

5G 联合创新系列丛书

5G 高频系统 关键技术及设计

黄宇红 刘盛纲 杨 光 王大鹏 丁海煜◎著

KEY TECHNOLOGIES AND DESIGN OF
5G HIGH FREQUENCY SYSTEM

非
外
借



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5G 高频系统 关键技术及设计

黄宇红 刘盛刚 杨光 王大鹏 丁海煜◎著

KEY TECHNOLOGIES AND DESIGN OF
5G HIGH FREQUENCY SYSTEM

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G高频系统关键技术及设计 / 黄宇红等著. — 北京:
人民邮电出版社, 2018. 10
ISBN 978-7-115-49256-2

I. ①5… II. ①黄… III. ①无线电通信—移动通信
—高频—系统设计 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第199688号

内 容 提 要

本书系统性地探讨了 5G 高频标准化、系统设计及产品实现中的关键问题, 包括频谱规划与分配、传播特性与建模、物理层关键技术和标准化设计、射频指标定义及标准化、高频组网、基站站型规划及关键架构设计、关键器件研发及设计等多方面的内容。

本书涉及内容系统、全面, 对 5G 高频产业构建中形成的许多研究成果、产业突破以及创新案例进行了详细阐述, 是业界现阶段难得的一部既有学术水平, 也有很强工程指导意义的著作。对于后续 5G 高频段应用领域的研究、开发、创新提供了重要参考, 可作为科学研究和工程应用领域重点参考的著作之一, 也可作为高等院校相关专业的师生不可多得的教科书与参考书。

-
- ◆ 著 黄宇红 刘盛纲 杨 光 王大鹏 丁海煜
责任编辑 吴娜达
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>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 720×960 1/16
印张: 13.5 2018 年 10 月第 1 版
字数: 250 千字 2018 年 10 月河北第 1 次印刷
-

定价: 89.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

4G 移动通信网络的大规模商用带来了我国移动互联网的蓬勃发展，移动互联网已经深深地改变了我们的生活。与此同时，用户体验的不断升级、行业应用的爆发再次强烈地呼唤 5G 的到来。为了满足 5G 的三大应用场景——增强移动宽带、低时延高可靠、低功耗大连接的各种网络能力需求，高、中、低频协同工作是必不可少的。

相比中低频段，高频得益于更大的系统带宽，可在有限的热点覆盖范围内支持更大的传输速率。未来，一方面，用户业务体验应用的视频图像分辨率在不断提升，从 1080P 到 4K 甚至到 8K、12K、24K，视频技术领域也在同步快速发展；另一方面，信息渲染方式也在不断增强和多元化，增强现实（AR）和虚拟现实（VR）已经逐渐成为现实。这些视频技术和信息渲染技术发展的最佳载体将是泛在、高速的移动通信技术，对 5G 系统提出了很高的要求，例如 24K 3D 的 VR 360 视频将需要 1~3Gbit/s 的 5G 网络下行传输带宽，并且当用户数量进一步增加时，只有高频的网络通信能力才能创造这种极致的用户体验，并可支持更多的并发用户数。由此可见，高频应用将是 5G 甚至后续 6G 等移动通信演进系统不可或缺的重要组成部分。

此外，频率资源作为一种战略性资源，面向更高频段进行深入研究不仅仅是移动通信的问题，也是国家战略方面的问题。其中太赫兹（0.1~1THz）通信、

可见光通信都是未来 6G 通信的热门候选技术,目前学术界已经广泛开展了对它们的研究和讨论,随着后续需求、技术、产业方面的进一步成熟,这些技术将逐渐在工业界引起关注。太赫兹频段兼具微波和光学的传播特性,可以用于远程无线通信、卫星间通信以及地面移动通信。其中,在远程无线通信领域,国家未来五年的预期目标是利用 0.3~1THz 频段,无线通信传输距离可达 1 万千米,速率达 10Gbit/s。在地面移动通信应用方面,太赫兹面临更大的挑战,例如太赫兹的无线信道测量和建模、适用于民用通信的器件材料工艺成熟度、高速高精度的捕获和跟踪技术、高速率 MIMO 传输技术、应用场景定义、网络架构、组网方式等方面的研究刚刚起步,基本还是空白。

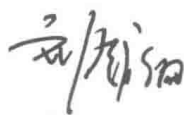
另一个重点技术——可见光通信技术,是通过照明装置,把信息加载到可见光上进行传输,在灯光可照射的区域,都可以实现通信,具备传输速率高、保密性好、低碳环保、通信设备经济且应用极其广泛的优点,具有广阔的应用前景。但目前可见光通信技术还处于实验室研究阶段,克服多径效应和遮挡效应、选择高速调制技术、实现全双工通信等关键技术方案还有待进一步优化。

我们应当清楚地认识到,上述这些令人期待的高新技术的研究、突破甚至应用,尤其是我国产业能够在其中发挥主导作用、做出核心贡献都有个前提条件,就是在 5G 端到端产业构建中我们能够先行实现全产业链的突破,尤其针对核心芯片的薄弱瓶颈环节。我们应该看到,中国目前的科技水平,包括通信行业的基础能力方面,通过国内科技工作者多年来的不懈努力,已经取得了长足的进步,在系统集成等子领域已经处于国际领先地位。但是与发达国家还有较大差距,尤其在高频产业方面,该差距涉及关键技术水平、产业化能力、产业及产品完备性等各方面。

虽然通信行业自身以及集成电路微电子行业都在积极准备、广泛布局,但是总体上来说底子比较薄,虽然具备了赶上国际先进水平的可能性和条件,但是需要时间,并且产业深度融合携手共进,才能真正实现整体产业群体突破和提升。

本书从5G高频应用的整体性出发，系统性地阐述了5G高频系统的关键技术及设计，并详细阐述了中国移动、中国电子科技集团在这几年产业构建中形成的许多研究成果、产业突破以及创新案例，是业界现阶段难得的一部既具有学术水平又具有很强工程指导意义的著作。希望广大通信行业的读者能够通过本书更快、更全面地了解5G高频通信的原理、可能的实现方案和面临的挑战，把这些思考应用到高频产品的研发和方案研究中，共同推进5G高频产业的快速发展，助力我国5G创新影响力进一步增强。

中国科学院院士



当前新一轮产业革命正在兴起，新一代移动通信技术以及移动互联网、云计算、大数据等共同推动着新业态、新应用的不断发展，并加速与经济社会各个行业、领域的深度融合，各种新型的行业需求也在不断涌现，深刻影响和改变着人民大众的生活生产方式。在此背景下，国家提出了在“十三五”期间要深入实施网络强国战略和“互联网+”行动计划，积极拓展网络经济空间，加快培育经济发展新动能，促进互联网和经济社会融合发展。

面向未来，5G 是基础通信全面升级的又一次契机，是“互联网+”“中国制造 2025”等国家战略的核心支撑能力。5G 一方面直接推动了移动通信技术和产品的重大飞跃，带动了芯片、软件等领域快速发展。另一方面，5G 与工业、医疗、交通等行业的深度融合，催生了工业互联网、车联网等新业态，使传统通信行业需要与各行各业深度融合，从过去的单一领域创新向跨领域协同创新转变。国家“十三五”规划纲要中明确提出要积极推进 5G 发展，2020 年启动 5G 商用，这对中国 5G 发展提出了新的、更高的要求。

我国主导的 TD-LTE 4G 技术成功实现全球规模应用，带动了中国企业全产业链群体突破。在 4G 成功的基础上，政府、产业、学术界各方都对 5G 有了更高的期望，希望实现全球领先，并能够在产业瓶颈和短板方面实现突破。早在 5G 研发初期，我国就提出在 2020 年前要成为无线移动通信技术、标准、

产业、服务与应用的领先国家之一，预期达到“1225”的目标：基本专利占比从 2% 提升至 10%，终端核心芯片占有率从小于 1% 提升至 20%，新增国际市场占有率从 5% 提升至 20%，新增国内市场占有率从 10% 提升至 50%。其中，关键点的突破应当是加大短板环节布局，目前核心器件尤其高频模拟器件是 5G 端到端产业短板已成为共识。移动通信产业对基础器件、标准协议和软件开发能力以及集成能力等都有所要求，4G 规模商用显著提升了各个环节的国内实力，但核心器件的发展主要取决于集成电路的产业规模，目前集成电路产业仍掌控在少数国际企业手里，国家已有布局，但是仍然没有出现细分领域占据前三名的芯片企业。

中国电子科技集团在集成电路方面布局多年，前期在军工、雷达、微波等领域的集成电路研究和产业化方面积累了大量成果并形成了一定产业基础，近些年也逐步转向民用移动通信系统，其中包括中电科 13 所、中电科 55 所等多家研究院所和下属公司都广泛投入相关产业中。但是，应该清楚地认识到，在高频模拟芯片上我国仍与全球领先企业有一定的差距。目前国际企业支持高频射频芯片的频段和器件种类比较齐全，技术成熟，产业能力强。因此，中国电子科技集团公司相关企业也与以中国移动为龙头的移动通信产业进行深度合作，力求从移动通信规模商用需求角度出发，深耕多用户、高移动性、高集成度、低功耗、低成本为特点的移动通信行业产业需求，并争取在加工工艺、一致性保证、品质管控等方面缩小与国际领先企业之间的差距。

本书系统地介绍了 5G 高频应用的系统设计以及关键技术，尤其针对 5G 高频应用中涉及的模拟射频器件方面的关键问题、难点、核心技术及应用展望等，这也是以中国移动为首的通信行业企业与中国电子科技集团公司下属的各类集成通信行业企业深度合作、共同攻关研究的主要成果。本书所涉及内容系统、全面，为后续 5G 高频段应用领域研究、开发、创新提供了重要参考，可作为科学研究和工程应用领域重点参考的著作之一。

按照 5G 整体部署规划，以 2.6GHz、3.5GHz 和 4.9GHz 频段为代表的中频

段 5G 系统正在加快成熟，预计 2020 年前正式商用，而 5G 高频段的商用部署节奏要再延迟 1~2 年，目前正处于需要产业突破瓶颈、进入快速发展的阶段。这本书的出版适逢此关口，针对 5G 高频的诸多技术问题做了系统深入的论述，也给出了多种创新方案，希望读者能够从中受到某些启发，助力整个产业链的产品开发、测试验证和组网运营，促进 5G 高频应用早日成熟。

中国工程院院士



<<< 前 言

随着国家 5G 引领战略的实施和多样化业务需求的驱动，中国 5G 网络商用的准备步伐不断加快。中国政府在 2017 年 7 月批复 3.5GHz、4.9GHz、26GHz 和 39GHz 频段为 5G 技术试验频段。考虑到 6GHz 以下的中低频更适合广覆盖，且产业和技术成熟度相对较高，因此中国的 5G 商用首发频率基本确定为 3.5GHz 和 4.9GHz 频段，另外 2.6GHz 频段也是候选频段之一。相比中低频，5G 高频 (>6GHz) 得益于更大的系统带宽，是应对传输速率爆发增长的重要手段。通过高、中、低频协同和立体覆盖，5G 系统才能保障各种场景下的优质用户体验。

但 5G 高频系统设计及商业应用还是面临着诸多新的挑战，包括但不限于：5G 高频的频谱规划和信道建模、系统设计和标准制订、产品规划和关键器件设计开发、组网和运营等。相比中低频，5G 高频整体产业和技术成熟度还较低，预计商用时间将比 5G 中低频晚 1~2 年。为了加快国内 5G 高频产业进程，为 5G 各种应用场景提供高性能保证，提升国内产业的商用产品竞争力，从 2016 年年底开始，中国移动通信研究院依托 5G 联合创新中心开展系列工作，与产业各方开展高频联合创新项目。经过一年多的研究和推动，逐渐明确了 5G 高频发展的技术体系，在系统设计、产业研发和组网部署等多个环节形成突破并产生了大量创新，同时将成果也输出到 3GPP 第一个完整的 5G 标准 Release15 (R15) 版本中。因此，在 3GPP R15 版本发布及中国 5G 规模试验正式启动之际，把当前

5G 高频的阶段性研究成果撰写成此书，希望能够给本专业读者一些启迪，达到引导 5G 高频产业未来的研究方向、加快研发投入以推动商用进程的目的。

参加本书编写工作的人员主要有：第 1 章，王大鹏；第 2 章，刘婧迪、郭春霞；第 3 章，郑毅、李岩；第 4 章，吴丹、钟科、郑毅；第 5 章，邵哲；第 6 章，郑毅、钟科；第 7 章，王大鹏、付吉祥、张欣旺、张瑞艳、柯颀、金逸韵、钟科；第 8 章，付吉祥、王大鹏。

在本书的写作过程中，还得到 5G 联合创新中心成员单位（中兴通讯、华为、爱立信、大唐、诺基亚、中电科 13 所、中电科 14 所、中电科 55 所、北京邮电大学、北京交通大学、华讯方舟、通宇、凡谷、安列德、Qorvo、ADI、Intel、KeySight、R&S 等）的大力支持，在此一并感谢。

同时，感谢为本书的出版做出大量贡献的人民邮电出版社的编辑同志，希望本书的内容能让需要的读者朋友受益。

根据技术研究和产业推动进展，后续将会在修订版本中更新本书相关内容。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不足的地方，欢迎广大读者批评指正。

作者

2018 年 9 月于北京

<<< 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 5G 的场景与指标需求	3
1.2 5G 的高、中、低频协同覆盖需求	4
1.3 5G 高频总体发展目标及重点研发方向	6
第 2 章 5G 频谱规划与分配	9
2.1 高频的定义	9
2.2 全球 5G 高频规划进展	10
2.2.1 TDD 成为高频主流特征	11
2.2.2 ITU WRC-19 1.13 议题研究进展和时间规划	11
2.2.3 全球主要经济体高频规划现状	12
2.2.4 我国高频频谱研究进展	13
2.2.5 高频规划和分配所需研究和准备工作	14
2.3 总结与展望	17
参考文献	17
第 3 章 5G 高频传播特性分析与建模	19
3.1 高频信道模型的挑战	20
3.2 高频信道建模方法及最新进展	21
3.2.1 前期研究工作及标准化进展	21
3.2.2 高频信道建模的分类	22
3.2.3 统计信道建模	23

3.2.4	合信道建模	42
3.3	总结与展望	48
	参考文献	49
第4章	5G 高频物理层关键技术和标准化设计	51
4.1	高频在移动通信应用中的挑战及关键应对技术	51
4.1.1	挑战一：带宽	52
4.1.2	挑战二：天线	53
4.1.3	挑战三：信道	54
4.1.4	挑战四：器件	54
4.2	5G 高频物理层整体系统设计	55
4.2.1	系统参数设计	56
4.2.2	部分带宽设计	58
4.2.3	波束扫描接入设计	59
4.2.4	波束管理设计	64
4.2.5	参考信号设计	69
4.3	总结与展望	81
	参考文献	82
第5章	5G 高频射频指标定义及标准化	83
5.1	5G 高频射频指标面临的挑战	83
5.2	5G 高频 OTA 射频指标 3GPP 标准化概述	84
5.3	5G 高频 OTA 指标的标准研究进展和预期	86
5.3.1	OTA 发射指标	87
5.3.2	OTA 接收指标	92
5.4	总结与展望	95
	参考文献	96
第6章	5G 高频组网研究及标准化	97
6.1	高频组网挑战	97
6.2	5G 高频覆盖能力分析	102
6.3	5G 高频与中低频协作组网	109
6.3.1	不同协作方式的组网方案	110
6.3.2	非完整链路的工作方式	111

6.4	超密集组网与干扰抑制	111
6.5	高频自回传技术	112
6.6	5G 高频移动性优化	114
6.6.1	小区虚拟化	114
6.6.2	C-U 分离	114
6.6.3	双连接	115
6.7	高频组网关键技术研究及标准化进展	116
6.8	总结与展望	117
第 7 章	5G 高频基站规划及关键架构设计	119
7.1	5G 高频基站产品规划和设计流程	119
7.2	5G 高频基站应用场景及设备形态	121
7.3	5G 高频系统仿真及整机指标设计	122
7.3.1	面向 5G 高频系统的系统级仿真评估方法演进	122
7.3.2	系统级仿真基本概念及系统级仿真平台的关键工作流程	123
7.3.3	仿真任务及仿真参数配置	125
7.3.4	仿真结果及分析	129
7.3.5	仿真结论及对整机指标的初步建议	137
7.4	关键架构设计之一：数模混合架构方案设计	138
7.4.1	高频架构方案的选择	138
7.4.2	天线阵列优化方案	140
7.4.3	高频滤波器实现方案	142
7.4.4	天面共用实现方案	145
7.4.5	PA/LNA 功能模块集成方案	147
7.4.6	幅相控制单元实现方案	155
7.4.7	数字和模拟中频	161
7.4.8	本振系统实现方案	164
7.4.9	校准方案	169
7.4.10	高频线性化技术	171
7.4.11	高频设备散热	173
7.5	关键架构设计之二：透镜架构方案设计	175
7.5.1	透镜的种类优选分析	175
7.5.2	波束管理方案	177
7.5.3	高频大功率 PA 的实现挑战	179

7.6 总结与展望	180
参考文献	181
第8章 5G 高频基站关键器件研发及设计	183
8.1 高频器件的种类	183
8.2 高频器件国内外技术及产业情况	184
8.2.1 传统化合物技术及产业情况	184
8.2.2 Si (硅) 基技术及产业情况	185
8.2.3 GaN 技术及产业情况	186
8.2.4 器件 (芯片) 封装技术及产业情况	188
8.2.5 异质异构集成技术及产业情况	191
8.3 关键器件设计	194
8.3.1 功率放大器 (PA) 的设计实现	194
8.3.2 低噪声放大器 (LNA) 的设计实现	196
8.3.3 开关 (SW) 的设计实现	197
8.3.4 天线的设计实现	197
8.4 总结与展望	199
参考文献	199

<<< 第 1 章

概 述

近年来，中国移动建成了全球规模最大的 4G TD-LTE 网络。截至 2017 年年底，中国移动 4G 基站数达到 187 万个，用户数达到 6.5 亿户。4G 的快速发展及普及促进了电子商务、网络约车、视频直播等移动互联网业务的蓬勃发展，给人们的生活带来了极大的变化。据统计，自 4G 牌照发放以来，移动互联网用户数增长 86.8%，拉动信息消费超万亿元。

如果说 4G 的普及改变了人们的生活方式，那么 5G 将通过与各行各业的应用深度融合，改变整个社会生产和运行模式，为传统行业的升级改造和持续发展带来新的契机。5G 具有更高速率、更低时延、更大连接等特点，将渗透到工业、交通、农业等各个领域，实现移动通信技术与垂直行业广泛、深度地融合，催生自动驾驶、远程医疗、工业互联网等更加丰富的创新应用场景及业态。

5G 应用将主要包括三个场景：eMBB（Enhanced Mobile Broadband，增强移动宽带）、mMTC（Massive Machine Type Communication，海量机器类通信）、uRLLC（Ultra-Reliable Low Latency Communication，高可靠低时延通信）。在 eMBB 场景中，5G 将以吉比特级的高速率引爆众多创新应用，为消费者带来沉浸式的虚拟现实/增强现实（VR/AR）、超高清视频等极致网络体验。在 mMTC 场景中，5G 将具备每平方千米一百万连接的能力，实现超低功耗、超大连接、超强覆盖

和超低成本的全新通信，为智能抄表、广域物联、智慧市政、智慧楼宇、智能追踪等典型应用量身打造，助力物联网加速发展。并且伴随着相关应用规模的不断提升，和生活中“吃穿住行用”密切结合，将会进一步带来诸如智能单车、智能停车等更多的创新应用。在 uRLLC 场景，5G 低至 1ms 的空中接口时延以及提升至 99.999% 的可靠性，将驱动智能控制走向现实，满足智能制造、自动驾驶等行业应用的特定需求，拓宽融合产业的发展空间，支撑经济社会创新发展。

据中国信息通信研究院（下文简称“中国信通院”）预计，到 2030 年，5G 将直接带动我国国民经济总产出 6.3 万亿元，间接带动国民经济总产出 10.6 万亿元，将从消费到生产，全面推动我国数字经济发展迈上新台阶。综上所述，5G 将带来更广泛的人与人、人与物、物与物之间的连接，激发云计算、大数据、人工智能等技术发挥出最大的潜能，开启感知泛在、连接泛在、智能泛在的万物互联新时代。

5G 的整体发展涉及多个方面，包括顶层需求设计、技术研究、标准制定、产业推进和生态构建等。从 2013 年开始，中国移动从顶层设计出发，与产业联合提出了中国 5G 的需求和愿景，被国际电信联盟接纳，并以满足各类用户众多需求为导向，制定了相应的技术和部署建设策略。同时，产业界和学术界进行关键技术研究 and 方案储备，尤其针对大规模天线等变革性技术开展重点攻关，通过核心技术突破实现能力升级。此外，随着 5G 全球标准化的启动，已开始布局并开展相应的标准制定、技术验证和系统验证工作，为实现 2020 年 5G 商用奠定技术和产业基础。国际标准化组织 3GPP 已经明确 5G 发展的相关技术标准包括 R15（2018 年 6 月冻结）和 R16（2019 年 12 月冻结）版本，其整体规划及最新进展参考图 1-1。中国加快推进产业进展，在前期技术试验的基础上，2018 年将启动面向端到端通信产业的规模试验以及面向垂直行业应用的业务示范项目，全面做好商用的各项准备，如图 1-2 所示。



图 1-1 5G 相关 3GPP 标准整体规划