



★ ★ ★ ★  
★ “十三五” ★

国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程  
网络强国建设

5G 丛书

## 5G Wireless Access Network: Fog Computing and Cloud Computing

# 5G 无线接入网络： 雾计算和云计算

彭木根 编著



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

★ ★ ★ ★ ★  
“十三五”

国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程  
网络强国建设

5G 丛书

# 5G 无线接入网络： 雾计算和云计算

5G Wireless Access Network:  
Fog Computing and Cloud Computing

彭木根 编著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

5G无线接入网络：雾计算和云计算 / 彭木根编著

— 北京：人民邮电出版社，2019.3

(5G丛书)

国之重器出版工程

ISBN 978-7-115-50311-4

I. ①5… II. ①彭… III. ①无线接入技术—接入网  
IV. ①TN915.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第285712号

## 内 容 提 要

本书全面深入地介绍了面向5G移动通信系统的雾无线接入网络和云无线接入网络，包括系统架构、理论组网性能、信道估计、资源分配等，突出了云计算和雾计算与无线接入网络相结合的特征及相互间的差异，给出了相应的性能。

本书内容翔实丰富、深入浅出，可作为高等院校通信工程、电子信息工程和计算机应用等专业的研究生和高年级本科生相关课程的教材或者理论科研参考书，也可作为相关工程技术人员的理论指导手册。

---

◆ 编 著 彭木根

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>

北京盛通印刷股份有限公司印刷

◆ 开本：800×1000 1/16

印张：28.5

2019年3月第1版

字数：527千字

2019年3月北京第1次印刷

---

定价：219.00元

读者服务热线：(010) 81055493 印装质量热线：(010) 81055316

反盗版热线：(010) 81055315

广告经营许可证：京东工商广登字 20170147号

# 《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



## 专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、  
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家  
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原  
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



## 前言

与 4G 移动通信系统相比,5G 移动通信系统不仅传输速率更高,而且在传输中呈现出低时延、超链接、高可靠、低功耗特点,能更好地支持物联网应用。5G 不仅能使“人与人”之间实现无缝连接,也能进一步加强“人与物”“物与物”之间高速便捷的无缝通信。4G 无线接入网络架构主要为人与人之间的无缝覆盖和高速传输设计,难以高效支撑低时延、超链接、高可靠、低功耗等性能要求的物联业务或者应用需求。

过去一直是信息通信在推动计算技术的快速发展,无线通信理论和技术在不到 20 年的时间内从 2G 迅速演进到 5G,通信技术自身发展遇到瓶颈,“天花板”效应显著,急需引进先进理论和技术进行变革突破。借鉴云计算和雾计算,实现计算和通信的有效融合,可以有效打破移动通信面临的困境。因此,在 5G 中,基于云计算和雾计算的无线接入网络应运而生。2009 年,中国移动通信集团公司提出了云无线接入网络(C-RAN)架构,通过充分利用云计算强大的集中处理能力,抑制小区间干扰,同时降低基站的能耗,实现绿色高效组网。C-RAN 无法满足 5G 的低时延、高可靠等通信需求,2014 年学术界和产业界陆续提出了异构云无线接入网络(H-CRAN)及雾无线接入网络(F-RAN)解决方案。F-RAN 和 H-CRAN 能够满足 5G 及后 5G 各种性能目标要求,已经成为 5G 及后 5G 接入网络的重要组成,引起了业界广泛关注,并得到深入推进。

与基于集中式云计算和大规模协作处理的 C-RAN 和 H-CRAN 相比,F-RAN 充分利用基站和用户设备的计算缓存能力,结合了集中式和分布式自适应处理的优





势，能够显著降低束缚 C-RAN 和 H-CRAN 发展的前传链路容量开销和时延过大等问题，也能够网络边缘设备处适时进行大数据分析处理，提高无线网络快速反馈及智能动态组网能力。

C-RAN、H-CRAN 和 F-RAN 是 4G 超密集异构网络的演进，也是 5G 的重要组成部分，揭示这些不同接入网络的工作机理和性能差异，在目前阶段非常重要。本书主要介绍和总结了 C-RAN、H-CRAN 和 F-RAN 的架构组成、组网理论性能和资源分配等关键技术。本书共分为 9 章：第 1 章让读者建立面向 5G 的新一代无线接入网络的特征和系统架构等基本概念，为后面的学习打下必备的基础；第 2 章详细介绍了基于点随机分布模型的 C-RAN 组网性能，给出了不同接入模式对应的上下行理论组网性能，并探讨了空间立体三维网络节点分布对组网性能的影响；第 3 章详细介绍了 H-CRAN 的理论组网性能，刻画了不同预编码方案对性能的影响，给出了不同配置下的容量和误比特率性能对比；第 4 章描述了 F-RAN 理论性能，特别是介绍了缓存的影响以及对应的时延性能；第 5 章介绍了 C-RAN 的相干信道估计技术，包括导频设计和信号检测性能；第 6 章介绍了 C-RAN 和 F-RAN 的半盲信道估计技术及在理想和非理想前传链路下的性能；第 7 章描述了业务队列时延感知的 C-RAN 资源分配技术，给出了不同资源分配优化方法及其对应的性能；第 8 章介绍了 H-CRAN 的资源分配技术，描述了基于异构资源共享和干扰控制的资源分配方法；第 9 章介绍了一种成本频谱效率指标，并给出了基于该指标的资源分配优化方法。

本书是北京邮电大学相关科研团队多年研究的成果结晶。项弘禹博士参与了第 1 章的编写，闫实博士对第 2 章进行了编写，程园园参与了第 3 章的编写，赵中原博士、贾诗雯等进行了第 4 章的编写，胡强博士进行了第 5 章的编写，班有容进行了第 6 章的编写，李健博士等进行了第 7 章和第 8 章的编写，王亚运进行了第 9 章的编写。

本书的部分研究内容受国家自然科学基金优秀青年基金项目“无线分层异构网络的协同通信理论与方法”、国家自然科学基金国际（地区）合作与交流项目“云无线接入网络基于延迟感应的无线资源管理理论与算法设计”资助，在此特别表示感谢。在本书的编写过程中，还得到了普林斯顿大学 H.Vincent Poor 教授、北京邮电大学王文博教授、新加坡科技设计大学 Tony Quek 教授、曼切斯特大学 Zhiguo Ding 教授等的指导帮助以及中国信息通信研究院、中国电信股份有限公司创新中



心、大唐移动通信设备有限公司等单位的大力支持，他们提供了许多宝贵建议和有益帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于 5G 无线接入网络技术还在不断完善中，且 5G 标准化工作截至目前还在进行中，5G 接入网络架构及关键技术仍在不断演进，再加上作者水平有限，谬误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。根据大家反馈的意见以及技术的增强和演进，本书将会陆续修改部分章节内容，欢迎读者来信讨论其中的技术问题：[pmg@bupt.edu.cn](mailto:pmg@bupt.edu.cn)。

彭木根

2018 年 4 月 27 日



# 目 录

第 1 章 无线接入网络演进	001
1.1 云无线接入网络	005
1.1.1 C-RAN 历史发展	007
1.1.2 C-RAN 优缺点	008
1.1.3 C-RAN 挑战	009
1.2 异构云无线接入网络	010
1.3 雾无线接入网络	015
1.3.1 F-RAN 系统架构	016
1.3.2 F-RAN 关键技术	018
1.3.3 F-RAN 技术挑战	024
1.4 F-RAN 网络切片架构	025
1.4.1 基于边缘计算的接入网络切片	026
1.4.2 F-RAN 接入网络切片关键技术	029
1.4.3 F-RAN 接入网络切片挑战	033
参考文献	034
第 2 章 云无线接入网络性能	039
2.1 基于空间点过程的节点位置分布模型	041
2.1.1 泊松点过程	041
2.1.2 泊松—费列罗里模型	042
2.1.3 用户距离分布	043
2.2 不同场景信道特征研究	044
2.3 有用信号分布	046
2.3.1 系统模型	046
2.3.2 信号源为单天线 RRH	047
2.3.3 信号源为多天线 RRH	048
2.4 数值仿真分析	048
2.5 C-RAN 上行场景性能分析	052



2.5.1	系统模型	052
2.5.2	用户接入策略	053
2.5.3	系统性能分析	054
2.5.4	数值仿真分析	065
2.6	C-RAN 下行场景性能分析	067
2.6.1	系统模型	068
2.6.2	用户接入策略	069
2.6.3	系统性能分析	070
2.6.4	数值仿真分析	073
2.7	C-RAN 室内场景性能分析	074
2.7.1	系统模型	074
2.7.2	用户接入策略	076
2.7.3	性能分析	077
2.7.4	数值仿真分析	081
2.8	小结	083
	参考文献	084
第 3 章	异构云无线接入网络理论性能	087
3.1	基于用户接入的 H-CRAN 理论性能	089
3.1.1	用户接入策略	091
3.1.2	系统性能分析	093
3.1.3	数值仿真分析	105
3.2	基于预编码策略的中断概率性能	109
3.2.1	预编码技术	109
3.2.2	系统模型	110
3.2.3	不同预编码下用户 SINR 分布	112
3.2.4	两种预编码策略下的系统中断概率	114
3.2.5	仿真结果分析	118
3.3	基于预编码策略的容量和误比特率性能	119
3.3.1	两种预编码的系统容量	121
3.3.2	两种预编码的平均误比特率	125
3.3.3	性能分析	126
	参考文献	128



第4章 雾无线接入网络理论性能 .....	129
4.1 基于随机几何的 F-RAN 理论传输性能 .....	130
4.1.1 典型用户接入特定 RRH 的有效容量 .....	136
4.1.2 典型用户接入 RRH 协作簇的平均有效容量 .....	138
4.1.3 典型用户接入 RRH 协作簇的能量效率 .....	140
4.1.4 基于博弈理论的传输性能优化 .....	141
4.1.5 仿真结果与分析 .....	150
4.2 F-RAN 中基于内容缓存的传输方法 .....	154
4.2.1 基于 F-AP 的内容传输 .....	157
4.2.2 基于 RRH 协作簇的内容传输 .....	158
4.2.3 内容接入策略和缓存部署方法 .....	159
4.2.4 服务簇的传输需求量 .....	160
4.2.5 内容传输的平均遍历速率 .....	161
4.2.6 传输的等待时延和时延比率 .....	165
4.2.7 面向时延性能的传输方法分析 .....	170
4.3 仿真结果与分析 .....	172
4.3.1 推论 4-2 和推论 4-3 的平均遍历速率的准确性验证 .....	172
4.3.2 用户请求单个内容对象的等待时延 .....	173
4.3.3 用户请求多个内容对象的等待时延 .....	174
参考文献 .....	175
第5章 云无线接入网络信道估计技术 .....	177
5.1 信道估计技术概述 .....	178
5.1.1 导频辅助的信道估计 .....	179
5.1.2 基于叠加导频的信道估计 .....	180
5.1.3 盲或半盲信道估计 .....	182
5.2 分段导频传输方案和信道估计算法研究 .....	184
5.2.1 系统建模 .....	185
5.2.2 信道建模 .....	187
5.2.3 分段导频传输 .....	189
5.2.4 数据信号传输 .....	191
5.2.5 信道估计算法设计 .....	192
5.2.6 克拉美罗界 .....	196



5.3 数据接收检测方案和导频优化设计研究	202
5.3.1 数据检测和导频结构设计	204
5.3.2 系统模型与信道建模	204
5.3.3 上行数据信号检测矩阵	205
5.3.4 前传链路导频结构设计	207
5.3.5 接入链路导频结构设计	210
5.3.6 联合 MRC-ZF 接收检测	216
5.3.7 基于频谱效率的导频设计	221
5.4 仿真评估与性能验证	223
5.4.1 仿真场景设置	224
5.4.2 信道估计算法的仿真实现与性能验证	225
5.4.3 导频结构优化设计的仿真实现与性能验证	229
参考文献	233
<b>第 6 章 云无线接入网络的半盲信道估计</b>	<b>237</b>
6.1 理想前传链路下的半盲信道估计	239
6.1.1 C-RAN 传输方法	239
6.1.2 C-RAN 半盲信道估计算法	240
6.1.3 仿真结果与分析	242
6.2 非理想无线前传链路下的半盲信道估计	244
6.2.1 系统模型与传输方法	244
6.2.2 半盲信道估计优化算法	247
6.2.3 仿真结果与分析	257
6.3 非理想无线前传链路下的低复杂度半盲信道估计	260
6.3.1 效益函数中容量的下界分析	260
6.3.2 效益函数中信道估计精度的上界分析	262
6.3.3 仿真结果与分析	267
参考文献	271
<b>第 7 章 云无线接入网络的资源分配</b>	<b>273</b>
7.1 基于业务队列的协作多点传输下的动态无线资源分配	274
7.1.1 系统模型	276
7.1.2 混合多点协作传输方案	277
7.1.3 基于马尔可夫决策过程的问题建模	281



7.1.4	低复杂度功率和速率分配策略 .....	284
7.1.5	仿真验证与结果分析 .....	288
7.2	基于业务队列的面向预编码优化的动态无线资源优化 .....	292
7.2.1	系统模型 .....	293
7.2.2	基于马尔可夫决策过程的问题建模 .....	295
7.2.3	低复杂度协作预编码策略 .....	297
7.2.4	性能仿真验证 .....	302
7.3	基于业务队列的联合节点选择的动态无线资源优化 .....	305
7.3.1	系统模型和问题建模 .....	306
7.3.2	基于李雅普诺夫优化的问题转化 .....	309
7.3.3	基于组稀疏波束成形的等效算法 .....	312
7.3.4	基于松弛整数规划的等效算法 .....	318
7.3.5	仿真验证与结果分析 .....	322
	参考文献 .....	328
<b>第 8 章</b>	<b>异构云无线接入网络的资源分配 .....</b>	<b>333</b>
8.1	基于业务队列的联合拥塞控制的动态无线资源优化 .....	334
8.1.1	系统模型 .....	336
8.1.2	准入控制模型 .....	339
8.1.3	问题建模 .....	340
8.2	基于李雅普诺夫优化的问题转化和分解 .....	342
8.2.1	虚拟性能队列的引入 .....	342
8.2.2	随机优化问题的转化 .....	344
8.2.3	等效优化问题的分解 .....	345
8.3	低复杂度资源分配优化算法 .....	346
8.3.1	连续性放松 .....	347
8.3.2	拉格朗日对偶分解 .....	348
8.4	算法性能界分析 .....	351
8.4.1	瞬时队列长度界 .....	351
8.4.2	吞吐量效益性能 .....	352
8.5	仿真验证与结果分析 .....	354
8.5.1	仿真场景与参数设置 .....	354
8.5.2	仿真结果与分析 .....	354
	参考文献 .....	360



第 9 章 雾无线接入网络的资源分配 .....	363
9.1 传统性能评估指标及挑战 .....	364
9.1.1 传统性能指标 .....	366
9.1.2 新的性能指标 .....	367
9.2 基于经济频谱效率的资源分配 .....	371
9.2.1 谱效模型 .....	371
9.2.2 前传链路成本模型 .....	373
9.2.3 经济有效的频谱效率模型 .....	373
9.2.4 系统问题描述 .....	374
9.2.5 系统问题建模分析 .....	375
9.2.6 算法仿真结果分析 .....	384
9.3 F-RAN 系统联合 D2D 的资源分配优化 .....	390
9.3.1 D2D 模型 .....	390
9.3.2 成本模型 .....	392
9.3.3 系统问题描述 .....	393
9.3.4 优化问题解决 .....	394
9.3.5 优化问题算法仿真 .....	402
参考文献 .....	406
名词索引 .....	409





## 第1章

# 无线接入网络演进

为了满足人机物互联的需求，无线接入网络需要突破传统人与人通信的格局，向人与物、物与物通信支撑演进。本章基于 5G 无线网络的性能需求，介绍了热点超密集无线接入网络演进方案，包括云无线接入网络、异构云无线接入网络和雾无线接入网络。具体而言，描述了这些演进接入网络的技术特征、网络架构、关键技术、问题挑战等，为后续章节内容提供了架构背景和系统演进基础。