi-Fi 6 之后的下一代 Wi-Fi 7 技术，它以超高带宽和超高性能为目标，技术上有更多创新和突破。Wi-Fi 7 的理论速率可以达到 30Gb/s，超出目前 Wi-Fi 6 速率的 3 倍多，也超出了 5G 移动通信的峰值速率。

Wi-Fi 7 技术在 2023 年发布第一版本的标准，各个厂家在 2023 年已陆续开始研发产品和逐渐在市场中推广。从通信技术发展及应用来看，Wi-Fi 7 标准发布后的四五年内都将是无线数据通信技术的性能标杆，是各种高带宽和低时延业务的关键支撑，Wi-Fi 7 必然会给家庭网络、企业无线上网办公、城市公共场所 Wi-Fi 应用等带来高度关注，成为短距离通信或家庭上网的热点话题，它的超高性能将进一步促进超高清视频、网络游戏、虚拟现实等各种高带宽业务的发展。Wi-Fi 7 也将在物联网、工业互联网等行业中起到核心接入作用，对数字化经济发展有显著的效益支持。

市面上关于 Wi-Fi 技术原理和开发应用的图书还比较少，关于 Wi-Fi 7 的探讨还只是聚焦在行业内标准规范的演进。我们选择撰写 Wi-Fi 7 技术的图书，希望为不同行业提供无线产品开发和业务应用的专业参考，推动行业升级和应用最新无线通信技术，支持新

Wi-Fi 技术与 5G 移动的网络融合，支撑更多的行业应用场景或业务服务，同时也让大众对远程办公学习、家庭影音娱乐等生活体验背后的技术概念和原理有更多的了解。

本书以 Wi-Fi 7 技术原理为主要内容，围绕 Wi-Fi 技术分为 8 章展开描述。

第 1～3 章首先从 Wi-Fi 的基本概念和原理入手，介绍 Wi-Fi 演进发展到 Wi-Fi 6 的核心技术，然后重点介绍 Wi-Fi 7 给关键技术和标准规范带来的主要变化、Wi-Fi 7 对 Wi-Fi 安全和无线组网技术带来的影响，让读者对 Wi-Fi 7 各方面技术有比较深入的理解。

第 4～8 章介绍基于 Wi-Fi 7 的产品开发和测试方法，行业联盟对 Wi-Fi 技术的支持以及尤其对 Wi-Fi 7 商业化的推动，接着继续介绍 Wi-Fi 7 在行业或家庭不同场景下的应用、Wi-Fi 7 与移动 5G 技术融合，最后展望 Wi-Fi 的技术发展趋势和社会影响。

本书的特点是以 Wi-Fi 7 专业技术介绍为主，同时介绍 Wi-Fi 7 技术的新产品开发方案和测试方法，以及在行业及室内场景中的应用，并且介绍 Wi-Fi 7 技术与其他最新通信或计算机技术的融合和集成，本书的目的是兼容技术原理和应用，使理论和实践能被条理清晰和专业地介绍给读者。本书提供配套的课件和讲解视频，请扫描封底“本书资源”二维码下载。

Wi-Fi 技术已经从崭露头角到全面发展，成为短距离通信技术的旗舰技术。按照 Wi-Fi 标准的演进规律，到 2030 年左右，Wi-Fi 8 就会出现。它会带来什么惊奇，现在肯定还说不上来。移动 6G 与 Wi-Fi 8 搭配，构成室内室外全场景的应用，预计将是 10 年以后被关注的技术里程碑。

本书共 3 位作者，成刚负责统稿，其中第 1 章由成刚、蒋一名、杨志杰共同撰写，第 2 章、第 3 章、第 8 章由杨志杰和成刚撰写，第 4 章由蒋一名和成刚撰写，第 5～7 章由成刚撰写。

在书稿完成过程中，感谢上海诺基亚贝尔宽带终端部门系统组专家张西利和韩永利、Wi-Fi 软件专家何定军、Wi-Fi 硬件设计专家尹小林等认真审阅和建议。同时感谢编辑王中英对书稿的宝贵意见，使得本书最终能顺利完成。这两年 Wi-Fi 技术发展很快，一本书很难涵盖所有最新知识点，如读者发现有不足之处，也敬请见谅。

作者

2023 年 7 月

目 录

第 1 章 Wi-Fi 技术概述 / 1

1.1 Wi-Fi 技术标准和演进 / 1

1.1.1 无线局域网传输技术 / 1

1.1.2 IEEE 关于 Wi-Fi 的标准演进 / 4

1.2 Wi-Fi 关键技术介绍 / 6

1.2.1 Wi-Fi 基本概念和原理 / 7

1.2.2 Wi-Fi 物理层技术 / 12

1.2.3 Wi-Fi 物理层标准 / 29

1.2.4 Wi-Fi MAC 层标准 / 34

1.2.5 Wi-Fi 的无线媒介接入原理 / 41

1.2.6 Wi-Fi 设备的发现、连接和认证过程 / 48

1.2.7 Wi-Fi 省电模式管理机制 / 51

本章小结 / 55

第 2 章 Wi-Fi 6 技术的性能转型 / 57

2.1 Wi-Fi 6 技术概述 / 57

2.1.1 传统 Wi-Fi 技术上的局限 / 58

2.1.2 Wi-Fi 6 标准的新变化与技术规格 / 60

2.2 Wi-Fi 6 主要的核心技术 / 62

2.2.1 核心技术概述 / 62

2.2.2 OFDMA 接入技术 / 64

2.2.3 多输入多输出技术 / 72

2.2.4 Wi-Fi 6 的低功耗技术 / 78

2.2.5 空间复用技术 / 88

2.2.6 多 BSSID 技术 / 93

2.2.7 非连续信道捆绑技术 / 98

2.3 Wi-Fi 6 物理层技术与标准更新 / 100

2.3.1 Wi-Fi 6 物理层技术的特点 / 101

2.3.2 Wi-Fi 6 新的 PPDU 帧格式 / 106

- 2.4 Wi-Fi 6 支持 6GHz 频段的技术 / 114
 - 2.4.1 6GHz 频段的需求和定义 / 114
 - 2.4.2 6GHz 频段上的发现和连接过程 / 118
 - 2.4.3 6GHz 频段上的双载波调制技术 / 121
- 本章小结 / 123

第 3 章 Wi-Fi 7 技术原理和创新 / 125

- 3.1 Wi-Fi 7 技术概述 / 125
 - 3.1.1 Wi-Fi 7 技术特点 / 126
 - 3.1.2 Wi-Fi 7 标准的演进 / 132
- 3.2 Wi-Fi 7 主要的核心技术 / 132
 - 3.2.1 Wi-Fi 7 关键技术概述 / 133
 - 3.2.2 Wi-Fi 7 新增的多链路设备 / 134
 - 3.2.3 Wi-Fi 7 多链路同传技术 / 139
 - 3.2.4 Wi-Fi 7 多链路下的发现、连接和认证过程 / 153
 - 3.2.5 Wi-Fi 7 的多资源单位捆绑技术 / 158
 - 3.2.6 Wi-Fi 7 的多用户输入输出技术 / 165
 - 3.2.7 Wi-Fi 7 支持低时延业务的技术 / 167
 - 3.2.8 Wi-Fi 7 增强点对点业务的技术 / 178
- 3.3 Wi-Fi 7 支持的应急通信服务技术 / 190
- 3.4 Wi-Fi 7 物理层标准更新 / 193
- 3.5 Wi-Fi 7 技术的安全性 / 198
 - 3.5.1 Wi-Fi 安全标准的演进和发展 / 199
 - 3.5.2 Wi-Fi 网络安全的关键技术 / 201
 - 3.5.3 Wi-Fi 的 WPA3 安全技术 / 207
 - 3.5.4 Wi-Fi 7 的安全技术 / 212
- 3.6 支持 Wi-Fi 7 的 Mesh 网络技术 / 217
 - 3.6.1 Wi-Fi EasyMesh 网络技术 / 218
 - 3.6.2 Wi-Fi 7 下的 EasyMesh 网络技术 / 226
- 本章小结 / 230

第 4 章 Wi-Fi 7 产品开发和测试方法 / 232

- 4.1 Wi-Fi 7 产品开发概述 / 232
 - 4.1.1 Wi-Fi 7 产品定义与规格 / 233
 - 4.1.2 Wi-Fi 7 产品开发流程 / 238
- 4.2 Wi-Fi 7 AP 产品软件开发 / 242

4.2.1	Wi-Fi 7 AP 产品的软件架构 / 242
4.2.2	Wi-Fi7 连接管理 / 249
4.2.3	Wi-Fi 7 数据转发 / 253
4.2.4	Wi-Fi 7 性能优化 / 258
4.2.5	Wi-Fi 7 无线信道管理 / 264
4.2.6	Wi-Fi 7 EasyMesh 网络 / 269
4.2.7	Wi-Fi 7 网络管理 / 281
4.3	Wi-Fi 7 AP 产品测试 / 286
4.3.1	Wi-Fi 7 性能测试 / 286
4.3.2	Wi-Fi 7 关键技术测试 / 293
	本章小结 / 299
第 5 章 Wi-Fi 行业联盟对技术和产品的推动 / 301	
5.1	Wi-Fi 联盟在技术时代的成功 / 302
5.1.1	Wi-Fi 联盟的测试认证方式 / 302
5.1.2	Wi-Fi 联盟制定的测试认证规范 / 303
5.1.3	Wi-Fi 联盟关于 QoS 管理的测试认证 / 304
5.2	无线宽带联盟在 Wi-Fi 行业中的助力 / 306
5.2.1	无线宽带联盟工作组和任务组 / 306
5.2.2	无线宽带联盟推动 Wi-Fi 感知技术发展 / 307
5.3	宽带论坛对 Wi-Fi 管理的贡献 / 308
第 6 章 Wi-Fi 7 技术应用和体验升级 / 310	
6.1	居家办公学习和娱乐的新体验 / 310
6.1.1	AR/VR 用户体验与 Wi-Fi 技术发展 / 310
6.1.2	Wi-Fi 7 技术支持超高清视频业务 / 314
6.1.3	升级家庭 Wi-Fi 技术和改进体验 / 317
6.2	Wi-Fi 7 在行业中的应用 / 320
6.2.1	学校多媒体教室的 Wi-Fi 应用 / 320
6.2.2	体育馆高密度连接下的 Wi-Fi 部署 / 322
6.2.3	酒店公寓的 Wi-Fi 应用场景 / 325
6.2.4	企业办公的 Wi-Fi 应用场景 / 327
第 7 章 Wi-Fi 7 与移动 5G 技术的融合 / 330	
7.1	Wi-Fi 7 与 5G 技术的比较 / 330
7.2	Wi-Fi 接入网络与移动 5G 的不断融合 / 332

7.2.1 融合标准演进和 Wi-Fi 技术支持 / 333

7.2.2 支持网络融合的 5G 网络切片 / 336

7.3 Wi-Fi 与移动 5G 技术融合的应用场景 / 341

7.3.1 5G 与 Wi-Fi 接入网络融合的场景类型 / 341

7.3.2 5G 与 Wi-Fi 接入网络融合的例子 / 342

7.3.3 5G 与 Wi-Fi 接入网络融合的演进方向 / 343

第 8 章 Wi-Fi 技术发展的展望 / 345

8.1 超高宽带网络的开启 / 345

8.2 展望新一代 Wi-Fi 关键技术 / 347

8.3 结语 / 350

附录 A 术语表 / 351

参考文献 / 357

通过手机、计算机上的 Wi-Fi 连接进行上网，早已成为人们日常生活的一部分，家里的智能电视、网络摄像头等各种电器产品也把 Wi-Fi 作为最主要的无线通信技术。如果 Wi-Fi 上网出现故障，会让很多人感觉到生活、工作或学习上的不方便。

Wi-Fi 技术是电气与电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）制定的 802.11 系列的无线局域网（Wireless Local Area Network, WLAN）标准。Wi-Fi 英文全称为 Wireless Fidelity，即“无线相容性认证”，它的称呼代表了一种商业认证，即行业中的 Wi-Fi 联盟（Wi-Fi Alliance, WFA）对满足 802.11 标准的厂家产品的互联互通的认证，同时也是一种无线联网的技术。Wi-Fi 联盟定义 Wi-Fi 的标准写法是“Wi-Fi”，不过人们经常习惯性写成“WiFi”或“Wifi”。

常见的支持 Wi-Fi 技术的产品是家里使用的无线路由器以及手机、计算机、智能电视、网络摄像头、打印机等各种类型的终端，它们都内置了专有的 Wi-Fi 芯片和相应天线，能够发送和接收 Wi-Fi 数据。

虽然 Wi-Fi 的上网应用已经非常普及，但 Wi-Fi 技术还在快速迭代和演进，平均每 5 年就有一代新的 Wi-Fi 技术规范被发布。Wi-Fi 技术的推动力来自互联网宽带到户之后人们对更便捷的无线上网的需求，来自每年大量不同类型的基于 Wi-Fi 的智能终端的使用，更来自无线网络环境下的各种新业务的涌现。

读者将通过本章的学习首先了解 Wi-Fi 技术的起源和标准演进，以及 Wi-Fi 的基本原理，然后在后面章节了解 Wi-Fi 6 和 Wi-Fi 7 技术标准和规范，以及 Wi-Fi 7 的开发和场景应用。

1.1 Wi-Fi 技术标准和演进

人们熟知的移动通信是通过基站、核心网等设施进行远距离传输语音和数据的通信技术，而 Wi-Fi 是在百米距离内进行通信的无线局域网技术。基于无线局域网的特点，Wi-Fi 核心技术主要包含两部分，一部分是如何利用无线电磁波实现二进制比特流的数字传输，另一部分是如何在较短距离内为 Wi-Fi 终端搭建数据网络的关键技术。

本章是 Wi-Fi 技术概述，下面首先对无线局域网技术进行简要介绍，然后介绍 Wi-Fi 标准的起源和演进。

1.1.1 无线局域网传输技术

无线局域网属于短距离无线通信的计算机网络系统，它利用射频（Radio Frequency, RF）技术，通过电磁波的传送，把传统的有线网络的线缆用无线方式进行连接，具有一

定的拓扑结构，网络中的设备安装更加灵活，无线终端也可以在网络中灵活变换位置。但无线局域网并没有代替有线网络，而是可以看成有线网络在无线区域的延伸和补充。

无线通信的基础是电磁波技术。在自由空间内进行传送的电磁波受到很多环境因素的影响，例如电磁波在自由空间内随着距离的增加而发生弥散损耗；电磁波碰到障碍物有反射、散射、折射、衍射等传播行为，使得相同的发射信号可能通过多个途径先后到达接收的设备，出现**多径现象**（Multipath Effect）。自由空间的电磁波也非常容易受到其他无线信号的干扰而影响信号的传送质量。所以**如何设计有效、可靠和安全的无线通信系统**，是无线局域网涉及的关键技术。

基于无线通信的 Wi-Fi 技术主要是在室内应用，室内的门、窗、桌子、橱柜、床等都会影响电磁波在空间传播的损耗和途径。参考图 1-1，虽然 Wi-Fi 信号都是从一个家庭路由器或终端发送出去，但有可能通过多个不同的途径分别到达接收方，由于不同路径的信号到达接收方的时间不一样，它们相互之间按照不同相位进行叠加，而可能导致原来的信号失真，这种室内的**多径现象**是 Wi-Fi 技术设计的一个主要考虑因素。

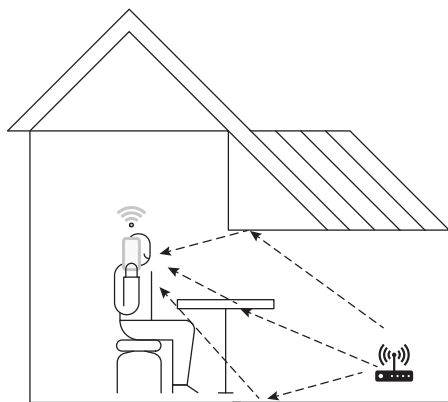


图 1-1 Wi-Fi 信号在室内的多径传播

1. 无线局域网的起源

世界上第一个无线网络（ALOHAnet）是 1971 年 6 月在美国夏威夷大学搭建运行的计算机网络系统，参考图 1-2 所示。ALOHAnet 是第一个展示了如何通过**随机存取协议**（Random Access Protocol）来支持共享无线媒介下的数据通信的局域网，其设计原则可以看作以太网和 802.11 无线网络的早期雏形。

在图 1-2 的夏威夷的 ALOHAnet 网络中，ALOHAnet 传送数据之前首先要构建帧格式，然后以数据帧的方式在共享的无线网络中进行广播传送，数据帧中定义了源和目的地址，接收设备接收属于自己地址的数据帧，而忽略其他帧，ALOHAnet 发送数据协议的简要过程如下：

- （1）当设备有数据要发送时，它就会立即进行发送。
- （2）接收设备收到数据后，将向发送设备回复确认，然后发送设备继续发送数据。
- （3）如果网络中两个设备同时进行数据发送，那么就会在共享的无线媒介中产生发送冲突，两个设备会分别随机等待一段时间后重新发送。

可以看到，这里 ALOHAnet 的关键设计是**所有的发送设备共享无线媒介**，并且为了

避免冲突而进行**随机等待**，这也是迄今为止所有 Wi-Fi 技术所遵循的基本技术特征，在 Wi-Fi 技术原理中（1.2 节）将介绍 Wi-Fi 如何进行发送数据之前的冲突避免。

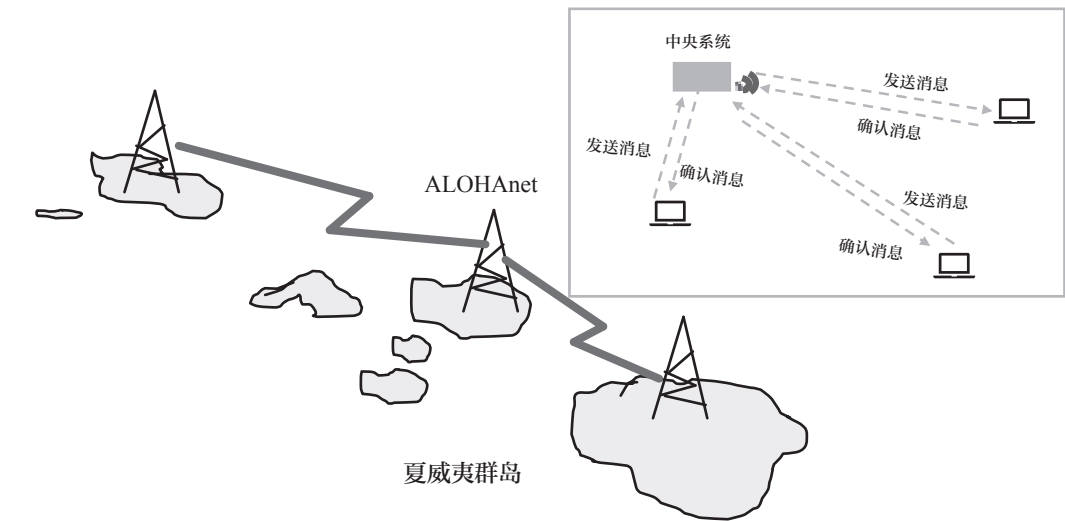


图 1-2 夏威夷的 ALOHAnet 网络

2. 无线局域网络使用的频段

在讨论 Wi-Fi 标准起源和演进之前，先解释一下电磁波频谱中的 ISM 频段的概念。

ISM 代表工业（Industrial）、科学（Scientific）与医疗（Medical），各个国家为 ISM 设定了相应的电磁波频段，称为 **ISM 频段**（Industrial Scientific Medical Band）。ISM 频段属于无许可或免授权频段，使用它不用向专门机构申请许可证，但要符合各个国家或地区的发射功率的限制。

参考表 1-1 的 ISM 频段范围和适用业务，其中固定网络指的是基于有线电缆或光缆的通信。Wi-Fi 的路由器通常需要通过以太网接口或者光纤宽带的方式连接到互联网，所以在通信行业中把 Wi-Fi 看成固定网络的延伸，而不属于移动通信的范畴。IEEE 在开始制定 Wi-Fi 的 802.11 标准的时候，所使用的 2.4GHz 就属于表 1-1 中的 2.4GHz 的 ISM 频段，后来 IEEE 又把 5GHz 也作为 Wi-Fi 的 ISM 频段。根据各个国家对频段的业务需求，ISM 频段表格中的内容还在演进，例如第 2 章和第 3 章将介绍 Wi-Fi 6 和 Wi-Fi 7 使用的 6GHz 频段。

表 1-1 ISM 频段

频率范围	中心频率	适用性	许可用户
6.765 ~ 6.795MHz	6.78MHz	当地相关	固定网络或移动业务
13.553 ~ 13.567MHz	13.56MHz	全球	固定网络或移动业务，不包含航空使用
26.957 ~ 27.283MHz	27.12MHz	全球	固定网络或移动业务，不包含航空使用
40.66 ~ 40.7MHz	40.68MHz	全球	固定网络或移动业务，卫星业务等
433.05 ~ 434.79MHz	433.92MHz	地区 1（当地相关）	业余无线电业务等
902 ~ 928MHz	915MHz	地区 2（当地相关）	固定网络或移动业务（不包含航空使用）
2.4 ~ 2.5GHz	2.45GHz	全球	固定网络或移动业务，业余业务及卫星业余业务等

续表

频率范围	中心频率	适用性	许可用户
5.725 ~ 5.875GHz	5.8GHz	全球	固定网络或移动业务，业余业务及卫星业余业务等
24 ~ 24.25GHz	24.125GHz	全球	业余业务及卫星业余业务，卫星地球探测业务等
61 ~ 61.5GHz	61.25GHz	当地相关	固定网络或移动业务，卫星通信等
122 ~ 123GHz	122.5GHz	当地相关	卫星相关业务，固定网络或移动业务，太空相关业务等
244 ~ 246GHz	245GHz	当地相关	无线电业务，无线电天文应用，业余业务及卫星业余业务等

注释：地区 1 包含欧洲、非洲、蒙古、波斯湾地区的西部等；地区 2 包含美洲（包含格陵兰）、部分太平洋岛国地区。

鉴于 ISM 频段的免授权使用，其他非 Wi-Fi 通信技术的产品也会使用相同的 ISM 频段，例如蓝牙、ZigBee 的设备、无线电话、微波炉等产品使用的都是 2.4GHz 的 ISM 频段。所以 Wi-Fi 技术在刚引入的时候，就存在与其他无线产品的频谱资源冲突的可能性。

Wi-Fi 产品类型和数量快速增长，免授权频段是其中一个关键因素，但 Wi-Fi 在大规模普及后，设备使用免授权频段下的无线资源引起了越来越多的冲突，设备相互之间产生干扰，反而又成为 Wi-Fi 技术在场景应用上的掣肘。因此，新的 Wi-Fi 标准在制定时，尤其关注如何减少设备之间的干扰，从而提升共享无线媒介的利用率。

1.1.2 IEEE 关于 Wi-Fi 的标准演进

Wi-Fi 标准来源于 IEEE 制定的 802.11 系列规范，所有 Wi-Fi 标准都以 802.11 开头，并添加字母后缀作为新规范的命名，例如 802.11a 和 802.11b。

在 IEEE 制定 802.11 标准之后，Wi-Fi 联盟制定相应的 Wi-Fi 产品认证标准，如果厂家提供的支持 802.11 标准的产品通过相应的测试，则 Wi-Fi 联盟给予产品相应的认证资格，然后厂家就可以在商业化的产品上印上相应的 Wi-Fi 认证标识，参考图 1-3。



图 1-3 Wi-Fi 联盟的标识（左）和 Wi-Fi 认证的标识（右）

图 1-4 是从 1997 年到 2024 年的 IEEE 802.11 标准演进过程。

(1) 早期的 Wi-Fi 规范起源于 1997 年 IEEE 制定的 802.11 的最初标准，它定义了 2.4GHz 的 ISM 频段上的数据传输方式，数据传输速率是 2Mbps。当时 802.11 的通信技术并不用于目前的室内上网，而主要用于无线条码扫描仪进行低速数据采集，例如仓库存储与制造业的环境。

(2) 1999 年 IEEE 批准了速率更高的 802.11b 和 802.11a 标准。802.11b 同样工作在 2.4GHz 频段，支持 11Mbps、5.5Mbps、2Mbps、1Mbps 的多速率的选择和切换。802.11a

标准其实是 802.11b 的后续标准，它工作在 5GHz 频段，数据传输速率是 54Mbps，传输距离是 10 ~ 100m。虽然 802.11a 的初衷是代替 802.11b 得到更大规模的商业化部署，但是 5GHz 频段并不是所有地区都可以免授权使用的，所以 802.11a 没有得到很多厂家的支持。而 802.11b 使用的是不需要授权执照的 2.4GHz 频段，所以很快成为主流的 Wi-Fi 标准。

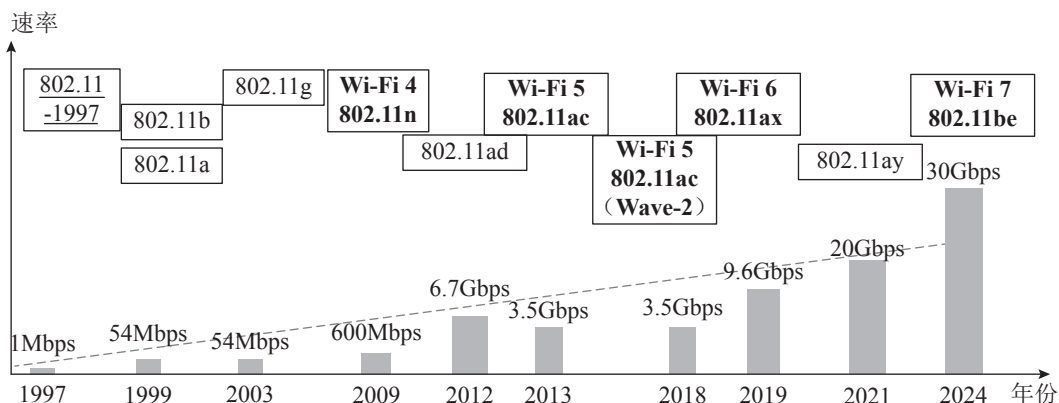


图 1-4 Wi-Fi 标准的演进

(3) 2003 年，802.11g 标准被制定，它支持 802.11a 的传输速率，并且兼容 802.11a 和 802.11b 的调制方式。但 802.11g 使用的是 2.4GHz 频段，而不是 802.11a 的 5GHz 频段。同样，802.11g 支持 Wi-Fi 通信的多种速率的选择。

(4) 2009 年，新的 802.11n 标准被制定，理论上传输速率最高可以达到 600Mbps，这是无线局域网数据传输速率的飞跃。802.11n 可以工作在两个频段，即 2.4GHz 和 5GHz。

从 802.11n 标准开始，多天线技术得到发展，相应的多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）技术是利用多根天线同时进行发送和接收，直接可以提高通信容量和频谱效率。802.11n 标准也开始支持频段绑定，原先的 802.11a/b/g 支持 20MHz 的频宽，而 802.11n 支持两个 20MHz 频段的绑定，即达到 40MHz 的带宽，使得数据通信的速率增长一倍。

802.11n 标准的制定是无线局域网高带宽和高速率数据通信的转折点，为 Wi-Fi 技术在全球的大规模普及起到了关键作用。

(5) 2013 年，工作在 5GHz 频段的 802.11ac 被批准。频宽除了 20MHz 和 40MHz 以外，802.11ac 也支持 80MHz 和可选 160MHz 的带宽，实际数据传输速率可以达到 1Gbps。802.11ac 同样支持多天线的 MIMO 技术。

2016 年，Wi-Fi 联盟根据 802.11ac 协议推出了第二波（Wave2）认证标准，增加了更多的功能，例如多用户下的多输入多输出技术（Multiple User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO），支持最多 8 个 MIMO 的数据流等。

(6) 2019 年，最新的 802.11ax 标准被发布，Wi-Fi 联盟把它定义为 Wi-Fi 6，主要目标之一就是关注高密度场景下的性能和业务质量。Wi-Fi 联盟在 2020 年宣布，在 6 GHz 频段运行的 Wi-Fi 6 设备被命名为 Wi-Fi 6E。从 Wi-Fi 6E 开始，Wi-Fi 设备可以同时支持 2.4GHz、5GHz 和 6GHz 三个独立频段。

(7) 2023 年 IEEE 正在完善 802.11be 标准，也就是本书将要介绍的 Wi-Fi 7 标准。

表 1-2 是 IEEE 802.11 标准的发布时间和主要特征。

表 1-2 IEEE 802.11 标准列表

802.11 协议	发布时间	频率 (GHz)	带宽 (MHz)	速率	调制传输
802.11-1997	1997 年 6 月	2.4	22	1Mbps、2Mbps	DSSS、FHSS
802.11b	1999 年 9 月	2.4	22	1Mbps、2Mbps、5.5Mbps、11Mbps	DSSS
802.11a	1999 年 9 月	5	20	6Mbps、9Mbps、12Mbps、18Mbps、24Mbps、36Mbps、48Mbps、54Mbps	OFDM
802.11g	2003 年 6 月	2.4	20	6Mbps、9Mbps、12Mbps、18Mbps、24Mbps、36Mbps、48Mbps、54Mbps	OFDM
802.11n (Wi-Fi 4)	2009 年 10 月	2.4、5	20、40	最高支持 600Mbps	OFDM
802.11ad	2012 年 12 月	60	2160	最高支持 6.7Gbps	OFDM
802.11ac (Wi-Fi 5)	2013 年 12 月	5	20、40、80、160 (可选)	最高支持 6.9Gbps	OFDM
802.11ax (Wi-Fi 6)	2019 年 1 月	2.4、5	20、40、80、160	最高支持 9.6Gbps	OFDMA
802.11ay	2021 年 12 月	60	2160、4320、6480、8640	最高支持 20Gbps	OFDM
802.11be (Wi-Fi 7)	2024 年	2.4、5、6	20、40、80、160、320	最高支持 30Gbps	OFDM

1.2 Wi-Fi 关键技术介绍

本节主要介绍 Wi-Fi 网络技术的基本概念、基本原理和标准。

从最初的 IEEE 802.11a/b 开始，Wi-Fi 在标准演进中就不断有新的技术被引入和采纳，Wi-Fi 的物理层协议和数据链路层的帧格式为了支持新功能而被不断扩充，然而 Wi-Fi 通信所依赖的基本网络结构，以及设备连接 Wi-Fi 的方式并没有发生改变，新定义的技术标准也一直持续保持着对原有规范的兼容性，使得支持新标准的 Wi-Fi 路由器仍然能与旧的 Wi-Fi 终端进行通信。因此，掌握 Wi-Fi 网络基本概念和基本原理，可以为进一步学习最新的 Wi-Fi 7 标准做好准备。

当初 Wi-Fi 技术被引入是为了解决短距离无线局域网中设备之间如何进行通信的问题，所以 Wi-Fi 技术的基本原理是基于有限地域范围内的无线连接下的数据通信方式。

通过本章学习基本的 Wi-Fi 技术，读者能够掌握无线通信下的 Wi-Fi 网络结构、无线通信的电磁波频谱和信道概念、物理层的编码和调制、数据链路层的帧格式以及 Wi-Fi 设备如何通过竞争的方式访问无线媒介等。下面是本节所包含的基本内容：

- Wi-Fi 网络的基本组成和技术术语。
- Wi-Fi 物理层的频谱定义、基本概念和核心技术。
- Wi-Fi MAC 层的基本协议和帧格式。
- Wi-Fi 设备访问无线媒介的基本原理和流程。

- Wi-Fi 网络下的省电模式的管理机制。

1.2.1 Wi-Fi 基本概念和原理

1. 认识家庭 Wi-Fi 网络的组成

学习 Wi-Fi 技术之前, 先看一下图 1-5 所示的常见家庭 Wi-Fi 网络的基本组成。

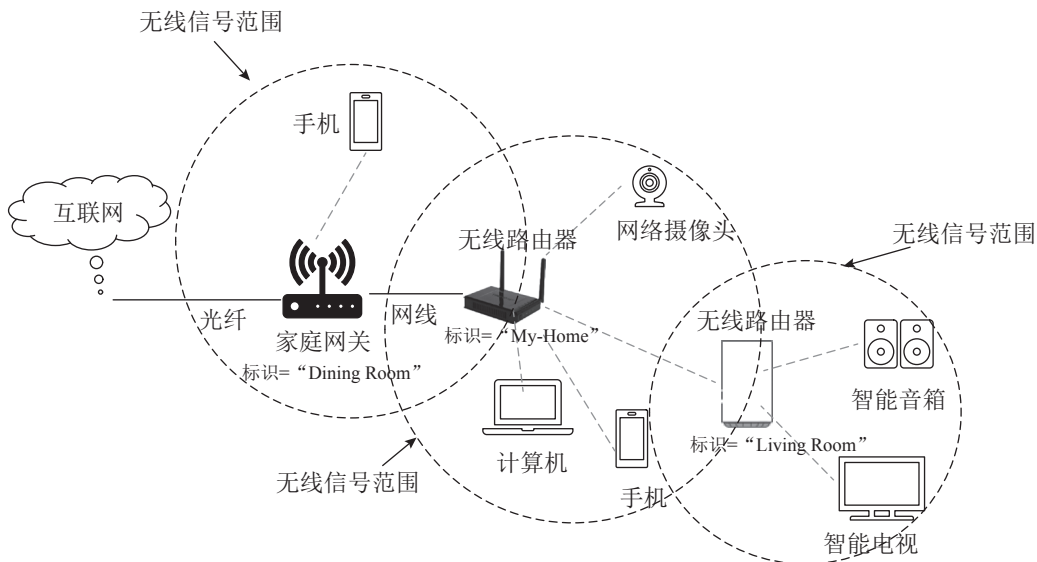


图 1-5 认识家庭 Wi-Fi 网络的基本组成

图 1-5 中所有的设备都具有 Wi-Fi 功能, 其中包括光纤宽带入户所安装的家庭网关, 连接至家庭网关的无线路由器, 通过 Wi-Fi 连接至家庭网关或无线路由器的计算机、手机、网络摄像头、智能电视、智能音箱等。

家庭网关是运营商铺设光纤到家的时候安装的, 无线路由器是运营商提供或者人们自己购买的。无线路由器必须连接至家庭网关, 并通过光纤连到外部的网络中。它们的标识可以在计算机或者手机上的 Wi-Fi 连接的选项中找到, 例如家庭网关的标识是“Dining Room”, 而无线路由器的标识分别为“My-Home”和“Living Room”。这个字符串默认印在设备外壳背面的标签上, 也可以通过设备的网页来修改。

家里的 Wi-Fi 设备就是通过这些标识连接无线路由器或者家庭网关进行上网。无线路由器称为 Wi-Fi 无线接入点 (Access Point, AP), 它为各种终端设备提供 Wi-Fi 接入服务, 而计算机、手机或者智能终端等支持无线上网的设备称为终端设备 (Station, STA), 作为标识的字符串被称为 SSID (Service Set Identifier), 即服务集标识符, SSID 最大长度不超过 32 字节。

Wi-Fi 网络就是由一个或多个支持 Wi-Fi 的 STA 通过无线方式连接到 AP 所构成的无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN)。

下面了解 Wi-Fi 网络中的其他专业术语和概念。

2. Wi-Fi 网络中的专业术语和概念

参考图 1-6 的典型 Wi-Fi 无线局域网络架构及术语名称。除了接入点 AP、终端

STA 和服务集标识符 SSID，还包括基础服务集（Basic Service Set, BSS）、扩展服务集（Extended Service Set, ESS）、分布式系统（Distributed System, DS）、门户（Portal）等。

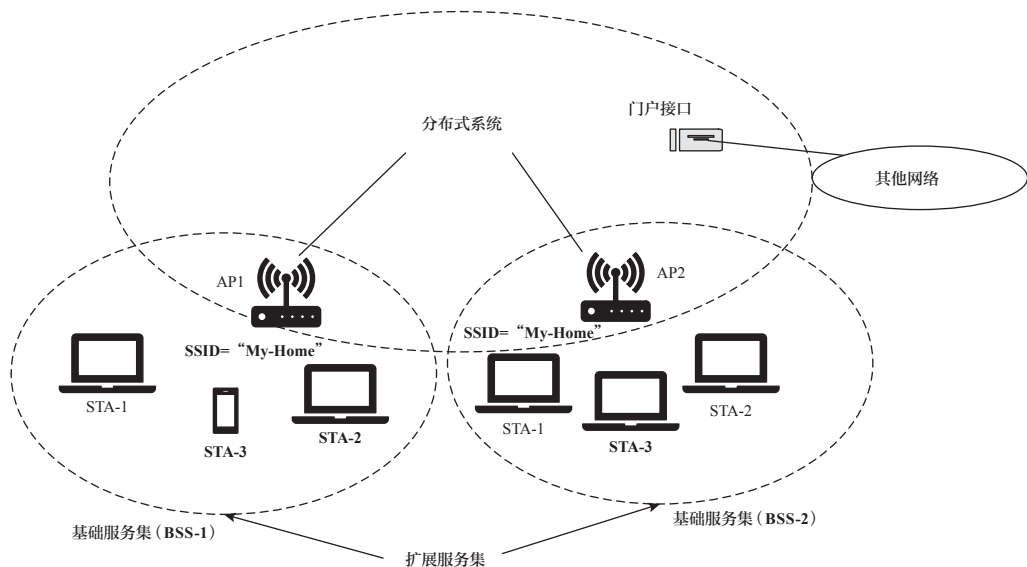


图 1-6 Wi-Fi 网络中的专业术语和概念

基础服务集：一个 AP 与多个 STA 构成的无线局域网被称为一个 BSS。在同一个 BSS 的网络中，AP 提供一个 SSID 作为接入的标识符，AP 为这些 STA 提供上网服务或者 STA 相互之间数据转发等服务。在有限的覆盖范围内，可能有多个 BSS 在自由空间重叠，因此 IEEE 定义一个长度为 48 比特的 MAC 地址（Basic Service Set Identifier, BSSID）来区分不同的 BSS。

扩展服务集：ESS 由两个以上的相互连接并且 SSID 相同的 BSS 网络构成，可以看成是一个 BSS 的覆盖范围延伸。每个 BSS 有一个 AP 设备，ESS 中的多个 AP 设备之间基于有线或无线进行连接，组成覆盖范围更大的无线局域网。ESS 经常用于公共区域、社区或企业等场所，它扩展了 Wi-Fi 信号的覆盖范围，接入 ESS 网络的无线终端在移动的时候可以自动连接到临近的 AP，由于 AP 之间的 SSID 相同，无线终端就不用手动寻找和选择新的 Wi-Fi 网络。

分布式系统：DS 是一个用于连接一个或者多个 BSS 和局域网（Local Area Networks, LAN）所构成的网络系统，例如，在企业的 Wi-Fi 网络中，所有的无线路由器、连接路由器的移动设备和交换机共同组成一个分布式系统。在 BSS 网络中，DS 服务一般部署在设备连接的 AP 节点上。在 ESS 网络中，DS 服务部署在中央节点或者控制器上（Access control），为设备提供多个 AP 上的数据转发服务。

门户：作为 Wi-Fi 网络与其他网络之间的逻辑接口，提供 802.11 协议格式与非 802.11 协议格式的数据转换功能。通常一个分布式系统中只包含一个逻辑上的 Portal。如果本地设备要连接到广域网，Portal 则将 Wi-Fi 数据格式转换成广域网所需要的协议格式。

3. Wi-Fi 技术的基本内容

掌握 Wi-Fi 的关键技术，就是了解 AP 与 STA 之间如何通过无线连接方式建立数据通信的机制。从 IEEE 制定 802.11 标准的角度来看，主要是学习物理层和数据链路层的规

范；从 Wi-Fi 网络运行的基本原理来看，需要理解 Wi-Fi 所特有的频段和信道的概念，学习 AP 与 STA 如何建立连接，以及 Wi-Fi 设备之间如何竞争相同的无线媒介等核心机制；从 Wi-Fi 设备的产品特点来看，需要掌握多天线所带来的数据传输的新功能，以及 Wi-Fi 省电模式的处理方式，参考图 1-7。

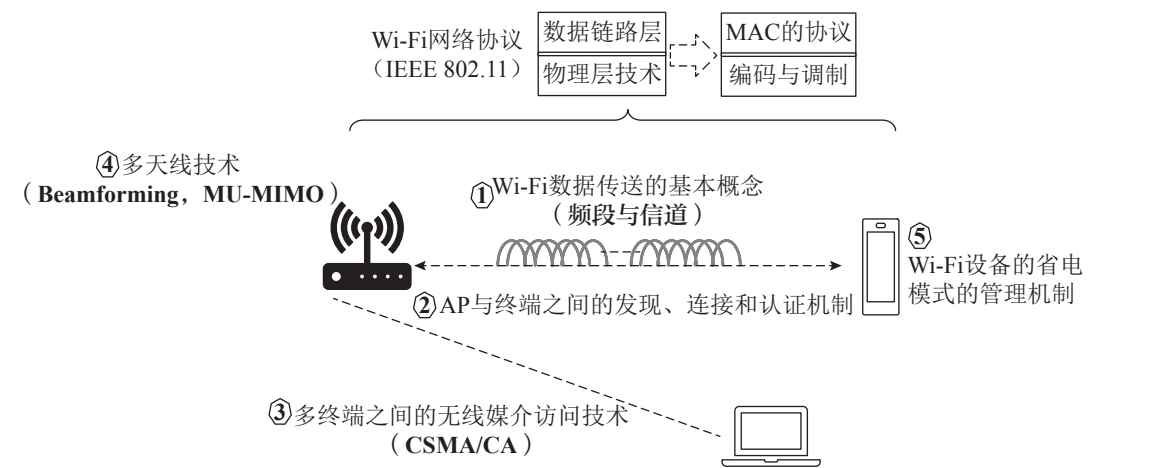


图 1-7 Wi-Fi 技术的基本内容

IEEE 的 802.11 标准在后面章节中详细介绍。下面先大致了解 Wi-Fi 技术有哪些基本内容，以便于后面深入理解技术原理和细节。

1) Wi-Fi 数据传输的基本概念

Wi-Fi 是基于电磁波进行数据传输的。电磁波不仅包括大家都知晓的可见光，而且包括具有广泛范围的不同频率的频谱。图 1-8 是从 γ 射线到无线电波的频谱图。

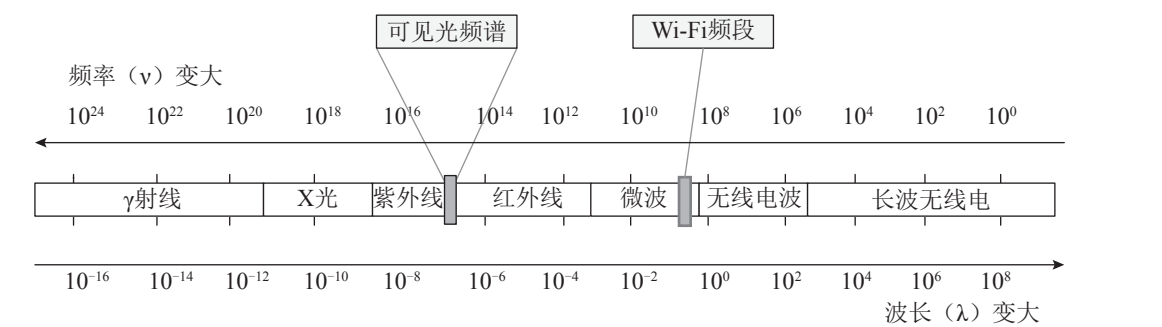


图 1-8 电磁波频谱图

从图 1-8 中可以看到， γ 射线的波长最短，然后依次是 X 光、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波等。Wi-Fi 所需要的 2.4GHz 或者 5GHz 是微波频段的一部分。

Wi-Fi 标准采用的 2.4GHz 或 5GHz 是免授权频段。在 Wi-Fi 通信中，整个 2.4GHz 或 5GHz 频段并不是由一个 Wi-Fi 设备完全占用，而是在频段上根据频率范围分成多个信道 (Channel)，就像是公路划分的不同车道，让无线网络中的设备在各自的信道上进行数据传输。

所有的信道在通信协议中都是平等的，没有优先级，每个 Wi-Fi 设备可以工作在任何一个信道上。但 Wi-Fi 终端与 AP 必须工作在相同信道上才可以通信。Wi-Fi AP 根据信道的拥塞情况，可以自动选择一个干扰最小的信道，作为当前的工作信道，连接 AP 的

Wi-Fi 终端也会随着 AP 一起切换信道。

2) AP 与终端之间的发现、连接和认证机制

在 Wi-Fi 的基础设施网络中，AP 设备是 Wi-Fi 网络的数据接入及转发中心，所有 Wi-Fi 终端设备都需要连接到 AP 之后，才能进行数据的发送和接收。终端设备接入到 Wi-Fi 网络的过程包括网络发现、认证和关联，以图 1-9 为例。

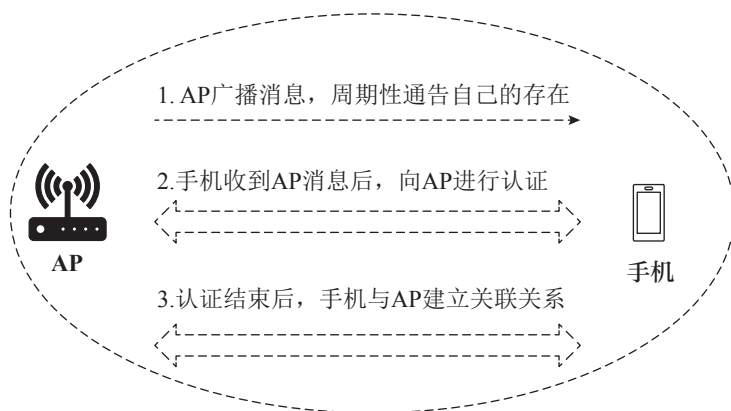


图 1-9 Wi-Fi 终端与 AP 之间的连接过程

(1) **网络发现**: AP 设备周期性地向空中广播消息，通告 SSID 名称等相关信息。如果有某一个手机终端接收到这个消息，人们就可以在手机的 WLAN 列表中看到 AP 的 SSID 名称，例如“My-Home”。终端设备也可以主动发送探测请求的消息，寻找和探测 SSID，收到探测请求的 AP 发送响应消息，它包含 SSID 等相关信息，用于完成终端设备的网络发现过程。

(2) **认证过程**: 当人们在手机上选择“My-Home”连接并输入对应的密码时，手机就会向 AP 发送消息，要求 AP 对手机的登录进行认证。认证过程中 AP 设备对终端设备进行密钥鉴权，以保证 Wi-Fi 网络接入的安全性。

(3) **关联过程**: 如果认证成功，手机就会再向 AP 发送关联消息，与 AP 建立关联关系，此后手机就可以通过 AP 的 Wi-Fi 接入实现上网等业务。

在完成认证和关联过程后，终端设备加入到 Wi-Fi 网络，开始与 AP 之间进行数据传输。在终端连接 AP 的过程中，AP 作为 Wi-Fi 服务提供方，始终控制终端的认证和关联的过程，从而决定是否允许终端接入 Wi-Fi 网络。

3) 多终端之间的无线媒介访问技术

Wi-Fi 网络的典型特征是共享无线传输媒介，AP 与相连的终端都是利用相同的无线信道进行数据通信。如果设备之间不采取互相避让的机制，一定会引起不同设备发送的数据在空间中产生冲突。所以 AP 和终端在发送数据之前，首先需要获得无线媒介的访问权。只有当前设备数据发送结束后，各个设备才能竞争无线媒介的访问权。

Wi-Fi 网络采用的无线媒介访问机制被称为**载波侦听多路接入和冲突避免**（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA）机制。

参考图 1-10，依据 CSMA/CA 机制，在手机发送数据的时候，网络摄像头与计算机侦听到无线媒介中的 Wi-Fi 信号，于是就保持侦听状态。当手机结束数据发送后，无线媒

介处于空闲状态，网络摄像头与计算机就会随机回退一段时间。当计算机回退时间首先结束时，它就获得无线媒介访问权，开始传送数据，此时手机与网络摄像头就会处于侦听状态。

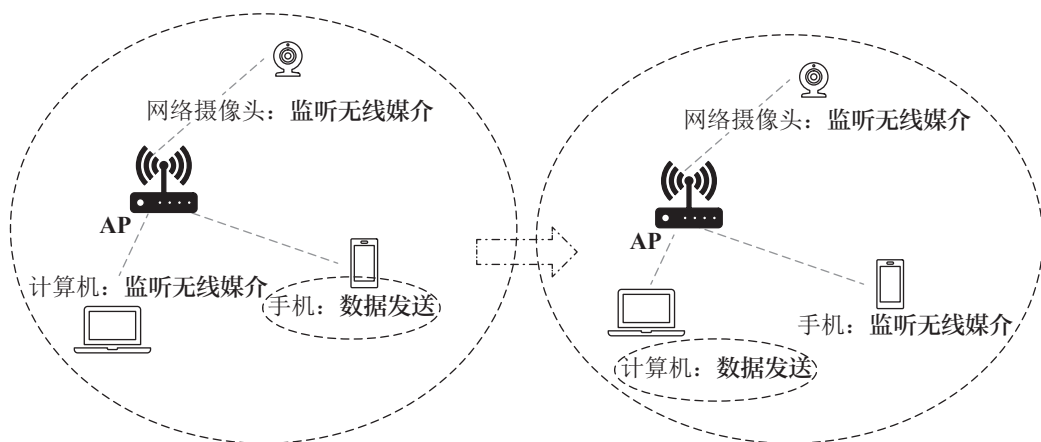


图 1-10 Wi-Fi 网络采用的无线媒介访问机制

4) 多天线技术

通常 AP 设备至少配备了两根以上的天线，支持 2.4GHz、5GHz 或 Wi-Fi 6 之后的 6GHz 的数据发送和接收，而支持多根天线的终端设备也逐渐多起来。Wi-Fi 设备在多天线下（Multiple Input Multiple Output, MIMO）的数据发送和接收机制已经成为 Wi-Fi 标准的关键技术。图 1-11 中列举了三种基本的多天线技术。

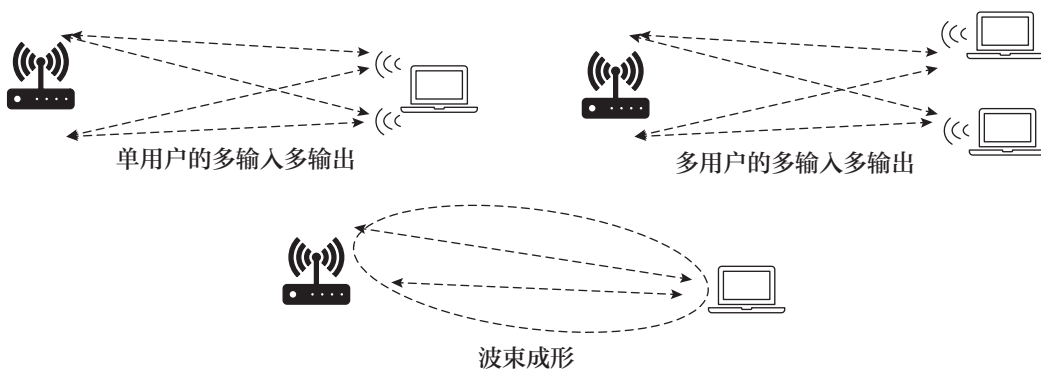


图 1-11 Wi-Fi 的多天线技术

- 单用户的多输入多输出（Single-User MIMO, SU-MIMO）：发送端通过多天线同时向一个用户发送数据流。
- 多用户的多输入多输出（Multiple-User MIMO, MU-MIMO）：发送端通过多天线同时向多个用户发送数据流。
- 波束成形（Beamforming）：发送端对多天线辐射的信号进行幅度和相位调整，形成所需特定方向上的传播，类似于把信号能量聚集在某个方向上进行传送。

5) Wi-Fi 设备的省电模式的管理机制

有大量的 Wi-Fi 终端是通过电池供电的，例如手机、网络摄像头等智能终端，它们可

以设置节电模式，使得设备周期性地进入省电状态。AP 需要为处于节电模式的终端缓存数据以保证其下行数据不会丢失。终端会周期性地醒来检查是否有缓存数据，如果有，则及时取走数据，参考图 1-12。IEEE 802.11 规范为 Wi-Fi 省电模式定义了管理消息和处理机制的协议过程。

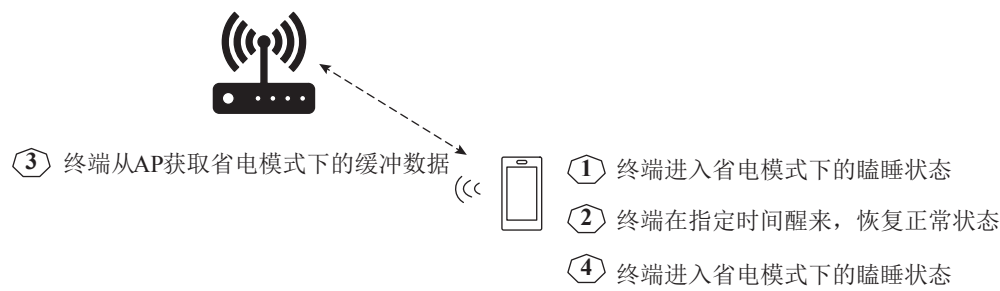


图 1-12 Wi-Fi 设备的省电模式的管理

上述的 Wi-Fi 基本概念与主要技术涉及 Wi-Fi 物理层或者数据链路层的规范定义。后面章节将依次进行介绍。

1.2.2 Wi-Fi 物理层技术

通过本节的学习，读者将了解 Wi-Fi 通信系统基本原理、物理层的基本概念、Wi-Fi 频谱和无线信道的定义、物理层编码和调制技术以及多天线技术。

1. 基于 Wi-Fi 技术的通信系统

Wi-Fi 技术是一种短距离的数字信号通信技术，学习 Wi-Fi 首先要了解 Wi-Fi 技术下的无线通信系统的基本概念。

如图 1-13 所示，与常规的通信系统一样，Wi-Fi 通信主要包括信息源的编码与译码、信息源的加密和解密、信道编码与译码、信号的调制和解调等环节。

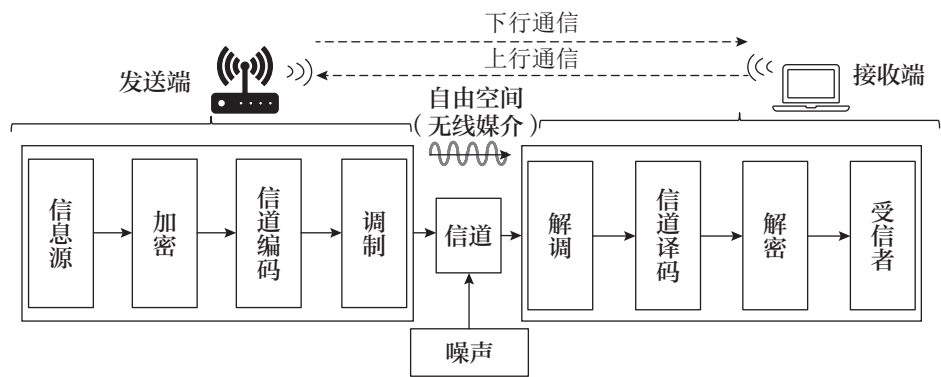


图 1-13 基于 Wi-Fi 技术的通信系统

1) Wi-Fi 通信中信息源与受信者

图 1-13 中信息源是数据通信发起的源头，受信者是通信系统所传送信息的目的地。基于 Wi-Fi 技术的通信，AP 与终端相互之间进行数据传输，两者既是信息源，也是受信者。当数据从 AP 发向终端，称为下行通信，当数据从终端发向 AP，称为上行通信。

AP 向终端发送的数据来自其他网络设备，例如，互联网中的视频通过通信网络传送到家庭中无线路由器 AP，然后 AP 再发给计算机、手机或者电视机等终端，它们作为受信者进行播放。在实际应用中，通常下行数据流量高于上行数据流量，但在 Wi-Fi 技术的规范定义中，发送端与接收端之间具有相同的数据通信能力。

2) 无线媒介的信道

信道是信号在通信系统中传输的通道，是信号从发射端传输到接收端所经过的传输介质。在 Wi-Fi 领域中，信道就是 Wi-Fi 信号传输所经过的无线媒介。从 Wi-Fi 数据传输的角度来说，信道又是指 Wi-Fi 2.4GHz 或 5GHz 频段中所划分的某一段工作频率范围，发送端和接收端在这个工作频率范围内进行数据收发。

Wi-Fi 信道具有多径传输和时变性的特点。前面已经解释过，多径传输指的是无线环境中传输的电磁波信号经过折射、反射和衍射后通过不同路径分别到达接收端，接收端实际收到的信号是所有路径上信号的叠加；时变性则是指信道中的信号特征随着时间变化而变化。

3) Wi-Fi 信道中的噪声

从广义的角度来说，无线信道噪声就是对有用信号产生影响的干扰。例如，设备内部电路引起的噪声，或者像微波炉产生的工作在 2.4GHz 的非 Wi-Fi 信号等。

在分析 Wi-Fi 通信系统性能时，通常利用信号强度与噪声的比值来描述系统的抗噪声性能，即信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）。

4) Wi-Fi 信道编码与译码

Wi-Fi 信号在无线信道中传送的时候受到噪声等影响，信号会出现差错。为了增加 Wi-Fi 通信的抗干扰性，Wi-Fi 发送端根据一定的规则对信号进行编码。接收端则根据相应的逆规则进行解码，从中发现错误或纠正错误，提高通信的可靠性。

Wi-Fi 常用的信道编码是二进制卷积编码（Binary Convolutional Code, BCC）和低密度奇偶校验码（Low Density Parity Check, LDPC）。

5) Wi-Fi 的加密与解密

Wi-Fi 传输的无线媒介是开放空间，所传递的任何信息都可以被其他设备从空间截获。为了确保信息传递的安全性，就需要对发送数据进行加密。**加密**是指对原始信息按照一定算法进行转换，使得信息即使被截获，也不能被识别。在接收端，对加密的信息根据一定的算法进行还原，这个过程称为**解密**。在加密和解密的算法过程中使用的输入参数被称为密钥。

在 Wi-Fi 通信系统中，常用的加密方式包括有线对等保密（Wired Equivalent Privacy, WEP）和 Wi-Fi 保护接入（Wi-Fi Protected Access, WPA）两种不同的模式，WPA 又包括 WPA、WPA2 和 WPA3 三个不同的标准，第 3 章节将介绍 Wi-Fi 安全原理以及 Wi-Fi 7 带来的变化。

6) Wi-Fi 的调制与解调

与其他通信技术一样，Wi-Fi 信号的发送与接收需要经过调制与解调的过程。在调制过程中，信息源的原始信号（即基带信号）的频谱被搬移到作为 Wi-Fi 载波信号的 2.4GHz、5GHz 等频段上，载波的幅度、频率或相位等受基带信号变化的控制，然后被传

送到接收端。作为解调过程，接收端把调制信号还原成基带信号。

控制载波幅度的调制称为**振幅键控**（Amplitude Shift Keying, ASK），控制载波相位的调制称为**相移键控**（Phase Shift Keying, PSK），联合控制载波幅度及相位两个参数的称为**正交幅度调制**（Quadrature Amplitude Modulation, QAM）。

2. 物理层基本协议

为了便于不同体系结构的计算机网络可以互联互通，国际标准化组织定义了一个七层结构的开放系统互连基本参考模型 Open Systems Interconnection Reference Model，缩写为 OSI/RM，简称为 OSI。

OSI 参考模型自下而上依次是物理层、数据链路层、网络层、运输层、会话层、表示层以及应用层，而数据链路层又可以分为逻辑链路控制层和媒介访问控制层，Wi-Fi 技术要讨论和解决的问题对应着 OSI 模型中的**媒介访问控制层**（Medium Access Control, MAC）和**物理层**。Wi-Fi 技术与 OSI 参考模型的关系如图 1-14 所示。

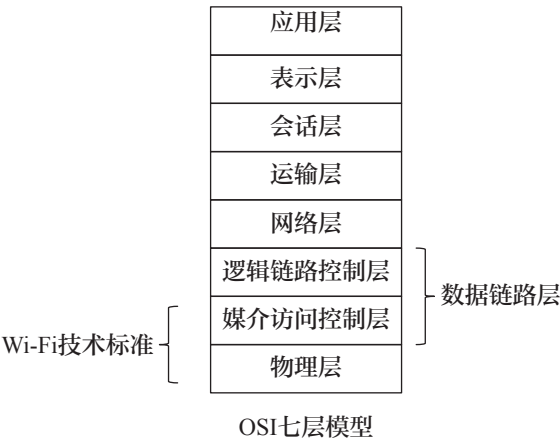


图 1-14 OSI 七层模型与 Wi-Fi 技术标准的关系

在 OSI 模型中，每一层报文格式包含协议头和净荷两部分，协议头是与该层相关的协议版本识别、控制信息等，净荷是指去除报头之后的信息部分。比如，网络层的 IP 数据报文的协议报头中提供了报文转发的地址信息、校验信息等，而净荷是 IP 报文的数据部分。

Wi-Fi 物理层处理的数据单元称为**物理层协议数据单元**（Physical Layer Protocol Data Unit, PPDU），它包括物理层前导码信息、物理层帧头部和净荷信息三部分。前导码信息主要作用是使接收端可以甄别 Wi-Fi 信号以及对无线信道的参数估计。物理层帧头部则使得接收端根据其编码调制信息将电磁波信号解调出数字信号，并最终解码还原出原始数字信息。净荷部分是 MAC 层处理的数据单元，又称为**MAC 层协议数据单元**（MAC Layer Protocol Data Unit, MPDU）。

IP 数据报文与物理层协议数据单元（PPDU）的对比如图 1-15 所示。

Wi-Fi 物理层的数据收发如图 1-16 所示，在发送端，物理层收到 MAC 层请求发送的 MPDU，按照 PPDU 的封包格式，增加物理层前导码和帧头部，完成数据帧封装，然后对 PPDU 数据单元进行编码和载波调制，在无线信道上发送。

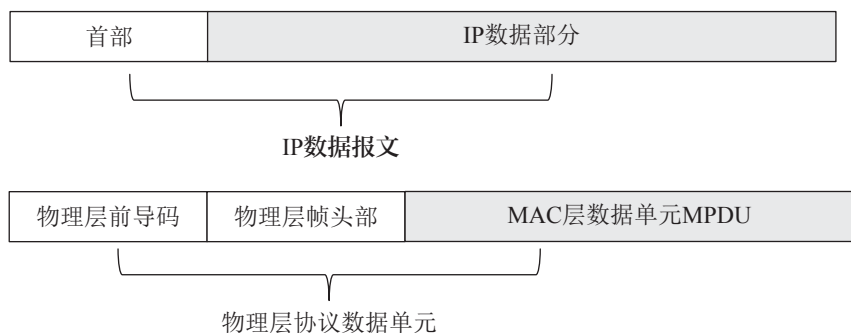


图 1-15 IP 数据报文与 PPDU 帧结构对比

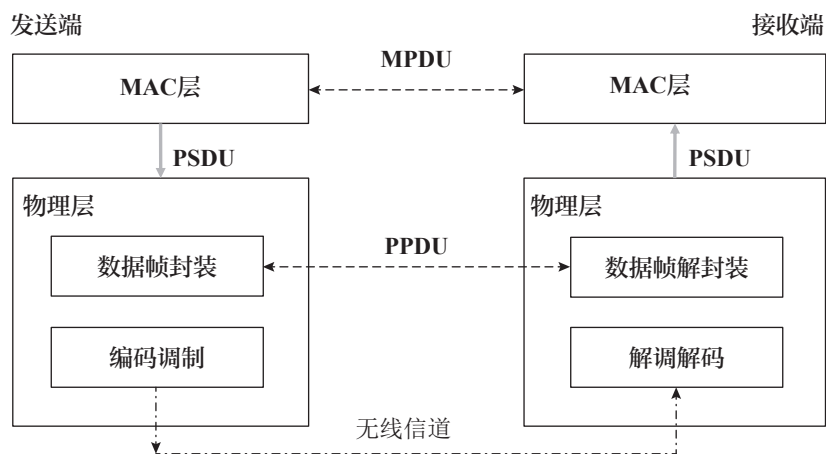


图 1-16 Wi-Fi 物理层收发流程

同样，接收端在无线信道上接收载波信号，进行载波解调和解码，还原为 PPDU 数据单元，然后解封得到 MPDU 数据单元，并发送给 MAC 层。在物理层和 MAC 层之间传递的数据称为物理层服务数据单元（Physical Service Data Unit，PSDU），实质与 MAC 层的 MPDU 完全相同。

3. Wi-Fi 信道的划分与定义

Wi-Fi 6 之前，传统的 Wi-Fi 标准采用的是免授权频段的 2.4GHz 和 5GHz，下面先介绍这两个频段的频谱情况和信道划分。

1) Wi-Fi 的 2.4GHz 频段和信道划分

每个国家根据自己的频谱资源对 2.4GHz 做了不同的信道划分。例如，日本的频谱范围为 2.412 ~ 2.484GHz，其中划分了 14 个信道，每个信道的有效带宽是 20MHz，并留出 2MHz 作为信道的强制隔离频带，2MHz 像是高速公路上的隔离带，用于减少信道之间频谱干扰。

图 1-17 标识了 14 个信道分布的频谱示意图，上方所标识的从 2412MHz 到 2484MHz 的 14 个频率值分别对应各自信道的中心频率，每个信道都有起始和终止的频率范围，由图中的半圆弧形来表示，构成了信道带宽，其中有三个信道在频谱上是不重叠的，即信道 1、信道 6 和信道 11，当不同设备分别工作在这三个信道上的时候，彼此之间的信号影响是最小的。

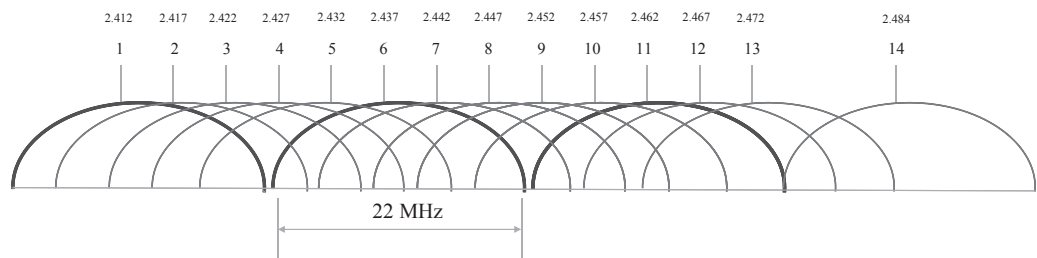


图 1-17 2.4GHz Wi-Fi 的频谱说明

另外，中国和欧洲在 2.4GHz 上定义的信道为 2.412 ~ 2.472GHz，共 13 个信道；美国为 2.412 ~ 2.462GHz，共 11 个信道。

因为 2.4GHz 是免授权的 ISM 频段，所以在该频段上的无线设备数量增长很快，既有 Wi-Fi 无线路由器或终端数量的增长，也有微波炉、蓝牙设备、物联网中支持 Zigbee 协议的智能家居等非 Wi-Fi 的设备的应用，因而在这个频段上面设备的干扰也越来越多，影响 Wi-Fi 连接的用户体验。而这个频段的频宽有限，信道应用的灵活性也不够，不能满足日益增长的高速率、高带宽的需求。

2) Wi-Fi 的 5G 频段和信道划分

在无线网络发展过程中，各国政府陆续开放了 5GHz 的免许可频段，参考图 1-18。与 2.4GHz 有不同的信道划分一样，在 5GHz 频段下也提供了多个互不交迭的信道。

- **欧洲和日本：**所分配的频段为 5.15GHz ~ 5.35GHz 和 5.47GHz ~ 5.725GHz，在这个频段内分配了 19 个 20MHz 带宽的信道，共有频率 380MHz。
- **中国：**所分配的频段为 5.15GHz ~ 5.35GHz 和 5.725GHz ~ 5.85GHz。其中 5.8GHz 共计 125MHz 带宽，划分为 5 个信道，信道号分别为 149、153、157、161 和 165，每个信道带宽为 20MHz。
- **美国：**所分配的频段为 5.1GHz、5.4GHz 和 5.8GHz 三个频段，每个频段的信道划分标准与其他国家相同。

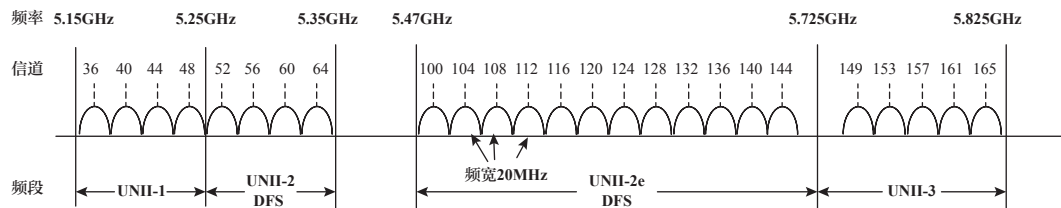


图 1-18 5GHz 的频段划分和信道定义

其中，5.25 ~ 5.35GHz 和 5.47 ~ 5.725GHz 是全球雷达系统的工作频段。

各国政府要求工作在 5GHz 的设备支持动态频率选择（Dynamic Frequency Selection, DFS）和发射功率控制（Transmission Power Control, TPC）的功能。当设备检测到当前信道上存在雷达信号的时候，利用 DFS 和 TPC 技术，设备能动态地选择切换到其他信道以及控制设备的发射功率，避免对雷达系统产生干扰。

根据设备支持 TPC 或者不支持 TPC 的情况，欧洲电信标准协会（European

Telecommunication Standards Institute, ETSI) 对于不同频段的设备等效全向辐射功率 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) 做了不同的要求, 如表 1-3 所示。

表 1-3 设备最大发射功率的管理

频段范围 (MHz)	EIRP (最大发射功率) (dBm)	
	支持 TPC 功能	不支持 TPC 功能
5150 ~ 5250	23	23
5250 ~ 5350	23	20
5470 ~ 5725	30	27

目前北美、欧洲、加拿大、澳大利亚、日本以及韩国都已对 AP 的雷达监测功能进行了强制要求, 并放到了设备的认证规范中。例如, FCC Part 15 Subpart E 规定工作在 5.25 ~ 5.35GHz 和 5.47 ~ 5.725GHz 的 U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) AP 设备, 应当具备雷达检测机制。ETSI EN 301 893 标准也对工作在此频段的设备做出了类似的要求, ETSI 则进一步将 5.470 ~ 5.725GHz 雷达信道划分为天气 (5.6 ~ 5.65GHz) 和非天气气象信道。凡是不能通过专业机构测试认证的 AP 都不能在该市场上进行销售。

3) Wi-Fi 物理层信道捆绑的规范定义

Wi-Fi 以 20MHz 为最小带宽单位进行数据传输, 信道捆绑技术就是把两个相邻的 20MHz 的信道绑定成一个 40MHz 带宽的信道, 甚至两个相邻 40MHz/80MHz 信道绑定构成一个 80MHz/160MHz 带宽的信道。信道捆绑技术带来的效果是增加了数据通道的频宽, 传输速率也得到翻倍。在 Wi-Fi 标准的演进中, 通过将较小带宽的信道捆绑成一个更大的信道带宽是关键技术之一。

根据图 1-17 的 2.4GHz 的信道分布, 信道 1、信道 6 和信道 11 在频谱上是不重叠的, 其中 2 个信道可以捆绑成 1 个 40MHz 的信道, 参考图 1-19。

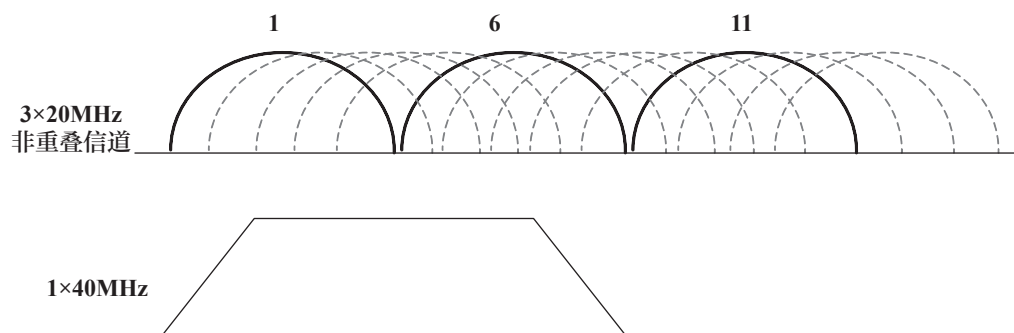


图 1-19 Wi-Fi 2.4GHz 的信道捆绑

根据图 1-18 所示 5GHz 频段信道划分图, 可以看到一共有 25 个非重叠的 20MHz 的信道, 它们能够捆绑成 12 个 40MHz 的信道, 或者捆绑成 6 个 80MHz 的信道, 或者继续捆绑成 2 个 160MHz 的信道, 参考捆绑信道的结果如图 1-20 所示。

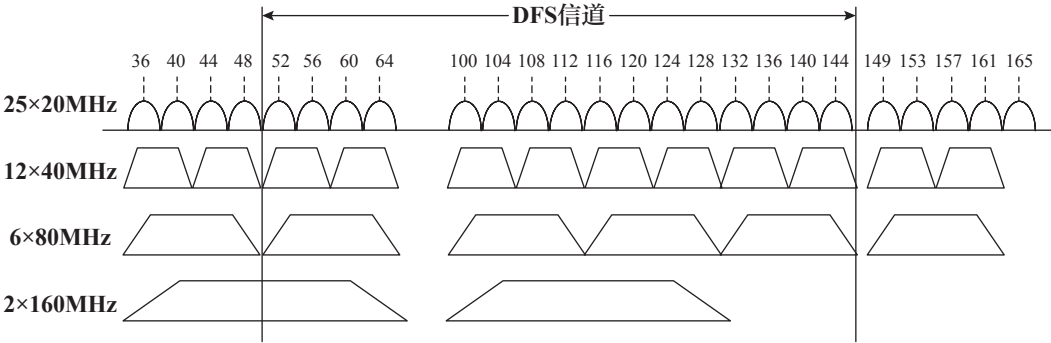


图 1-20 Wi-Fi 5GHz 的信道捆绑

因为很多国家不支持 5.47GHz 的雷达系统的工作频段，所以这些国家可能只有 1 个 160MHz 的信道。为了解决 160MHz 带宽频段资源问题，802.11 标准允许两个不相邻的 80MHz 信道捆绑，构成 80MHz+80MHz 这种模式。

在 IEEE 802.11 标准中，对于两个 20MHz 信道组成的 40MHz 信道，定义了一个主 20MHz 信道，另一个为辅 20MHz 信道。对于一个 80MHz 的信道，由 4 个连续的 20MHz 信道组成，定义了主 40MHz 信道与辅 40MHz 信道，以及主 40MHz 信道中的主 20MHz 信道与辅 20MHz 信道。至于选择哪个 20MHz 信道作为主信道，这是由 AP 来配置的，比如 80MHz 信道中选择第三个 20MHz 信道作为主信道。捆绑信道的中心位置称为**中心频点**。

图 1-21 中还标识了信道间的保护间隔，它是一段不传送任何数据的频段资源，目的是降低相邻 20MHz 信道间的信号干扰。当将相邻两个 20MHz 信道捆绑以后，同一个 40MHz 信道中的数据将同时发送和接收，这两个 20MHz 信道之间就没有相互干扰问题。此时，原先 20MHz 之间的保护间隔就可以用于数据传输的带宽资源。因此，40MHz 频宽下的有效带宽就大于两个单独 20MHz 信道的数据带宽之和。

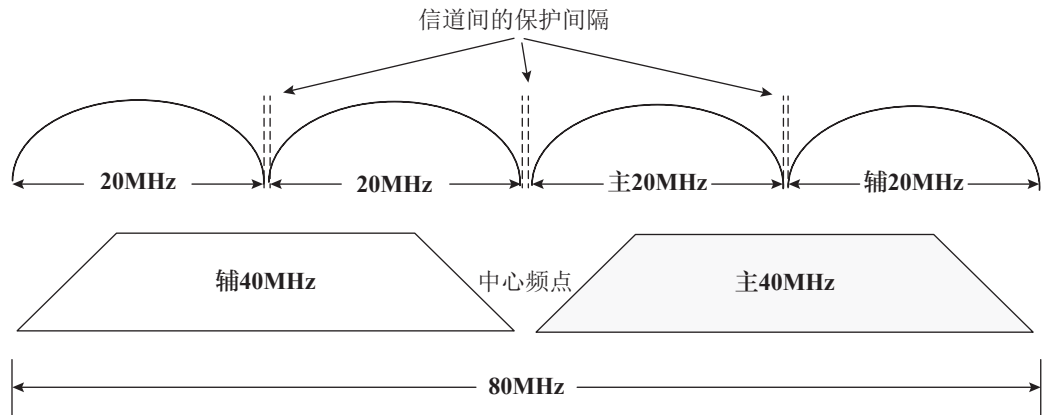


图 1-21 80MHz 信道绑定的例子

信道捆绑带来更大的带宽和数据传输速率。但对于一些低速 Wi-Fi 控制设备或者物联网设备，比如支持 Wi-Fi 功能的空调遥控器等，并不需要高速的数据传输，20MHz 的工作带宽完全可以满足其基本需求。

而对于 Wi-Fi 数据报文中的管理或控制帧，它们没有大带宽的需求，但需要所有连

接 AP 的 STA 都可以收到这样的消息，所以 802.11 标准规定管理帧或控制帧必须在主 20MHz 信道发送和接收，确保不支持信道捆绑的设备也可以收到这些帧。

4) Wi-Fi 信道捆绑下的多 STA 竞争信道的问题

对于一个支持 80MHz 的 BSS，如果其中一个 STA 在主 20MHz 信道上给 AP 发送数据，同时另外一个 STA 在辅 40MHz 信道上给 AP 发送数据，则 AP 无法解析两个不同步的数据。

因此，如果要使用 20MHz 以上的带宽，802.11 标准规定 AP 或者 STA 必须以 20MHz 为单位，在多个捆绑的信道上同时竞争无线媒介资源。只有同时竞争成功，才可以使用绑定带宽。如果其中一个或者多个 20MHz 的信道竞争不成功，则只能在竞争成功的信道中选择包含主 20MHz 或主 40MHz 的频宽上发送数据。

在图 1-21 所示示例中，即使 STA 没有竞争到第一个 20MHz 信道访问权，STA 仍然可以竞争获取其他三个 20MHz 信道的无线访问权，但 STA 最后只能在后两个 20MHz 捆绑的主 40MHz 信道上发送数据。至于是否可以将后面 3 个 20MHz 信道上捆绑起来构成 60MHz 带宽上发送数据，将在 Wi-Fi 7 章节做进一步介绍。

此外，如果设备竞争不到主 20MHz 所在的信道，但却竞争到其他信道，则设备放弃所有竞争到的信道，不能发送任何数据。

4. 物理层编码调制技术

无线信道理论最大数据传输速率取决于无线信道的带宽和信道的信噪比。使用免授权频段的 Wi-Fi 技术，它的信道带宽是有限的，例如 2.4GHz 频段的信道带宽最大是 40MHz，5GHz 频段的信道带宽最大是 160MHz。另外，短距离通信的 Wi-Fi 在室内环境中碰到的主要技术挑战是，来自其他无线信号的干扰噪声以及多径传输下所引起的数据传输的误码率。

因此，基于 Wi-Fi 有限的信道带宽，如何有效降低传输数据的误码率和持续提升传输数据的速率，是每次制定新的 Wi-Fi 物理层技术规范的关键部分。而作为物理层的核心技术，信道编码和调制方式的改进是 Wi-Fi 标准迭代升级的重点。

1) Wi-Fi 的信道编码

Wi-Fi 信道编码演进的关键是如何提高**编码效率**，即提升有效信息长度在整个编码信息长度中的比例。如果编码效率的定义是 k/n ，则对每 k 位有用信息，编码器总共产生 n 位的数据，其中 $n-k$ 位是多余的， k/n 越大，则编码效率越高。

Wi-Fi 规范中的信道编码技术的选择，是从初期的以拓展频带宽度为主的**扩展频谱通信**，演进到编码效率更高、具备对数字信号进行**自动纠错功能的信道编码**。

扩展频谱通信又简称扩频通信，是把较窄的信号所占有的频带宽度，在发送前扩展到远大于所传信息必需的最小带宽，这种方式有较强的抗干扰性和较低的误码率。

参考图 1-22，早期 Wi-Fi 802.11b 规范采用了扩频通信中的**直接序列扩频**（Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS），这是指直接利用高码率的扩频码序列，在发送端去扩展信号的频谱。而在接收端，用相同的扩频码序列去进行解扩，把展宽的扩频信号还原成原始的信息。

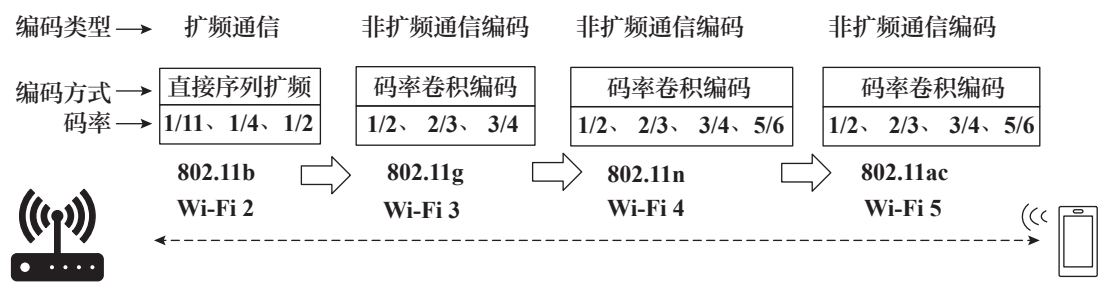


图 1-22 Wi-Fi 物理层的编码格式

在扩频通信中，假设传输的有效信息长度为 k ，编码后产生一个长度为 n 的编码序列。如果 m 为扩频码长度，则 $n=m \times k$ ，编码效率 $R=k/n$ 。因此扩频通信的码率 $R=k/(m \times k) = 1/m$ 。在图 1-22 中，802.11b 的编码效率是 1/11、1/4 和 1/2。

为了提高 Wi-Fi 传输系统的可靠性，802.11g 规范之后的 Wi-Fi 物理层技术采用了具有对数字信号进行自动纠错的信道编码，即**纠错编码**。

纠错编码分为**分组码**和**卷积码**两大类。

- **分组码**：把原信息分割成多个组，在每个组后面加冗余进行检错或纠错的编码，组之间没有任何联系，常见的分组码有**奇偶校验码**、**汉明码**等。
- **卷积码**：不是把信息序列分组后再进行单独编码，而是由连续输入的信息序列得到连续输出的已编码序列。

802.11g、802.11n、802.11ac 采用的主要是**二进制卷积编码**（Binary Convolutional Code，BCC），而 Wi-Fi 6 之后强制支持**低密度奇偶校验码**（Low Density Parity Check，LDPC）。

- **二进制卷积编码**：指将有效数据进行分组后，添加的冗余信息不仅参考当前组的原始信息，而且还包括之前组的原始信息的编码方式。
- **低密度奇偶校验码**：是特殊的具有稀疏矩阵的线性分组码。它有逼近香农极限的良好性能，接收端解码复杂度较低，结构灵活，解码时延短，吞吐量高。

Wi-Fi 的信道编码的效率随着新的规范的演进而不断提升。从图 1-22 看到，802.11n 和 802.11ac 的编码效率包含了 1/2、2/3、3/4、5/6 多种情况，已经在 802.11g 规范上得到改进，多数都高于 802.11b 的编码效率。

而 Wi-Fi 6 采用的 LDPC 码是近年来信道编码领域的研究热点，已广泛应用于深空通信、光通信、4G/5G 无线通信和将来的 6G 移动通信等领域。

2) Wi-Fi 的信道调制技术

Wi-Fi 信道调制技术的不断发展是围绕着如何充分利用已有频带，提升每个传输信号的符号所能承载的信息比特的容量而展开的。单位时间内传输的信号符号称为**码元**，每秒钟传送码元的数目称为**波特率**。一个码元所承载的信息比特的数量由调制方式来决定。

在 Wi-Fi 规范的初期，采用的调制方式是通过仅改变载波信号的相位值来表示数字信号 1 和 0 的**相移键控**（Phase Shift Keying，PSK）。

802.11b 使用的相移键控分别为**差分二进制相移键控**（Differential Binary Phase Shift Keying，DBPSK）和**差分正交相移键控**（Differential Quadrature Phase Shift Keying，DQPSK）。

DBPSK 来自二进制相移键控（BPSK），BPSK 指的是二进制数字信号来控制载波信

号的相位变化, 0 和 1 分别对应载波相位 0 和 π ; 而 DBPSK 是指利用前后码元的载波相对相位变化传递数字信号信息, DBPSK 中的每个传输信号承载 1 比特的信息。作为对调制方式的基本理解, 图 1-23 给出 BPSK 的调制信号的波形, 图中每一个周期的调制信号表示 0 或 1 的二进制信息, 相位为 0 表示数字 0, 相位为 π 表示数字 1。

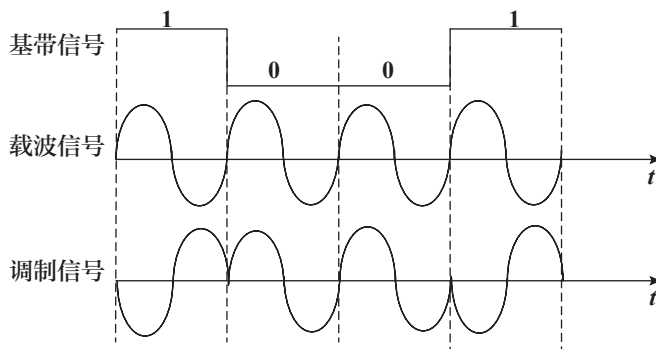


图 1-23 基于 BPSK 调制方式的调制信号

差分正交相移键控来自正交移相键控 (QPSK), QPSK 也称为四相移相键控 (4PSK) 调制, 它利用 4 种相位来表示 00、01、10、11。而 DQPSK 指的是利用前后码元的载波相对相位变化传递数字信号信息, DQPSK 中的每个传输信号承载 2 比特的信息, 参考图 1-24 中所给的 DQPSK 的调制信号的例子。

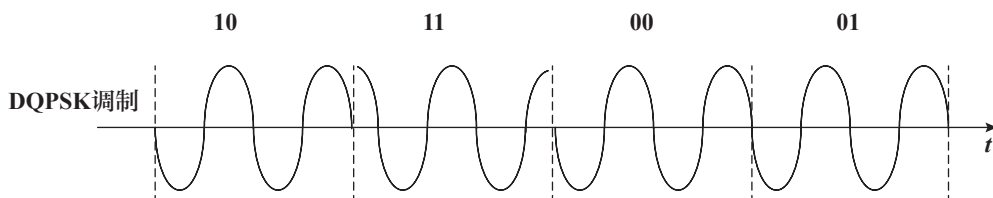


图 1-24 基于 DQPSK 调制方式的调制信号

数字调制可以用“星座图”的直观方式来表示调制信号的分布与数字信息之间的映射关系。如图 1-25 所示, BPSK 的相位 0 和 π 分别表示数字 0 和 1, 而 QPSK 用另外 4 个相差 90° 的相位来表示 00、01、10、11。星座图中的横坐标表示同相 (In-phase, I) 分量, 纵坐标表示正交 (Quadrature, Q) 分量。

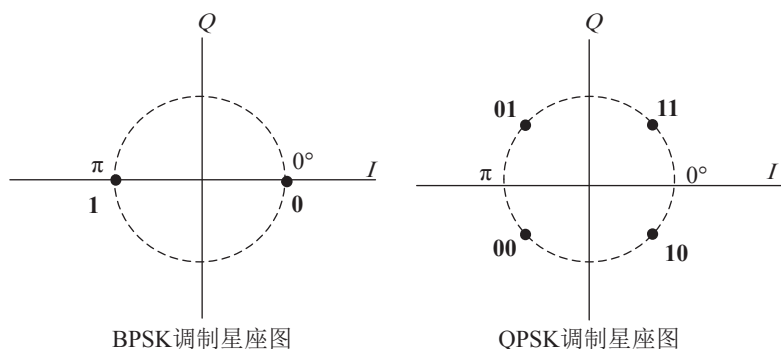


图 1-25 BPSK 与 QPSK 的星座图

802.11b 使用的相移键控的调制方式比较简单，但调制效率不高。参考图 1-26，从 802.11g 开始，除了兼容 802.11b 的调制方式，Wi-Fi 规范中采用的主要是振幅和相位联合的调制方式，称为正交振幅调制（Quadrature Amplitude Modulation，QAM），每个传输信号能承载的信息支持 4 比特、6 比特和 8 比特，分别用 16-QAM、64-QAM 和 256-QAM 的方式来表示。16-QAM 中的 16 是从 2^4 换算过来的，其他的 QAM 标识都采用相同的二进制计算方式。

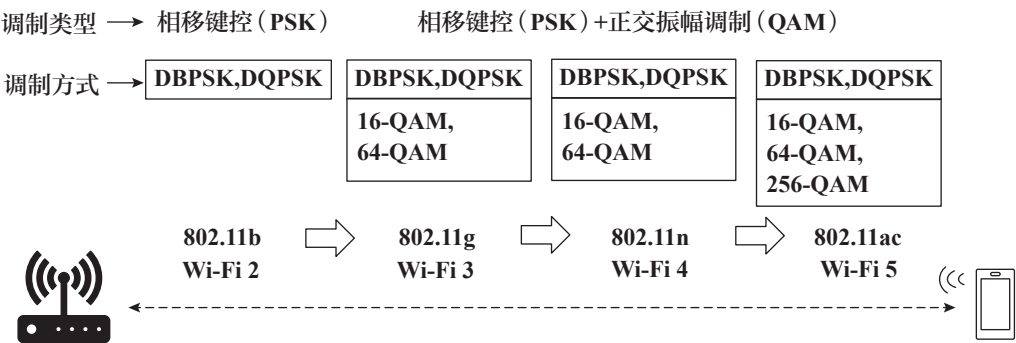


图 1-26 Wi-Fi 物理层的调制方式

星座图同样来表示 QAM 调制中的信号与数字信息的映射关系。参考图 1-27，分别表示 16-QAM 和 64-QAM，在 16-QAM 图中，每一个星座上的信号承载 4 比特信息，而 64-QAM 中每一个星座上的信号承载 6 比特信息。从图 1-27 看到，802.11ac 支持 256-QAM，即每个传输信号承载 8 比特的信息，调制效率是 802.11b 的 4 倍或 8 倍，相应的数据传输速率也至少是 802.11b 的 4 倍以上。

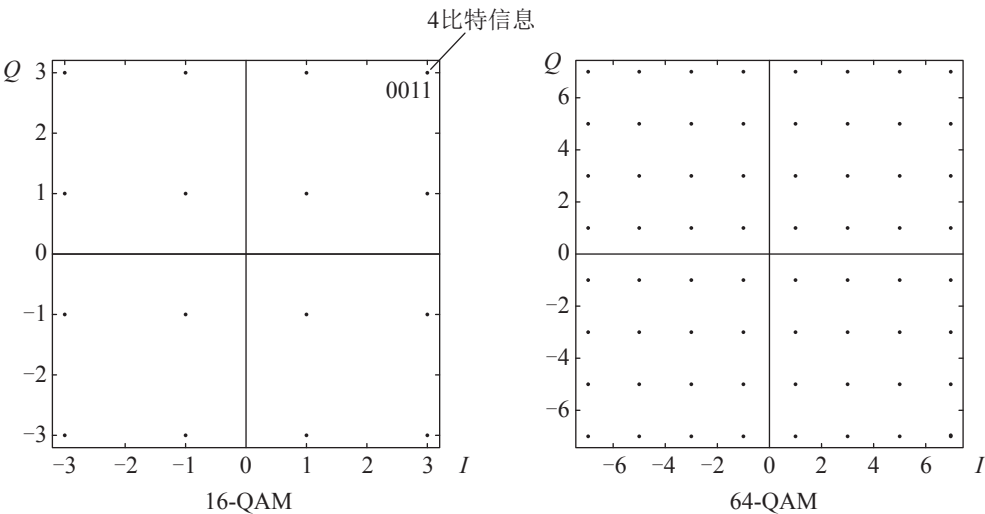


图 1-27 16-QAM 和 64-QAM 调制的星座图

3) 正交频分复用技术

正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）是目前 Wi-Fi 标准中已经广泛应用的信道调制技术。它的基本概念是 Wi-Fi 的信道被划分成很多相同带宽、相同周期但频谱重叠的子载波，而子载波之间相互正交并且不会相互干扰。

如图 1-28 所示, 传统的频分复用 (Frequency Division Multiplexing, FDM) 在应用的时候, 数据流通过多载波技术被分解成多个比特流, 构成多个低速率信号在载波上并行传送。两个子载波之间有一定的频率间隔作为保护带宽来防止干扰, 但是频谱的利用率就受到限制。而子载波正交复用技术可以在频宽相同时承载更多的子载波, 能大幅度提高频谱的利用率。

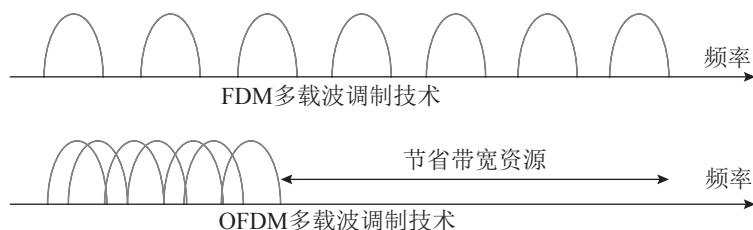


图 1-28 FDM 与 OFDM 的频谱利用的区别

4) OFDM 下消除 Wi-Fi 多径干扰的方法

发射端通过天线将电磁波信号向周围辐射, 在现实环境中, 电磁波遇到物体阻挡或者经过大气层传输不可避免地产生折射或反射信号, 所以接收端在不同路径上可以接收到相同的信号, 称为**信号或者电磁波的多径传输**。如图 1-29 所示, 接收端在路径 1 上接收到直射信号的同时, 也通过路径 2 和路径 3 的反射路径接收到相同的信号。

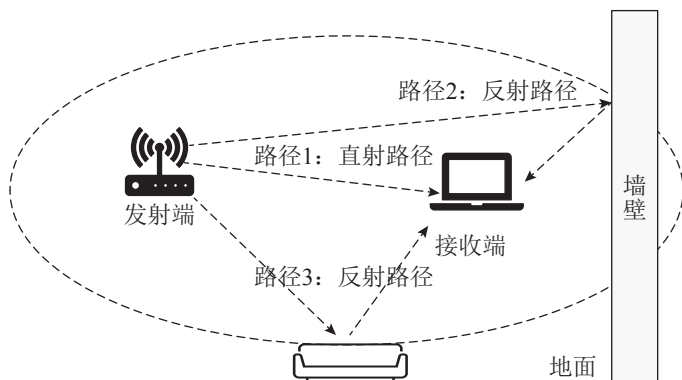


图 1-29 多径传播信号的现象

OFDM 技术可以解决子载波相互之间的干扰问题, 但在多径传播情况下, 同一个 OFDM 符号在不同路径上接收仍然存在前后符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI) 问题。

OFDM 调制方式下, Wi-Fi 信号由多个正交 OFDM 符号构成, 接收端从多径上接收到的同一个 OFDM 符号存在一定的时间差, 对于信号上相邻的两个 OFDM 符号, 就存在路径 1 的第 1 个 OFDM 符号与路径 2 的第 2 个 OFDM 符号相互叠加, 可能导致接收端不能正确解码。如图 1-30 所示, 两个路径上的 OFDM 信号出现了符号间干扰, 即前一个符号的尾部与下一个符号的头部重叠, 使得叠加后的信号解码困难。

OFDM 符号保护间隔 (Guard Interval, GI) 是一段不包含任何采样信号的空闲的传输时段, 如果保护间隔的长度大于多径传播造成的 OFDM 符号最大时延, 可以使得前一个

符号的尾部在保护间隔中结束，而不会对下一个 OFDM 符号构成干扰。如图 1-31 所示，每个 OFDM 符号之前插入保护间隔，可以改善符号间干扰问题。

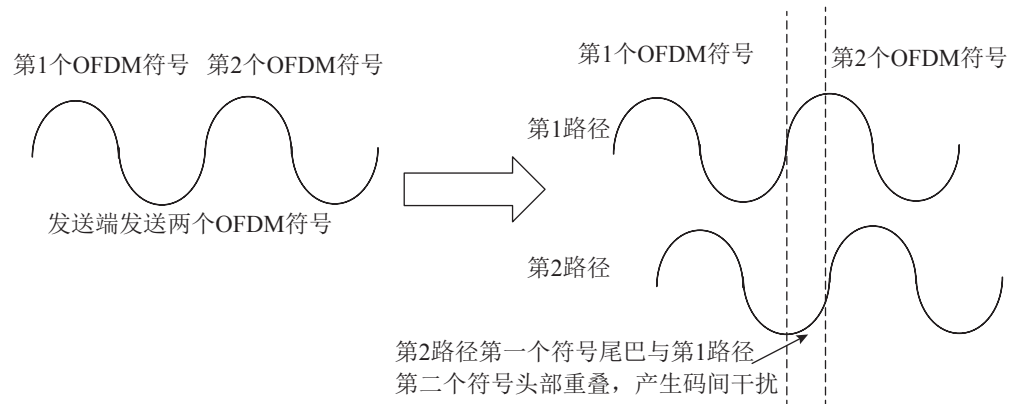


图 1-30 OFDM 的符号间干扰

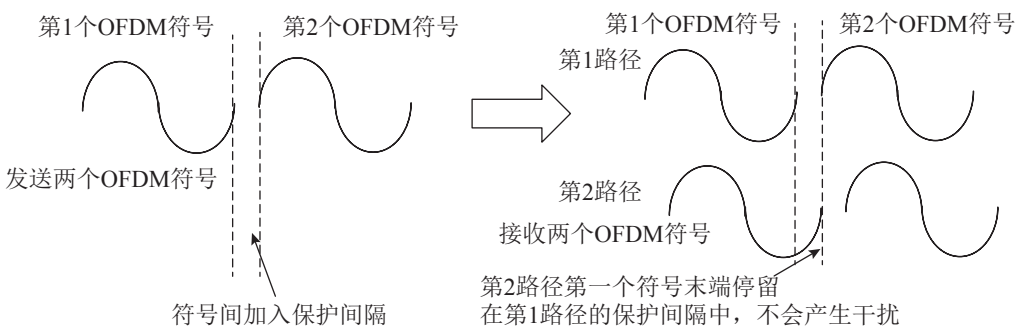


图 1-31 加入保护间隔后的 OFDM 符号传输

802.11g 定义了时长为 800ns 的保护间隔，可以消除多径情况下 OFDM 的符号间干扰。但较大的保护间隔会影响数据传输的吞吐量。因此 802.11n 又引入了 400ns 的短保护间隔（Short Guard Interval，SGI），有助于在实际场景中提高传输速率。

5. 多输入多输出技术

多输入多输出（MIMO）技术指在发射端通过多个天线发射信号，并在接收端使用多个天线接收信号，在不增加带宽的情况下，成倍改善通信质量或提高通信效率。MIMO 技术可以分为空间分集增益、空间复用增益和波束成形（Beamforming）。

- **空间分集增益：**指在多天线上传输相同的数据，增强信道可靠性，降低误码率。
- **空间复用增益：**指在多天线上同时传输多路不同的数据，提高信道吞吐量。
- **波束成形：**发射端对多天线信号进行幅度和相位调整形成特定方向上的传送；接收端对多天线收到的各路信号进行加权合成，产生某些方向的信号增强或衰减，从而在方向上取得较好的信号质量。

本节先介绍空间分集增益和空间复用增益，下一节介绍波束成形技术。

1) 空间分集增益

图 1-32 是空间分集增益技术下通过多天线进行数据传送的例子，相同的原始数据通过 2 根发射天线同时发送出去，然后接收端通过 2 根天线同时接收，接收端既可以选择其

中一个强信号，也可以合成两根天线的信号。

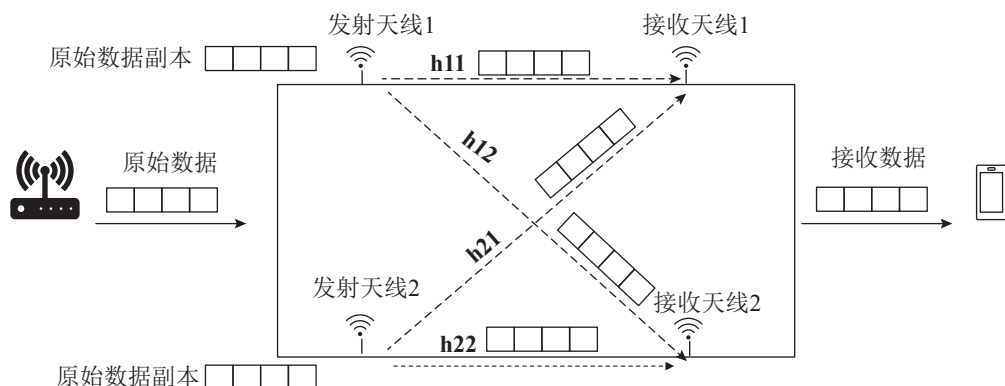


图 1-32 2 根发射天线和 2 根接收天线下的空间分集的示例

在 Wi-Fi 通信技术中，由于手机等终端设备的随机移动、电磁波的多径传输、多普勒效应影响，以及在传输路径中出现的能量损耗，信道呈现一个与时间相关的随机变化的特征，信道的随机性称为衰落。显然，信道衰落对任何调制技术都会带来负面影响。空间分集增益就是通过多天线技术来解决信道衰落问题，又称为抗衰落技术。

空间分集增益又分为接收分集增益和发射分集增益。

- **接收分集增益：**是指分集接收与单一天线接收的电平差。由于接收天线接收信号的衰落特性相互独立，则接收机可以选择其中一个强信号，或者合成不同的信号，送给解调器解调。如果分集接收与单一天线接收的电平差越高，则增益改善效果越好。接收分集增益与接收天线数量有关。
- **发射分集增益：**利用两个以上的天线发射信号，并设计发射信号在不同的信道中保持独立衰落，然后在接收端对多路信号进行合并，从而减少衰落的严重性。发射分集增益通过此方式从接收中取得效果。

接收分集增益首先需要理解空间分集接收的概念。如果接收端通过两根天线接收同一信息，并且天线的间距大于半个波长以上，则接收端两天线上的信号相关性很小，接收机在每个天线上独立接收信号的一个副本，称为信号的**空间分集接收**。

发射分集可以采用延迟发送分集方式，即在多个天线上在不同时间发送同一信号的多个副本，这种实现方法比较简单，但在接收端有接收时延。也可以采用空时发送分集方式，即将**数据编成空时分组码**（Space Time Block Code, STBC），从两个或者多个天线上发送。STBC 的关键在于多天线传输的信号矢量需要相互正交，从而保证多天线发出的信号不会相互干扰。使用 STBC 技术，即在具有 M 根发射天线与 N 根接收天线的系统中，最大分集增益为 $M \times N$ ，参考图 1-32，它是 2×2 MIMO 空间分集的示例。

2) 空间复用增益

发射端将不同数据通过不同天线发射到无线信道中，接收端在不同天线上接收到不同的数据流，以此提高传输的速率，这种技术称为空间复用，带来的传输速率的提高称为空间复用增益。如图 1-33 所示，对于一个有 2 个发射天线的发射端和有 2 个接收天线的接收端组成的 MIMO 系统来说，最大可以获得 2 倍于单天线系统的传输速率。

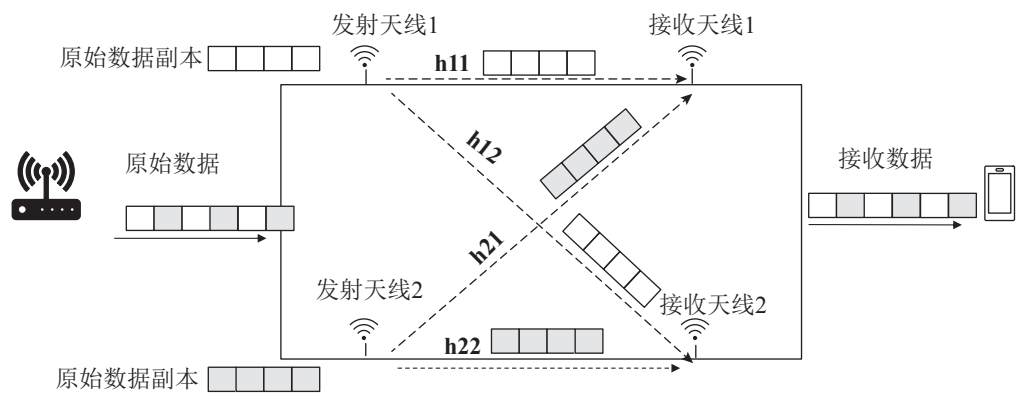


图 1-33 2×2 MIMO 空间复用示意例子

MIMO 包括单用户 MIMO (Single User MIMO, SU-MIMO) 和多用户 MIMO (Multiple Users MIMO, MU-MIMO)。SU-MIMO 和 MU-MIMO 区别在于接收端的用户个数，SU-MIMO 接收端为 1 个多天线用户。MU-MIMO 接收端为多个用户，其中每个用户可以是 1 根天线，也可以是多根天线。利用 MU-MIMO，发送端通过多天线同时向不同的用户发送不同的数据流，从而提高信道吞吐量，降低数据时延。

3) Wi-Fi 关于 MU-MIMO 的规范定义

802.11ac 引入 AP 向多设备终端同时传输数据的下行 MU-MIMO 技术。为了避免多个空间流之间相互干扰，需要 AP 获取 STA 的信道信息，以保证接收天线可以准确接收到相应的数据，这个过程也称为探测 (Sounding)。每次只获取一个接收端的信道信息，称为单用户探测 (Single User sounding, SU-sounding)，而如果同时获取多个终端设备信道信息，则称为多用户探测 (Multiple Users sounding, MU-sounding)。

在下行方向，AP 通过探测过程中搜集各个 STA 反馈的信道信息，合成一个发送矩阵，各个发送天线上的数据需要根据该矩阵的参数进行调整，保证 STA 只收到自己的数据。对于多个 STA 发送上行数据来说，需要对这些设备在发送速率、功率、时间同步等方面有严格的管控，这样 AP 才可以解码多条流的数据。基于它的复杂性，802.11ac 并没有支持上行多用户的 MIMO 模式。图 1-34 所示为 2 条流的 SU-MIMO 和 MU-MIMO 对比。

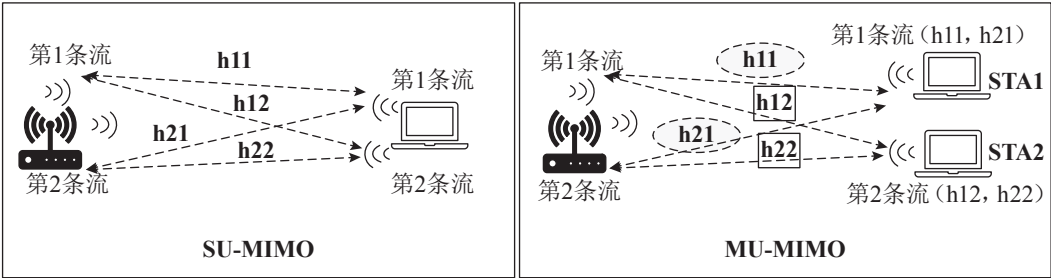


图 1-34 2 条流的 SU-MIMO 与 MU-MIMO 对比

SU-MIMO: 因为 AP 的两条流的发送路径 (h11, h12, h21, h22) 对于发送端和接收端都是已知的，SU-MIMO 不需要探测过程获取接收端信道信息，接收端在不同天线上解析出不同的流。

MU-MIMO: 系统设计的目标是使 STA1 不会从路径 h21 接收到任何信号, 同时 STA2 不会从路径 h12 接收到任何信号。此时需要利用探测过程在发送信号时将信道矩阵考虑进去, 尽量减少这些路径上的功率, 提高接收端的信噪比, 从而使得接收端可以分别解析出自己的信息, 而不需要额外的信道信息。

6. 波束成形技术

Wi-Fi 信号通过全向天线向四周以电磁波的形式辐射到无线信道中, 在 Wi-Fi 信号覆盖范围之内的设备都可以相互通信, 但是当设备之间距离较远时或者出现严重遮挡时, 信号质量将严重下降, 如图 1-35 左半部分所示, STA1 与 AP 之间存在障碍物遮挡, 而 STA2 处于 AP 的信号覆盖范围边缘时, 此时 STA1 或 STA2 接收到的 AP 的 Wi-Fi 信号强度就会比较弱, 从而降低了 Wi-Fi 数据传送的速率。由于每个国家都对 Wi-Fi 设备的最大发射功率做了严格限制, 所以不能通过增加发射功率的方式来提升 Wi-Fi 的信号强度和覆盖范围。

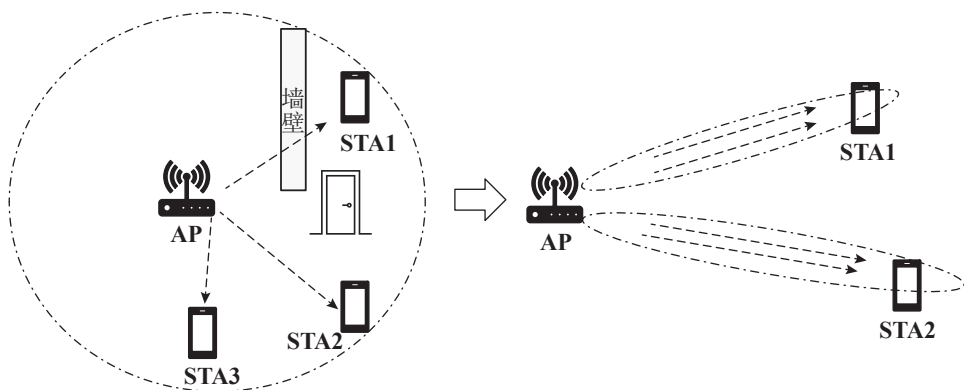


图 1-35 Wi-Fi 的全向辐射到波束成形

从 IEEE 802.11ac (即 Wi-Fi 5) 规范开始, Wi-Fi 标准引入了波束成形技术 (Beamforming), 用于改进 Wi-Fi 覆盖的问题。基本原理是, 在 Wi-Fi 发送设备为多天线系统的情况下, 发射设备对多天线辐射的信号进行幅度和相位调整, 形成所需特定方向上的传播, 类似于把信号能量聚集在某个方向上进行传送, 它被称为发送波束成形技术。通过波束成形技术, 可以扩大 Wi-Fi 传输距离和增强接收端的信噪比, 降低其他方向上的干扰, 理论上可以提高通信双方的最大吞吐量。参考图 1-35 右半部分, AP 向 STA1 或者 STA2 的方向进行波束成形的传送。

对于发送波束成形技术, 为了保证信号朝着特定的方向传输, 需要知道接收端的信道信息, 然后根据接收端反馈的信道信息对发送信号做相应的处理, 这是前面介绍 MIMO 时讲的探测技术。

通过波束成形技术发送数据的设备称为波束成形发送端 (Beamformer), 接收波束成形数据的设备称为波束成形接收端 (Beamformee)。Beamformer 和 Beamformee 利用物理层头部字段的交互信道信息 (Channel State Information, CSI) 来实现探测过程。波束成形过程包括探测过程和发送波束成形后数据的过程, 单用户和多用户的探测过程稍微有些差别, 以 802.11ac 定义的信道探测过程为例, 分别阐述如下。

1) 单用户信道探测的基本过程

单用户信道探测过程包括发送端发起探测和接收端反馈信道信息, 如图 1-36 所示,

具体过程描述如下：

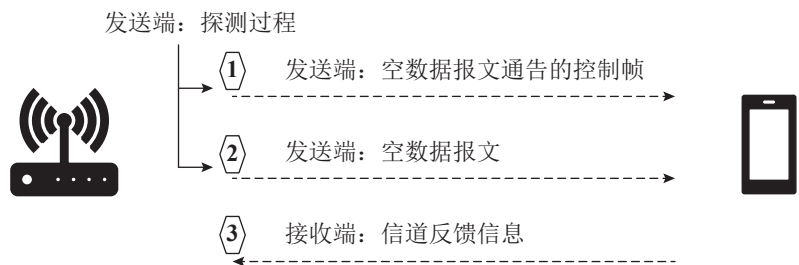


图 1-36 单用户信道的探测过程

(1) **发送端的探测过程：**发送端首先向接收端发送称为空数据包通告的控制帧，接着发送空数据报文，提供探测信息给接收端。

(2) **接收端反馈信道信息：**接收端根据接收到的发送端消息中包含的信道信息，向发送端发送信道反馈信息，因为数据量比较大，所以需要压缩传输。

2) 多用户信道探测的基本过程

在 Wi-Fi AP 支持多天线下的多输入多输出情况下，需要一个发送端与多个接收端共同完成探测过程。如图 1-37 所示，具体过程描述如下：

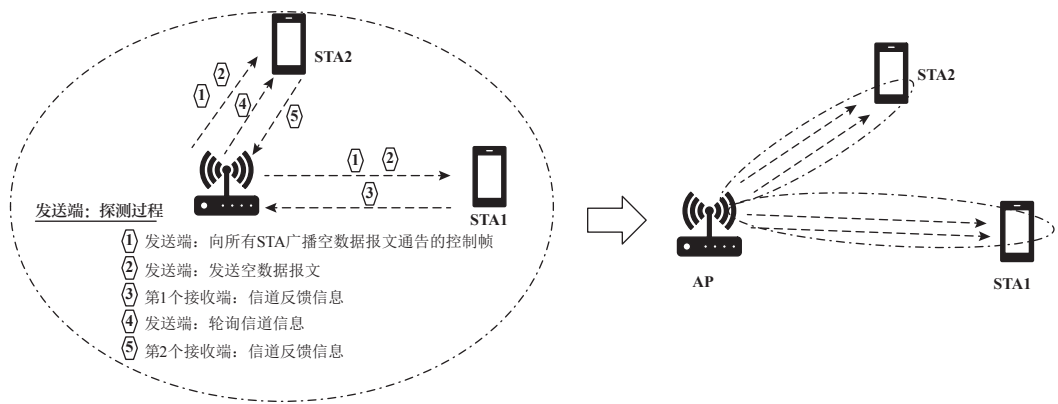


图 1-37 多用户信道的探测过程

(1) **发送端的广播探测过程：**发送端要向多个接收端广播空数据包通告的控制帧，接着发送空数据报文，提供探测信息给接收端。

(2) **接收端反馈信道信息：**在控制帧所指示的第一个接收端发送信道反馈信息。

(3) **发送端处理反馈的信道信息：**发送端处理第一个接收端所反馈的信道信息后，随后发送端向第二个接收端发送报告轮询帧（Beamforming Report Poll）查询信道信息。

(4) **接收端继续发送反馈信息：**第二个接收端发送信道反馈信息。当所有的接收端都做了反馈之后，发送端完成整个探测过程。

(5) **发送端开始波束成形：**发送端根据信道反馈信息生成控制矩阵，然后向接收端发送数据帧时加入该矩阵，此时即可实现波束成形。

此外，接收端可以通过对多天线收到的各路信号进行加权合成，产生某些方向上的信号增强或衰减，进而表现为某个方向上取得较好信号质量的传播，这个技术称为**接收波束**

成形技术。由于该技术和具体实现相关，802.11ac 协议中只定义了发送波束成形技术，但没有定义接收波束成形技术。

1.2.3 Wi-Fi 物理层标准

Wi-Fi 标准在物理层上的迭代演进的主要关注点是持续提升传输速率，它的核心技术是信道编码和调制方式的改进，并且通过支持更大的信道带宽、增加空间并发数据流的数量等方式组合，全方面提升 Wi-Fi 的传输速率。

另外，为了使支持新 Wi-Fi 标准的产品能与支持旧规范的设备进行互通，新标准在物理层格式上的定义始终保持与旧规范的兼容。这样当 Wi-Fi 标准不断推陈出新的时候，并没有影响大量已有用户终端的使用。

下面首先介绍 Wi-Fi 传输速率的计算方法，然后介绍 Wi-Fi 物理层格式。

1. Wi-Fi 传输速率的计算方式

Wi-Fi 理想情况下的最大传输速率的计算方式如式 1-1 所示：

$$\text{传输速度} = \frac{\text{传输比特数量} \times \text{传输码率} \times \text{数据子载波数量} \times \text{空间流数量}}{\text{载波符号的传输时间}} \tag{1-1}$$

其中，传输比特数量是指每个子载波调制一个码元所需要的比特个数。把它与载波符号的有效传输时间进行计算，就可以获得单位时间所传输的比特数量，即构成了传输速率的最基本信息。

传输码率指的是编码后的传输数据中有效数据占总传输数据的比例，而数据子载波数量是指一个信道带宽中承载数据的有效子载波的数量。把它们放在一起计算，就获得了一个完整信道下的传输速率。

空间流数量即自由空间中同时传输的数据流数量。在多天线的 Wi-Fi 设备中，每增加一条空间流的传输，则传输速率就增加一倍。

图 1-38 给出了 Wi-Fi 传输速率的图示。

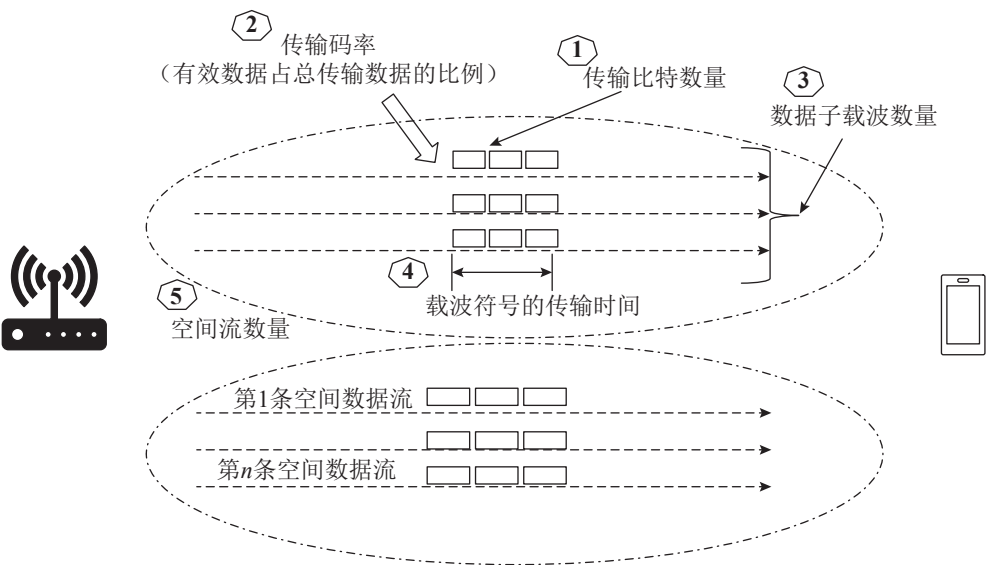


图 1-38 Wi-Fi 传输速率的图示

如果把传输一个载波符号比作一辆货车，那么传输比特数量就是每辆货车承载的货物，而数据子载波数量就像同一条马路下的并行的车道，车道越多，运输的货物就越多。空间数据流则是多层高架的立体交通，允许更多的车辆在各层的道路上运输比特数据。

下面介绍各个标准下的速率计算的参数信息，并给出具体的计算例子。

1) 传输比特数量

传输比特数量取决于所采用的调制等级。如前面信道调制方式中所提到的，在 16-QAM 中，16-QAM 中的 16 是从 2^4 换算过来的，即每个子载波传输一个符号所承载的比特数量为 4。而在 64-QAM 中，每个子载波传输一个符号所承载的比特数量为 6。不同 Wi-Fi 标准下的 QAM 调制等级以及比特数量如表 1-4 所示。

表 1-4 不同标准下的最高调制等级

支持 QAM 调制的标准	802.11g	802.11n	802.11ac
QAM 调制等级	64-QAM	64-QAM	256-QAM
传输比特数量（位）	6	6	8

2) 传输码率

Wi-Fi 传输码率指的是编码后的传输数据中有效数据占总传输数据的比例，也就是编码效率。如果传输码率或编码效率的定义是 k/n ，则对每 k 位有用信息，编码器总共产生 n 位的数据，其中 $n-k$ 是多余的， k/n 越大，则传输码率越高。不同 Wi-Fi 标准下的码率和调制方式如表 1-5 所示。

表 1-5 不同标准下调制、编码及码率

调制方式	802.11b (DSSS)	802.11a/g	802.11n	802.11ac
DBPSK	1/11			
DQPSK	1/11			
DQPSK	1/4			
DQPSK	1/2			
DBPSK		1/2	1/2	1/2
DQPSK		1/2	1/2	1/2
DQPSK		3/4	3/4	3/4
16-QAM		1/2	1/2	1/2
16-QAM		3/4	3/4	3/4
64-QAM		2/3	2/3	2/3
64-QAM		3/4	3/4	3/4
64-QAM		5/6	5/6	5/6
256-QAM				3/4
256-QAM				5/6

3) 数据子载波数量

数据子载波数量，即承载数据的子载波的数量。除此之外，子载波还包括用于边界隔