

WILEY

5G与未来 无线通信系统 回传和前传网络揭秘

[葡] 卡齐·默罕默德·塞杜·哈克 (Kazi Mohammed Saidul Huq) 编
乔纳森·罗德里格斯 (Jonathan Rodriguez)

丁雨明 李祎斐 译



Backhauling/Fronthauling
for Future Wireless Systems

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

非外借

5G 与未来无线通信系统： 回传和前传网络揭秘

[葡] 卡齐·默罕默德·塞杜·哈克 (Kazi Mohammed Saidul Huq) 编
乔纳森·罗德里格斯 (Jonathan Rodriguez)

丁雨明 李祎斐 译



机械工业出版社

Copyright © 2017 by John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Backhauling/Fronthauling For Future Wireless Systems, ISBN: 9781119170341, by Kazi Mohammed Saidul Huq and Jonathan Rodriguez, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2017-3092 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

5G 与未来无线通信系统: 回传和前传网络揭秘/
(葡) 卡齐·默罕默德·塞杜·哈克等编; 丁雨明,
李祎斐译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 11

书名原文: Backhauling/Fronthauling For Future Wireless Systems

ISBN 978-7-111-58032-4

I. ①5… II. ①卡… ②丁… ③李… III. ①无线
电通信-通信系统-研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 229470 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕 潇 责任编辑: 吕 潇

责任校对: 郑 婕 封面设计: 马精明

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 11.5 印张 · 219 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58032-4

定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书将未来移动通信系统（比如 5G）中智能回传/前传研究领域的相关人士汇聚一堂，阐述了学术上和工业上的理论与实际的技术挑战，以及最新的研究成果。除此之外，本书还对不同种类的回传/前传技术和拓扑结构进行了综合性的分析，讨论了已经可行的回传/前传的拓扑结构，阐释了部署未来智能/高效回传/前传基础设施在结构、技术和商业观点上的全部需求，并展示了实际生活中的应用案例。本书由众多领域的具体主题组成，章节的安排从概览到特定的专题，由浅入深，结构严谨。

本书适合从事无线通信和传输网络技术的研发和研究工程师阅读，也可作为大学相关专业本科生和研究生的参考书。

原书前言

PREFASCE

在移动通信系统中，连接核心到接入网的部分称为“回传”。任何电信网络边缘都需要通过回传连接。回传研究的重要性是由于现如今需要增加数据容量和覆盖面，以满足日益增长的电子设备（智能手机、平板电脑和笔记本电脑）的数量，预计到2020年这将达到前所未有的水平。回传预计将在处理大流量方面发挥关键作用，其处理能力由移动宽带和引入异构网络（HetNets）的严格要求决定。虽然回传技术已经被广泛地用于传统移动系统中，但仍然是主导下一代移动系统研究领域的主题。很明显，如果没有适当的回传，那么任何新的无线电接入网络技术和协议引入的益处都将黯然失色。

传统上，回传部分将无线接入网络（RAN）连接到小区站点中处理基带的网络的其余部分。然而，随着下一代网络的开始，“前传接入”概念的势头也在增长。未来的技术路线图将把SDN（Software-Defined Network, 软件定义网络）和网络虚拟化作为在不同的移动运营商之间分享资源需求的有效手段，从而朝着降低未来网络运营和资本支出的方向迈进。此外，基带处理将集中化，允许运营商通过协调的资源管理策略完全管理干扰。实际上，3GPP目前正在将C-RAN架构可视化，其中演进的基站通过通信传输连接到云无线接入网络（C-RAN）小区，被称为“前传网络”。传统上，光纤技术用于基站的部署；然而，这伴随着固有的局限性，包括许多小型站点的成本和缺乏可用性。这为无线电解决方案提供了动力，这些无线电解决方案可以在前传接入中处理大量的流量，从而引发整个研究界寻找光纤的替代品和高级解决方案。

目前在回传和前传技术方面的工作是分散的，还处于起步阶段。为下一代网络提供现代化的通信方式，这就是5G，开发具体的解决方案仍然有很多方法。本书旨在将5G网络的前传和回传接入相关的讨论整合在一起。我们的目标是讨论通信基础设施的这些关键部分，并提供所有通信基础设施开始的视角，以及LTE/LTE-A网络方面和5G未来挑战的视角。此外，本书还介绍了不同

类型的回传/前传技术的综合分析，同时引入了创新的协议架构。

在编写本书时，作者们借鉴了他们在国际研究方面的丰富经验，并在通信传输研究领域和标准化方面处于领先地位。这本书旨在为下一代通信传输提供一个有用的参考，不仅使研究生更多地了解这个不断发展的领域，而且也激励移动通信研究人员在这个领域进一步迈出创新步伐，并在 5G 舞台上留下足迹。

Kazi Mohammed Saidul Huq

Jonathan Rodriguez

葡萄牙阿维罗电信研究所

原书致谢

这是一本为传统和新兴的移动通信网络处理通信研究挑战的书，编者希望它能为研究人员带来关于这个话题新的突破性的灵感来源。本书的灵感来源于作者们在欧洲研究未来无线系统回传/前传架构前沿的丰富经验，包括 E-COOP 项目 (UID/ EEA/ 50008/2013)，这是一个由葡萄牙电信研究所资助的跨学科研究计划。但是，如果没有那些为此而作出贡献的人，这项工作将不会完成。编者首先要感谢所有的合作者，他们完成的章节汇编成本书，提供补充思想并且建立一个完整的通信视野。此外，衷心感谢研究所的 4TELL 研究组成员贡献了有用的建议和修订。此外，编者还要感谢 FCT- 葡萄牙基金会支持这项工作。

Kazi Mohammed Saidul Huq

Jonathan Rodriguez

葡萄牙阿维罗电信研究所

目 录

CONTENTS

原书前言

原书致谢

第 1 章 引言：通信挑战	1
参考文献	6
第 2 章 5G 应用的一种 C-RAN 方法	7
2.1 引言	7
2.2 从有线到无线回传/前传技术	8
2.3 基于 3GPP 的协调系统架构	9
2.4 C-RAN 的参考架构	12
2.4.1 基于前传的 C-RAN 的系统架构	12
2.4.2 云资源优化器	13
2.5 基于 C-RAN 的移动系统的潜在应用	16
2.5.1 D2D 服务的虚拟化	16
2.5.2 数值分析	17
2.6 结论	20
参考文献	21
第 3 章 具有大规模 MIMO 毫米波通信的回传 5G 小小区	23
3.1 引言	23
3.2 5G 小小区的现有无线回传解决方案	24
3.3 毫米波和大规模 MIMO 技术的基础知识	25
3.3.1 毫米波通信	25
3.3.2 具有大天线阵列的 MU-MIMO	26
3.4 毫米波回传：状态和问题研究	27
3.4.1 LOS 毫米波回传	27

3.4.2	NLOS 毫米波回传	28
3.4.3	5G 网络回传的研究挑战	29
3.5	案例研究: 基于大规模 MIMO 的毫米波回传系统	31
3.5.1	系统模型	32
3.5.2	最大化用户速率	34
3.5.3	用户匹配理论	35
3.5.4	数值结果	37
3.6	结论	40
	致谢	40
	参考文献	40
第 4 章	云端无线接入网络中的灵活集中式前传	43
4.1	引言	43
4.2	无线电接入网络架构	44
4.3	功能拆分选项	45
4.4	灵活功能拆分的要求	47
4.4.1	拆分选项 A	47
4.4.2	拆分选项 B	48
4.4.3	拆分选项 C	49
4.4.4	拆分选项 D	50
4.4.5	总结和示例	50
4.5	灵活集中网络中的统计复用	52
4.5.1	每个基站的 FH 数据速率分布	53
4.5.2	中断率	54
4.5.3	聚合链路统计复用	54
4.6	前传和回传技术的融合	57
4.6.1	PHY 层技术	57
4.6.2	数据/MAC 层技术	60
4.6.3	网络层技术	60
4.6.4	控制和管理平台	61
4.7	灵活功能拆分的启动器	61
4.8	结论	63
	致谢	64
	参考文献	64
第 5 章	异构回传技术的分析与优化	67

5.1	引言	67
5.2	回传模型	69
5.2.1	网络模型	69
5.2.2	延迟模型	70
5.2.3	成本模型	72
5.3	回传包延迟分析	73
5.3.1	平均回传包延迟	73
5.3.2	延迟限制的成功概率	75
5.3.3	性能评估	76
5.4	回传部署成本分析	79
5.5	回传感知 BS 关联策略	82
5.5.1	平均网络包延迟	82
5.5.2	BS 关联策略	84
5.5.3	数值结果	86
5.6	结论	91
	参考文献	91
第 6 章	异构网络有服务质量保证的动态增强型小区间干扰协调策略	94
6.1	引言	94
6.2	系统模型和问题陈述	95
6.2.1	网络环境	95
6.2.2	QoS 约束	98
6.2.3	问题陈述	99
6.3	动态干扰协调策略	100
6.3.1	SMDP 分析	100
6.3.2	具有 QoS 约束的准入控制	101
6.3.3	联合动态 eICIC 和总速率最大化的准入控制	103
6.3.4	联合动态 eICIC 和比例平衡最大化准入控制	104
6.4	数值结果	105
6.5	结论	113
	参考文献	113
第 7 章	联合优化无线电接入和异构蜂窝网络回传的小区选择	116
7.1	引言	116
7.2	系统模型和问题陈述	117
7.2.1	联合 RAN/BH 容量	119

7.2.2	问题陈述	122
7.3	建议解决方案	122
7.3.1	演进	122
7.3.2	宽松	124
7.3.3	拟议算法的实际实施	126
7.4	模拟结果	127
7.5	结论	134
	参考文献	134
第 8 章	用于高速无线回传的多频段和多信道聚合：挑战和解决方案	136
8.1	引言	136
8.2	无线回传频谱	138
8.2.1	微波带和信道分配	138
8.2.2	毫米波段和使用趋势	139
8.3	多频段和多信道聚合	140
8.3.1	频段和信道聚合概述	140
8.3.2	系统架构	141
8.3.3	子频段聚合和实现	144
8.3.4	频段和信道聚合的完整 SDR 方法	149
8.4	频谱有效的信道聚合	151
8.4.1	系统概述	151
8.4.2	没有保护带的频域复用	152
8.4.3	数字中频信号的生成与接收	152
8.4.4	高性能 OFDM 传输	153
8.5	实践系统实例	154
8.5.1	CSIRO Ngarra 回传	155
8.5.2	CSIRO 高速 E 波段系统	155
8.6	结论	158
	参考文献	158
第 9 章	云无线电接入网络的安全挑战	160
9.1	引言	160
9.2	C-RAN 架构概述	161
9.3	C-RAN 环境中的入侵攻击	162
9.3.1	入侵攻击的入口	162
9.3.2	入侵检测计数机制的技术挑战	165

9.3.3 内部攻击	166
9.4 针对 C-RAN 的 DDoS 攻击	168
9.4.1 使用信令扩增的 DDoS 攻击	169
9.4.2 移动网络上的外部实体的 DDoS 攻击	170
9.4.3 移动网络上的外部受干扰的 IP 网络的 DDoS 攻击 ..	170
9.5 结论	171
参考文献	171

Kazi Mohammed Saidul Huq 和 Jonathan Rodriguez

葡萄牙阿维罗电信研究所

现如今，使用移动互联网已成为一种普遍现象，正改变着社会趋势并在创造数字经济中发挥着关键作用。这在一定程度上得益于半导体技术的进步，这些技术使运行速度更快且更符合能源标准的设备成为现实，如智能手机、平板电脑和传感器设备等。然而，真正智能的数字世界仍处于起步阶段，目前的趋势将继续下去，这将导致移动数据流量和智能设备以前所未有的态势增长。事实上，爱立信的一份报告显示^[1]，到2018年年底，一台传统笔记本电脑每个月将会产生11 GB的流量，一台平板电脑每个月将产生3.1 GB的流量，一部智能手机每个月将产生2GB的流量。这些数字代表着不断变化的通信模式，即终端用户不仅接收数据同时还生成数据。换句话说，终端用户将成为高流量消耗应用程序的“产消者”，例如高清无线视频应用、机对机通信应用、健康监控应用和社交网络。因此，现有技术需要进行彻底的工程设计升级，以便能够满足日益提升的用户期望，同时应对预期流量增长。这一变化将受到市场预期的驱动，而如今人们开始关注的新技术是5G通信技术^[2]。

专家预计，5G将实现和满足无线连接新时代的期望，并将在实现所谓的数字世界方面发挥关键作用。

与传统的4G系统相比，对5G的要求已经从如下方面达成广泛共识^[3,4]：

- 1) 容量：面积容量增加1000倍；
- 2) 延迟：RTT（Round Trip Time，往返时间）延迟小于1ms；
- 3) 能源：以J/bit为单位，提高能源效率100倍；
- 4) 成本：部署成本降低10~100倍；
- 5) 移动性：移动性支持和永久连接高吞吐量要求的用户。

为了实现这些目标，所有关键的移动利益相关者，如运营商、供应商和移动研究界，正在设法重新设计移动架构，以支持更高速的数据连接。

由于BS（Basic Station，基站）和终端用户之间的距离很短，因此小小区

(small cell) 这种新兴的部署在实现快速连接方面正取得良好成效，同时还降低了能源消耗。小小区市场应用中，室内毫微微蜂窝应用已成为成功案例，那么问题是我们可以将毫微微小小区模式推广到户外世界吗？事实上，目前的趋势表明，这正是未来发展的方向——多层异构网络将成为 LTE-Advanced 标准^[5,6]新的设计补充。这里，多层无线网络（小小区层）起着关键作用，同时起作用的还有网络共存方式，用以减少层间的干扰。此外，移动技术将继续朝着这个方向发展，高密度部署的小小区将提供高数据连接覆盖区域的热点岛。在这一背景下，如何将流量从本地服务基站传输到核心网络，将是研究领域面临的新问题。通常，在传统网络中，将 BS 与 RAN (Radio Access Network, 无线电接入网络) 互联到 EPC (Evolved Packet Core, 演进包核心网) 的网络段被称为回传。在部署成本和覆盖面积有限的限制下，光纤线路或微波链路已经实现了这一作用。然而，移动技术正在朝着虚拟化和软件定义网络的时代迈进，无线电资源从公共池分配给不同的供应商，进行集中式管理。事实上，随着云服务的兴起，上述新时代在云计算领域也体现出类似的发展趋势。新兴移动网络正在朝着 C-RAN (Cloud Radio Access Network, 云无线电接入网络) 方向^[7,8]迈进，其中 RRU (Remote Radio Unit, 远程无线电小区) 与集中处理式 RAN 核心协同工作以提供协调调度，换句话说，进行干扰管理。这种范式正在改变网络中通信传输的感知，从回传到并入后端和前端。在这种情况下，回传规定了信息如何从基站到核心网络，而前传是指 C-RAN 核心网络和小小区之间的连接部分。图 1.1 所示为与传统和新兴 C-RAN 体系结构相关的回传和前传部分。

5G 未来增强的通信传输（无论是回传还是前传）预计将在 2020 年左右部署，以支持未来十年预测的无线数据的指数增长。因此，开发具有突破性的回传和前传解决方案的市场不仅可以增强当今的网络，而且还可以为 C-RAN 等新兴技术提供一致的干扰管理方法。这个通信传输的挑战为本书提供了灵感，其标题为“未来无线系统的回传/前传”。

本书旨在汇集来自学术界和行业的所有移动利益相关者，以确定和促进技术挑战以及与未来通信系统（如 5G）的回传/前传研究相关的最新结果。它概述了目前回传通信系统的方法，并解释了现实应用和案例，从技术和流量观点说明部署未来智能和高效回传/前传基础设施的理由。本书旨在激励研究人员、运营商和制造商在未来的超密集无线系统的新兴智能回传/前传覆盖领域提出突破性的想法。此外，本书还提出了详细的安全挑战，以分析未来无线智能回传/前传的性能。很明显，智能回传/前传部署可以提供一个有趣的舞台，能够为下一代无线通信系统的移动利益相关者绘制新的商业机会。这是一本针对未来无线系统进行智能回传/前传的书籍，更新了通信传输路线图上的研究团体，反映了 3GPP (3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 组当前和新兴功能。

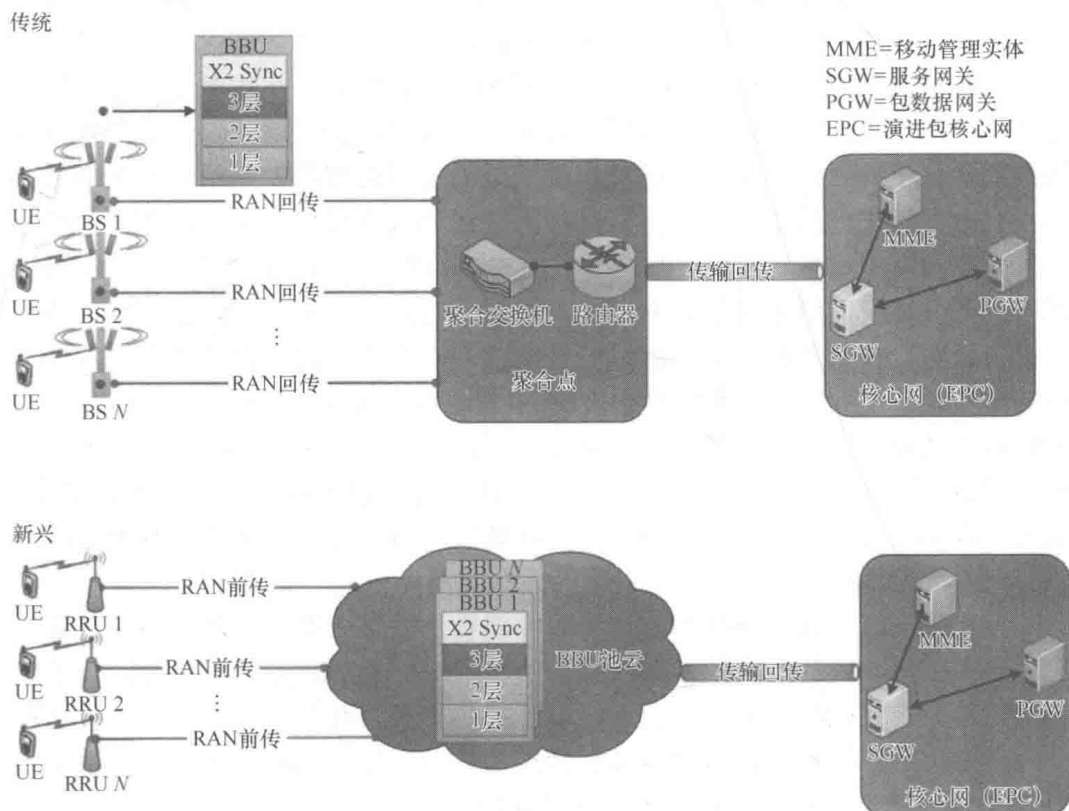


图 1.1 传统和新兴的 C-RAN 移动网络的通信传送

为了引导读者通读本书，这本书有如下的布局。在第 2 章，未来无线电通信的参考架构从 5G 的角度出发。5G 网络预计将获得香农水平和超出吞吐量且几乎零延迟。但是，如果 5G 的表现要优于传统的移动平台，则需要解决几个挑战，其中之一是通信“拖运”的设计。传统上，回传段将 RAN 连接到在小区站点发生基带处理的网络的其余部分。然而，在第 2 章中，我们将使用“前传接入”的概念，该方案最近引起了很多的关注，因为它有可能支持基于采用 C-RAN 架构的远程基带处理，该架构旨在减轻（或协调）干扰运营商部署的基础设施，这大大降低了对干扰感知收发器的要求。为此，我们提供了一个参考架构，它还包括一个网络和协议架构，并提出了一个所谓的“云资源优化器”。这种集成解决方案将成为 RAN 服务的推动者，不仅为有效的无线电资源管理铺平了道路，而且为虚拟移动服务提供商开辟了新的机会。

新兴的信道传输方法和使用较高频带（如大规模 MIMO（Multiple-Input/Multiple-Output，多输入/多输出）和毫米波）的可能性对于未来的无线系统和通信传输来说是至关重要的。第 3 章将介绍大规模 MIMO 和毫米波通信的基本原理，以及它们对小区回传和前传的适用性。此外，将概述具有大量 MIMO 和毫米

波通信的小小区无线回传性能分析模型。使用该模型，提出大量 MIMO 和/或基于毫米波的无线回传网络性能的一些数值结果。

与分散式网络架构相比，C-RAN 承诺相当大的收益。集中基带处理可实现更小的无线接入点、协作信号处理并且易于升级和维护。此外，通过实现不是在专用硬件上的处理，而是通过动态和灵活的通用处理器，基于云的网络可以实现处理元件之间的负载平衡，从而提高能源和成本效率。然而，集中化在延迟和数据速率方面也对前传网络提出了挑战性的要求。如果考虑到异构的前传，这一点尤其重要，则不仅包括专用光纤，而且包括例如毫米波链路。灵活的集中化方法可以根据负载情况、用户场景和前端链路的可用性将处理链的不同部分自适应地分配到集中基带处理器或 BS 来放宽这些要求。这不仅减少了延迟和数据速率的要求，而且还将数据速率与实际用户流量相结合。在第 4 章中将给出不同权重下方法的全面概述，并分析其在延迟和数据速率方面的具体要求。此外，我们还将展示灵活集中的性能，并提供如何设置前传网络以避免过度或不足尺寸的设计指南。

使用不同有线和无线技术的异构回传部署是满足小型和超密集网络需求的潜在解决方案。因此，评估和比较各种回传技术的性能特征至关重要，以了解其对网络聚合性能的影响，并为系统设计提供指导。在第 5 章中，作者提出相关回传模型，并研究具有不同容量和特点的各种回传技术的延迟性能，包括光纤、xDSL（数字用户线路）、毫米波和 6GHz 以下波段。使用这些模型，作者旨在优化 BS 关联，以使覆盖在小小区上的宏小区网络中的平均网络包延迟最小化。此外，作者对回传部署成本进行了模型和分析，并表明存在最小化每个小区 BS 的平均回传成本的最优网关密度。提出了数值计算结果，以显示不同回传的延迟性能特征。和传统的 BS 关联策略之间的比较显示回传对网络性能的显著影响，这表明无线电接入和回传网络的联合系统设计以及优化的重要性。

小型网络已被公认为提供更好的服务覆盖和更高的频谱效率的潜在解决方案。然而，小小区的密集部署可能会导致小区间的干扰问题，并降低小型网络的性能提升。已经在 4G 中开发了用于解决小区间干扰的各种技术。特别地，ICIC（Inter-Cell Interference Coordination，小区间干扰协调）技术可以协调两个相邻小区中的数据传输和干扰。在第 6 章中，作者考虑一个由覆盖有小型网络的宏小区网络组成的 HetNet（Heterogeneous Network，也称为异构网络），它们同时访问相同的频谱。在这里，HetNet 架构假设宏小区和小小区通过高速前传/回传连接互连。特别是由于无线用户的移动性、负载和数据流量在每个活跃的宏小区域都不同。传统的 eICIC（enhanced ICIC，静态增强 ICIC）机制不能确保 ABS（Almost Blank Subframe，几乎空白的子帧）占空比适应于动态网络条件。只有动态 eICIC 机制才适用于这种非静态网络流量。因此，作者旨在为 eICIC 制定动态干扰协调策略，以在给定 QoS 约束下最大限度地提高系统效用。与传统

的 eICIC 机制相反，本书所提出的方法不会增加任何回传要求。计算机模拟显示，QoS 要求的动态 eICIC 机制的各种场景的性能优于静态 eICIC 方法和传统的动态 eICIC 机制。

对于未来的无线系统，需要考虑回传技术联合优化的小区选择。在这方面，考虑到小区选择方面的回传，第7章将提供综合分析。本章将讨论异构蜂窝网络，其中本地部署了小小小区的群集以在宏小区区域内创建热点区域。关于这个主题的大多数研究都侧重于减轻同频干扰；然而，无线回传最近成为在小小小区中实现普遍存在的宽带无线流量的迫切挑战。在现实情况下，回传可能会限制相邻小区之间可以交换的信令量，目的是实时协调其操作；此外，在高负载小区（例如热点）中，回传可以限制终端用户的数据速率。在这里，作者开发了一种新颖的小区关联框架，其目的是平衡异构小区中的用户，以改善整体无线电和回传资源的使用，并提高系统性能。作者描述了小区负载、资源管理和回传容量限制之间的关系。然后，小区选择问题被表示为组合优化问题，并且提出了两种称为“演进”和“宽松”的启发式算法，来解决这个困境。分析表明，“演进”接近最佳解决方案，在吞吐量和资源利用效率方面，相对于基于经典 SINR（Signal-to-Interference-Plus-Noise，信号与干扰加噪声比）的关联方案，可以带来更好的改进。

高速和长距离的无线回传是一种高性价比的光纤网络替代方案。对高速宽带服务需求的不断增长，要求在无线回传中采用更高的频谱效率和更宽的带宽。随着无线移动网络向 5G 发展，采用高阶调制和执行无线回传的多频段和多信道聚合已成为行业发展趋势。然而，商用无线回传系统不能同时满足高速和长距离的严格要求。在第8章中将讨论多频段和多通道聚合的各种系统架构。解决在多频段和多通道系统中实现高速无线传输的挑战。这些挑战包括如何提高频谱效率和功率效率；如何防止信道间干扰；以及如何确保低延迟，以确保弹性数据包传输和负载平衡。

尽管 C-RAN 技术在 5G 移动通信系统中具有显著的优势，但 C-RAN 技术必须面对与虚拟系统和云计算技术相关的多种固有的安全挑战，这可能会阻碍其在市场上的成功建立。因此，解决这些挑战至关重要，以便 C-RAN 技术充分发挥潜力，促进未来 5G 移动通信系统的部署。因此，第9章将介绍 C-RAN 架构中主要组件的可能威胁和攻击的代表性示例，以便揭示 C-RAN 技术的安全挑战，并提供克服安全瓶颈的路线图。

总而言之，我们坚信这本书将为早期研究人员和开展这种无线电通信工作的学者提供有用的参考，但除此之外，它将为在这项技术的前沿工作的 5G 主要利益相关者提供灵感，在下一代系统的新通信设计中提出突破性的想法。