



国家重点图书出版规划项目

5G丛书

5G无线接入网络：雾计算和云计算

彭木根 编著

5G Wireless Access Network:
Fog Computing and
Cloud Computing



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

★ ★ ★ ★ ★
“十三五”
国家重点图书出版规划项目

5G丛书

5G无线接入网络：雾计算和云计算

彭木根 编著

5G Wireless Access Network:
Fog Computing and
Cloud Computing

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，2018.1

(5G丛书)

ISBN 978-7-115-46879-6

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(2017)第266481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。本书内容详实丰富、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>

北京市艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本：800×1000 1/16

印张：26

2018 年 1 月第 1 版

字数：487 千字

2018 年 1 月北京第 1 次印刷

定价：108.00 元

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

反盗版热线：(010)81055315

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。传统的 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、低功耗等性能的业务或者应用需求。

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 年的时间内从第二代移动通信系统 (2G) 迅速演进到 5G, “天花板”效应显著, 急需引进先进理论和技术才能有效突破。借鉴云计算和雾计算, 实现计算和通信的有效融合, 可以有效解锁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, 以抑制小区间干扰, 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 各种性能目标要求, 已经成为 5G 接入网络的重要解决方案, 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 发展的去程链路容量开销和时延过大等问题，也能够通过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 可以视为 4G 超密集异构组网的演进，也是 5G 的重要组成，未来将同时共存，揭示这些不同接入网络的工作机理和性能差异，在目前阶段尤其重要。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 9 章：第 1 章让读者建立面向 5G 的新一代无线接入网络的原理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，给出了容量和误比特率性能对比；第 4 章描述了 F-RAN 的组网性能，特别是介绍了缓存的影响以及时延性能；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去程链路下的性能；第 7 章描述了面向业务队列时延感知的 C-RAN 资源分配机制，给出了不同资源分配优化方法；第 8 章介绍了 H-CRAN 的资源分配优化方法，强调了基于异构资源共享和干扰控制的资源分配方法设计；第 9 章针对 F-RAN 需要新的性能评估指标这一需求，介绍了一种经济频谱效率指标，并给出了基于新性能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，还得到了美国普林斯顿大学 Poor 教授、北京邮电大学王文博教授、新加坡科技设计大学 Tony

教授、英国兰卡斯特大学 Ding 教授等的指导帮助以及中国信息通信研究院、中国电信创新中心、大唐移动等单位的大力支持，他们提供了许多宝贵建议或有益帮助，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 标准化工作还处于起步阶段，5G 接入网络架构及关键技术也在不断演进，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。

彭木根

2017 年 7 月 21 日

目 录

第 1 章 无线接入网络演进	1
1.1 云无线接入网络	4
1.1.1 C-RAN 历史发展	6
1.1.2 C-RAN 优缺点	7
1.1.3 C-RAN 挑战	8
1.2 异构云无线接入网络	9
1.3 雾无线接入网络	14
1.3.1 F-RAN 系统架构	15
1.3.2 F-RAN 关键技术	16
1.3.3 F-RAN 技术挑战	22
1.4 F-RAN 网络切片架构	23
1.4.1 基于边缘计算的接入网络切片	25
1.4.2 F-RAN 接入网络切片关键技术	27
1.4.3 F-RAN 接入网络切片挑战	31
参考文献	32
第 2 章 云无线接入网络性能	39
2.1 基于空间点过程的节点位置分布模型	41
2.1.1 泊松点过程	41

2.1.2	泊松—费列罗里模型	42
2.1.3	用户距离分布	43
2.2	不同场景信道特征研究	44
2.3	有用信号分布	46
2.3.1	系统模型	46
2.3.2	信号源为单天线 RRH	46
2.3.3	信号源为多天线 RRH	47
2.4	数值仿真分析	48
2.5	C-RAN 上行场景性能分析	51
2.5.1	系统模型	51
2.5.2	用户接入策略	53
2.5.3	系统性能分析	54
2.5.4	数值仿真分析	64
2.6	C-RAN 下行场景性能分析	67
2.6.1	系统模型	67
2.6.2	用户接入策略	68
2.6.3	系统性能分析	69
2.6.4	数值仿真分析	72
2.7	C-RAN 室内场景性能分析	73
2.7.1	系统模型	74
2.7.2	用户接入策略	75
2.7.3	性能分析	76
2.7.4	数值仿真分析	80
2.8	小结	82
	参考文献	83

第3章 异构云无线接入网络理论性能 87

3.1	基于用户接入的 H-CRAN 理论性能	89
3.1.1	用户接入策略	90
3.1.2	系统性能分析	93

3.1.3	数值仿真分析	104
3.2	基于预编码策略的中断概率性能	108
3.2.1	预编码技术	108
3.2.2	系统模型	109
3.2.3	不同预编码下用户 SINR 分布	111
3.2.4	两种预编码策略下的系统中断概率	113
3.2.5	仿真结果分析	116
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	120
3.3.2	两种预编码的平均误比特率	123
3.3.3	性能分析	124
	参考文献	126
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	135
4.1.2	典型用户接入 RRH 协作簇的平均有效容量	137
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	149
4.2	F-RAN 中基于内容缓存的传输方法	153
4.2.1	基于 F-AP 的内容传输	155
4.2.2	基于 RRH 协作簇的内容传输	156
4.2.3	内容接入策略和缓存部署方法	157
4.2.4	服务簇的传输需求量	157
4.2.5	内容传输的平均遍历速率	159
4.2.6	传输的等待时延和时延比率	162
4.2.7	面向时延性能的传输方法分析	167
4.3	仿真结果与分析	169
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	169

4.3.2	用户请求单个内容对象的等待时延	170
4.3.3	用户请求多个内容对象的等待时延	171
	参考文献	172
第5章	云无线接入网络信道估计技术	175
5.1	信道估计技术概述	176
5.1.1	导频辅助的信道估计	176
5.1.2	基于叠加导频的信道估计	178
5.1.3	盲或半盲信道估计	180
5.2	分段导频传输方案和信道估计算法研究	181
5.2.1	系统建模	183
5.2.2	信道建模	184
5.2.3	分段导频传输	186
5.2.4	数据信号传输	188
5.2.5	信道估计算法设计	189
5.2.6	克拉美罗界	192
5.3	数据接收检测方案和导频优化设计研究	198
5.3.1	数据检测和导频结构设计	200
5.3.2	系统模型与信道建模	201
5.3.3	上行数据信号检测矩阵	201
5.3.4	去程链路导频结构设计	203
5.3.5	接入链路导频结构设计	206
5.3.6	联合 MRC-ZF 接收检测	211
5.3.7	基于频谱效率的导频设计	216
5.4	仿真评估与性能验证	218
5.4.1	仿真场景设置	219
5.4.2	信道估计算法的仿真实现与性能验证	220
5.4.3	导频结构优化设计的仿真实现与性能验证	224
	参考文献	228

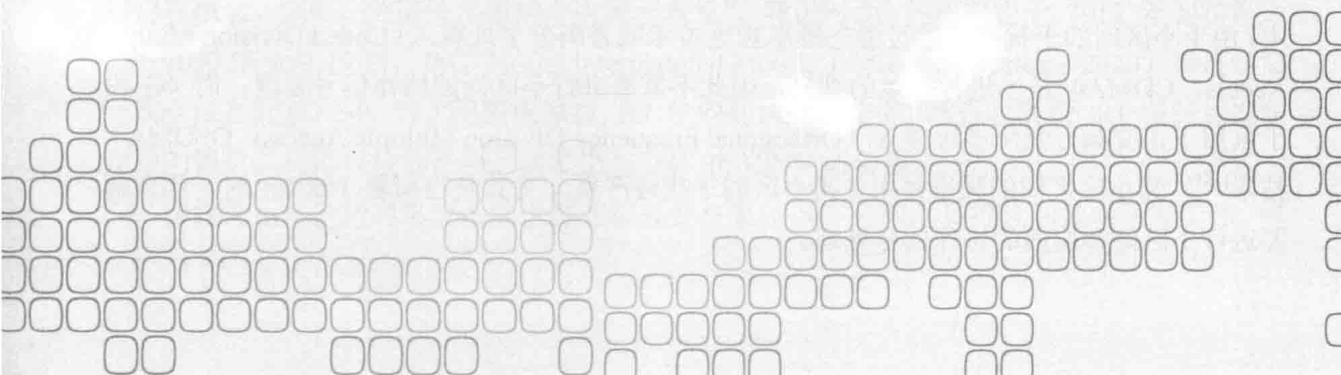
第 6 章 云无线接入网络的半盲信道估计	233
6.1 理想去程链路下的半盲信道估计	234
6.1.1 C-RAN 传输方法	235
6.1.2 C-RAN 半盲信道估计算法	236
6.1.3 仿真结果与分析	238
6.2 非理想无线去程链路下的半盲信道估计	239
6.2.1 系统模型与传输方法	240
6.2.2 半盲信道估计优化算法	242
6.2.3 仿真结果与分析	251
6.3 非理想无线去程链路下的低复杂度半盲信道估计	254
6.3.1 效益函数中容量的下界分析	255
6.3.2 效益函数中信道估计精度的上界分析	256
6.3.3 仿真结果与分析	262
参考文献	265
第 7 章 云无线接入网络的资源分配	269
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	270
7.1.1 系统模型	272
7.1.2 混合多点协作传输方案	273
7.1.3 基于马尔可夫决策过程的问题建模	276
7.1.4 低复杂度功率和速率分配策略	279
7.1.5 仿真验证与结果分析	283
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	285
7.2.1 系统模型	287
7.2.2 基于马尔可夫决策过程的问题建模	289
7.2.3 低复杂度协作预编码策略	291
7.2.4 性能仿真验证	295
7.3 基于业务队列的联合节点选择的动态无线资源优化	298
7.3.1 系统模型和问题建模	299

7.3.2	基于李雅普诺夫优化的问题转化	303
7.3.3	基于组稀疏波束成形的等效算法	305
7.3.4	基于松弛整数规划的等效算法	312
7.3.5	仿真验证与结果分析	315
	参考文献	321
第 8 章	异构云无线接入网络的资源分配	327
8.1	基于业务队列的联合拥塞控制的动态无线资源优化	328
8.1.1	系统模型	329
8.1.2	准入控制模型	333
8.1.3	问题建模	334
8.2	基于李雅普诺夫优化的问题转化和分解	335
8.2.1	虚拟性能队列的引入	335
8.2.2	随机优化问题的转化	337
8.2.3	等效优化问题的分解	338
8.3	低复杂度资源分配优化算法	339
8.3.1	连续性放松	340
8.3.2	拉格朗日对偶分解	341
8.4	算法性能界分析	344
8.4.1	瞬时队列长度界	344
8.4.2	吞吐量效益性能	345
8.5	仿真验证与结果分析	347
8.5.1	仿真场景与参数设置	347
8.5.2	仿真结果与分析	347
	参考文献	353
第 9 章	雾无线接入网络的资源分配	357
9.1	传统性能评估指标及挑战	358
9.1.1	传统性能指标	359
9.1.2	新的性能指标	361

9.2 基于经济频谱效率的资源分配	364
9.2.1 谱效模型	365
9.2.2 去程链路成本模型	366
9.2.3 经济有效的频谱效率模型	367
9.2.4 系统问题描述	368
9.2.5 系统问题建模分析	369
9.2.6 算法仿真结果分析	377
9.3 F-RAN 系统联合 D2D 的资源分配优化	383
9.3.1 D2D 模型	383
9.3.2 成本模型	385
9.3.3 系统问题描述	385
9.3.4 优化问题解决	387
9.3.5 优化问题算法仿真	395
参考文献	398

第 1 章

无线接入网络演进



近年来,随着移动互联网、物联网、智能终端应用和智能可穿戴电子设备的迅猛发展,多样化的移动多媒体业务需求急剧增长,无线分组数据业务量按指数递增,移动用户不再满足于普通的语音通信和简单的数据通信。根据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的年度报告^[1],截至2013年底,全球移动宽带用户数有20多亿,而根据爱立信的分析^[2],这一数据将在2018年增长至65亿人。与此同时,根据通用移动通信系统(Universal Mobile Telecommunication System, UMTS)论坛报告^[3],西欧国家的移动业务数据的日均总量将从2010年的186 TB(terabyte)增长至2020年的12 540 TB,预期增长高达67倍;而全球移动业务数据量将在2025年增长到351 EB(exabyte),相比2020年将增长174%。此外,快速增长的移动多媒体业务和智能应用具有“突发、局部、热点化”等特征,业务及应用在地域上分布不均匀,在用户海量聚集的部分热点区域,业务数据量成指数倍提升,基站与核心网的负载极大增加,导致网络易过载、业务时延长,甚至脆弱易瘫痪等^[4]。然而,传统无线网络中的接入网在部署、建设与运维中存在各种问题挑战,如潮汐效应、高能耗、高运营成本(Operational Expenditure, OPEX)与资本支出(Capital Expenditure, CAPEX)等;此外,ITU为移动通信系统分配的带宽不足600 MHz。因此,为了支撑剧增的移动多媒体业务需求,具有大容量、高传输速率能力的新一代宽带移动通信亟待发展和突破,力求提高单位面积的频谱效率^[5]。

为了更好地解锁移动通信所面临的窘境和解决日益增长的分组数据传输速率需求,第四代移动通信系统(4G)将微(micro)基站^[6]、微微(pico)基站^[7]、中继(relay)^[8]、家庭基站(Femto Access Point, FAP)^[9,10]、分布式天线(Distributed Antenna System, DAS)^[11]等各种不同类型的低功率节点(Low Power Node, LPN)部署在宏基站(Macro Base Station, MBS)的覆盖范围内,组建成分层异构无线网络(Heterogeneous Network, HetNet),其中传统的宏基站负责基本通信覆盖需求,而低功率节点满足盲区覆盖和服务热点区域的高速率传输需求。参考文献[12]系统介绍了HetNet的原理和关键技术,参考文献[13]总结了HetNet的主要技术挑战和现有的研究成果。图1-1描述了从第一代移动通信系统(1G)到4G的网络架构的演进过程。在传统的1G、第二代移动通信系统(2G)、第三代移动通信系统(3G)中,由于小区间的干扰可以通过静态频率规划技术或者码分多址接入(Coded Division Multiple Access, CDMA)技术进行有效的抑制,因此不需要进行小区间的协作信号处理。而4G由于采用了正交频分复用多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术^[14],邻小区之间的频谱复用使得小区间干扰较严重,尤其是当部署HetNet时,因此需要进行小区间和层间的协作信号处理。

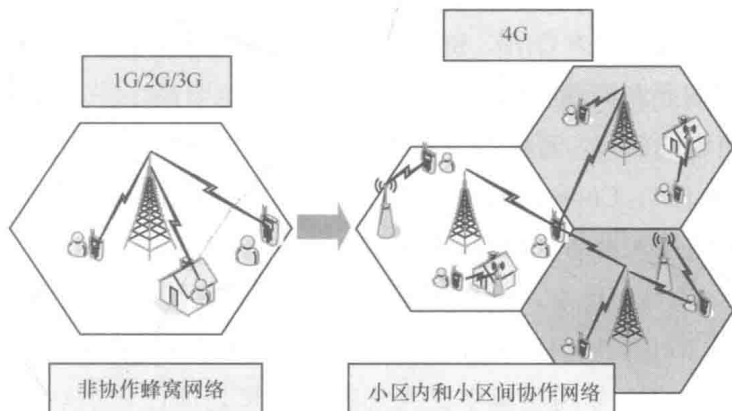


图 1-1 蜂窝网络架构的演变过程

在异构无线网络（HetNet）中，低功率节点间或者中继和基站间的回程链路（backhaul）容量易受限，导致协作多点传输（Coordinated Multi-Point, CoMP）技术的性能增益较理想状态差距较大，且低功率节点密度大容易引起网络规划优化管理复杂、成本高、频谱效率（Spectral Efficiency, SE）和能量效率（Energy Efficiency, EE）低等问题。此外，预先设置的低功率节点位置一般都是固定的，难以自适应用户业务的“潮汐”效应，更难实现以用户为中心的动态组网。已有研究和试验网测试表明，在低功率节点较密集的区域，当负载较高时采用 CoMP 后的平均吞吐率性能增益不明显，边缘用户的平均吞吐率增益最大约为 1 倍^[15]。由此可见，高密度 HetNet 的主要问题在于网络频谱效率和能量效率较 5G 性能目标有较大差距，且干扰和组网问题的解决难度较大，应用场景也受限^[16]。因此，超密集 HetNet 并不能大幅提升单位面积网络的频谱效率和能量效率，且对相邻节点分布式干扰协作的要求较高，不仅实现难度大，网络规划优化也很复杂。

近年来，随着 4G 的成熟与推广应用，国内外陆续展开 5G 的研究工作。2012 年 11 月，欧盟宣布启动了 METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the 2020 Information Society-2, 2020 年信息社会的无线移动通信关键技术-2) 项目，目标是“为建立下一代移动和无线通信系统奠定基础，为未来的移动通信和无线技术在需求、特性和指标上达成共识，取得在概念、雏形、关键技术组成上的统一意见”。我国对 5G 的研究也于 2013 年初拉开大幕，2013 年 4 月 19 日，IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020) 推进组第一次会议在北京召开。为了保障国家在 5G 中的知识产权比例，增强我国在 5G 国际标准制定中的地位，我国科技部已经启动多个与 5G 相关的科研项目。

国内外运营商和网络设备商也都在积极参与面向 5G 系统的标准化和技术研发工作，提

升自身在移动互联网时代的竞争力。例如美国的 IBM、微软和 Intel，欧洲的法国电信、爱立信、诺基亚西门子和阿尔卡特朗讯，中国的三大运营商、华为和中兴等。我国移动运营商走在技术演进的前列，例如中国移动在产业界率先提出了融合 Clean（节能减排）、Centralized（集中处理）、Cooperative（协作式无线电）和 Cloud（利用了云计算能力的软硬件平台）的云无线接入网络（Cloud Radio Access Network, C-RAN）^[17]。进一步结合 HetNet 和 C-RAN 各自的优点，业界随后又提出了异构云无线接入网络（Heterogeneous Cloud Radio Access Network, H-CRAN）^[18]的先进组网方法。C-RAN 和 H-CRAN 结合软件定义网络的发展，充分利用集中式大规模云计算处理，让小功率节点简化为 RRH（Remote Radio Head），和多个传统的基带处理单元（Baseband Unit, BBU）集中到一起形成 BBU 池，从而把绝大部分小功率节点的无线信号处理和资源管理都集中到 BBU 池，能够获得集中式大规模协同信号处理和资源管理增益，无论是网络的频谱效率，还是能量效率都提升显著。

1.1 云无线接入网络

C-RAN 架构如图 1-2 所示，该架构主要包括 3 个部分：由 RRH 组成的分布式无线接入网络；用于连接 RRH 的高带宽、低时延光纤或光传输网；由高性能通用处理器和实时虚拟技术组成的集中式 BBU 池^[20]。在 BBU 池处进行集中的虚拟化资源管理，以便实现多个 RRH 间的协同处理和资源共享。这样的 BBU 池集中式处理和 RRH 分布式部署的架构使得 C-RAN 具有以下优点。

- 移动运营商能够更容易地通过新增部署 RRH 来扩展和升级网络，因此能够显著降低运营成本；基站的集中式放置与集中化运维管理不仅使得基站的部署数量相对于传统网络大大减少，而且能够降低制冷设备等相关配套设备的能耗，因此能够显著地缩减资金支出。相关分析结果表明^[20]，相对于传统 LTE（Long Term Evolution）网络，C-RAN 能降低 10%~15% 的资金支出。
- 集中式的基带处理便于在 RRH 处进行协同无线信号处理，以实现无线信道的自适应动态适配和干扰抑制，提高网络的频谱效率；高密度的 RRH 部署使得其与用户距离减小，从而降低了网络端与用户端的发射功率并提高了网络的能量效率。另外，