

“信息科学技术学术著作丛书”序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

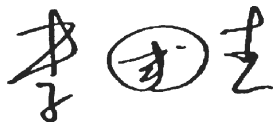
如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的推动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

“信息科学技术学术著作丛书”是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术、数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业、低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性,体现出科学出版社“高层次、高水平、高质量”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

无线电技术是当今发展最迅速、应用最广泛、最引人注目的高新技术之一，包括信号发射技术、信号接收技术、信号传播技术和阵列天线技术等。无线电技术已广泛应用于 5G 通信、卫星通信、工业互联网、车联网、短距通信等领域，深刻改变了人类的工作方式和生活方式，已成为推动国民经济发展、提升社会信息化水平的重要引擎，对促进各行各业的高质量发展、加快推进数字经济具有积极作用。无线通信技术的发展速度更是惊人，几乎以每十年一代的速度向前演进。经过四十多年的发展，移动通信实现了“1G 动起来、2G 用起来、3G 看起来、4G 快起来、5G 联起来”的举世瞩目的成就。5G 通信支撑了增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)、超高可靠性低时延通信(ultra-reliable and low-latency communication, uRLLC)和大规模机器类型通信(massive machine-type communications, mMTC)三大应用场景，并在传统通信的用户体验和垂直行业两个维度上得到了发展和应用，推动了移动互联向万物互联的跃迁。

人类社会即将全面进入智能化时代，社会服务均衡化、高端化，社会治理科学化、精准化，社会发展绿色化、节能化的需求日益迫切。随着 5G 通信的规模化商用，全球业界已经开启了 6G 通信的研究探索，预期在毫米波和太赫兹频段上突破超宽带、高速移动、超高可靠性、极低时延和多种无线接入等关键技术，实现“空、天、地、海”一体化无缝覆盖通信，满足更加丰富的沉浸化、智慧化和全域化业务应用场景的需求，推动万物互联向万物智联的跃迁。在智能化演进方面，智赋万物、智慧内生将成为 6G 通信的重要特征，人工智能与通信技术的深度融合，将引发网络信息技术的全方位创新。另外，卫星互联网、工业互联网、车联网等融合新一代信息通信技术的新型基础设施是数字经济发展的重点产业，全球业界都聚焦于基础设施与融合应用，积极开展规划和布局，强化技术创新引领和重点工程的实施。

为了把握未来科技发展的新机遇和新挑战，本书参考无线通信领域的大量论文和专利资料，从时域和频域的角度出发，对 5G 通信、工业互联网、车联网和卫星通信等系统的工作原理、信号基本特性、测试与仪器等进行深入分析和讨论，以期为从事无线通信系统研究和开发的工程技术人员、高等院校本科生和研究生提供参考。

本书的第 1 章为无线电业务与频谱管理，主要介绍无线电业务和无线电频谱

资源管理；第2章是信号时域分析，主要介绍信号与运算基础、采样定理、采样方式、信号盲检和信号同步等基础知识；第3章是信号频域分析，主要介绍傅里叶变换、拉普拉斯变换、Z变换，同时介绍频域测量仪器基本原理与性能参数；第4章是信号调制与解调技术，介绍幅移键控、频移键控、相移键控和正交幅度调制与解调等常用数字调制信号的基本理论以及调制与解调方法等基础知识；第5章是5G信号发生与分析，主要介绍5G通信频谱规划与信号特征、5G新空口信号发生与分析技术、5G测试技术与仪器等的基本原理、测试仪器核心技术和实现方法；第6章是工业互联网信号分析，主要介绍工业互联网业务及频谱资源、窄带物联网/长距离无线电/无线保真(Wi-Fi)/蓝牙(Bluetooth)/ZigBee/星闪信号的时域和频谱分析，以及工业互联网测试技术与仪器；第7章是车联网信号分析，主要介绍车联网业务及频谱资源、车联网信号时域分析、车联网信号频域分析、车联网信号生成与解析，以及车联网通信测试技术；第8章是卫星通信信号发生与分析，主要介绍DVB-S2X通信信号发生与分析、5G非地面网络通信信号发生与分析、卫星通信测试等；第9章是空口信号测试技术，主要介绍微波/毫米波空中激活测试技术与系统方案、空口信令测试技术、通信外场清频测试技术、无线通信网络优化测试技术等。

本书的撰写工作由刘祖深、钱肇钧、凌云志、徐波、张煜、王华华、铁奎、许虎、陈发堂、黄武、徐兰天和唐洪军等共同完成。全书由刘祖深整体规划和统筹组稿，把控内容质量，润色文字表述，修正逻辑瑕疵。第1章由钱肇钧和黄武撰写，第2章和第3章由刘祖深撰写，第4章由徐兰天撰写，第5章由许虎和陈发堂撰写，第6章由徐波和张煜撰写，第7章由许虎和王华华撰写，第8章由铁奎和唐洪军撰写，第9章由凌云志撰写。参与本书撰写、修改、制图等工作的还有孙昊、王嘉嘉、周建烨、周保奎、刘小刚、刘龙、刘永康、赵正洋、徐俊、张献澍、裴一峰、胡政权和李明福等，在此表示衷心的感谢！

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2024年12月

目 录

“信息科学技术学术著作丛书”序

前言

第 1 章	无线电业务与频谱管理	1
1.1	无线电业务介绍	1
1.1.1	5G/6G 通信业务	3
1.1.2	工业互联网通信业务	11
1.1.3	车联网通信业务	15
1.1.4	卫星通信业务	23
1.2	无线电频谱资源管理	36
1.2.1	无线电频谱资源管理概念	36
1.2.2	无线电频谱资源管理现状	41
1.2.3	无线电频谱资源管理机制	43
第 2 章	信号时域分析	45
2.1	信号与运算基础	45
2.1.1	常用函数	45
2.1.2	离散时间信号	54
2.1.3	信号差分与累加运算	56
2.1.4	卷积运算	57
2.2	采样定理	60
2.2.1	奈奎斯特采样定理	60
2.2.2	窄带采样定理	62
2.3	采样方式	64
2.3.1	实时采样	64
2.3.2	随机采样	65
2.3.3	顺序采样	65
2.3.4	非均匀采样	65
2.3.5	过采样	66
2.4	信号盲检	66
2.4.1	信号盲检概念与常用方法	67

2.4.2	物理下行链路控制信道盲检基本概念	71
2.4.3	3GPP 中盲检参数的定义	73
2.4.4	物理下行链路控制信道盲检流程	74
2.5	信号同步	75
2.5.1	载波同步	75
2.5.2	帧同步	77
2.5.3	码元/符号/位同步	84
2.5.4	5G 新空口同步技术与实现	88
2.6	MATLAB 常用函数	97
第 3 章	信号频域分析	101
3.1	傅里叶变换	101
3.1.1	傅里叶级数与傅里叶变换	101
3.1.2	离散傅里叶变换	103
3.1.3	快速傅里叶变换	111
3.2	拉普拉斯变换	113
3.3	Z 变换	116
3.4	频域测量仪器基本原理与性能参数	119
3.4.1	频谱分析仪基本原理和技术指标	120
3.4.2	矢量信号分析仪基本原理和技术指标	124
3.5	MATLAB 常用函数	128
3.5.1	MATLAB 常用频域函数简介	128
3.5.2	常用函数的仿真分析	131
第 4 章	信号调制与解调技术	140
4.1	信号调制与解调基础	140
4.1.1	基带信号与频带信号	140
4.1.2	模拟调制与数字调制	141
4.1.3	数字调制信号的传输	142
4.1.4	数字调制的应用	143
4.2	调制与解调基本参数	144
4.2.1	比特率与码元速率	145
4.2.2	数字信号的质量分析参数	145
4.3	幅移键控调制与解调	149
4.3.1	幅移键控调制	149
4.3.2	幅移键控解调	153
4.4	频移键控调制与解调	156

4.4.1	频移键控调制	156
4.4.2	频移键控解调	161
4.5	相移键控调制与解调	165
4.5.1	相移键控调制	165
4.5.2	相移键控解调	169
4.6	正交幅度调制与解调	172
4.6.1	正交幅度调制	172
4.6.2	正交幅度解调	175
4.7	振幅和相位键控调制与解调	179
4.7.1	振幅和相位键控调制	179
4.7.2	振幅和相位键控解调	182
4.8	正交频分复用调制与解调	185
4.8.1	正交频分复用调制	185
4.8.2	正交频分复用解调	188
4.9	MATLAB 常用函数	192
4.9.1	幅移键控调制与解调函数	192
4.9.2	频移键控调制与解调函数	195
4.9.3	相移键控调制与解调函数	198
4.9.4	正交幅度调制与解调函数	201
4.9.5	振幅和相位键控调制与解调函数	204
4.9.6	正交频分复用调制与解调函数	207
第 5 章	5G 信号发生与分析	213
5.1	5G 通信频谱规划与信号特征	213
5.1.1	5G 通信频谱规划	213
5.1.2	典型应用场景	215
5.1.3	5G 标准演进	215
5.1.4	5G 信号特征	219
5.2	5G NR 信号发生与分析技术	222
5.2.1	5G 帧结构与物理信道	222
5.2.2	5G 信道编码	228
5.2.3	5G 信道模型与估计	230
5.2.4	大规模天线阵列技术	233
5.2.5	5G 基带调制与解调	236
5.3	5G 测试技术与仪器	246
5.3.1	5G 测试概述	246

5.3.2	基站测试仪	249
5.3.3	终端综测仪	255
5.3.4	外场测试仪	259
第 6 章	工业互联网信号分析	262
6.1	工业互联网业务及频谱资源	262
6.1.1	工业互联网的关键技术	262
6.1.2	工业互联网的无线通信技术	264
6.1.3	工业互联网的频谱资源	265
6.2	工业互联网信号时域分析	266
6.2.1	NB-IoT 信号时域分析	266
6.2.2	LoRa 信号时域分析	270
6.2.3	Wi-Fi 信号时域分析	272
6.2.4	蓝牙信号时域分析	277
6.2.5	ZigBee 信号时域分析	281
6.2.6	NearLink 信号时域分析	284
6.3	工业互联网信号频域分析	290
6.3.1	NB-IoT 信号频域分析	290
6.3.2	LoRa 信号频域分析	291
6.3.3	Wi-Fi 信号频域分析	293
6.3.4	蓝牙信号频域分析	295
6.3.5	ZigBee 信号频域分析	299
6.3.6	NearLink 信号频域分析	301
6.4	工业互联网信号调制分析	302
6.4.1	NB-IoT 信号调制分析	302
6.4.2	LoRa 信号调制分析	305
6.4.3	Wi-Fi 信号调制分析	308
6.4.4	蓝牙信号调制分析	312
6.4.5	ZigBee 信号调制分析	314
6.4.6	NearLink 信号调制分析	316
6.5	工业互联网测试技术与仪器	320
6.5.1	信号源	320
6.5.2	信号分析仪	325
6.5.3	网络测试仪	332
6.5.4	基于无线通信协议的 VSG 与 VSA 测试软件	338

第 7 章 车联网信号分析	344
7.1 车联网业务及发展	345
7.1.1 车联网业务	345
7.1.2 车联网频谱资源	346
7.1.3 车联网发展趋势	347
7.2 车联网信号时域分析	350
7.2.1 LTE-V2X 信号时域分析	350
7.2.2 NR-V2X 信号时域分析	351
7.3 车联网信号频域分析	353
7.3.1 LTE-V2X 信号频域分析	353
7.3.2 NR-V2X 信号频域分析	355
7.4 车联网信号生成与解析	359
7.4.1 LTE-V2X 信号生成流程	359
7.4.2 NR-V2X 信号生成流程	363
7.4.3 LTE-V2X 信号解析流程	364
7.4.4 NR-V2X 信号解析流程	369
7.5 车联网通信测试技术	371
7.5.1 V2X T-Box 终端综合测试	373
7.5.2 V2X 射频一致性测试	376
7.5.3 V2X 协议一致性测试	379
7.5.4 V2X 通信链路性能测试	382
7.5.5 V2X 通信综合测试	385
第 8 章 卫星通信信号发生与分析	387
8.1 DVB-S2X 通信信号发生与分析	387
8.1.1 DVB-S2X 发展概述	387
8.1.2 DVB-S2X 技术特点	393
8.1.3 DVB-S2X 通信信号发生	395
8.1.4 DVB-S2X 通信信号分析	401
8.2 5G NTN 通信信号发生与分析	405
8.2.1 5G NTN 发展概述	406
8.2.2 5G NTN 技术特点	409
8.2.3 5G NTN 信号调制与解调	415
8.2.4 5G NTN 通信时频特征及补偿	422
8.3 卫星通信测试	431
8.3.1 卫星终端测试	431

8.3.2 卫星载荷测试	438
第 9 章 空口信号测试技术	442
9.1 微波/毫米波 OTA 测试技术与系统方案	442
9.1.1 概述	443
9.1.2 微波/毫米波 OTA 测试技术	444
9.1.3 微波/毫米波 OTA 测试系统方案	448
9.1.4 毫米波 OTA 测试系统测试验证	457
9.2 空口信令测试技术	460
9.2.1 空口测试整体架构	460
9.2.2 空口协议	462
9.2.3 空口信令分析	467
9.2.4 空口信令测试验证	469
9.3 通信外场清频测试技术	471
9.3.1 清频测试主要功能和应用场景	472
9.3.2 通信外场清频测试核心算法	473
9.3.3 通信外场清频测试技术方案	482
9.3.4 通信外场清频测试验证	487
9.4 无线通信网络优化测试技术	490
9.4.1 概述	491
9.4.2 通信路测主要测试方法	491
9.4.3 通信路测关键技术	495
9.4.4 通信路测仪设计方案	497
9.4.5 通信路测验证	499
参考文献	504

第 1 章 无线电业务与频谱管理

19 世纪末,意大利的马可尼和俄国的波波夫分别利用电磁波传输电报码的实验获得成功之后,无线电技术已经过一百多年的不断完善和发展。在军事应用方面,无线电技术从早期的利用简易通信装备,如莫尔斯电码打字机传输信息,逐步实现了数字化、网络化、集成化、自动化和智能化,成为军队战斗力的重要组成部分。在民用方面,移动通信是无线通信技术应用最广泛的领域之一,在航空航天、智能家居、交通运输等领域,无线通信技术也发挥着重要作用,成为现代社会不可或缺的一部分。

无线电频谱资源是一种在一定条件下可以重复利用的、不可消耗的人类共享的宝贵资源,然而,无线电频谱资源是有限的,尤其是在经济与社会高速发展带来的对无线电业务的海量需求下,其供求矛盾更加突出。无线电频谱资源就像土地、水、矿藏等,是人类共享的有限自然资源,是经济和社会可持续发展的重要战略资源,具有非耗竭性、不可替代性和可复用性等特点。尽管无线电频谱可以通过时间、空间、频率复用等方式进行利用,但某一频段或频率在特定区域、时间和条件下的利用也是有限的。为了保障无线电频谱资源的有效利用和管理,需要政府、企业和公众共同努力,加强科学研究和技术创新,推动无线电频谱资源的科学、合理与高效利用,同时加强国际合作和法律法规建设。

1.1 无线电业务介绍

经过百余年的不断发展,无线电业务的种类日益增多,各种新的业务不断涌现。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)颁布的《无线电规则》定义了 42 项无线电业务,我国颁布的《中华人民共和国无线电频率划分规定》根据实际情况增列了一种,定义了 43 项无线电业务。一些主要无线电业务的分类和简要概述如下。

(1) 无线电通信业务(radio communication service): 涉及各种电信用途的无线电波的传输、发射和/或接收,通常是指地面无线电通信。

(2) 固定业务(fixed service): 指定的固定地点之间的无线电通信业务,如电话通信、数据传输等。

(3) 卫星固定业务(fixed-satellite service): 利用一个或多个卫星在处于给定位

置的地球站之间的无线电通信业务,包括卫星电话、卫星互联网等。

(4) 移动业务(mobile service): 移动电台与陆地电台或者移动电台与移动电台之间的无线电通信业务,如手机通信、车载通信等。

(5) 卫星移动业务(mobile-satellite service): 在移动地球站与一个或多个空间电台之间的无线电通信业务,如海事卫星电话、航空通信等。

(6) 陆地移动业务(land mobile service): 基地电台与陆地移动电台或者陆地移动电台与陆地移动电台之间的移动业务,如公安、消防、出租车等的无线通信。

(7) 水上移动业务(maritime mobile service): 海岸电台与船舶电台或者船舶电台与船舶电台之间的无线电通信业务,这关系到船舶的航行安全、救援通信等。

(8) 航空移动业务(aeronautical mobile service): 航空电台与航空器电台或者航空器电台与航空器电台之间的无线电通信业务,以确保航班的通信安全。

(9) 卫星无线电导航业务(radionavigation-satellite service): 用于无线电导航的卫星无线电测定业务,如全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星定位系统等。

(10) 广播业务(broadcasting service): 供公众直接接收而进行发射的无线电通信业务,包括声音信号、电视信号或其他方式的发射。

以上无线电业务涵盖了从地面通信到卫星通信、从固定通信到移动通信等领域,为现代社会的信息传递、通信安全和导航定位等方面提供了重要支持。随着技术的发展,无线电业务的应用领域还将继续扩大和深化。除上述业务分类之外,还有航空固定业务、空间操作业务、气象辅助业务、卫星地球探测业务、卫星气象业务、标准频率和时间信号业务、卫星标准频率和时间信号业务、空间研究业务、业余业务、卫星业余业务、射电天文业务、安全业务、特别业务等,感兴趣的读者可以查阅《无线电规则》和《中华人民共和国无线电频率划分规定》。

目前,我国的无线电业务已经广泛应用于通信、广播电视、公共安全、铁路、交通、航空、航天、气象、渔业、科研和国防等多个行业和部门,渗透到经济、政治、文化、科技等各个领域,并在经济建设和国防建设中发挥着越来越重要的作用。随着无线电技术的飞速发展,各项无线电业务在我国得到了广泛应用,同时对无线电从业者和无线电管理工作提出了更高要求。

从上述无线电业务划分中可以看出,各种业务形成了多重的技术交叉,随着现代无线电技术的发展,已很难分清某单一技术可归类于上述业务中的哪一类,如通信技术、导航技术、定位技术等已很难区分是移动通信业务还是卫星通信业务,而与两者紧密联系的通导一体化业务和通感一体化业务正成为时下研究的热门领域。因此,本章主要基于目前无线电领域的发展趋势和热点应用,一是介绍当下技术趋于成熟且正走向各类行业垂直应用的第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G),以及正处于概念形成及关键技

术研究阶段的第六代移动通信技术(6th generation mobile communication technology, 6G),并介绍了基于5G和6G的通信业务;二是介绍新一代信息通信技术与现代工业技术深度融合的工业互联网业务;三是介绍汽车、电子、信息通信、道路交通运输等行业深度融合的车联网通信业务;四是介绍随着低地球轨道卫星的应用而引发新一轮技术竞争的卫星通信业务。上述四种业务是当下全球范围内的主要技术研究热点和发展方向。其中,5G业务已经规模化应用,并将结合卫星通信业务向6G业务发展;工业互联网和车联网业务都是基于现代通信技术的发展而产生的新型业务;卫星通信业务所含种类较多,本章主要介绍基于卫星移动通信业务中的低地球轨道卫星、中地球轨道卫星和地球静止轨道卫星通信业务;同时,本章还介绍国内外无线电频谱资源管理的现状,讨论如何管理好无线电频谱资源,以提高资源利用率。

1.1.1 5G/6G 通信业务

1. 5G/6G 通信概述

5G是面向2020年以后的移动通信需求而发展出来的新一代移动通信系统。相较于4G通信,5G具有超高的频谱利用率和能效,在传输速率和资源利用率等方面较4G提高了一个量级或更高,其无线电覆盖性能、传输时延、系统安全和用户体验也得到了显著提高。5G将与其他无线通信技术密切结合,构成新一代无所不在的移动信息网络。5G系统的应用领域也将进一步扩展,对海量传感设备及机器与机器(machine to machine, M2M)通信的支撑能力将成为系统设计的重要指标之一。随着新标准、新技术的不断完善,未来5G系统还需具备充分的灵活性,具有网络自感知、自调整等智能化能力,以应对未来移动信息社会难以预计的快速变化。

2013年初,欧洲联盟在第7框架计划中启动了面向5G研发的METIS项目,由29个参与方共同承担。韩国和中国的研究人员分别成立了5G技术论坛和国际移动通信-2020(International Mobile Telecommunications-2020, IMT-2020)(5G)推进组。我国863计划针对5G技术和应用启动了一批重大项目研发课题。5G通信技术迅速成为国内外移动通信领域的研究热点。2019年6月6日,中华人民共和国工业和信息化部(工信部)向中国电信集团有限公司、中国移动通信集团有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国广播电视网络有限公司发放5G牌照,中国正式进入5G商用元年。经过几年的发展,截至2023年12月,在5G网络部署方面,我国累计完成5G基站建设337.7万个。在终端接入方面,我国5G移动电话用户数达8.05亿。我国已经成为全球最大的5G用户市场。国内5G套餐用户总数达到13.74亿。中国信息通信研究院发布的《中国5G发展和经济社会影响白

皮书(2023 年)》表明,2023 年 5G 将直接带动经济总产出 1.86 万亿元,直接带动经济增加值约 5512 亿元,分别比 2022 年增长 29%和 41%;间接带动总产出约 4.24 万亿元,间接带动经济增加值约 1.55 万亿元,分别比 2022 年增长 22%和 22%。这标志着 5G 技术真正进入社会民众的生活场景,人们正享受着 5G 技术带来的红利。

随着 5G 通信的规模商用,全球业界开启了 6G 通信的研究探索。6G 是第六代移动通信技术的简称,它面向 2030 年及未来人类社会进入智能化时代,适应于社会服务均衡化和高端化、社会治理科学化和精准化、社会发展绿色化和节能化等未来社会的发展需求。6G 是由各种应用程序和支撑技术驱动的,在毫米波和太赫兹频段上实现宽带、移动、可靠、低时延通信以及移动性管理,完成创新型“空、天、地、海”一体化通信,实现移动互联到万物互联,再到万物智联。2022 年 11 月,IMT-2030(6G)推进组在《6G 前沿关键技术研究报告》中给出了 6G 关键性能指标描述,主要包含体验速率、峰值速率、流量密度、时延、同步和抖动、连接数密度、移动性、可靠性、覆盖、感知精度、定位精度、人工智能(artificial intelligence, AI)服务精度等。未来 6G 网络需要具备比 5G 更高的性能,支持每秒几吉比特至几十吉比特的用户体验速率,万至上亿的连接数密度,毫秒甚至亚毫秒级的空中接口(简称空口)时延,0.1 吉比特每平方米至数十吉比特每平方米的流量密度,1000 千米每小时以上的移动性,数百比特每秒乃至太比特每秒的峰值速率。以上指标在原有 5G 的基础上将实现 10~100 倍的提升。此外,6G 还进一步扩展了新的能力范畴,将需要支持微米级的抖动,覆盖范围也扩展至“空、天、地、海”的全球覆盖,具备厘米级的感知精度和定位精度,人工智能的服务精度和效率也将达到 90%。

国际电信联盟在 2020 年初的第 34 次国际电信联盟无线电通信部门 5D 工作组会议上,正式启动了 6G 研究工作,并初步形成了 6G 研究时间表和《未来技术趋势研究报告》撰写计划。5D 工作组于 2022 年 6 月完成了《未来技术趋势研究报告》的撰写,为 6G 研究方向的明确奠定了基础。第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)于 2019 年公布了 6G 标准化时间表,预计将在 2025~2030 年进行 6G 技术的标准化。我国早在 2019 年就建立了完备的 6G 推进组织,由工信部牵头成立中国 IMT-2030(6G)推进组,为行业搭建产学研用平台,加强国际合作交流和技术研发,并于 2022 年和 2023 年分别推出《6G 前沿关键技术研究报告》和《6G 前沿关键技术研究报告(网络技术领域)》。《6G 前沿关键技术研究报告》提出了 6G 概念,明确了 6G 发展的驱动力,提炼形成了 6G 典型应用场景及关键能力指标体系,同时,还从技术定义、研究现状、面临挑战及未来研究方向等几个方面进行了关键要素分析,并对重点技术方向做出研判。在重点技术方向的研判方面,围绕 6G 网络,对架构类技术、组网类技术、网络性能

提升技术、网络服务能力拓展技术等四大类的 12 个前沿技术进行分析,为产业界、学术界从事 6G 相关工作提供了重要参考。

总之,6G 技术不但在传统通信技术的基础上将先进计算、大数据、区块链等先进的信息技术融入其技术体系,而且在频段上发展到太赫兹和可见光通信,更是在人工智能、通感一体化、通导一体化、普惠智能等跨行业技术上实现了深度融合,可以预见,未来 6G 网络将实现地面网络和卫星通信网络的高度融合,并支撑工业互联网、车联网实现泛在互联,真正实现“空、天、地”一体化的全球无缝覆盖,随时随地满足安全可靠的“人、机、物”无限连接需求,并通过人工智能、算力网等新技术应用实现万物智联愿景。

2. 5G/6G 标准发展

3GPP 组织于 2018 年 6 月批准 5G 新空口(new radio, NR)通信标准,正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术成为全球标准,5G 标准形成 Release 15 版本。5G NR 支持各种 5G 装置、服务、部署与频段。Release15 5G 接入网主要包括非独立组网(non-standalone, NSA)和独立组网(standalone, SA)两个选项。Release15 是 5G 第一版可商用的标准,为了满足部分运营商的先发需求,分成 3 个版本先后完成:Release15 NR NSA、Release15 NR SA 和 Release15 late drop。其中,在 2017 年 12 月完成 Release15 NR NSA 版本,2018 年 6 月完成 Release15 NR SA 版本,Release15 late drop 于 2019 年 7 月完成冻结。Release15 标准冻结是 5G 技术发展的重要里程碑,它标志着 5G 技术从研究阶段进入商用阶段,为 5G 网络的部署和应用提供了统一的技术规范和标准。同时,Release15 标准的发布也将推动 5G 产业的快速发展和社会的数字化转型。

Release15 标准定义了 5G 网络的核心技术和关键性能,包括网络架构、空口、频谱分配、安全性和可靠性等方面。同时,Release15 标准还针对不同业务和应用场景,制定了相应的技术规范,为 5G 网络的灵活性和可扩展性提供了有力支持。Release15 的研究重点包括以下两方面。

(1) 5G 系统部分:主要完成网络切片、接入、移动管理和服务质量(quality of service, QoS)框架等。

(2) 5G NR 接入部分:5G 无线接入,主要针对增强型移动宽带(enhance mobile broadband, eMBB)和超高可靠性低时延通信(ultra reliable & low latency communication, uRLLC)场景。

Release16 标准于 2020 年 7 月冻结,标志着 5G 标准第一个演进版本完成。Release16 标准提升了功能,包括针对垂直产业应用扩增、系统架构上持续演进、多接口与人工智能功能加入,以适应多种应用场景 SA 架构版本。Release16 标准在增强型移动宽带能力和基础网络架构能力提升的同时强化了对垂直产业应用的

支持,其涵盖载波聚合大频宽增强、提升多天线技术、终端节能、定位应用、增加服务化架构、智慧化营运、5G 车联网、uRLLC 服务、切片安全、5G 蜂窝物联网(cellular internet of things, CIoT)安全、uRLLC 安全等议题。

Release17 标准于 2020 年 12 月开始规范制定,当时计划于 2021 年 6 月冻结,后来 Release17 标准冻结时间推迟,2022 年 6 月完成版本协议代码冻结。Release17 针对现有架构和功能持续演进,提升了边缘运算(edge computing)、多媒体广播多播业务(multimedia broadcast multicast services, MBMS)、近距离通信增强等功能,以满足各种场景的应用需求。

2021 年 4 月,3GPP 正式确定 5G-Advanced(5G-A)为 5G 演进标准名称,5G-A 被认为是 5G 向 6G 演进的中间阶段。Release18 为 5G-A 首个重要版本。随着 Release18 首批课题成功立项,5G-A 的标准化工作正式启程,内容包括 5G-A 下行链路和上行链路多进多出(multiple input multiple output, MIMO)演进、用于 NR 的 AI 或机器学习(machine intelligence, MI)、网络节能、NR 覆盖率增强等(梁雪梅等, 2024)。

3GPP 预计 2027 年将进入 Release19 和 Release20 标准化阶段,是 6G 频谱和性能的研究阶段;2027~2029 年,即 3GPP Release21 标准化阶段,是各国向国际电信联盟提交 6G 评估结果的阶段。2025 年开始 6G 标准制定,并最快在 2026~2027 年,即 Release20 标准化窗口完成 6G 空口标准技术规范制定工作,并于 2029~2030 年,即 3GPP Release22 标准化阶段向国际电信联盟提交 3GPP 6G 标准。预计 5G/6G 将继续在移动宽带、固定无线接入、工业物联网、车联网、扩展现实(extended reality, XR)、大规模机器通信、无人机与卫星接入等用例进行空口协议演进与增强,并研究和制定更高频段,如 52.6~71GHz 和太赫兹频段的相关标准。另外,6G 通信标准的服务范围将从陆地扩展到卫星、海底、地下,真正实现“空、天、地、海”一体化通信。对工业物联网等垂直行业,蜂窝窄带物联网、面向可穿戴与视频监控等中档终端、接入与回传集成演进、5G 直传空口及其演进功能、5G 非许可频段空口、定位增强、智能自组织网络、通信传感集成及其演进功能、网络拓扑增强功能等标准研究工作也将继续进行且日渐成熟,其中一些研究工作已经在 3GPP SA1/SA2 等工作组开展。

3. 5G/6G 应用场景

在国际电信联盟无线电通信部门第五研究组 5D 工作组(International Telecommunication Union-Radio Communication Sector, Working Party 5D, ITU-R WP5D)确定了 5G 应具有的三大类应用情景:eMBB、uRLLC 和大规模机器类型通信(massive machine-type communication, mMTC),前者侧重于移动通信,后两者则侧重于物联网,具体包括移动宽带数据接入、智慧家庭、智能建筑、语音通

话、智慧城市、三维立体视频、超高清晰度视频、云工作、云娱乐、增强现实、行业自动化、紧急任务应用、自动驾驶汽车等。

eMBB 是 4G 时代移动宽带化的延续,也是最早实现商用的 5G 场景。eMBB 的应用前景最为清晰,它将满足用户对高数据速率、高移动性的业务需求。同时,运营商也将打破 4G 时代的业务场景、终端模式的边界,引入如 4K/8K 超高清视频、虚拟现实和增强现实、云服务等新业务,广泛应用于融合传媒、智慧教育、智慧旅游和智能安防等领域,成为 5G 的基础业务应用。

uRLLC 是 5G 区别于 2G/3G/4G 通信网络的一个典型场景,也是移动通信行业切入垂直行业的一个重要突破,成为多产业融合的信息化革命的推手,广泛应用于智能网联汽车、智能制造、智慧电力、智慧医疗等领域。这类应用对传输网时延性能要求比较高,为 1~4ms。这一要求对网络架构的影响较大。

mMTC 是 5G 三大应用场景中面向物联网业务的场景,对网络感知实时性要求低,但对终端密集程度要求高。mMTC 延续现有的窄带物联网(narrow band-internet of things, NB-IoT)/增强机器类通信(enhanced machine-type communication, eMTC)物联网云平台,结合传感资产标识类信息、状态开关类信息以及数字传感类终端的发展,将承载更密集海量机器类通信。物联网应用将渗透到人们的居住、工作、休闲、交通等各个领域,典型应用场景包括基于园区的智慧安防、资产/人员管理、楼宇管理等,以及基于城市的市政管理、环境管理、物流、农业等。

6G 的应用场景在 5G 三大应用场景(eMBB、uRLLC、mMTC)的基础上,增加了态势感知、人工智能和虚拟现实等新应用,已经扩展为沉浸式通信、超大规模连接、感知与通信的融合、泛在连接、人工智能与通信的融合、超可靠低时延通信等六大应用场景,如图 1.1 所示。

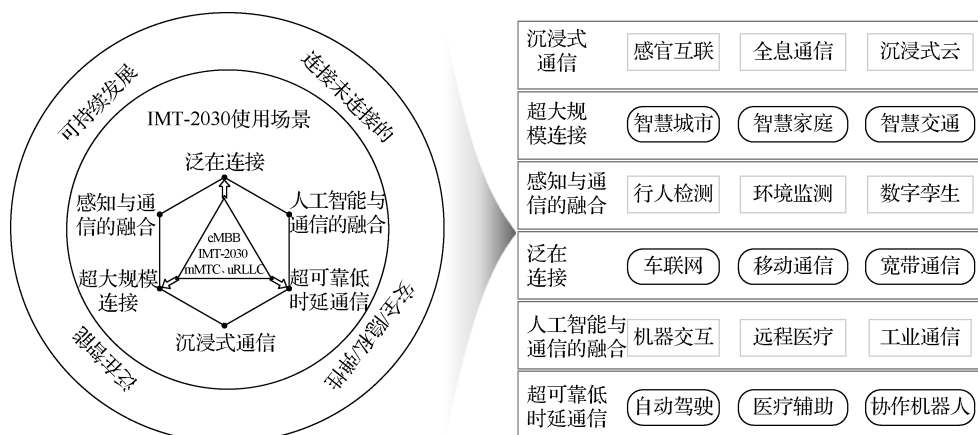


图 1.1 6G 通信六大应用场景

4. 5G/6G 组网架构

3GPP 提出了多种 5G 与 4G 互操作方案,选择取决于建网时间、业务体验、业务能力、终端产业链、组网复杂度等情况。目前,5G 的组网形式有 NSA 和 SA 两种形式,5G NSA 规格标准出现较早,于 2017 年下半年大致形成,且核心网络依靠现有的长期演进(long term evolution, LTE)设施,布建复杂度比 SA 低,因此其终端产品推出的速度亦会快许多。支持 NSA 架构的 5G 终端虽成熟,但在设计上更具挑战性,在射频器件上成本更高。5G 采用 SA 架构的优势是部署成本低、业务时延小、控制信令不需要通过 4G 传输。网络建设初期,NSA 与 SA 会共存一段时间,在 NSA 架构下,5G 终端需同时接入 4G 网络,因此需要支持 4G 和 5G 网络双连接,在顾及不同频段时,双连接终端在射频设计上会变得复杂。另外,在多个频段上同时传输信号会造成交调谐波干扰,从而影响终端性能,同时影响上下行速率和覆盖能力等。随着各国陆续完成 5G 频谱竞标,低频覆盖率有所提升,NSA 组网架构也将逐渐转至 SA 组网架构。在 NSA 架构下,不能支持移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)与网络切片,无论是在敏捷性、网络时延方面还是服务可靠性方面,都不如 SA 架构。

对于 5G 网络架构,在 3GPP 技术规范组-无线接入网(Technology Specification Group-Radio Access Network, TSG-RAN)第 72 次全体大会上,提出了 8 个选项,5G 网络组网架构如图 1.2 所示,其中选项 1/2/5/6 为独立组网方式,选项 3/4/7/8 为非独立组网方式。

选项 1:目前 LTE 的组网方式,5G 的部署以此为基础。

选项 2:纯 5G 网络,完全由 5G 基站 gNodeB(gNB)和 5G 核心网(next generation core, NGC)组成,需要完全替代 LTE 系统的基站和核心网,同时还要保证覆盖和移动性等,部署耗资较大,很难一步完成,是 5G 网络部署的终极目标之一。

选项 3:EPC+eNB(主)/gNB 的方式组网(其中,EPC 为演进分组核心(evolved packet core),eNB 为进化节点 B(evolved node B)),网络首先演进无线接入网,核心网使用 LTE,场景以 eNB 为主基站,控制面信令由 eNB 转发,LTE eNB 和 NR gNB 采用双连接的方式为用户提供高传输数据速率服务,可以有效降低初期的部署成本,主要是前期部署在热点区域,以增加系统吞吐量。

选项 4:NGC+eNB/gNB(主)的方式组网,同时引入 NGC 和 gNB,与 LTE 采取兼容的方式部署,核心网采用 5G NGC,eNB 和 gNB 都连接至 NGC,基站以 gNB 为主,同样是采用双连接的方式为用户提供高速率数据服务,LTE 网络负责保证覆盖,5G 系统负责提高热点地区的数据吞吐量。

选项 5:NGC+eNB 的混搭组网方式,主要应用在首先部署了 5G 核心网,并在 NGC 中实现了核心分组网演进功能,之后再逐步部署 5G 无线接入网的场景。

选项 6: EPC+gNB 混搭组网方式, 主要应用于先部署了 5G 接入网, 暂时采用 EPC 的场景, 这种部署方式不能完全将 5G 的功能发挥出来, 如网络切片等。

选项 7: NGC+eNB(主)/gNB 的组网方式, 这种方式中虽然完整部署了 5G NGC 和 gNB, 但数量较少, 仍以 LTE 中的 eNB 为主, 控制面信令都由 eNB 转发, eNB 和 gNB 采用双连接的方式为用户提供高速率数据服务。

选项 8: EPC+eNB/gNB 的组网方式, 运用 5G 基站将控制信令和用户面数据传输至 4G 核心网, 这种方式需要对 4G 核心网进行改造, 成本较高, 难度较大。

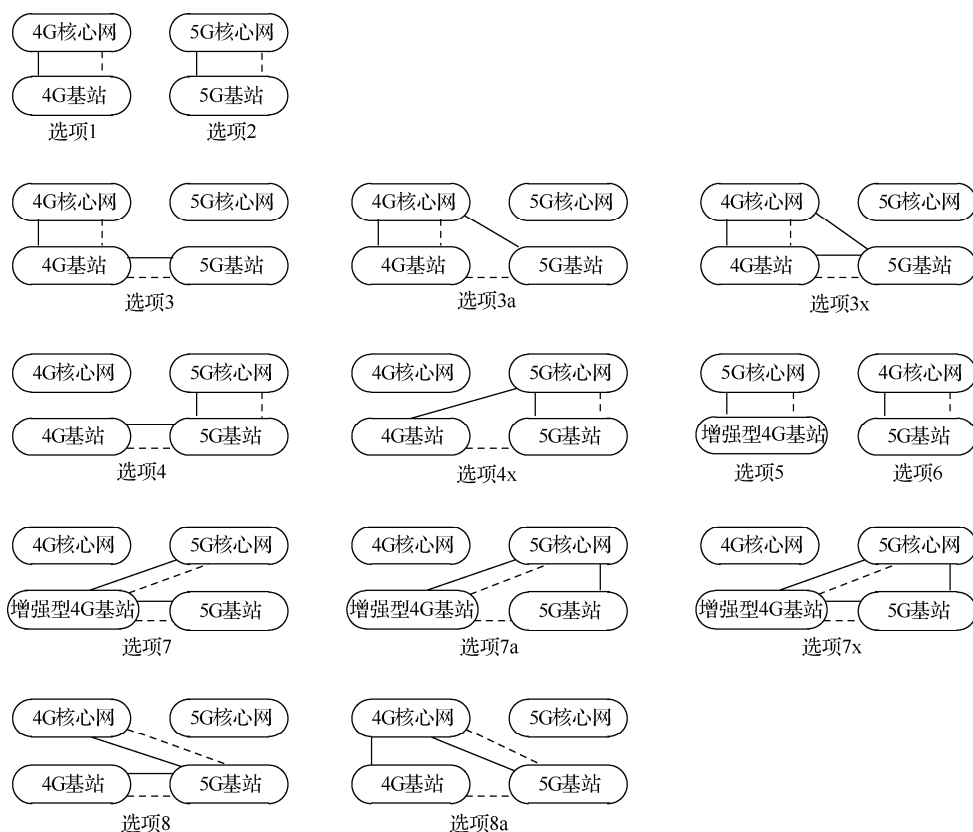


图 1.2 5G 网络组网架构

6G 通信的总体架构体系包括架构类技术、组网类技术、网络性能提升技术、网络服务能力拓展技术等方面, 涉及前沿关键技术 12 类。其中, 架构类技术包括“空、天、地”一体化组网技术、数字孪生网络技术和 6G 可信内生安全等; 组网类技术包括移动算力网络、端网云协同和新型网络共享; 网络性能提升技术包括韧性网络、确定性通信、语义通信和语义认知网络; 网络服务能力拓展技术包括网络大模型、通信感知网络、沉浸式通信等。

未来的 6G 通信网络架构一定是多个异构接入网络的一体化融合,具有多层立体、动态时变的特点,6G 星地融合组网面临的巨大挑战包括:多层复杂跨域组网导致网络架构设计困难;大尺度空间传播环境导致传输效率低;卫星的高速运动导致网络拓扑高动态变化,进而导致业务质量难以保障等。因此,必须从以下几个方面实现关键技术突破。

(1) 在 6G 星地融合的网络架构方面,需研究卫星与地面蜂窝通信架构的统一设计。一是通过设计弹性可重构的灵活网络架构,实现星地网络节点间网络功能的柔性分割;二是通过设计高效的多域多维度网络管理架构,提高星地融合网络中的资源管理效率。

(2) 在 6G 星地融合的空口传输方面,需研究卫星与地面蜂窝通信的统一无线空口设计方案,支持多种业务传输,使终端可以接入最合适的星地网络节点。

(3) 在 6G 星地融合的组网技术方面,需主要研究小区间频率规划、多层网络间自适应路由和星地空间无缝切换、星地一体多级边缘计算任务迁移等。

(4) 在 6G 星地融合的频率管理方面,需研究基于统一管理的网络频谱资源、星地间频谱资源的协调管理机制,通过频谱共享和干扰管理方案提高频谱资源利用率。

6G 作为新一代信息服务网络,将连接智能、支撑数字与物理世界融合、实现多要素信息服务。具备超越连接的服务能力是 6G 网络的架构特征。网络能力包括无处不在的连接、算力网络能力,可信安全、感知、数据服务能力,以及基于 AI 的网络智能自治能力等。6G 平台化服务网络架构如图 1.3 所示,包括基础设施功能层、网络功能层、应用与开放层,以及贯穿各层级的安全可信和管理与编排功能。

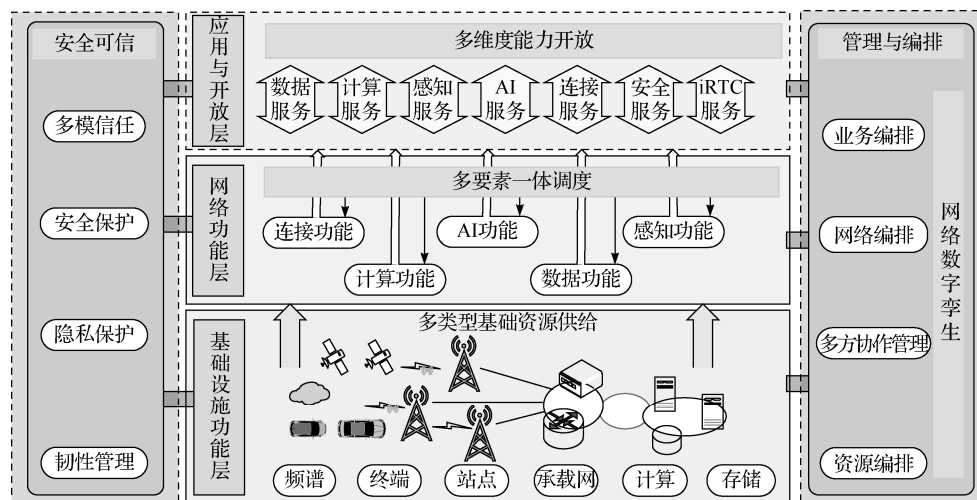


图 1.3 6G 平台化服务网络架构