



工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版

5G技术丛书

5G传输关键技术

王映民 孙韶辉 高秋彬 © 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版
5G 技术丛书

5G 传输关键技术

王映民 孙韶辉 高秋彬 等编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

随着智能终端及移动互联网的快速发展,未来移动网络需要满足更高的数据传输能力要求。在无线资源有限的情况下,5G 系统需要研究高效的无线传输关键技术,建立新型的无线传输体系,解决移动通信网络面临的频谱效率和功率效率问题。本书将重点介绍面向 5G 的无线传输关键技术,结合国内外学术界和工业界的最新研究成果,对新型编码调制、大规模多天线、新型多址接入、终端间直通、全双工、信道建模等关键理论和技术进行全面介绍和详细分析,为读者呈现出 5G 无线传输技术发展的美好前景。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

5G 传输关键技术 / 王映民等编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.3

ISBN 978-7-121-30276-3

I. ①5… II. ①王… III. ①移动网—无线传输技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 266734 号

策划编辑: 窦 昊

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23.25 字数: 596 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254466, douhao@phei.com.cn。

5G 技术丛书专家委员会

专家委员会主任

邬贺铨：中国工程院院士，IMT-2020（5G）推进组顾问

专家委员会副主任

刘韵洁：中国工程院院士，中国联合网络通信集团有限公司

丛书特别顾问

张乃通：中国工程院院士，哈尔滨工业大学

专家委员会委员

曹淑敏：IMT-2020（5G）推进组组长，中国信息通信研究院原院长

张新生：中国通信学会副理事长，未来移动通信论坛常务副理事长

侯自强（中国科学院声学研究所）

王晓云（中国移动通信集团公司）

毕奇（中国电信股份有限公司）

赵先明（中兴通讯有限公司）

童文（华为技术有限公司）

陈山枝（大唐电信科技产业集团）

张平（北京邮电大学）

尤肖虎（东南大学）

李少谦（电子科技大学）

王京（清华大学）

李建东（西安电子科技大学）

5G 技术丛书编审委员会

编审委员会主任

杨 旻（中国科学院上海微系统与信息技术研究所）

编审委员会委员

杨峰义（中国电信股份有限公司）

王映民（大唐电信科技产业集团）

陶小峰（北京邮电大学）

张钦宇（哈尔滨工业大学）

金 石（东南大学）

季新生（解放军信息工程大学）

李云洲（清华大学）

葛晓虎（华中科技大学）

武 刚（电子科技大学）

王海明（东南大学）

徐 景（上海无线通信研究中心）

邬贺铨院士之序

Introduction

电子工业出版社从我国大力推动第五代移动通信系统（IMT-2020，又称 5G）研究的背景出发，通过充分调研和认真组织，策划出版“5G 技术”丛书，以期及时总结、深入分析和充分反映我国在新的无线通信国际标准制定过程中的最新进展。丛书将按照 5G 关键技术和 5G 系统设计与应用两个层面分成两卷，“关键技术卷”各分册主要从理论和技术层面对 5G 关键候选技术进行具体详实的分析和介绍，“系统设计与应用卷”各分册主要从系统和应用层面对 5G 总体架构以及关键方法的评估和应用进行深入分析和描述，各分册的作者都是国内活跃在相关研究领域的优秀中青年科研工作者，具有较强的理论研究积累和实践经验，目前又都承担了与 5G 有关的国家重大专项和“863 计划”等项目。很高兴看到这批优秀的中青年科研工作者在参与科研工作的同时，积极参加编写这套高新技术丛书。

从出版社和著作者提供的样书看出，丛书以及每本书的结构都是经过仔细斟酌的，逻辑清晰、内容全面、观点鲜明、创新性强，内容充分反映了我国在新一代移动通信国际标准探索和技术开发中的最新成果，可供国内外的同行参考，将促进我国对国际 5G 标准制定的贡献。相信本套丛书的出版发行，将会推动我国移动通信技术的自主创新和产业发展。

邬贺铨

2016 年 8 月

刘韵洁院士之序

Introduction

面向 2020 年及未来，移动通信技术和产业将迈入第五代移动通信（5G）的发展阶段。5G 将满足人们的超高业务吞吐量、超高连接数密度、超高移动速度和超可靠低时延的广泛应用需求，大幅改善提升通信网络频谱效率、能量效率与成本效率，拓展移动通信产业的发展空间。更为重要的是，5G 将渗透到物联网和传统产业领域，与工业设施、医疗仪器、交通工具等深度融合，全面实现“万物互联”，有效满足工业、医疗、交通等垂直行业的信息化服务需要。

在 2016 年 7 月 15 日，美国政府宣布推出 4 亿美元的先进无线研究计划(Advanced Wireless Research Initiative)，由美国国家科学基金会牵头实施，将部署四个城市规模的 5G 实验测试平台，推动面向未来无线通信的基础理论和关键技术研究。我国工信部、发改委、科技部联合成立了“IMT-2020 推进组”，汇聚产、学、研、用各方力量，引领规划和重点推动 5G 关键技术研发，充分支持我国优势电信企业和研究院所在新一代移动通信国际标准制定过程中掌控影响力和话语权。

随着 5G 研发和标准化工作的快速深入展开，急需一套全面论述 5G 基础理论、关键技术和应用架构的系列书籍，电子工业出版社提前预见这一技术发展趋势和重要产业需求，有效组织国家 IMT-2020 推进组、国家 03 科技重大专项和国家“863 计划”5G 前期研发项目等的主要承担单位和优秀科技工作者，成功策划了这套 5G 技术丛书，及时总结和深入分析了最新 5G 技术的理论基础、体系架构、系统设计、测试评估、应用实现等多个方面的最新进展和研发挑战，相信这套丛书的丰富理论成果和实践经验能够帮助和培养新一代移动通信科技工作者，有效推进和巩固我国在 5G 国际标准化进程中的领导地位。

刘韵洁

2016 年 9 月

张乃通院士之序

Introduction

移动通信的发展不仅深刻改变了人们的生活方式，且已成为推动国民经济发展、提升社会信息化水平的重要引擎。移动互联网关键技术和基础设施的发展是“中国制造 2025”、“互联网+”战略的基础和保障。当前，面向 2020 年及未来的第五代移动通信（5G）已成为全球研发热点。为占领信息领域国际领先地位、掌握产业发展话语权，国家工信部、发改委、科技部成立“IMT-2020 推进组”，组织我国产、学、研、用各方力量，推动 5G 技术研究，以期在新的无线通信国际标准制定中掌握话语权和主导权，推动技术创新发展战略，为自主可控的信息网络提供基础设施保障。目前，我国的 5G 研发工作已走在国际前列。

电子工业出版社以此为背景，提出 5G 技术丛书的出版计划，组织国家 IMT-2020 推进组的主要参与单位，承担或参与国家“863 计划”5G 系统研究开发先期研究重大项目的单位，选择在国家重大科技专项中承担 5G 相关项目研发工作的中青年科技工作者作为丛书编著团队，编著这套丛书。丛书分为两卷：

（1）“关键技术卷”，从理论和技术层面对 5G 关键技术进行全面深入的分析，系统总结近年来我国在面向 IMT-2020（5G）研发方面所取得的进展。

（2）“系统设计与应用卷”，从系统应用层面对 5G 总体架构、传输性能评估和应用等方面进行阐述，具有系统创新特色和理论联系实际的效果，符合当前开展 IMT-2020 研究与工程的需求。

IMT-2020 推进组当前为了更加广泛与深入的开展研发工作，急需一套从理论技术到应用的丛书，相信本套丛书的丰富内容和先进成果能够有效促进完成 IMT-2020 推进组的既定目标。

张乃通

2016 年 11 月

尤肖虎教授之序

Introduction

从 2009 年开始, 全球掀起 4G 建设热潮, 截至 2015 年底, 全球 4G 用户数已达到 10.5 亿, 中国 4G 用户数到达 3.86 亿, 4G 在网用户人均月度使用流量突破了 200MB, 运营商从原本以语音为主的运营, 逐步转向以数据为主的流量运营, 同时极大地激活了移动互联网。

2012 年底, 欧盟启动了全球首个 5G 研究项目 METIS。2013 年, 国际电联正式启动了 5G 标准研究工作, 开展 5G 需求、频谱及技术趋势的研究工作, 计划 2016 年完成技术评估方法研究, 2018 年完成 IMT-2020 标准征集, 2020 年最终确定 5G 标准。3GPP 作为国际移动通信的标准化组织, 于 2015 年确定了 5G 研究计划, 2016~2017 年完成 5G 技术方案研究阶段, 2018~2019 年完成 5G 技术规范制定。我国“863 计划”于 2014 年启动了 5G 技术研究项目, 系统研究 5G 领域的关键技术, 包括无线网络架构、大规模天线、超密集无线网络、软基站试验平台、无线网络虚拟化、毫米波室内无线接入和评估与测试验证。与“863 计划”5G 相衔接, 国家科技重大专项 5G 相关研发课题的目标是面向国际标准, 鼓励我国产学研联合开展研发, 由企业推动创新成果纳入 IMT-2020 国际标准中。进一步, 我国已将“积极推进第五代移动通信(5G)和超宽带关键技术研究, 启动 5G 商用”写入“十三五”规划中。

5G 的主要应用为移动宽带、物联网和工业互联网, 旨在成为未来社会的信息基础设施。5G 将引入新型传输技术提高频谱利用率和支持高频段使用; 同时以网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)和软件定义网络(Software Defined Network, SDN)为主要手段, 构建控制与转发分离和控制集中的网络架构, 实现网络资源的灵活编排和部署; 通过新型波形、新多址和新帧结构等技术, 从而为海量物联网设备提供低功耗与深度覆盖, 为工业无线通信等应用提供高可靠低时延的连接。

本套丛书内容涉及 5G 系统的最新理论研究成果和关键技术评估, 具体包括 5G 网络架构、无线传输、超密集网络、大规模多天线、能效和频谱优化、仿真与测试等多个方面的研究成果和技术趋势, 作者来自于电信运营商、设备研制企业和科研院所, 内容和视角全面完整, 注重理论分析与实际应用相结合, 具有很好的时效性和参考价值。本丛书适合高等院校通信信息、电子工程及相关专业的高年级本科生和研究生, 以及无线通信领域的专业工程技术人员。

尤肖虎

2016 年 9 月

前言

Preface

随着人类社会信息化的加速，整个社会对信息通信的需求水平明显提升，可以说信息通信对人类社会的价值和贡献将远远超过通信本身，信息通信将成为维持整个社会生态系统正常运转的信息大动脉。无线移动通信以其使用的广泛性和接入的便利性，将从人与人之间的沟通拓展到人与物、物与物的一切连接，在未来信息通信系统中承担越来越重要的角色。人们对无线移动通信方方面面的需求呈现爆炸式增长，这些将对下一代无线移动通信（5G）系统在频率、技术和运营等方面带来新的挑战，未来移动通信将如何发展成为业界研究的热点。

2015年6月召开的国际电信联盟ITU-R WP5D第22次会议，正式确认ITU将命名为5G IMT-2020，并确定了5G的场景、能力和时间表等重要内容，第5代移动通信的发展已经进入了技术研究和标准化的重要时期。移动通信的跨代演进是由业务和应用驱动的，30多年来，全球移动通信已经发展到了第4代系统。从业务和应用的角度看代际演进的特点，第1代是语音通信，第2代是语音+文本，第3代是多媒体通信，而现在的第4代则是移动互联网。

5G的主要需求和驱动力是移动互联网和物联网的应用和发展。5G的应用场景需求分为三个场景，一个是支持移动互联网的MBB的演进发展，两个是物联网的发展；在物联网的场景中，一个是大量低功耗连接的场景，一个是高要求的高可靠低时延的场景。从业务和应用的角度看5G，最重要的特点就是大数据、众连接和场景体验。大数据，就是数据量大、数据速率高、数据服务为主，为移动互联网的发展提供支持；众连接就是大量的物联网终端用户接入，提供连接一切的能力；场景体验就是提供对应不同场景高质量的用户体验。

5G丰富的多场景应用和体验的需求，决定了5G的技术和能力需求也是多个维度的。即对应一组未来的应用场景需求和一组传输能力要求，需要由一组关键技术来支撑相应系统的实现。整体上，5G的发展具有如下特点：

（1）5G将是一个多场景、多指标、多技术的无线传输体系，有别于以往的前4代移动通信，5G作为面向2020年以后人类信息社会需求的移动通信系统，它是一个多业务、多技术融合的无线网络，通过技术的演进和创新，满足未来包含广泛数据和连接的各种业务的快速发展需要，提升用户体验。

（2）5G系统与标准体系的设计至关重要，未来的5G系统将是演进、融合和创新的系统，需要全面优化的系统与标准体系设计，使5G可以为迎接一个连接一切的系统来服务，5G将通过系统整体设计实现单一标准体系的多模式智能灵活切换，从而更好地为多种场景的体验服务。

(3) 5G 是一个涉及全产业链的全新能力的提升，5G 的竞争将不仅仅是通信产业的竞争，而且是基础产业及垂直行业全产业链的竞争，其中基础产业能力包括元器件、芯片、软件、基础设施以及应用系统和服务的能力。

2015 年 9 月召开的 3GPP RAN Workshop on 5G 会议，对 5G 空口技术及其标准化安排进行了研讨。来自全球的 5G 组织参加了会议，重点介绍研究进展和主要观点；约 60 多个 3GPP 成员输入文稿，表达 5G 技术观点、5G 版本考虑等。3GPP 形成了共识：5G 标准体系包含全新空中接口：新空口不考虑与 LTE 的后向兼容，同时 LTE 将继续演进。5G 标准包含两个阶段：

- 第一阶段 (Rel-15) 在 2018 年下半年完成，尽量满足早期商用需求。
- 第二阶段 (Rel-16) 在 2019 年年底完成，满足所有 5G 场景和需求，并作为 IMT-2020 标准提交。

5G 标准保持前向兼容性：由于 5G 标准分阶段完成，5G 新空口设计中将充分考虑前向兼容性，即新空口设计应易于支持后续新的应用场景和需求。这次会议的召开也意味着 3GPP 的 5G 空中接口的研究和标准化工作正式启动。

在无线资源有限的情况下，5G 系统需要研究高效的无线传输关键技术，建立新型的无线传输体系，解决移动通信网络面临的频谱效率和功率效率问题。本书将重点介绍面向 5G 的无线传输关键技术，结合国内外学术界和工业界的最新研究成果，对新型编码调制、大规模多天线、新型多址接入、终端间直通、全双工、信道建模等关键理论和技术进行全面介绍和详细分析，为读者呈现出 5G 无线传输技术发展的美好前景。

面对全球通信产业激烈竞争，中国通信人已经经历了从追赶到并驾齐驱、从同步竞争到超越发展，经历了中国通信业由大到强的发展历程。在 5G 技术的研究中，我国企业、高校和相关组织机构发挥了重要的作用，取得了丰硕的成果。本书就是多家单位合作的结晶。

本书由王映民、孙韶辉、高秋彬主持编写，各章编写的负责人和参与人员如下：

章	负 责 人	参 与 人 员
第 1 章	大唐电信科技产业集团 王映民	大唐电信科技产业集团 孙韶辉 大唐电信科技产业集团 秦飞
第 2 章	北京邮电大学 张建华	北京邮电大学 田磊 北京邮电大学 刘振子
第 3 章	大唐电信科技产业集团 苏昕	东南大学 王东明 大唐电信科技产业集团 宋扬 大唐电信科技产业集团 任余维 大唐电信科技产业集团 孙韶辉
第 4 章	大唐电信科技产业集团 康绍莉	大唐电信科技产业集团 任斌 北京科技大学 戴晓明 大唐电信科技产业集团 高秋彬 大唐电信科技产业集团 孙韶辉
第 5 章	西安电子科技大学 白宝明	上海无线通信研究中心 康凯 西安电子科技大学 徐恒舟 西安电子科技大学 冯丹 西安电子科技大学 徐旻子 大唐电信科技产业集团 孙韶辉
第 6 章	北京大学 马猛	北京大学 焦秉立
第 7 章	大唐电信科技产业集团 高秋彬	上海无线通信研究中心 周婷 北京大学 许晨 北京大学 宋令阳 大唐电信科技产业集团 陈文洪 大唐电信科技产业集团 徐晖 大唐电信科技产业集团 张娟

本书作者感谢电信科学技术研究院、北京邮电大学、北京大学、西安电子科技大学、上海无线通信研究中心、东南大学、北京科技大学等单位及中国 IMT-2020 推进组和 Future 论坛的领导和同事们的大力支持和真诚帮助，感谢在 5G 技术研究和标准化过程中与中国信息通信研究院、中国移动研究院以及众多的国内外厂商和研究机构的交流与合作。限于作者的水平和能力，本书还有诸多不足与谬误之处，还希望各位读者和专家提出宝贵的意见和建议。

作者

2016 年 3 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

Contents

第 1 章 | Chapter 1

5G 移动通信发展概述	1
1.1 移动通信系统发展状况	2
1.2 5G 系统发展愿景与需求[19~23]	6
1.2.1 5G 发展趋势和驱动力	6
1.2.2 5G 愿景	8
1.2.3 5G 面临的需求和挑战	9
1.2.4 5G 系统的性能指标	10
1.2.5 5G 标准化进展	13
1.3 5G 系统的无线传输关键技术	17
1.4 本章小结	19
1.5 参考文献	20

第 2 章 | Chapter 2

新型无线信道建模	23
2.1 无线信道建模	24
2.1.1 3 种基本电波传播机制	25
2.1.2 无线信道建模	26
2.1.3 基本传输场景	30
2.2 大尺度衰落模型	34
2.2.1 自由空间传播模型	34
2.2.2 对数距离路径损耗模型与对数正态阴影衰落	35
2.2.3 室内传播模型	36
2.2.4 室外传播模型	37
2.2.5 室外到室内传播模型	39
2.3 小尺度衰落模型	40
2.3.1 小尺度衰落参数	40
2.3.2 小尺度参数分布模型	43

2.3.3	小尺度衰落建模	45
2.4	3GPP 3D 信道模型	46
2.4.1	GBSM 信道建模	46
2.4.2	信道模型的参考坐标系	48
2.4.3	大尺度衰落模型	50
2.4.4	小尺度衰落模型	52
2.4.5	3D 信道模型仿真	56
2.5	5G 新场景无线信道建模	64
2.5.1	高频段信道建模	64
2.5.2	D2D 信道建模	71
2.5.3	V2V 信道建模	73
2.6	本章小结	77
2.7	参考文献	78

第 3 章 | Chapter 3

	大规模天线技术	87
3.1	技术背景	88
3.1.1	MIMO 技术的发展历程	88
3.1.2	massive MIMO 技术原理和发展动态	90
3.1.3	massive MIMO 技术应用场景	92
3.2	massive MIMO 基本理论	93
3.2.1	多用户 massive MIMO 系统模型	93
3.2.2	massive MIMO 上行链路信道容量	95
3.2.3	massive MIMO 下行链路信道容量	97
3.2.4	massive MIMO 容量仿真	99
3.3	massive MIMO 检测技术	101
3.4	massive MIMO 传输方案	104
3.4.1	恒包络预编码	104
3.4.2	低复杂度预编码算法	106
3.4.3	数模混合波束赋形	111
3.4.4	三维扇区化	115
3.5	massive MIMO 信道状态信息反馈	117
3.5.1	基于码本的隐式反馈方案	117
3.5.2	基于信道互易性的反馈方式	120
3.5.3	基于压缩感知的反馈方式	121
3.5.4	预感知式反馈方式	123
3.5.5	数模混合波束赋形的信道状态信息获取	125

3.6 导频污染及参考信号设计	127
3.7 massive MIMO 能效优化	129
3.8 大规模天线协作	130
3.9 大规模天线阵列校准	131
3.10 本章小结	134
3.11 参考文献	137

第 4 章 | Chapter 4

高效空口多址接入	141
4.1 多址接入技术发展现状	142
4.1.1 蜂窝移动通信多址接入技术综述	142
4.1.2 5G 移动通信多址接入技术的挑战	143
4.2 图样分割多址接入	144
4.2.1 PDMA 技术的理论和系统模型	144
4.2.2 PDMA 发送端关键技术	158
4.2.3 PDMA 接收端关键技术	166
4.2.4 PDMA 技术后续进一步研究的内容	171
4.3 其他新型多址接入	172
4.3.1 功分非正交多址接入	172
4.3.2 稀疏码分多址接入	176
4.3.3 非正交波形	179
4.4 本章小结	185
4.5 参考文献	185

第 5 章 | Chapter 5

新型编码调制	189
5.1 编码调制技术发展现状	190
5.1.1 现代信道编码技术	190
5.1.2 编码调制的原理与方法	194
5.1.3 编码调制系统的性能度量参数	198
5.1.4 编码调制技术在蜂窝移动通信系统中的应用	201
5.2 编码与信号星座成形	203
5.2.1 编码增益与成形增益	203
5.2.2 信号星座成形方法	204
5.2.3 几种简单的成形方法	206
5.3 多元 LDPC 编码	212
5.3.1 多元 LDPC 码的基本概念及因子图表示	213

- 5.3.2 多元 LDPC 码的译码214
 - 5.3.3 多元 LDPC 码的基本构造方法225
- 5.4 多元 LDPC 编码调制229
 - 5.4.1 多元 LDPC 编码调制系统模型229
 - 5.4.2 联合迭代检测译码算法231
- 5.5 极化码及极化编码调制236
 - 5.5.1 Polar 码的基本概念与原理236
 - 5.5.2 Polar 码的编码方法与译码算法241
 - 5.5.3 Polar 编码调制系统245
- 5.6 编码调制与超奈奎斯特传输相结合248
 - 5.6.1 超奈奎斯特技术的基本原理248
 - 5.6.2 FTN 的解调算法250
 - 5.6.3 频域 FTN 技术252
 - 5.6.4 FTN 技术展望253
- 5.7 本章小结254
- 5.8 参考文献254

第 6 章 | Chapter 6

- 同频同时全双工259
- 6.1 同频同时全双工技术原理260
 - 6.1.1 全双工基本原理260
 - 6.1.2 全双工技术的发展现状261
- 6.2 全双工系统自干扰消除技术262
 - 6.2.1 天线干扰消除262
 - 6.2.2 射频干扰消除266
 - 6.2.3 数字干扰消除270
 - 6.2.4 器件非理想特性对干扰消除的影响和解决方法271
- 6.3 全双工技术应用场景分析273
 - 6.3.1 点对点通信273
 - 6.3.2 中继273
 - 6.3.3 无线局域网274
 - 6.3.4 蜂窝系统275
 - 6.3.5 保密通信277
 - 6.3.6 认知无线电277
- 6.4 全双工系统容量278
 - 6.4.1 点对点通信系统容量278
 - 6.4.2 多用户系统容量279