



第 1 章

背景介绍



1.1 移动通信系统的空口技术演进

移动通信的普及始于 1968 年 AT&T 贝尔实验室提出的蜂窝小区概念，即将一片广大区域分成若干个正六边形的小区，类比自然界中蜜蜂构筑的蜂巢。小区之间可以复用频谱资源，因此整个网络的容量不再受限于系统宽带；小区之间的紧密相邻可以保证用户在切换小区时没有覆盖间隙。从那时起到现在的几十年中，蜂窝通信相比其他无线通信领域，保持着较为迅猛的发展速度，其峰值速率、频谱效率、用户速率、系统容量、连接用户数等都呈现出数量级式增加趋势，其间经历了 5 代的更替，如表 1-1 所示。

表 1-1 前几代移动通信系统的空口技术演进

移动通信系统空口技术	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代
标志性技术	频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)； 固定占用； 模拟调制	时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 为主； 数字调制； 卷积码	码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 为主； 数字调制； Turbo 码	正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDM) 为主； 空间信道复用 (MIMO)； 咬尾卷积码； Turbo 码增强	正交频分多址 (OFDM) 为主； 大规模天线 (massive MIMO)； LDPC 码； Polar 码

第一代移动通信空口的多址技术是频分多址 (FDMA)，仅支持语音服务。每个用户的无线资源按固定频率划分，由于采用模拟幅度调制 (Amplitude Modulation, AM)，且对发射功率缺乏有效的控制，所以频谱效率很低。以北美的制式为例，每条通道单独要占 30 kHz 带宽，通话容量十分有限。模拟器件难以集成，终端的硬件成本高，体积大，普及度很低。

第二代移动通信空口的多址技术以时分多址 (TDMA) 为主，主要业务是语音通话，TDMA 最广泛的制式是欧洲联盟 (简称欧盟) 主导制定的 Global System of Mobile communications (GSM) 标准。GSM 系统将频谱资源划分成若干个 200 kHz 窄带，每个窄带中的多个用户按照时隙轮流接受服务。为减少小区间干扰，保证小区边缘的通话性能，GSM 系统通常将相邻的 7 个或 11 个小区组成一簇，簇内各小区的频率不能复用。模拟语音信号经过信源压缩变成数字信号，采用数字调制、纠错编码及功率控制，大大提高传输效率和系统容量。GSM 的信道编码主要采用分组码和卷积码，算法复杂度较低。在第二代移动通信的后期出现另外一种制式：高通公司的 IS-95，主要在北美部署。IS-95 是第一个使用码分复用 (CDMA) 的直接频率扩展的商用标准，可以被视为第三代移动通信的前奏。

第三代移动通信的空口广泛采用扩展码分多址，大大增强了信道的抗干扰能力。相邻小区可以完全复用频率，系统容量因此得到很大程度的提升。CDMA 2000/EV-DO 和 UMTS/HSPA 是第三代移动通信的两大标准。CDMA 2000/EV-DO 主要在北美、韩国、中国等国家或地区使用，载波带宽为 1.25 MHz，其协议由国际标准组织 3GPP2 制定。UMTS/HSPA 的协议

由国际标准组织 3GPP 制定,在世界范围得到更广泛的使用。其载波带宽为 5 MHz,所以又称 Wideband CDMA (WCDMA)。为支持更高速率的数据业务,CDMA 和 UMTS 各自演进成为 Evolution Data Optimized (EV-DO) 和 High Speed Packet Access (HSPA)。它们都采用相对较短的时隙,融入了时分复用技术。第三代移动通信还有一套标准:TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA),主要由中国公司和一些欧洲公司制定,属于 3GPP 标准的一部分。TD-SCDMA 在中国大规模部署。

3G 系统容量的提高在很大程度上得益于码分多址系统的软频率复用和快速功率控制,以及使用了 Turbo 码。1993 年,Turbo 码的提出使得单链路性能逼近香农极限容量。在短短几年间,Turbo 码得到广泛应用,并掀起了对随机编码和迭代译码的研究热潮。

第四代移动通信的空口主要是正交频分多址 (OFDMA),这个选择有一定的技术必然性。首先,4G 系统的带宽至少是 20 MHz,远大于 3G 系统的带宽。大带宽意味着时域上更密的采样和更明显的多径衰落。如果仍采用 CDMA,将会产生严重的多径干扰。尽管这种干扰可以通过先进的接收机来抑制,但复杂度很高。相反地,OFDM 将频带划分成多个正交的子载波,每个子载波的信道相对平坦,信号解调无需复杂的均衡器或干扰消除机制。OFDM 接收机的低成本使得多天线接收机的复杂度大大降低,尤其对于大带宽系统。可以说,OFDM 的引入极大地促进了多天线技术在第四代移动通信中的推广,对系统容量的提升起了重要作用。4G 系统也部分使用时分复用,时隙长度比 3G 短,而且有一些控制信道和参考信号采用码分复用。

第四代移动通信的初期有三大标准:UMB、WiMAX 和 LTE。UMB 是 Ultra Mobile Broadband 的简称,起始于 IEEE 802.20,主导公司包括高通公司、朗讯公司、北电网络公司和三星公司,协议于 2007 年底基本完成 3GPP2。但由于威瑞森 (Verizon) 通信公司等主流运营商对其缺乏兴趣,UMB 后续的标准化和商用在 2008 年后就停止了。WiMAX 是 Wi-Fi 向移动通信的拓展,2007 年完成了第一版标准,得到斯普林特 (Sprint) 公司等运营商的支持。但由于斯普林特公司自身经营状况的恶化,再加上产业联盟过于松散,商业模式不够健全,WiMAX 渐渐淡出主流标准。

LTE 首个版本对应 3GPP Release 8,于 2008 年完成。随着对 UMB 投入的停止和 WiMAX 标准的边缘化,LTE 逐渐成为全球主流的 4G 移动通信标准。从 2009 年起,3GPP 开始 LTE-Advanced 的标准化,对应 Release 10,其性能指标完全达到国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 的 IMT-Advanced (4G) 的要求。

除了 OFDM 和多天线技术,LTE/LTE-Advanced 还引入了一系列新的空口技术,如载波聚合、小区间干扰消除抑制、无线中继、下行控制信道增强、终端直通通信、非授权载波、窄带物联网 (NB-IoT) 等,使得 4G 移动通信系统的频谱效率、峰值速率、网络吞吐量、覆盖率等有较明显的提升。网络拓扑不仅是宏站构成的同构网,还包括宏站/低功率节点所组成的异构网。在信道编码方面,LTE 基本沿用 3G 的 Turbo 码作为数据信道的前向纠错码,但在结构上进行了优化,这在一定程度上降低了译码复杂度且提高了性能。控制信道采用咬尾卷积

码，降低了开销。

移动通信在第五代实现了全球统一的协议，其空口在 3GPP 中也称新空口（New Radio, NR），与 4G 系统类似，主要是正交频分多址（OFDMA）。尽管 5G 初期在 3GPP 对非正交多址（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）进行过研究，但最终未能形成标准。与前 4 代不同的是，5G 的应用十分多样化，关键性能指标不再局限于峰值速率和平均小区频谱效率。除此之外，用户体验速率、连接数、低延时、高可靠等都是重要的技术指标^[1]。5G 的应用场景大致可以归为三大类：增强的宽带移动（eMBB）、低时延高可靠（URLLC）、海量物联网（mMTC）。为支持更大的带宽（如 400 MHz），从而更好地服务 eMBB 场景，5G NR 所用的频段拓展到毫米波，如 30 GHz。得益于大规模天线技术（Massive MIMO），5G 系统的小区频谱效率相比 4G LTE 提高了 3 倍。5G NR 的信道结构更为灵活，支持不同的子载波间隔和子帧长度，可以适应不同的传输速率、传输时延和可靠性要求。信道编码方面的演进是 5G NR 的一大特色，在物理业务信道，LDPC 码因其高效并行的译码算法及在长码块情形下的优异性能，取代了在移动通信业已使用近 20 年的 Turbo 码；在物理控制信道（超过 11 bit 长度），极化码因其在短码条件下的优异性能，取代了在移动通信业使用了 30 多年的卷积码。

5G 系统不仅涵盖地面网络，还能够与卫星网络相结合，共同实现更广域的立体覆盖。所用的频段除了运营商关心的授权频段，还支持免授权频段^[2]，并能够独立组网。为更好地服务垂直行业，5G NR 对车联网（V2X）^[3]和定位（positioning）^[4]进行了标准化，并在终端节能方面^[5]引入许多先进技术。

1.2 6G 发展动态

→ 1.2.1 相关研究组织

随着 5G 标准化工作趋于稳定和 5G 系统的大规模商用，全世界各主要国家和地区逐渐将目光投向下一代移动通信系统的研究探索。从 2018 年起，中国、美国、欧盟国家、日本、韩国等开始了 6G 相关的科研计划，从未来的应用场景、社会影响、潜在的使能技术、频段分配等方面开展相应的工作。

1. 中国

中国于 2019 年在工业和信息化部的领导下成立了 IMT-2030（6G）研究组，后来更名为“推进组”，旨在汇聚学术界、产业界等的专业人员，对下一代移动通信的需求愿景、频谱、网络架构、无线技术等进行研究，参与的单位不局限于中国的高校、企业和科研单位，还有不少国外企业和科研单位。在无线技术方面，目前已先后成立了 12 个技术任务组，分为 5 大类，如图 1-1 所示。第一大类是空口演进类，包括新型编码调制、新型多址接入、超大规模天线和新型双工 4 个任务组；第二大类是具有颠覆性的新型技术类，包括全息无线电、轨道

角动量（Orbital Angular Momentum, OAM）和智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）3 个任务组；第三大类是融合技术类，包括无线 AI 和感知通信一体化 2 个任务组；第四大类是新频谱下的技术类，包括太赫兹通信和可见光通信 2 个任务组；第五大类是通用基础类，目前只有无线信道建模 1 个任务组。

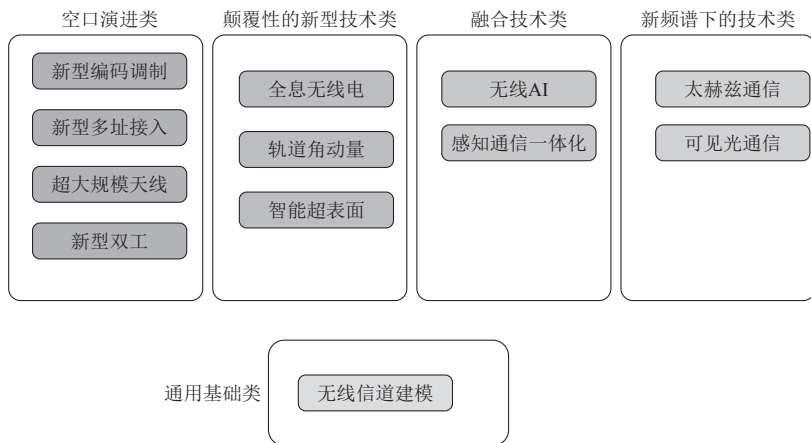


图 1-1 中国 IMT-2030 (6G) 各无线任务组及类型

在中国，除了比较官方的 IMT-2030 推进组，许多学术界和产业界的论坛、联盟和标准组织也开展了 6G 方面的研讨，如未来移动通信论坛（Future Forum）、智能超表面技术联盟（RIS Tech Alliance, RISTA）、太赫兹产业联盟、中国通信标准化协会（CCSA）等。

2. 美国

2020 年 10 月，美国电信行业解决方案联盟（ATIS）成立了 Next G Alliance，旨在未来十年内提升北美在移动通信领域的领导地位。该联盟聚焦于研发、标准化和商用化的整个生命周期，创始成员为来自美国和日本的主流运营商及全球各地知名的科技和电信企业。Next G Alliance 有 3 种成员类型，包括“正式创始成员”、“贡献成员”和“战略成员”，不论是不是 ATIS 成员，原则上除在美国商务部“实体清单”上的公司没有资格外，其他公司只要满足条件均可申请加入。联盟计划通过 ITU、3GPP 来进行标准化，已经与欧洲、日本和韩国 6G 行业组织签署了 MOU（谅解备忘录）；并先后发布关于 6G 路线图、可持续发展、6G 应用及案例的白皮书，Next G Alliance 的 6G——研究工作已经在快速推进。2022 年 7 月，Next G Alliance 发布技术工作组白皮书 *6G Technologies*，预测了推进 6G 未来所需的技术及需要对北美 6G 优先事项进行进一步研究的领域，概述了涵盖以下领域的 47 个关键 6G 候选技术：组件技术；无线电技术；系统和网络架构；网络运营、管理和维护（OA&M）及服务支持；可信度—安全性、可靠性、隐私和弹性。

美国联邦电信管理委员会（FCC）于 2019 年推出了 Spectrum Horizons Experimental 许可证，针对 95 GHz ~ 3 THz 频率的特殊授权类别。AT&T、三星、Keysight Tech 公司已获得

FCC 授权的许可证, AT&T 计划通过实验获得关于如何优化下一代云原生架构和技术, 以及使用 Multi-Gbps 吞吐量开发新用例的见解, 三星公司计划测试一个 6G 无线通信系统原型。2022 年 1 月, FCC 重组了其技术咨询委员会 (TAC), 新的 TAC 将领导美国科研机构对 6G、人工智能、高级频谱共享技术和新兴无线技术等的研究。FCC 还发布首张频谱实验牌照, 用于 95 GHz ~ 3 THz 太赫兹频段 6G 实验。

美国国家科学基金会 (NSF) 旗下的 RINGS (Resilient and Intelligent Next-Generation System) 计划专注于加速提高美国在 Next G 网络和计算技术方面的竞争力, 开发智能、弹性和可靠的 Next G 网络, 并确保 Next G 技术和基础设施的安全性和弹性。RINGS 是 NSF 迄今为止最大的一项计划, 旨在让政府和企业合作伙伴共同支持一项研究计划。NSF 于 2022 年 4 月宣布选择 37 项提案进行资助, 最终总资金预算为 4350 万美元, 每个项目在 3 年内获得约 100 万美元。企业合作伙伴包括各大信息技术公司, 项目提案负责方是各大高等院校。

美国国防部于 2022 年 2 月宣布了一项新技术愿景, 把下一代 (6G) 无线技术指定为美国国防部的 14 个关键技术领域之一, 包括太赫兹通信和传感技术融合等。此外美国国防部宣布成立一个 5G 和 Future G 跨职能团队, 以通过加速采用变革性的 5G 和下一代无线网络技术确保其部队能够在世界任何地方有效运作。

3. 欧盟

芬兰在 2018 年率先启动 6G 旗舰项目推进 6G 研究和国际合作, 之后启动 RF SAMPO 项目。(由 Nokia 领导, Oulu 大学协调, 并有产业和学术界主要利益相关者组成联盟, 旨在加快射频和天线技术开发, 并加速从 5G 向 6G 过渡), 从而增强芬兰在无线电技术方面的竞争力。

2021 年欧盟 6G 伙伴合作项目启动, 包括地平线 (Horizon 2020) 项目中的 REINDEER 和 6G 旗舰研究项目 Hexa-X。2021 年, 德国启动首个 6G 研究项目。另外, 欧洲电信标准化协会 (ETSI) 于 2021 年 9 月成立智能超表面 (RIS) 工业标准组 (ISG)。2022 年 5 月, 欧洲的 6G-IA 与日本 B5PC 签署 MOU, 6 月与中国 IMT-2030 (6G) 推进组签署 MOU。

2022 年 5 月, 芬兰政府成立新的国家联盟——6G Finland, 将所有相关利益攸关方聚集在一起, 共同开展 6G RDI 工作。芬兰政府已经将建设国家 6G 测试网络作为其快速恢复基金 (RRF) 计划的优先领域之一。创始成员是芬兰目前从事 6G 研发的几家研究机构和公司。联盟旨在提高芬兰在 6G 领域的竞争力, 建立新的国际伙伴关系, 加强 6G 合作, 提升其在 6G 领域的全球影响力。联盟成员将开始针对重要的共同优先事项制定 6G 研发路线图。6G Finland 还将作为芬兰 6G 专业知识在国家联络点, 积极参与国内和国际的 6G 讨论。芬兰和日本代表团在东京大学讨论了两国在信息通信技术领域的近期合作方向。

2022 年 7 月, Nokia 宣布将领导德国国家资助的 6G 灯塔项目 6G-ANNA, 与 6G-ANNA 的 29 个合作伙伴合作 (来自德国工业界、初创公司、研究机构和大学), 旨在推动 6G 研究和标准化。6G-ANNA 的资金来自德国联邦教育和研究部, 目标在于加强德国和欧洲的 6G 议程, 并从德国和欧洲的角度推动全球预标准化活动。6G-ANNA 是更大的 “6G 平台德国” 国家计划的一部分, 总交易额为 3840 万欧元, 为期 3 年。

4. 日韩

日本政府发布了 6G 路线图，目标到 2025 年完成 6G 基础技术，到 2030 年实现商用，并争取将 6G 基础设施的全球市场份额提升到约 30%。6G 相关的研究目前散落在一些高校和公司当中，例如，日本广岛大学、日本早稻田大学和日本电气公司（NEC）开展太赫兹 CMOS 低成本器件工艺的研究和实验验证；日本电信运营商 NTT 计划建设一张 6G 试验网络，为 2025 年大阪世界博览会场馆提供服务。NTT 还进行了多次智能超表面（RIS）的实验验证。

日本 Beyond 5G 推进联盟（B5PC）与欧洲 6G 智能网络和服务行业协会（6G-IA）在 2022 年 5 月签署了一份谅解备忘录（MOU），促进在下一代网络方面开展合作。该 MOU 是日本与欧洲 Beyond 5G/6G 相关组织首次签署的 MOU。同时，日本与欧盟达成协议，同意面向 6G 移动通信系统的实用化，实施联合研究。2022 年 6 月，DoCoMo、NTT、富士通和 Nokia 宣布开始合作进行联合 6G 技术试验，进行室内试验，2023 年 3 月进行室外试验。DoCoMo 和 NTT 的这些试验将验证 DoCoMo 和 NTT 迄今为止提出的概念，并将在与 6G 相关的全球研究小组、国际会议和标准化活动中进行报告。日本于 2022 年 6 月第一个向国际电信联盟提交 6G 国际标准提案，旨在掌握主动权，取得早期优势。

韩国政府启动 MSIT 项目，确保移动通信领域领先地位，计划 2028 年在全球第一个实现 6G 商用，争取实现全球第一 6G 核心标准专利，全球第一智能手机市场份额，全球第二设备市场份额。韩国政府在 2022 年 3 月宣布投资 2513 亿韩元，以制定包括 6G、自动驾驶汽车和可再生能源在内的数字化转型和“碳中和”国家标准，加快确保人工智能和 6G 等数字创新。此外，MSIT 运营 6G 战略委员会，从 2021 年开始连续 5 年开发价值 2200 亿韩元的核心技术。2022 年 5 月，韩国 6G 战略委员会与日本 B5PC 召开会议讨论建立合作关系。韩国提议建立互动渠道（举办研讨会和实施联合研发项目等），处理双方 B5G5/6G 战略问题。三星公司设立“三星网络革新中心（SNIC）”，SNIC 负责 5G 和 6G 等新一代移动通信基础技术的研究。三星公司与美国加州大学合作开发 6G 太赫兹原型系统。LG 公司和韩国科学技术院（KAIST）共同设立了 6G 研究中心，致力于执行多样的产学科制。韩国电子通信研究院（ETRI）与芬兰奥卢大学签署了一份谅解备忘录，以开发第六代（6G）网络技术。

5. 国际行业组织

从行业角度，IEEE 有多个针对未来技术方向的工作组，如人工智能、机器学习、中高频段的毫米波通信、卫星通信等。2020 年 7 月，IEEE 通信协会（ComSoc）发出研究智能超表面（RIS）的新兴技术倡议（ETI）。2022 年 7 月，O-RAN 联盟宣布成立下一代研究小组（nGRG），旨在开展有关 O-RAN 和未来 6G 网络的研究。nGRG 将专注于研究 6G 和未来网络标准中的开放和智能 RAN 原则。

ITU 作为联合国旗下的通信标准官方组织，给出了 IMT-2030（6G）的时间表，如图 1-2 所示。需求愿景方面的工作计划在 2023 年 6 月完成，其中的未来技术趋势研究于 2021 年 2 月启动，历经数十轮修改，2022 年 6 月完成撰写工作^[6]，之后一直到 2026 年进行性能指标和评估方法的制定，2027 年至 2030 年是技术标准的提请和评估期，最终批准全球的 6G 标准。

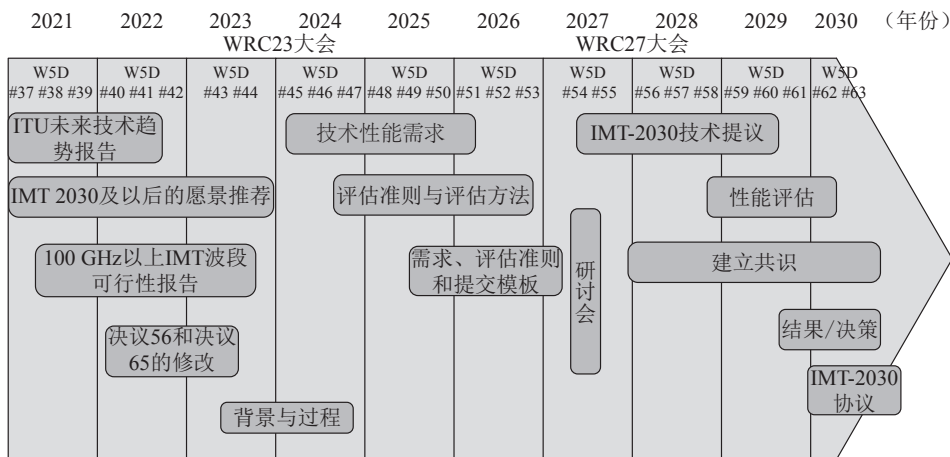


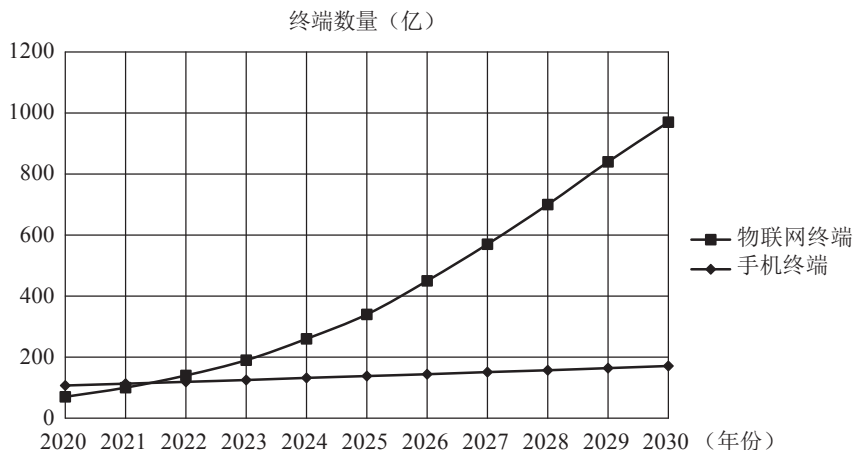
图 1-2 国际电联（ITU）的 IMT-2030（6G）时间表

→ 1.2.2 6G 驱动力、市场预测和发展需求

6G 发展的宏观驱动力大致包含 4 个方面。第一个是经济可持续发展驱动力，体现在人民高品质生活需求、产业数字化转型需求、国际协作全球化需求；第二个是社会可持续发展驱动力，包括社会治理能力现代化需求和公共服务保障均等化需求；第三个是环境可持续发展驱动力，即绿色可持续发展需求和重大突发事件高效应对需求；第四个是技术创新发展驱动力，包括新型无线技术和网络技术、ICDT 融合技术（无线和网络），以及新材料（纳米材料、信息功能材料等）。

根据国际电信联盟的预测^[7]，2030 年移动数据流量将是 2020 年的 100 倍左右。物联网发展前景更是广阔，2030 年物联网终端规模将达到千亿级，如图 1-3 所示。据埃森哲预计，产业物联网到 2030 年有望为全球贡献 14.2 万亿美元的产值。数字化社会转型带来通信感知业务发展机遇，无人机探测、智慧交通等场景需求强烈，市场空间广阔，感知设备数将迎来爆发性增长。随着 6G 感知能力的不断提高，各类应用数量及规模也将不断扩大。在未来，越来越多的个人和家用设备、各种城市传感器、无人驾驶车辆、智能机器人等都将成为新型智能体设备。

网络运营的发展需求体现在以下 7 个方面：①能力极致融合，提供通信、计算、感知等融合的能力体系，满足 6G 需求；②智慧内生泛在，提供无处不在的算力、算法、模型与数据，支撑无处不在的 AI 应用；③网络分布至简，提供即插即用、按需部署的网络功能与服务；④运营孪生自治，实现网络规划 / 建设 / 维护 / 优化的高水平自治，降低网络运营成本；⑤安全内生可信，提供主动免疫、弹性自治、虚实共生、安全泛在的服务能力；⑥全域立体覆盖，空天地海融合覆盖，保证业务无缝体验；⑦生态绿色低碳，实现从网络建设到运行维护等多个环节的节能减排，助力可持续发展。

图 1-3 未来移动数据流量与终端规模预测^[7]

1.2.3 空口技术发展趋势

未来 6G 网络空口技术呈现以下四大发展趋势。

1. 智能化

许多未知或者以前不大容易控制的信道环境及通信过程将会变得更加可控，而且是更加灵活、有效的控制。设计者和运营者通过智能控制，能够更好地驾驭无线信道环境，为多种多样的业务提供良好服务。智能超表面是其中一个例子，借助信息材料的发展，对超表面单元天线进行可控的调幅调相，“主动”地改善电磁波传播环境，而不是被动地顺应。另一个例子是海量终端的随机接入，这个过程本身带有很强的随机性，尽管随机性可以通过基于资源动态调度的正交多址方式彻底消除，但信令开销巨大，有效性差。采用新颖的设计，可以允许随机性带来的一定程度的碰撞，但可保证各个链路的性能，以达到对一个随机过程的有效控制。

未来网络的需求种类繁多、场景丰富，系统设计应该具有足够的灵活性，参数应该具有更多的可选性。这个趋势在 5G 就开始了。例如，对于 OFDM 的子载波间隔，5G NR 针对不同的系统带宽、部署频段，以及业务类型，定义了不同的参数；对于一个无线帧，定义了上百种的下行和上行的时隙配比和组合。这为厂商或系统运营商提供了充分多样的参数选择和广阔的调整范围，以优化系统容量或降低传输时延。

人工智能 / 机器学习 (AI/ML) 从某种意义上是一种高级的统计学，适合解决难以精准测量、建模和分析的问题。移动通信系统的高层协议的很多过程涉及复杂的网络行为，较难通过解析的方法找到明显的规律，因此 AI/ML 可以发挥较大的作用，在实际中已有试点部署。进一步把 AI/ML 应用到无线物理层是目前学术界和产业界的研究热点，这本身非常具有挑战性，因为传统通信系统有完备的数学物理理论体系和精确的建模，即使是随机性很强的移动

通信系统，也有很成熟有效的分析工具（如随机过程、概率论、信息论等）来指导方案的设计。无线物理层的 AI/ML 化会涉及，甚至有可能动摇“移动通信”这个学科的基础，从而导致学科的重塑。AI/ML 在空口中的潜在应用有很多种，相对容易的、对空口协议和硬件实现影响较小的是反馈信令设计、信道估计等。3GPP Rel-18 已经开始对 AI/ML 空口进行研究，主要聚焦于信道状态信息（Channel State Information, CSI）反馈的增强、信道估计用的参考信号的增强等。

2. 协议功能至简

3GPP 作为全球最重要和最主流的移动通信标准制定组织，成员包括了世界范围内众多的公司、企业、科研机构、高校等，在 4G 和 5G 时代制定了种类繁多的功能，3Gpp 标准无疑对全球移动通信产业的发展发挥了十分积极的作用。同时也应看到，正是由于产业链中各类企业的参与和相互之间知识产权利益的竞争，3GPP 在很多情况下为了平衡利益，不得不融合各家的技术方案，标准化不少虽然有用，但在性价比方面并不明显具有优势的非必要附加功能；有时对于同一个应用场景，定义多种功能，每一个功能所涉及的技术方案又很不相同。这样的结果容易造成技术的简单堆砌，增加了协议的复杂度，提高了研发和实现的成本，而对系统性能的提升又不明显，“事倍功半”，也很让运营商感到困惑：到底哪些功能是系统必须具备的？哪些是锦上添花的？回头来看 5G NR 协议，对系统容量提升最起作用的是大规模天线（Massive MIMO）技术，对降低用户面传输时延最有直接作用的是帧结构的设计和 HARQ 时序，对降低控制面传输时延的最有效方式是两步随机接入过程（Two-Step RACH），而对大带宽高速率传输的信道译码最有帮助的是引入 LDPC 码。这些无疑是地面移动通信网络，尤其是 eMBB 和 URLLC 场景最为必要的功能 / 技术。

6G 空口的研究和标准化将会更加着眼于典型应用场景，所聚焦的技术更为先进、具有较好的通用性，并且兼顾实际系统中实现的难度和复杂性。尽量少定义一些系统必备的基本功能，能够较为广泛地应用和部署，形成市场的规模效应。而不少针对特定场景的进一步优化，则留给厂家的具体实现，协议对此不做过分定义，做到标准的“轻装前进”。

3. 充分利用算力

空口技术离不开各种信号或者信息比特处理，从移动通信系统的第一代起，空口物理层技术始终保持高速的发展，以支持更大的带宽、实现更短的传输延时和更海量的用户等。空口的处理能力，尤其是基带的处理速度，增长趋势不逊于、甚至超越半导体行业的摩尔定律。过去的移动通信系统的大量计算资源集中在核心网，相比之下，基站侧的运算能力有限，在整个网络的计算能力中只占很小的一部分。而随着基带处理能力突飞猛进的发展，使得现在在一个基站的计算能力，如果仅从比特处理的速度来看，已经接近或者超过一台中型计算机。而在很多时候，基站的通信负载远未到满荷，如果剩余的计算资源能够被邻区满负荷基站或者网络高层（包括核心网）所利用，将可以很大程度地提高网络 / 基站算力。这点与边缘计算类似，即把原来在核心网 / 应用层的计算 / 处理拿到基站端处理。因此，空口技术的第三大发展趋势是算力的充分利用。

充分利用算力的一个重要前提是算法实现的通用化和虚拟化。通信协议的高层与计算机网络密切相关,大部分处理本身就是在通用的计算处理器上实现的,算力的打通是比较自然和容易的。但在通信协议的底层,如物理层,许多运算处理是各有其自身特点的,例如,有些硬件结构适用于处理快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),而另一些结构适用于高并行的二元域 LDPC 的译码算法,等等。原则上,各种物理层算法都可以通过对通用处理器的灵活软件编程来实现,类似于软件仿真虚拟,但计算效率往往不如专用处理器。5G 时代,一些设备商在基带处理器的选择上,例如是采用可编程处理器(FPGA)还是专用芯片(ASIC),曾有着深刻的经验教训。随着技术的发展,专用计算的通用化和虚拟化是存在可能的。以 AI/ML 为例,其基本模型的种类并不多,算法具有一定的通用性,也有比较成熟的硬件处理器,如 GPU。因此,如果在未来通信中,传统意义的基带算法可以被 AI/ML 代替,那么基带单元的算力与高层节点算力之间的打通也就水到渠成了。

4. 学科交叉

未来移动通信的发展在很大程度上将取决于相关学科领域的突破。材料器件方面,信息超材料技术本身属于材料领域,以前主要用于军事上的电磁隐身。这几年来在超表面材料上的突破极大地促进了基于智能超表面的无线通信研究,材料科学与通信学科的结合为多天线技术带来了范式上的变革;另外一个例子是高频段的通信技术,如太赫兹通信和无线光通信,对材料器件的要求比中低频段要严苛许多,一些关键的通信性能指标直接受限于器件的最大发射功率、能够调制的最大带宽、信号质量、器件噪声等。成本也是一个重要因素,需要器件领域与通信学科一起攻关。

即使都在信息领域,也存在二级学科直接层面的交叉,如通信与感知,在无线领域,传统意义的感知主要是雷达探测。基于特制的收发天线和特殊的波形调制,根据物体反射的回波,采用特殊的信号处理算法,以感知目标物体的方位、距离、速度、形状、材料特性等。这些与传统通信是很不一样的。把通信与感知结合,近两年成为业界的研究热点,尤其是在高频段,感知精度相比低频段有大大提升,也增强了交叉的动力。

1.3 本书的目的和结构

自 2020 年以来,通信业界对 6G 的需求愿景和性能指标需求渐渐有所共识,对无线空口架构和潜在的关键技术也开始深入研究。在这个大背景下,有必要出版一本有关 6G 无线网络潜在关键技术书,从相对宏观的角度,对 6G 无线物理层的技术进行一个较为全面的梳理。

本书的结构如图 1-4 所示,在第 1 章对 6G 的背景进行介绍之后,第 2 章从场景需求和部署频段出发,提出了需求侧的指标要求和可能的频谱资源。第 3 章介绍 6G 无线接入网可能的网络拓扑,如地面通信、卫星通信、宏小区同构网、异构网等。第 4 章对无线物理层的基本功能进行综述,包括移动性管理、无线传输、无线定位等。第 3 章和第 4 章的关系是相辅相成的,无线接入网的网络拓扑在很大程度上决定了无线物理层的基本功能,而无线空口的各

个技术大类又服务于不同的网络拓扑。接下来，本书分别按技术大类进行了相对深入的描述，第5章介绍编码多址波形类技术，包括信道编码与调制、信源信道联合编码、新型多址接入、潜在的新波形等。第6章介绍多天线空域类技术，包括基站/终端多天线技术的增强、智能超表面中继、全息无线电和统计态轨道角动量等。第7章介绍高频段部署类技术，包括太赫兹通信、可见光传输和通信感知一体化。需要指出的是，一些融合性的技术（如AI/ML使能空口）在本书中没有用单独的章节来统一介绍，而是分散在第5章到第7章的相关章节中予以介绍。本书内容安排点面结合，由浅入深，希望能够比较系统地给读者展现6G无线网络潜在关键技术的发展方向。

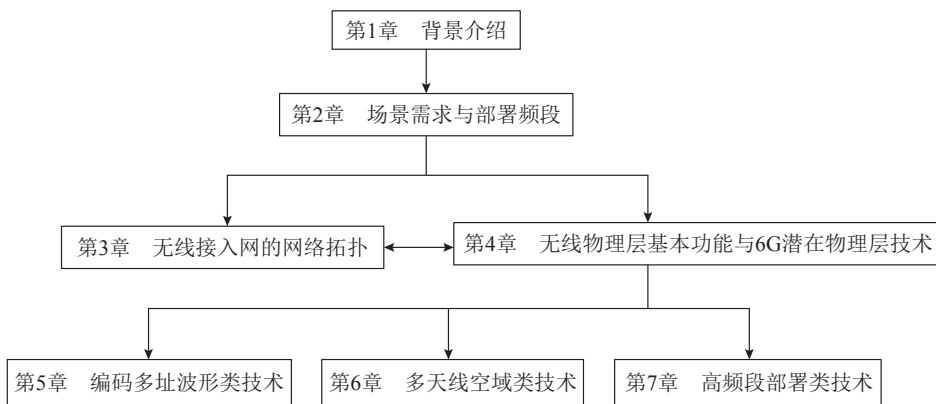


图 1-4 本书的结构

参考文献

- [1] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR 38.913 [S], Sophia antipolis: 3GPP, 2015.
- [2] 3GPP. Study on NR-based access to unlicensed spectrum: TR 38.889 [S], Sophia antipolis: 3GPP, 2018.
- [3] 3GPP. Study on NR Vehicle-to-Everything (V2X): TR 38.885 [S], Sophia antipolis: 3GPP, 2018.
- [4] 3GPP. Study on NR positioning enhancements: TR 38.857 [S], Sophia antipolis: 3GPP, 2018.
- [5] 3GPP. Study on User Equipment (UE) power saving: TR 38.840 [S], Sophia antipolis: 3GPP, 2018.
- [6] ITU-R. IMT future technology trends of terrestrial IMT systems towards 2030 and beyond [R/OL]. (2022-11) [2023-06-13], https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2516-2022-PDF-E.pdf.
- [7] ITU-R. IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030 [R/OL]. (2015-07)[2023-06-13], https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf.