

# 5G

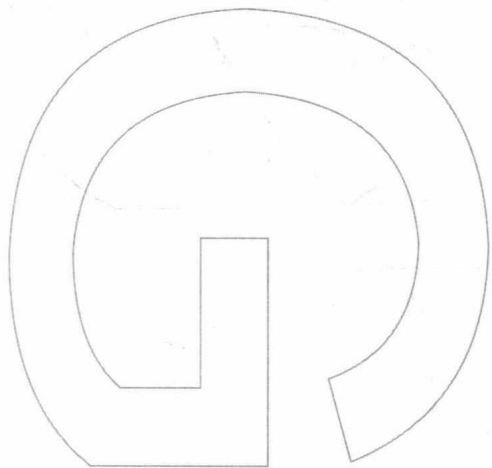
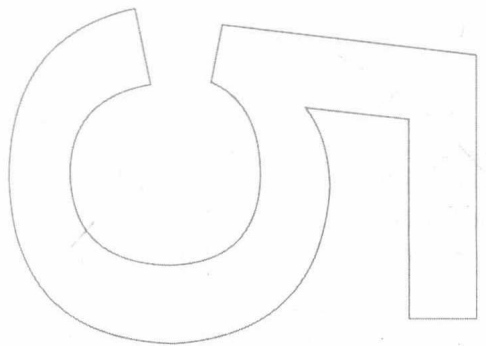
## 无线系统设计与国际标准

刘晓峰 孙韶辉 杜忠达 著  
沈祖康 徐晓东 宋兴华

5G  
Wireless  
System Design and  
International Standard

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



# 5G

## 无线系统设计与国际标准

---

刘晓峰 孙韶辉 杜忠达 著  
沈祖康 徐晓东 宋兴华

**5G**  
**Wireless**  
**System Design and**  
**International Standard**

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

5G无线系统设计与国际标准 / 刘晓峰等著. -- 北京:  
人民邮电出版社, 2019. 2  
ISBN 978-7-115-50644-3

I. ①5… II. ①刘… III. ①移动通信—通信系统—  
国际标准 IV. ①TN929.5-65

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第004373号

## 内 容 提 要

本书主要介绍了 5G 系统设计中涉及的关键技术及相应的国际标准化内容, 其中空口技术部分主要涉及初始接入设计、控制信道设计、大规模天线设计、信道编码、NR 与 LTE 共存几个主要部分。高层设计及接入网架构方面将涵盖 NSA/SA、CU/DU 分离、双连接等内容。本书不仅对这些关键技术进行了介绍, 还对这些技术的标准化过程及标准化方案进行了详细分析。

本书适合从事移动通信研究的本科生及研究生、从事移动通信工作的工程师及希望了解 5G 相关情况的专业人士阅读。

- 
- ◆ 著 刘晓峰 孙韶辉 杜忠达  
沈祖康 徐晓东 宋兴华
- 责任编辑 李 强  
责任印制 彭志环
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 800×1000 1/16  
印张: 29.25 2019年2月第1版  
字数: 461千字 2019年2月北京第1次印刷
- 

定价: 159.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

● 王志勤

**面**向 2020 年及未来十年的发展，第五代移动通信（5G）将从移动互联网步入移动物联的新时代。人们期望 5G 技术能够像互联网一样成为通用技术，以其极强的渗透性、带动性，与各行各业深度融合，为社会经济发展的关键基础设施提供支撑。5G 与大数据、人工智能等 ICT 新技术融合发展，将推动生产组织方式、资源配置效率、管理服务模式发生深刻变革，创造数字经济的新价值体系。

移动通信可提供国际漫游服务，产业巨大，全球统一标准一直是产业界的梦想。2016 年，国际标准化组织 3GPP 启动了 5G 标准制定工作，经历一年多的紧张忙碌，凝聚了全球数千名专家智慧结晶的全球统一的 5G 第一版国际标准终于按期完成。

为了提升移动互联网用户体验，拓展移动物联网多样化的需求，5G 要明显提高系统性能，包括吉比特级的高速率、毫秒级的低时延、百万级的连接能力，还需要提供灵活的系统设计以满足物联网多样化的需求。这对 5G 技术的创新提出了很高的要求。在 5G 无线技术方面，我们常常用“三驾马车”来形象地比喻 5G 无线技术创新：一是灵活的系统设计，以及灵活的帧结构、波形设计，可适应多样化需求，满足低时延等性能的要求；二是大规模天线，增加天线数量及新型设计，进一步提升频谱效率，满足中频段及高频段的需

求；三是无线新技术，如新型信道编码等，为大带宽、高速率业务提供支撑。可见，5G 不像以往各代移动通信是以新的多址接入技术作为特征，5G 是以多种关键技术来共同定义的。

5G 国际标准是产品研发的基础。本书是以 5G 第一版国际标准作为依据，重点介绍了 5G 无线技术标准系统设计与关键技术，是 5G 技术标准方面难得的教科书，有利于 5G 产品开发、网络建设与应用等方面的技术人员准确、深入地理解 5G 技术。

本书的作者大多来自于 5G 国际标准化工作的一线，亲历了 5G 标准激烈争论与达成统一的过程，对技术标准有更加深刻的理解。他们是在移动通信领域耕耘多年的工程师，对于产品设备研发有丰富的实践经验，书中提供了大量很有价值的技术方案与系统设计。同时，他们也是 IMT-2020 (5G) 推进组的成员，在 5G 标准的推进中结下了深厚的友情，也形成了一支很成熟的创作团队。相信他们的作品会给你带来很多收获和启发，也期待着有更多力量投入 5G 的建设和发展中，让我们共同创造出 5G 美好的明天。

# 前言|FOREWORD

随着 4G 的广泛应用，无线互联网的时代已经开启。以智能手机为代表的无线互联网应用给我们的生活带来了深刻变化。在 4G 的基础上，不仅传统移动宽带数据业务快速增长，越来越多的新应用及新技术也不断涌现。这也对无线网络的发展提出了更加多样化的需求。这些需求不仅包括更高系统吞吐量，还包括对更低的传输时延、更高的可靠性和系统更多的连接用户数的追求。

5G 系统就是为应对这些新的需求而提出的。5G 系统的设计与 4G 系统最大的差别在于，5G 系统在支持快速增长的移动宽带数据业务的同时，还需要考虑支持超低时延、高可靠性业务和广覆盖下的大连接业务。5G 系统不仅需要实现人和人的互联，还需要实现人与物、物与物的互联，即万物互联。为完成这一任务，5G 不仅需要使用传统的低频频谱，如 3GHz 以下的频谱，还需要支持高频频谱的使用，以获得更大的系统带宽，来满足不同的业务需求。这些需求给 5G 的系统设计带来极大挑战。

为迎接 5G 带来的诸多挑战，全球主要移动通信公司在 3GPP 开展了 5G NR（新空口）的标准化工作。相对于 4G 系统，5G NR 的系统设计更加灵活，支持更多的基本参数配置，具有上下行对称的波形设计和自包含且灵活的帧结构配置。同时，5G NR 中还引入了一系列新的技术。其中比较有代表性的是将 Polar 码（极化码）用于控制信道的编码方案，数据信道也采用了 LDPC 作为数据信道编码方案。本书第 4 章对 NR 采用的新编码方案进行了详细介绍。

本书的架构从系统设计的角度出发，紧扣 5G NR 的整个标准化进程，对关键的物理层关键技术和关键信道标准化过程及实现进行了比较详细的阐述。在物理层信道设计方面，本书在第 6 章对控制信道设

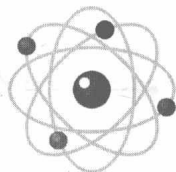
计进行了单独介绍，而对其他信道设计的介绍则分布于各章节中。在组网方面，考虑到 5G NR 与 4G LTE 的联合部署，本书在第 8 章对不同的网络部署方式及关键技术进行了详细介绍。

5G NR 与 4G LTE 有着非常紧密的关系，这一点在 5G 的整个标准化过程中体现得非常充分。首先，5G NR 需要考虑和 4G LTE 进行联合部署，在很多物理层的设计上需要兼顾不同系统的特点进行联合设计；其次，很多 NR 的设计采用了 LTE 的设计作为基础。这样做一方面可以节省标准化时间，另一方面也为 4G 和 5G 芯片共用部分模块提供了可能。本书在写作过程中也充分考虑到 5G NR 与 4G LTE 的关系，尽量在讲述 5G NR 设计时与 LTE 设计进行对比，以便读者对相关设计有更好的理解。

本书的撰写依托 IMT-2020 推进组的相关工作，集合了多名在国际标准化工作一线的专家的辛勤工作。刘晓峰负责全书组织架构和统稿，并承担前 3 章部分内容的撰写工作。孙韶辉、王可、高秋彬、全海洋、黄秋萍、苏昕、宋月霞、汪颖、李辉负责第 5 章和第 2 章部分内容的撰写工作。杜忠达、郝鹏负责第 8 章和第 3 章部分内容的撰写工作。沈祖康、王俊、李榕、张公正、黄凌晨负责第 4 章的撰写工作。宋兴华、薛丽霞、张旭、孙昊、陈铮、戴晶、冯淑兰、彭金磷、肖洁华、官磊、马蕊香、徐修强负责第 6 章的撰写工作。肖伟民、刘嘉陵、郭志恒、谢信乾、费永祥、毕文平负责第 7 章的撰写工作。徐晓东负责第 3 章帧结构部分的撰写工作。魏贵明、徐晓燕、魏克军、朱颖负责第 1 章、第 2 章部分内容的撰写工作及全书修订工作。在这里还要感谢杜滢、徐菲、万蕾、童文、朱佩英、王欣晖、刘光毅、胡南、黄河、刘星、张峻峰、梁亚超等技术专家的支持。

受标准化时间的影响，很多技术特性并没有在第一版 5G 的 NR 国际标准中完成标准化。在 5G 后续的持续标准化工作中，还将引入更多的新技术特性并对现有技术进行优化。同时，为实现万物互联的愿景，5G 在未来的标准化工作中也将向车联网、工业互联网等垂直行业进行扩展。本书的撰写和 5G 标准化工作同步开展，截至本书成书之日，一些技术方案还在不断演进，如有机会，还将继续进一步补充和修正本书内容。对于本书存在的不足之处，敬请读者和专家批评指正。

# 目录 CONTENTS



## 第1章 5G标准制定概述

1.1	ITU 5G 需求的制定	3
1.2	中国参与 5G 需求的研究制定	5
1.3	5G 标准的制定过程	7
1.3.1	ITU 关于 IMT-2020 (5G) 标准的制定过程	7
1.3.2	3GPP 5G 国际标准制定	11

## 第2章 5G系统设计架构与标准体系

2.1	5G 系统网络架构	16
2.2	无线接口	19
2.2.1	物理层	19
2.2.2	数据链路层	22
2.2.3	RRC 层	24
2.3	物理层系统设计架构及关键技术	26
2.3.1	物理层系统设计架构	26
2.3.2	物理层关键技术	29
2.4	NR 标准体系架构介绍	33
	参考文献	38



## 第3章 5G NR基础参数及接入设计

3.1 基础参数及帧结构	40
3.1.1 基础参数	40
3.1.2 帧结构	42
3.2 接入设计	50
3.2.1 概述	50
3.2.2 小区搜索过程	50
3.2.3 下行同步信道及信号	53
3.2.4 随机接入	71
参考文献	75

## 第4章 5G NR信道编码

4.1 Polar 码	78
4.1.1 Polar 码的设计原理	81
4.1.2 5G NR 中的 Polar 码标准化内容	91
4.1.3 典型配置/示例	99
4.2 LDPC 码	107
4.2.1 LDPC 码设计原理	108
4.2.2 5G NR 中的 LDPC 码标准化内容	112
4.2.3 典型配置/示例	128
4.3 其他编码	132
4.3.1 超小包编码	132
4.3.2 其他候选编码	136
参考文献	137

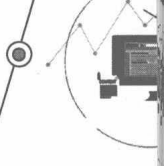
## 第5章 5G NR大规模天线设计

5.1	概述	142
5.2	多天线传输的基本过程	148
5.2.1	数据加扰	148
5.2.2	数据调制	149
5.2.3	层映射	149
5.2.4	传输方案	152
5.2.5	资源块映射	156
5.3	参考信号设计	156
5.3.1	解调参考信号 (DMRS)	156
5.3.2	信道状态信息参考信号 (CSI-RS)	161
5.3.3	相位跟踪参考信号 (PT-RS)	165
5.3.4	信道探测参考信号 (SRS)	172
5.4	信道状态信息反馈设计	178
5.4.1	框架设计	178
5.4.2	Massive MIMO 码本设计	181
5.4.3	信道测量机制	195
5.4.4	信道信息反馈机制	198
5.4.5	信道互易性	205
5.5	模拟波束管理	207
5.5.1	波束管理过程	208
5.5.2	波束测量和上报	209
5.5.3	波束指示	214
5.5.4	波束恢复过程	217
5.6	上行多天线技术	223
5.6.1	基于码本的传输方案	223
5.6.2	非码本的传输方案	231

5.6.3 上行多用户 MIMO	233
5.7 准共站址 (QCL)	234
5.7.1 QCL 定义	234
5.7.2 参考信号间的 QCL 关系	236
5.7.3 QCL 指示方式	238
5.8 小结	242
参考文献	243

## 第6章 5G NR控制信道设计

6.1 控制信道设计	248
6.1.1 下行控制信道设计	248
6.1.2 上行控制信道设计	262
6.2 调度和资源分配	291
6.2.1 下行资源分配	292
6.2.2 上行资源分配	296
6.2.3 VRB 到 PRB 的映射	301
6.3 HARQ 机制	302
6.3.1 HARQ 进程和调度	303
6.3.2 HARQ-ACK 信息上报	304
6.3.3 UE 上下行数据处理时延	305
6.3.4 HARQ-ACK 码本	308
6.3.5 基于编码块组的传输	316
6.4 多业务复用	319
6.4.1 多业务复用背景简介	319
6.4.2 下行抢占信令设计	322
6.4.3 基于编码块组的下行抢占	327
参考文献	327



## 第7章 5G NR功率控制及上下行解耦

7.1 5G NR 功率控制 .....	330
7.1.1 上行功率控制 .....	330
7.1.2 下行功率控制 .....	340
7.2 上下行解耦 .....	340
7.2.1 上下行解耦基本概念 .....	341
7.2.2 SUL 小区模型和初始接入机制 .....	348
7.2.3 SUL 小区数据与控制传输机制 .....	351
7.2.4 上行功率控制 .....	359
7.2.5 SUL 典型频段组合 .....	362
参考文献 .....	364

## 第8章 5G高层设计及接入网架构

8.1 网络架构和术语 .....	368
8.2 系统架构和工作原理 .....	371
8.2.1 Option2: 独立工作 NR 架构 .....	373
8.2.2 Option3: 连接到 EPC 的非独立工作架构 .....	423
8.2.3 Option7: 连接到 5GC 的非独立工作架构 .....	445
8.2.4 Option4: 基于 Option2 的双连接架构 .....	446
8.2.5 Option5: 连接到 5GC 的 eLTE .....	447
8.3 gNB 的内部架构和工作原理 .....	450
8.3.1 CU-DU 分割和 F1 接口 .....	450
8.3.2 CP-UP 分割和 E1 接口 .....	453
8.3.3 用户面控制机制 .....	454
参考文献 .....	455



# 第1章

## Chapter 1

# 5G 标准制定概述



随着移动通信技术的不断快速发展，尤其是 4G 技术广泛应用以后，我们的生活也发生了深刻的改变。移动网络与智能终端的普及使得我们的生活方式围绕各种新型应用进行了重构。但是人们对更高性能移动通信的追求从未停止。为了迎合未来社会发展的需求，尤其是爆炸性的移动数据流量增长、海量的设备连接及不断涌现的各类新业务和应用场景，第五代移动通信（5G）系统应运而生。

5G 将渗透到未来社会的各个领域，以用户为中心构建全方位的信息生态系统。5G 将使信息突破时空限制，提供极佳的交互体验，为用户带来身临其境的信息盛宴。5G 将拉近万物的距离，通过无缝融合的方式，便捷地实现人与万物的智能互联。5G 将为用户提供光纤般的接入速率，“零”时延的使用体验，千亿设备的连接能力，超高流量密度、超高连接数密度和超高移动性等多场景的一致服务以及业务及用户感知的智能优化，同时将为网络带来超百倍的能效提升，比特成本降低不及原来的百分之一，最终实现“信息随心至，万物触手及”的总体愿景。

移动互联网和物联网是未来移动通信发展的两大主要驱动力，将为 5G 提供广阔的前景。移动互联网颠覆了传统移动通信业务模式，为用户提供前所未有的使用体验，深刻影响着人们工作生活的方方面面。面向 2020 年及未来，移动互联网将推动人类社会信息交互方式的进一步升级，为用户提供增强现实、虚拟现实、超高清（3D）视频、移动云等更加身临其境的极致业务体验。移动互联网的进一步发展将带来未来移动流量的超千倍增长，推动移动通信技术和产业的新一轮变革。

物联网扩展了移动通信的服务范围，从人与人通信延伸到物与物、人与物的智能互联，使移动通信技术渗透至更加广阔的行业和领域。面向 2020 年及未来，移动医疗、车联网、智能家居、工业控制、环境监测等将会推动物联网应用爆发式增长，数以千亿

的设备将接入网络，实现真正的“万物互联”，并缔造出规模空前的新兴产业，为移动通信带来无限生机。同时，海量的设备连接和多样化的物联网业务也会给移动通信带来新的技术挑战。

## 1.1 ITU 5G 需求的制定

国际电信联盟（ITU）是联合国的 15 个专门机构之一，但在法律上不是联合国附属机构，它的决议和活动不需联合国批准，但每年要向联合国提交工作报告。

ITU 主管信息通信技术事务，由无线电通信（ITU-R）、电信标准化（ITU-T）和电信发展（ITU-D）三大核心部门组成。每个部门下设多个研究组，5G 的相关标准化工作主要是在 ITU-R WP5D 工作组下进行。

从 2012 年开始 ITU 组织全球业界开展 5G 标准化前期研究工作，持续推动全球 5G 共识形成。2015 年 6 月，ITU 正式确定 IMT-2020 为 5G 系统的官方命名，并明确了 5G 业务趋势、应用场景和流量趋势，提出 5G 系统的 8 大关键能力指标，以及未来移动通信技术发展趋势。

ITU 确认将“IMT-2020”作为唯一的 5G 候选名称。从 3G 开始，ITU 以 IMT（国际移动通信）为前缀为每一代移动通信定义一个官方名称，3G 官方名称为 IMT-2000，4G 官方名称为 IMT-Advanced。考虑到第五代移动通信技术将在 2020 年左右实现商用，以及 ITU 对移动通信的命名惯例，我国主推采用“IMT-2020”为 5G 官方名称，受到绝大多数国家支持。

ITU 明确了 IMT-2020 的业务趋势、应用场景和流量趋势。在业务方面，5G 将在大幅提升“以人为中心”的移动互联网业务体验的同时，全面支持“以物为中心”的物联网业务，实现人与人、人与物和物与物的智能互联。在应用场景方面，5G 将支持增强移动宽带（eMBB）、海量机器类通信（mMTC）和超高可靠低时延通信（URLLC）三大类应用场景，如图 1.1 所示，在 5G 系统设计时需要充分考虑不同场景和业务的差异化需求。在流量方面，视频流量增长，用户设备增长和新型应用普及将成为未来移动通信流量增长的主要驱动力，2020 年至 2030 年全球移动通信流量将增长几十倍至一百倍，并体现两大趋势：一是大城市及热点区域流量快速增长；二是上下行业务不对称性进一步深化，尤其体现在不同区域和每日各时间段。

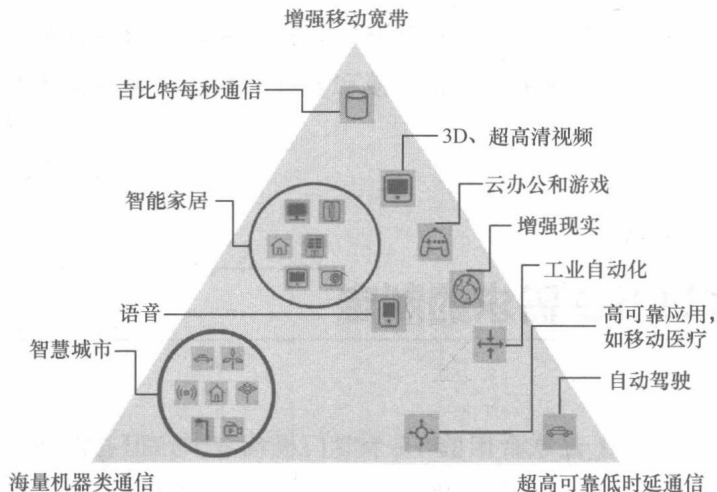


图 1.1 ITU《IMT 愿景》建议书定义的 5G 三大应用场景

ITU 在 2015 年提出 IMT-2020 系统的 8 大关键能力指标。如图 1.2 所示，除了传统的峰值速率、移动性、时延和频谱效率之外，ITU 还提出了用户体验速率、连接数密度、流量密度和能效四个新增关键能力指标，以适应多样化的 5G 场景及业务需求。其中，5G 用户体验速率可达 100Mbit/s 至 1Gbit/s，能够支持移动虚拟现实等极致业务体验；5G 峰值速率可达 10~20Gbit/s，流量密度可达 10Mbit/(s·m<sup>2</sup>)，能够支持未来千倍以上移动业务流量增长；5G 连接数密度可达 100 万个/平方千米，能够有效支持海量的物联网设备；5G 传输时延可达毫秒量级，可满足车联网和工业控制的严苛要求；5G 能够支持 500km/h 的移动速度，能够在高铁环境下实现良好的用户体验。此外，为了保证对频谱和能源的有效利用，5G 的频谱效率将比 4G 提高 3~5 倍，能效将比 4G 提升 100 倍。

ITU 全面总结了未来移动通信技术的发展趋势。ITU 在《IMT 未来技术趋势》研究报告中，总结了近期及 2020 年以后的移动通信技术总体发展趋势，并指出未来移动通信系统将优化空口接入技术、覆盖更多业务、增强用户体验、提升网络能效、支持新型终端技术和网络优化技术，从而全面提升系统性能。其中，大规模天线、新型多址、超密集组网、新型双工、灵活频谱使用、低时延高可靠、先进接收机等被认为是未来无线技术发展趋势；软件定义网络(SDN)、网络功能虚拟化(NFV)、集中式无线接入网(C-RAN)、以用户为中心网络、多网协同等被认为是无线网络技术的未来发展方向。

ITU 明确 6GHz 以上频谱资源可用于 IMT-2020 系统。ITU 以 6GHz 至 100GHz 为主要研究范围，分析了 10GHz、28GHz、60GHz、73GHz 等几个代表频段的传播特性，以



及 6GHz 以上高频段无线信号在室内和热点区域的覆盖性能。研究表明，利用高频段易于实现大规模天线阵列的特点，通过波束赋型技术，在室内和热点区域可有效弥补高频段无线信号的传播损耗。同时，ITU 还论证了 6GHz 以上频段与 6GHz 以下频段混合组网，以及 6GHz 以上频段用于接入和回程灵活部署的可行性。研究结果表明，在重点研究的 IMT 部署场景中，6GHz 至 100GHz 频谱资源可用于 IMT-2020 系统部署。

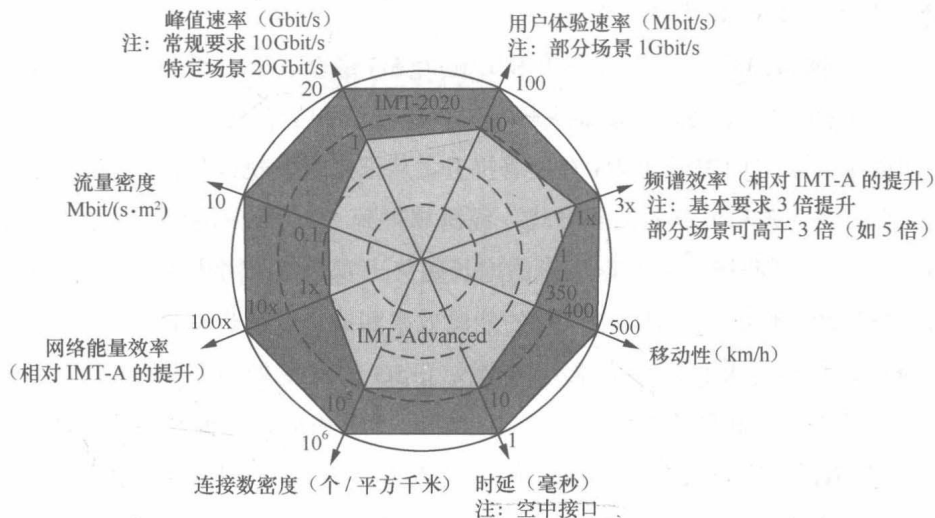


图 1.2 ITU《IMT 愿景》建议书提出的 IMT-2020 (5G) 与 IMT-A 关键能力对比

## 1.2 中国参与 5G 需求的研究制定

5G 作为新一代移动通信技术发展的主要方向，将成为推动国民经济和社会发展、促进产业转型升级的重要动力。2014 年 5 月，我国 IMT-2020 (5G) 推进组面向全球发布《5G 愿景与需求》白皮书，详述了我国在 5G 业务趋势、应用场景和关键能力等方面的核心观点。5G 关键性能指标应主要包括用户体验速率、连接数密度、端到端时延、流量密度、移动性和用户峰值速率。在 5G 典型场景中，考虑增强现实、虚拟现实、超高清视频、云存储、车联网、智能家居、OTT 消息等 5G 典型业务，并结合各场景未来可能的用户分布、各类业务占比及对速率、时延等的要求，可以得到各个应用场景下的 5G 性能需求。