



信息通信领域产学研合作特色期刊

第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868

CN 34-1228/TN

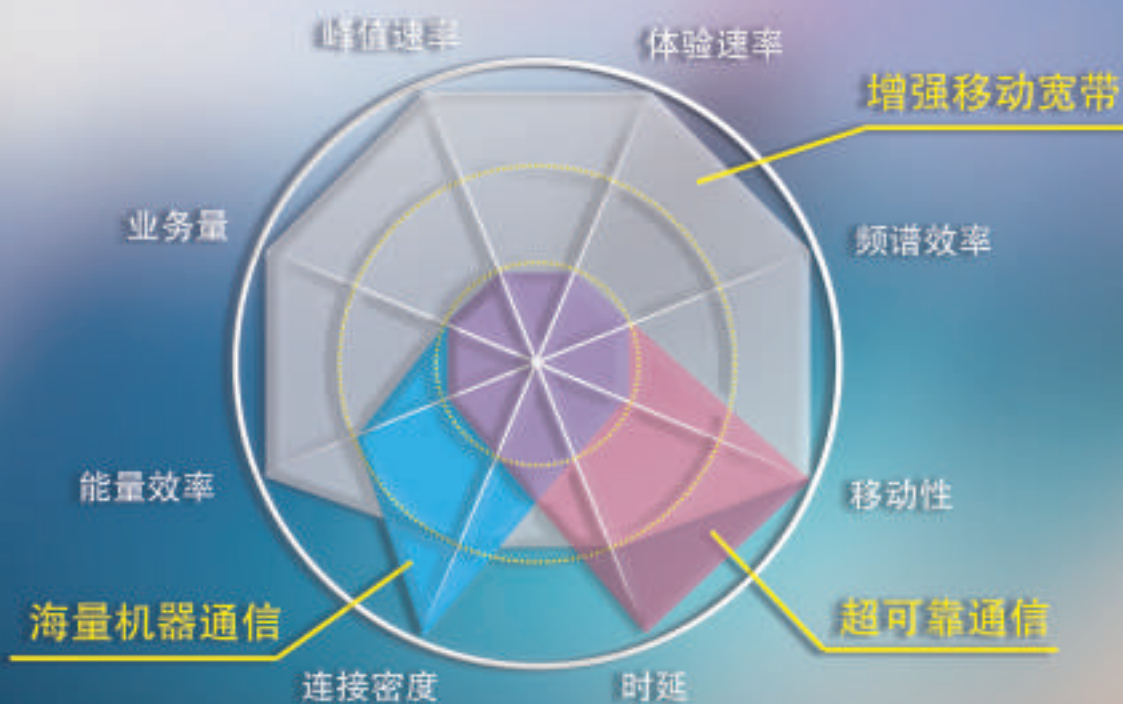
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2016年6月 • 第3期

### 专题：5G 技术与业务创新



# 《中兴通讯技术》第7届编辑委员会委员名单

**主 任** 钟义信（北京邮电大学教授）

**副主任** 赵先明（中兴通讯股份有限公司董事长兼总裁） 糜正琨（南京邮电大学教授）

**副主任** 马建国（天津大学电子信息工程学院院长） 陈前斌（重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长）

## 编委（按姓氏拼音排序）

- |     |                            |     |                     |
|-----|----------------------------|-----|---------------------|
| 曹淑敏 | 中国信息通信研究院院长                | 孙枕戈 | 中兴高能技术有限责任公司总经理     |
| 陈建平 | 上海交通大学教授                   | 孙知信 | 南京邮电大学物联网学院院长       |
| 陈 杰 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁            | 谈振辉 | 北京交通大学教授            |
| 陈前斌 | 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长        | 唐雄燕 | 中国联通网络技术研究院首席专家     |
| 葛建华 | 西安电子科技大学通信工程学院副院长          | 田文果 | 中兴新能源汽车有限责任公司董事长    |
| 管海兵 | 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长       | 童晓渝 | 中电科软件信息服务有限公司副总经理   |
| 侯为贵 | 中兴通讯股份有限公司前任董事长            | 王 京 | 清华大学教授              |
| 洪 波 | 中兴发展股份有限公司总裁               | 王文东 | 北京邮电大学软件学院副院长       |
| 洪 伟 | 东南大学信息科学与工程学院院长            | 王 翔 | 中兴通讯股份有限公司副总裁       |
| 纪越峰 | 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院<br>执行院长 | 卫 国 | 中国科学技术大学教授          |
| 江 华 | 中兴通讯股份有限公司副总裁              | 吴春明 | 浙江大学教授              |
| 蒋林涛 | 中国信息通信研究院科技委主任             | 邬贺铨 | 中国工程院院士             |
| 李尔平 | 浙江大学信息学部副主任                | 徐安士 | 北京大学教授              |
| 李红滨 | 北京大学教授                     | 续合元 | 中国信息通信研究院技术与标准研究所总工 |
| 李建东 | 西安电子科技大学副校长                | 徐慧俊 | 中兴通讯股份有限公司执行副总裁     |
| 李 军 | 清华大学信息技术研究院院长              | 薛一波 | 清华大学教授              |
| 李乐民 | 中国工程院院士, 电子科技大学教授          | 杨义先 | 北京邮电大学教授            |
| 李融林 | 华南理工大学教授                   | 杨 震 | 南京邮电大学校长            |
| 李少谦 | 电子科技大学通信与信息工程学院院长          | 尤肖虎 | 东南大学教授              |
| 李 涛 | 南京邮电大学计算机学院院长              | 张宏科 | 北京交通大学教授            |
| 李 星 | 清华大学教授                     | 张 平 | 北京邮电大学网络技术研究院执行院长   |
| 刘建伟 | 北京航空航天大学教授                 | 张云勇 | 中国联通研究院副院长          |
| 陆建华 | 中国科学院院士, 清华大学教授            | 赵慧玲 | 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师 |
| 马建国 | 天津大学电子信息工程学院院长             | 赵先明 | 中兴通讯股份有限公司董事长兼总裁    |
| 孟洛明 | 北京邮电大学教授                   | 郑纬民 | 清华大学教授              |
| 糜正琨 | 南京邮电大学教授                   | 钟义信 | 北京邮电大学教授            |
| 庞胜清 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁            | 钟章队 | 北京交通大学教授            |
| 史立荣 | 中兴通讯股份有限公司董事               | 周 亮 | 南京邮电大学通信与信息工程学院副院长  |
|     |                            | 朱近康 | 中国科学技术大学教授          |



信息通信领域产学研合作特色期刊  
第三届国家期刊奖百种重点期刊  
中国科技核心期刊  
工信部优秀科技期刊  
中国五大文献数据库收录期刊  
ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
1995年创刊

## 办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;  
迎接挑战,把握世界通信技术动态;  
立即行动,求解通信发展疑难课题;  
励精图治,促进民族信息产业崛起。

# 目次

中兴通讯技术 总第128期 第22卷 第3期 2016年6月

## 专题:5G技术与业务创新

- 02 非均匀密集无线组网 ..... 陶小峰,吴慧慈,许晓东  
06 开放5G网络架构与开源平台 ..... 赵明,王京,田志刚  
12 5G空口统一框架初探:软件定义空口 ..... 倪吉庆,孙奇,崔春风  
17 大规模MIMO下行预编码技术 ..... 陆晨,王闻今,高西奇  
22 一种适合5G的新型多载波技术——FB-OFDM ..... 张万春,辛雨,郁光辉  
26 一种应用于5G基于LDPC码的物理层包编码 ..... 徐俊,许进,胡留军  
31 基于GRT平台的全双工WiFi设计与实现 ..... 吴浩洋,王韬,焦秉立  
36 非理想CSIT下超密集分布式天线网络的高能效协同波束成形 ..... 王璟,冯伟,周世东  
41 5G环境下系统级仿真建模与关键技术评估 ..... 李凯,徐景,杨旸

## 专家论坛

- 47 5G:智能移动通信1.0 ..... 李少谦  
49 安全通论——攻防篇之“石头剪刀布” ..... 杨义先,钮心忻

## 企业视界

- 52 M-ICT时代下的5G技术及创新 ..... 朱龙明,朱清华,姚强

## 技术广角

- 57 大数据技术发展趋势及灯塔大数据行业应用平台 ..... 王若倪,赵慧玲  
62 面向未来移动通信的核心网架构 ..... 宗在峰,吴磊

## 综合信息

《中兴通讯技术》第7届编辑委员会新增编委简介(30) 中国稳坐芯片专利申请榜首 排头兵中兴通讯跻身全球30强(35) 2025年全球5G服务收入有望达到2470亿美元(40) IEEE发布首个车载以太网标准 每端口提供100Mbit/s带宽(40) 400G以太网标准工作组成立(46)

期刊基本参数:CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*64\*zh\*P\*¥ 20.00\*15000\*14\*2016-06

# Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 22 No. 3 June. 2016

## Special Topic: 5G Technologies and Business Innovation

- 02 Non-Uniformly Dense Wireless Networking ..... TAO Xiaofeng, WU Huici, XU Xiaodong
- 06 Open 5G Network Architecture  
and Open Source Platform ..... ZHAO Ming, WANG Jing, TIAN Zhigang
- 12 A Framework of 5G Air Interface: Software  
Defined Air Interface ..... NI Jiqing, SUN Qi, CUI Chunfeng
- 17 Precoding Technique for Massive MIMO Downlink ..... LU Chen, WANG Wenjin, GAO Xiqi
- 22 FB-OFDM: A Novel Multicarrier  
Scheme for 5G ..... ZHANG Wanchun, XIN Yu, YU Guanghui
- 26 A Physical Layer Packet Coding Based  
on LDPC Codes for 5G ..... XU Jun, XU Jin, HU Liujun
- 31 Full-Duplex WiFi Design and Implementation Based  
on GRT platform ..... WU Haoyang, WANG Tao, JIAO Bingli
- 36 Energy Efficient Coordinated Beamforming for Massively Dense Distributed  
Antenna Networks with Non-Ideal CSIT ..... WANG Jing, FENG Wei, ZHOU Shidong
- 41 System Simulation Modeling and Key Technology  
Evaluation in 5G ..... LI Kai, XU Jing, YANG Yang

## Expert Forum

- 47 5G: Intelligent Mobile Communications 1.0 ..... LI Shaoqian
- 49 The General Theory of Security: "Rock Scissors Paper"  
in Offensive and Defensive ..... YANG Yixian, NIU Xinxin

## Enterprise View

- 52 5G Technologies and Innovation in M-ICT Era ..... ZHU Longming, ZHU Qinghua, YAO Qiang

## Technology Perspective

- 57 Big Data Technology Development Trend and DENGTA  
Application Platform ..... WANG Ruoni, ZHAO Huiling
- 62 Future Mobile Communication Oriented Core  
Network Architecture ..... ZONG Zaifeng, WU Se

## 敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

## 2016年第1—6期专题

### 1 网络空间安全

杨义先 北京邮电大学 教授  
杨庚 南京邮电大学 教授

### 2 大数据分析处理与应用

郑纬民 清华大学 教授

### 3 5G技术与业务创新

王京 清华大学 教授  
向际鹰 中兴通讯股份有限公司 首席科学家

### 4 天地一体化信息网络

张乃通 中国工程院 院士  
顾学迈 哈尔滨工业大学 教授

### 5 工业互联网与智慧工厂技术

邬贺铨 中国工程院 院士  
王耀南 湖南大学 教授

### 6 SDN/NFV的实践与规模应用

蒋林涛 中国信息通信研究院 教授

## 专题栏目策划人



王京

清华信息科学与技术国家实验室副主任,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心主任,微波与数字通信国家重点实验室副主任兼无线传输与个人通信研究室主任等;主要研究方向为无线移动通信、宽带无线传输技术等;曾承担多项“863”项目、科技攻关项目以及国防预研和型号等项目;负责的中国第三代移动通信系统研究开发项目获2003年国家科学技术进步二等奖,另获国防科学技术奖二等奖1项;申请专利30余项,发表论文100余篇。



向际鹰

中兴通讯股份公司首席科学家;从事无线通信技术,包括3G、4G、5G、基带、射频等技术;获得国家科学技术进步奖2项,国家技术发明奖1项,并获得2013年度通信产业技术贡献人物奖;发表论文35篇。

## 专家论坛栏目策划人



李少谦

电子科技大学教授、博导,通信抗干扰技术国家级重点实验室主任,通信与信息工程学院院长,国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组成员,国家“863”计划5G重大项目总体组成员,国家“973”计划咨询专家组成员,国家通信与网络重点研发计划专家组成员,四川省学术与技术带头人,政府特殊津贴获得者,IEEE Fellow;主要研究方向为无线与移动通信技术,主持完成了30余项国家级科研项目;获国家、国防和省部级科技奖6次;申请发明专利80余项,获专利授权50余项,发表论文100余篇,出版专著多部。

## 专题:5G技术与业务创新

### 导读

在描述3G和4G愿景的时候,ITU基本是围绕人的需求确立了技术指标,有了像“面包车”形状的需求指标,只包括移动速度和传输峰值速率的技术指标。到了5G阶段,ITU提出的技术需求呈现三角形,除了面向人的“增强移动宽带”通信需求外,还增加了面向物的“大规模机器通信(mMTC)”和“高可靠低时延通信(URLLC)”。

在2G之前只应对话音业务,采取的是与场景和应用无关的单一无线传输技术,技术指标设计只是需要保证在小区覆盖最恶劣的区域内有效通信,是“广种薄收”策略。到了3G和4G阶段,仍然是面向人的通信,只是针对不同的电磁环境优化无线传输技术;5G以后,除了考虑电磁环境还要考虑应用场景,除了考虑面向人的通信还要考虑面向机器的通信,可能的趋势是针对复杂多变的应用场景(包括电磁环境和应用场景)分别提供优化技术,如果采用一种通用的技术实现所有场景的优化几乎是不可能的,采取“量身定做”的策略可能实现最优。

现在面临的压力是网络建设和运维成本的提升与运营收入之间逐渐加大的差距,未来5G移动通信网络架构的发展应该为了减少这种差距。2G之前的系统与网络架构是单一服务于电话业务,如果需要数据业务则需要采用电路连接;2.5G之后逐渐在系统和网络中引入了GPRS和IMS等技术,试图适应部分数据业务的需求,但是远远不够。5G之后的系统与网络应有一个开放的框架,通过提供适度(而不是过度)的服务质量满足“三角形”应用场景带来的各种需求,降低网络建设和运维低成本,这是网络技术发展最大的挑战。

4G之前的终端主要是面向人的通信,信息交互形式来自于人类的感官;智能终端就是主要解决了人类处理最多的视觉、音频和触觉等的信息交互问题。尽管现有数十亿的终端,但是呈现形式是单一的,只是通过数十万种软件应用APPs来满足人类的不同需求。5G之后的终端,特别是终端增量的主要来源将是数以千万计的机器与物体。与之对应的数十亿甚至上百亿的终端将是由数以千万种终端类型构成。给我们带来的挑战是,如何像构建软件APP那样快速、低成本构建这些服务于机器和物的终端应用。

另外,5G若能在无线空口技术上实现按需自适应统一、灵活、可配置,满足5G典型场景差异化的性能需求;在网络架构上实现更加灵活、智能、高效和开放,呈现出“一个逻辑架构、多种组网架构”的形态,则5G将在移动通信智能化上迈出坚实的步伐,开启移动通信智能化的新时代。5G在移动通信的发展历程中具有重大意义。移动通信发展的下一阶段是智能化,5G将开启移动通信智能化时代,5G是智能移动通信1.0,移动通信智能化将持续几十年或更长。

5G需求的多样性对无线传输技术、网络架构和终端形态等都带来了巨大的挑战。在当前通信与信息、通信与计算、通信与互联网相互融合的时代,5G也将迎来全新的发展机遇。

王京 向际鹰 李少谦

2016年4月20日

# 非均匀密集无线组网

## Non-Uniformly Dense Wireless Networking

陶小峰/TAO Xiaofeng  
吴慧慈/WU Huici  
许晓东/XU Xiaodong

(北京邮电大学, 北京 100876)  
(Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100876, China)

2010年4G开始部署,全球范围内开始了5G研究的热潮。5G通信系统的研究预计通过已有技术与新技术的融合解决现有网络不能支撑的诸多挑战,各类新技术的融合能在支持预计移动数据量的同时扩大移动通信所能支持的应用范围<sup>[1]</sup>。国际电信联盟(ITU)结合各类业务与应用对网络性能的不同要求,将IMT-2020与已有的IMT-Advanced系统作对比,总结了5G系统的关键性能指标<sup>[2]</sup>,其中峰值速率预计可以达到10 Gbit/s且用户体验速率达到100 Mbit/s,网络能效及频谱效率分别达到现有系统的100倍和3倍。为了实现更高的用户数据率、更优的无线链路能效以及开发利用更高的频率资源,非均匀超密集组网成为无线网络的发展趋势。虽然通过不断增大网络基站或热点的非均匀密集化组网方式能提供更高的数据速率以及海量的连接,但是同样也带来了严重的干扰问题,复杂的资源分配等问题,而且随着网络的发展,用户体验需求也更加苛

收稿时间: 2016-02-10  
网络出版时间: 2016-04-27  
基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A701)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0002-004

**摘要:** 无线密集网络作为未来移动通信系统的主要场景,能提供超高的、非均匀的数据量及海量的连接服务,并有提高无线链路的能效以及利用更高的频谱等诸多优势,将成为未来移动通信系统的主要架构之一,研究无线密集组网架构及关键技术意义重大。无线密集网络的网络架构、网络建模分析以及异构密集网络之间的融合是非均匀密集无线网络中的重要研究问题。

**关键词:** 无框架网络架构;异构融合;随机几何

**Abstract:** Dense wireless networking, seen as a major communication architecture in future mobile communication systems, can provide super high and non-uniform data traffic as well as massive connectivity services. It can also improve energy efficiency and spectrum efficiency of the wireless systems. Researches on dense wireless networks, including network architecture, network modeling and the convergence among heterogeneous networks, are meaningful and important.

**Keywords:** frameless network architecture; heterogeneous convergence; stochastic geometry

刻,如安全需求更高等。因此如何在非均匀的超密集组网趋势下,利用有限的无线通信资源,适应未来无线业务的空-时非均匀性和OTT等业务多样化的需求,成为5G组网面临的巨大技术挑战。

### 1 无框架网络架构

无线组网技术的基础是无线网络架构,1G到4G移动通信系统的发展都是基于蜂窝小区架构的演进,这些无线组网方式虽然在一定程度上提高了移动通信系统的网络容量,但由于5G系统中采用非均匀高密度的异构混合组网方式,基于传统蜂窝小区架构的技术演进将难以真正解决限制5G系统网络容量的关键技术问题,进而很难实现5G无线组网架构及组网方式的真正变革。为了突破蜂窝小区架构所带来的一些的限制,

并在未来5G系统拟部署的非均匀高密度异构混合无线网络环境下实现干扰可控与资源可管的容量有效提升,相关研究机构提出了“无框架组网架构(FNA)”及其相应的无线组网策略<sup>[3-7]</sup>。

#### 1.1 无框架网络架构部署场景及特点

基于无框架网络架构及组网方法,未来网络中将不再存在具体的小区边界,而是以用户为中心,基站及其天线单元的覆盖范围可以根据用户的业务需求及干扰分布等情况进行自适应调整。

无框架网络架构中,传统基站被分解为集中处理单元和天线单元。集中处理单元与天线单元之间通过光纤回程链路、无线回程链路、有线回程链路等多种方式连接。集中处理单元承担着主要的网络控制功能,

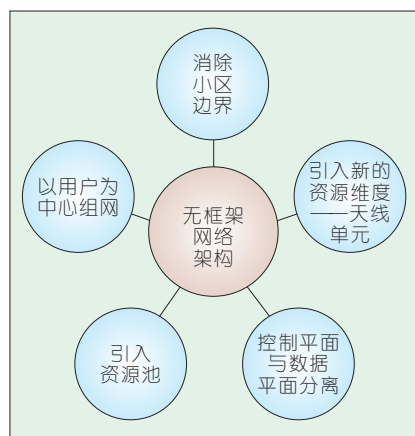
负责无线信号的处理、维护无线接入网络的控制平面及用户平面；天线单元负责无线信号的发送和接收。网络按用户的业务服务质量需求动态地选择合适的天线单元来构建针对各个用户的专属服务天线单元集合。

通过这种功能分解,天线单元被释放,成为一维新的无线资源,从而参与到多维无线资源的管理与控制过程之中。这种无框架网络架构及其组网方法具有如图1所示特点。

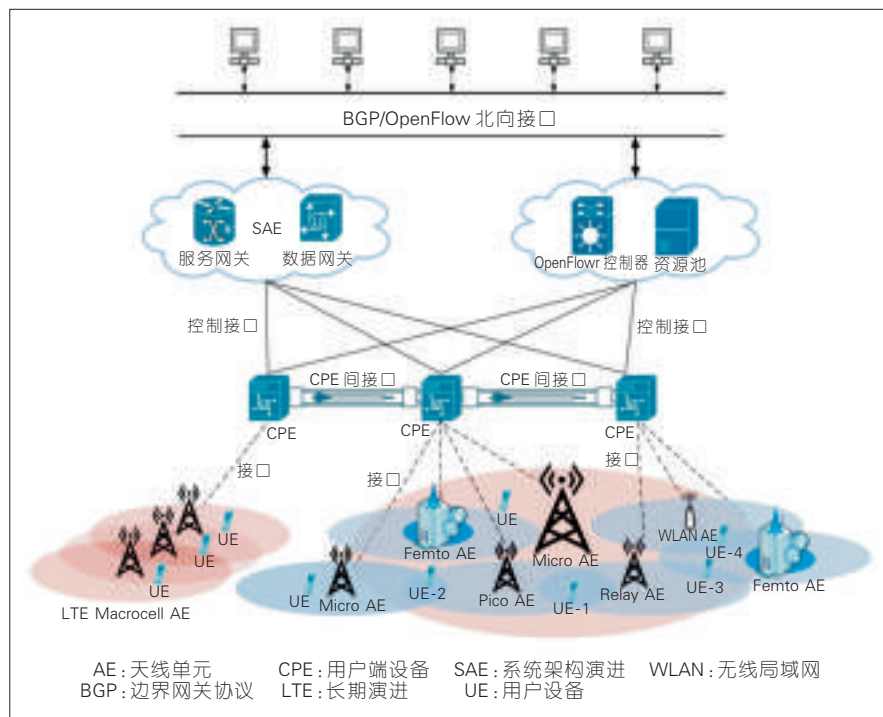
## 1.2 基于软件定义网络的无框架网络架构演进

基于软件定义网络(SDN)及OpenFlow协议的无框架网络演进架构<sup>[3, 7]</sup>包括由不同制式、不同类型天线单元组成的,支持各节点完全协作的虚拟化接入网结构,具体包括实现信号处理功能的集中处理单元、连接集中处理单元与天线单元的接口、连接各不同集中处理单元的集中处理单元间接口、支持OpenFlow等协议的控制器、连接集中处理单元与控制器的控制接口、实现虚拟化无线资源管理的资源池等基本组件<sup>[3]</sup>。

此外,传统移动通信中的多天线技术、协作通信技术、中继技术、载波聚合等技术可以灵活地应用到本架构中,从而实现各天线单元以及各天线单元所属的各集中处理单元等接入节点的充分协作,具体的架构<sup>[3]</sup>如图2所示。



▲图1 无框架网络架构组网特点



▲图2 基于软件定义网络的无框架网络架构演进

该演进架构不仅支持无框架网络架构所支持的用户平面与控制平面的分离及自适应调整策略、以用户为中心的资源管理及移动性管理策略、自适应业务卸载策略以及集中式干扰管理策略,还融合了SDN与OpenFlow的技术优势,支持基于虚拟化的无线资源管理策略、业务分片策略等组网关键技术,实现了传统移动通信网络架构中接入网的虚拟化,提出了将SDN技术及OpenFlow等协议应用到移动通信接入网架构中的解决方案。与此同时,这种无框架的网络架构中基站、热点以及移动终端的位置更加随机,用于建模传统小区的规则六边形模型不再适用于密集网络的建模,因而需寻找适合于密集网络建模和分析的数学工具与模型。

## 2 基于随机几何的无线密集网络分析

随机几何是目前应用最普遍的一种针对随机网络的建模工具,它用于研究网络整体所呈现出的统计平均特性,具有非常成熟的数学基础以

及较易分析的数学模型,因此被广泛应用与随机网络、异构网络和密集网络的建模与分析。

### 2.1 随机几何基本概念

随机几何主要用于解决随机空间问题,可具体解决以下几类问题<sup>[8]</sup>:

- 描述一维、二维或更高维度的点的集合;
- 刻画一个点集合所呈现的统计特性以及这个点集合的所有可能实现结果的统计平均值;
- 描述一个存在固定位置参考点的点过程,以及这个点过程呈现的统计特性;
- 给定一个点集合,确定一个产生这样的点集合的统计模型。

根据以上4个问题,我们可以看出:随机点过程是随机几何中最基础也是最重要的一个分支,它是某一区域内的点的随机集合,这些点的分布特性可通过空间平均性来表示。在无线网络中的研究对象通常是基站或者用户,因此利用随机几何对无线网络的建模与分析中一般采用随机

点过程。

## 2.2 基于随机几何的无线密集网络建模与分析

将无线网络看成是一系列分布在一定区域内的节点组成的集合,根据所考虑的网络,这些节点可能是发送端,如蜂窝网中的基站、WiFi中的接入节点,或者接收端如移动终端等。将具有相同特性的节点建模为一个点过程,每个点过程之间相互独立或存在一定的相关性。在已有的无线网络建模和分析研究中使用最多的随机点过程是泊松点过程(PPP)以及其衍生的泊松点过程,如Cox过程、泊松簇过程等。

以PPP为例,采用PPP对无线密集网络建模,通常假设网络中发送节点和接收节点的位置是独立的、在二维平面服从Poisson点过程。以一对目标发送-接收节点的密集网络为例,将所有信号发送源的位置建模为密度参数为 $\lambda_t$ 的PPP过程 $\Phi_t \subset \mathbb{R}^2$ ,所有信宿的位置建模为与 $\Phi_t$ 相独立的PPP过程 $\Phi_r \subset \mathbb{R}^2$ ,密度参数为 $\lambda_r$ 。对于任意一个接收节点 $x \in \Phi_r$ ,假设其目标发送端位置为 $y_0 \in \Phi_t$ ,则接收端接收到的干扰信号功率为除了目标信号之外的其他发送端发送的信号功率 $I_{x,y_i}$ 的累加,即 $I_{agg}(x) = \sum_{y_i \in \Phi_t, y_i \neq y_0} I_{x,y_i}$ 。由于 $I_{x,y_i}$ 与发送端和接收端之间的信道衰落及距离相关,因此接收端的累积干扰信号功率是可数随机变量 $I_{x,y_i}$ 的和,且每个随机变量均是多个随机变量的乘积。

直接分析干扰信号的特性十分复杂,但是在无线网络的分析过程中,干扰信号的功率直接影响接收端的信干噪比(SINR),从而对网络容量、连接、覆盖等重要参数有着至关重要的影响。因此,我们对接收端的累计干扰信号功率的分析有非常重要的意义。随机几何为得到累积干扰信号的统计特性提供了很好的方法。对于随机变量 $I_{agg}(x)$ ,其拉

氏变换可表达为:

$$L_{I_{agg}(x)}(s) = E\left[e^{-sI_{agg}(x)}\right] = E_{\Phi_t}\left[e^{-s \sum_{y_i \in \Phi_t, y_i \neq y_0} P_t \|x - y_i\|^{-\alpha} h_{x,y_i}}\right] \quad (1)$$

结合PPP过程的概率密度生成函数(PGF)以及Slivnyak-Mecke定理、移位定理<sup>[8]</sup>等,可得到干扰的拉普拉斯函数,从而可得到累计干扰的概率密度分布函数和阶距特性。

在得到干扰信号的统计特性基础上,可进一步分析得到网络的终极参数SINR的统计特性,从而可以对网络性能,如网络容量、覆盖<sup>[9-11]</sup>、连接度、延时等进行分析。文献[9-10]中采用K层独立PPP对异构网络进行建模并分析了用户的覆盖性能和覆盖性能,结果表明在干扰受限环境下增大基站密度对网络覆盖不产生影响,但在高路径损失环境下增加基站密度能提高用户的网络的安全性能。

为了兼容异构无线网络中大量共同存在的不同制式的无线通信系统,并合理有效地对不同系统进行功能分工,例如传统宏蜂窝系统主传信令信号而热点网络系统主传数据信号等,需要针对移动用户不同需求或根据网络自身状态而对网络功能进行调整。文献[10]中为了实现用户安全传输与基站选择复杂度的折中,提出了一种基于门限的用户接入策略,可针对用户的计算能力和安全需求等通过调整门限值实现安全提升或者基站复杂度的降低。为了实现异构网络间的协作,并能根据实际网络状态调整协作基站集合,文献[11-12]中提出了一种基于用户位置和基于信号门限的异构基站协作机制,用户可根据自身所处位置或者网络状态选择合适的协作基站集合,网络自身也可通过调整门限值增加或降低接入用户的数量。

## 3 超密集聚合无线网络融合设计

密集聚合无线网络的系统设计

可从系统结构与聚合协作方面考虑,并分别从物理层、数据链路层、网络层等层面实现。

物理层的协作技术不仅可以扩展小区的覆盖范围,消除或减少通信盲点,还可以根据网络环境进行干扰协调,以提高同频组网的性能,改善系统容量。

数据链路层屏蔽下层的差异,为网络层提供透明传输。在具体协议栈实现中,不同接入网络由于各自的特性,具有不同的数据链路层实现。

网络层一方面可以为传输层提供统一的IP接口,另一方面可以屏蔽不同网络底层传输介质的异构性,在异构的网络环境中扮演着“同构层”的角色,其并发传输对于其上的传输层以及其下的数据链路层都是透明的,且其实现自由度大,可以自定义添加各种网络算法模块,但是实现相对复杂,难度较大。

为了验证密集聚合网络的协作与融合设计的性能,图3分别展示了密集聚合网络的系统原理和实际搭建的密集聚合网络。其中蜂窝网络管理控制和维持信令,3个热点网络进行数据传输,通过以上工作模式实现控制与用户(C/U)分离。特别在小区切换时,只需跨宏小区进行信令切换,有效地提高用户接收信号的稳定性并降低切换频率。所搭建的密集聚合网络支持长期演进(LTE)/WiFi等多种网络融合协作,扩展性高;数据包近数据链路层,存储效率高,且协议数据在Linux内核完成,代码执行效率高。

图3中所示的异构密集融合网络能实现达7.5 Gbit/s的数据率,且能按需扩展。表1对5G移动通信目标以及理论值做了对比,从表中可以看出:已实现的密集聚合网络在峰值速率和频谱效率方面接近5G目标值,而在功率效率及流量密度方面远超5G目标值。与理论值相比,已实现的3热点+1蜂窝网络还存在较大差距,后续将继续着重研究4个热点网



▲ 图3 密集无线网络原型系统

▼ 表1 不同网络指标对比

指标	目标	已实现(3WiFi频段+1蜂窝频段) 220 MHz, 100 m <sup>2</sup>	理论值(4WiFi频段+1蜂窝频段) 260 MHz, 100 m <sup>2</sup>
业务峰值速率/(Gbit/s)	100	7.5	13
频谱效率	10 X	34 bit/(s · Hz) (6.8 X)	51.2 bit/(s · Hz) (10.24 X)
功率效率	10 X	10 <sup>-3</sup> J/s (40 X)	5.8 * 10 <sup>-3</sup> J/s (232 X)
流量密度	25 X	7.5 Tbit/(s · km <sup>2</sup> ) (75 X)	13 Tbit/(s · km <sup>2</sup> ) (130 X)

络与蜂窝网络共存的异构密集网络融合方案与原型系统搭建。

#### 4 结束语

在超密集组网的趋势下,如何利用有限的无线通信资源,适应未来海量的、非均匀的无线数据业务以及满足业务多样化的需求,成为5G组网面临的重大技术挑战。组网架构是5G组网研究的骨架,从根本上改革网络架构方能满足未来无线业务需求。在此推动下,无线密集网络将成为未来移动通信系统的主要架构之一,研究无线密集组网架构及关键技术

术对满足未来无线通信需求具有很重要的意义。

#### 参考文献

- [1] OSSEIRAN A, BOCCARDI F, BRUAN V, et al. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 26–35. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815890
- [2] VISION IMT. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. ITU, 2014
- [3] 许晓东, 张慧鑫, 戴巡, 等. 一种移动通信接入网架构: 201410052534.9 [P]. 2014
- [4] XU X D, WANG D, TAO X F, et al. Resource Pooling for Frameless Network Architecture with Adaptive Resource Allocation, Science China Information Sciences, 2013, 56(2): 83–94. DOI: 10.1007/s11432-013-4788-7

- [5] XU X D, ZHANG H X, XUN D, et al. SDN Based Next Generation Mobile Network with Service Slicing and Trials [J]. China Communications, 2014, 11(2): 65–77. DOI: 10.1109/CC.2014.6821738
- [6] 许晓东, 戴巡, 张慧鑫, 等. 一种基于遗传算法的集中式资源管理方法: 201310226342.0 [P]. 2013
- [7] HAENGGI M. Stochastic Geometry for Wireless Networks [M]. British: Cambridge University Press, 2012
- [8] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and Analysis of K-Tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550–560
- [9] WU H C, TAO X F, XU J, et al. Secrecy Outage Probability in Multi-RAT Heterogeneous Networks[J]. IEEE Communications Letter, 2016, 20(1): 53–56. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2499748.
- [10] WU H C, TAO X F, XU J, et al. Coverage Analysis for CoMP in Two-Tier HetNets With Nonuniformly Deployed Femtocells [J]. IEEE Communications Letter, 2015, 19(9): 1600–1603. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2444836
- [11] WU H C, TAO X F, and LI N. Coverage Analysis for K-Tier Heterogeneous Networks with Multi-Cell Cooperation [C]// 2015 IEEE Globecom Workshops, 2015. USA: IEEE, 2015:1–5. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7413970
- [12] CUI Q M, SHI Y L, TAO X F, et al. A Unified Protocol Stack Solution for LTE and WLAN in Future Mobile Converged Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 24–33. DOI: 10.1109/MWC.2014.7000968

#### 作者简介



陶小峰, 北京邮电大学教授、博导, IET会士, 国家工程实验室主任, 国家杰出青年获得者; 长期从事无线通信基础理论的研究及实践, 现主要研究5G移动通信理论与技术; 两次获得国家技术发明奖; 出版中、英文著作各1部, 发表论文160余篇, 拥有授权专利74项。



吴慧慈, 北京邮电大学在读博士研究生; 研究方向为异构协作无线网络的覆盖与容量分析、异构无线网络物理层安全性能分析与优化。



许晓东, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、博导; 长期从事无线网络架构及组网理论研究; 承担多项国家自然科学基金等项目; 发表论文70余篇。

# 开放 5G 网络架构与开源平台

## Open 5G Network Architecture and Open Source Platform

赵明/ZHAO Ming  
王京/WANG Jing  
田志刚/TIAN Zhigang

(清华大学, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

人 类社会的网络化和虚拟化浪潮已经形成, 这个进程的一个标志就是从 2010 年开始移动通信终端数量超过了地球人口数量, 而且有预测认为 2020 年全球将有 260 亿移动通信连接设备<sup>[1-3]</sup>。未来远超人口总数的连接设备, 这正是 5G 移动通信技术发展的背景。国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) WP5D 第 22 次会议上, 已经正式将 5G 命名为 IMT-2020, 并发布了 IMT-2020 愿景以及时间表<sup>[4-5]</sup>。ITU 列举了若干未来非常有潜力的业务, 包括 3D 视频、超高清 (UHD) 屏幕、云计算、虚拟现实等, 并将这些业务归纳进 3 个主要的应用场景: 增强型移动宽带 (eMBB)、大规模机器通信 (mMTC) 和高可靠低时延通信 (URLLC)。

面对丰富的业务场景需求, 一方面我们认为不可能有一张网同时满足所有需求, 另一方面移动通信网络作为整个国民经济的基础设施, 又必须是公共统一的。由此可以预期, 对 5G 移动通信系统的最大的需求将是其定制能力、演进能力和服务国民经

收稿时间: 2016-03-18

网络出版时间: 2016-05-05

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2014AA01A703); 港澳台科技合作专项 (2014DFT10320)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0006-006

**摘要:** 提出一种开放网络研究框架, 及其开放网络架构解决方案。认为 5G 的 3 种业务场景向 3 类关键技术指标的灵活映射需求, 决定了基于公共资源池的网络切片是必然之选, 网络架构的开放性是保障敏捷切片所必须的, 网络和技术指标的演进也决定了传统垂直封闭网络架构不可持续。在该开放研究框架中, 各层、各域均给出了相应的技术模块, 传统垂直封闭网络协议架构也分别进行了解耦和集中化重构。该方案尝试性地满足性能、效率和业务需求, 并与开源协作开发模式结合。

**关键词:** 开放架构; 软件定义网络 (SDN); 网络功能虚拟化 (NFV); 超密集组网 (UDN); 开源

**Abstract:** This paper proposes an open framework and corresponding open network architecture. The flexible mapping from three kinds of application scenarios to three groups of key performance indicators (KPIs) determines that it is necessary to construct specific network slice from a common resource pool. The openness of network architecture is the base to guarantee the agile slicing. In addition, the evolution of network and KPIs need also change the style of conventional vertical close architecture. The proposed open architecture provides corresponding modules in each layer and domain, and redesigns the conventional architecture with decoupling and centralization. This solution tries to meet the needs of cellular performance, network efficiencies and application requirement, and combines with the open source cooperation practices.

**Keywords:** open architecture; soft defined network (SDN); network function virtualization (NFV); ultra dense network (UDN); open source

济各行各业的能力; 5G 移动通信技术, 尤其是网络架构, 也将与以往迥然不同。近年来, IT 行业的发展可以给我们一些指引, 即采用开放网络架构, 包括基础设施虚拟化、网络处理平台化和面向应用与业务的端到端网络切片构建。

文章中我们从技术角度分析 5G 采用开放网络架构的必然性, 并给出一种开放网络架构解决方案。

### 1 开放网络架构的技术必然性

与传统移动通信网络相比, 5G 网

络面对的需求是全面而多元的, 面临很多技术挑战, 下面我们将详细分析这些技术挑战所导致的开放网络架构的技术必然性。

#### 1.1 需求与指标的灵活映射以及网络切片

5G 以前用“车”模型 (VAN) 来表达移动通信系统 (包括 IMT-2000 和 IMT-Advanced) 的性能指标需求, 而此次 ITU 通过雷达图的方式全面体现了 5G (IMT-2020) 的技术指标需求。ITU 定义了 8 个技术指标需求维度, 包括峰值速率、用户体验速率、频

谱效率、移动性、时延、连接密度、网络能量效率和流量密度,并将 3 个应用场景与 8 个技术指标做了映射,如图 1 所示。对比以往的技术指标需求可以发现,IMT-2020 中明确提出了连接密度、网络能量效率和流量密度等指标<sup>[6-8]</sup>。

将 ITU 的 8 个技术指标分为 3 类:

(1) 蜂窝组网性能。峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性以及隐含的覆盖保障是评价蜂窝组网性能的关键指标,与人的(语音或数据)通信需求比较贴近。值得注意的是,空口频谱资源的利用效率、空口网络流程的有效性也属于蜂窝组网性能的考量因素。比如,eMBB 中即时通信(IM)类业务,甚至大部分 OTT 业务,都会有大量的状态探测短包传输,这对于随机接入和终端休眠机制有很大挑战,因为传统机制对这类消息的传输效率很低。又比如,进入 5G 时代后,由于 eMBB 业务流量的爆发式增长,导致空口蜂窝密度的增加,称为超密集组网(UDN),这需要大量小区间协作以改善覆盖性能和降低干扰,而传统机制对于小区间协作所需的用户面和控制面覆盖方面效率都很低。

(2) 网络成本与效率。网络能量效率以及可支撑连接密度用来考量网络的有效性,主要是为提供一定服

务所需的成本,或以一定网络基础设施来支撑相应服务的效率,包含网络的能量效率和控制管理效率等。在 UDN 组网中,我们除了关注蜂窝组网效率外,还需要特别关注这种组网形态对应的网络成本与效率。控制面(C)与用户面(U)的覆盖需求差异越来越大,以至于第 3 代合作伙伴项目(3GPP)在高级长期演进(LTE-A)中标准化了一种 C/U 覆盖分离的异构组网(HetNet)形态,超蜂窝网络架构也有大量相关研究。因应这种无线组网的变化,接入网也分别用宏蜂窝基站与微蜂窝小站来负责 C/U 面的覆盖。在业务和人流潮汐效应下,大量小站有时是空闲的,需要网络及时控制其关闭和打开,以提高网络的能量效率。

(3) 端到端业务体验质量(QoE)保障。时延和移动性是当前自动驾驶等 URLLC 类业务提出的特殊需求,mMTC 类业务的终端低功耗低成本、网络超强覆盖也属于其特殊的 QoE 需求。每个业务都有其业务模型,都有需要特别关注的指标和流程,最终体现为用户或行业能直观感受的独特 QoE。

3 种业务场景对这 3 类技术指标的需求程度不同,甚至是矛盾的:

(1) 一般 eMBB 类业务。这类业务对蜂窝组网性能、网络成本与效率

这两类技术指标有较强需求,由于蜂窝移动通信系统的性能指标是按照人类的通信需求设计的,所以一般来说并无特殊的 QoE 需要保障。

(2) 一般 mMTC 和 URLLC 类业务。这类业务对网络成本与效率、业务 QoE 保障这两类技术指标有较强需求。对于 mMTC,网络防拥塞的需求属于网络成本与效率类技术指标,超强覆盖以及设计特别机制保障终端超低成本、低功耗属于业务特殊 QoE 保障需求。对于 URLLC,低时延属于特殊 QoE 保障需求,为此需要网络架构在很多节点提供业务卸载机制,以降低网络处理带来的时延,避免大量业务横穿网络影响其效率。

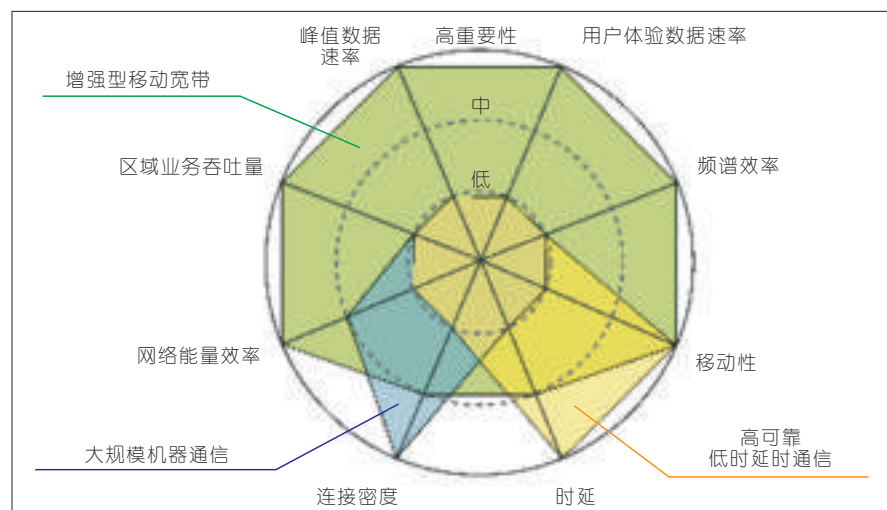
(3) 虚拟现实(VR)&现实增强(AR)、无人机、机器人等业务。这类业务兼具 eMBB 与 URLLC 的部分特点,对性能与 QoE 保障这两类指标有较强需求,但对网络成本与效率的影响则并不突出。

基于以上讨论可以看出,不同的业务场景不可能同时要求满足 3 类技术指标。为支撑这种灵活映射,避免不同业务场景之间矛盾的技术指标需求,一种解决办法是:基于公共资源池,为不同业务与场景构建不同网络切片。切片之间有良好的隔离性,并可以很容易提供、迁移和编排管理。本质上这种切片化构建方法需要一种开放网络架构,可以敏捷重构,弹性扩展,并可持续演进<sup>[9-12]</sup>。

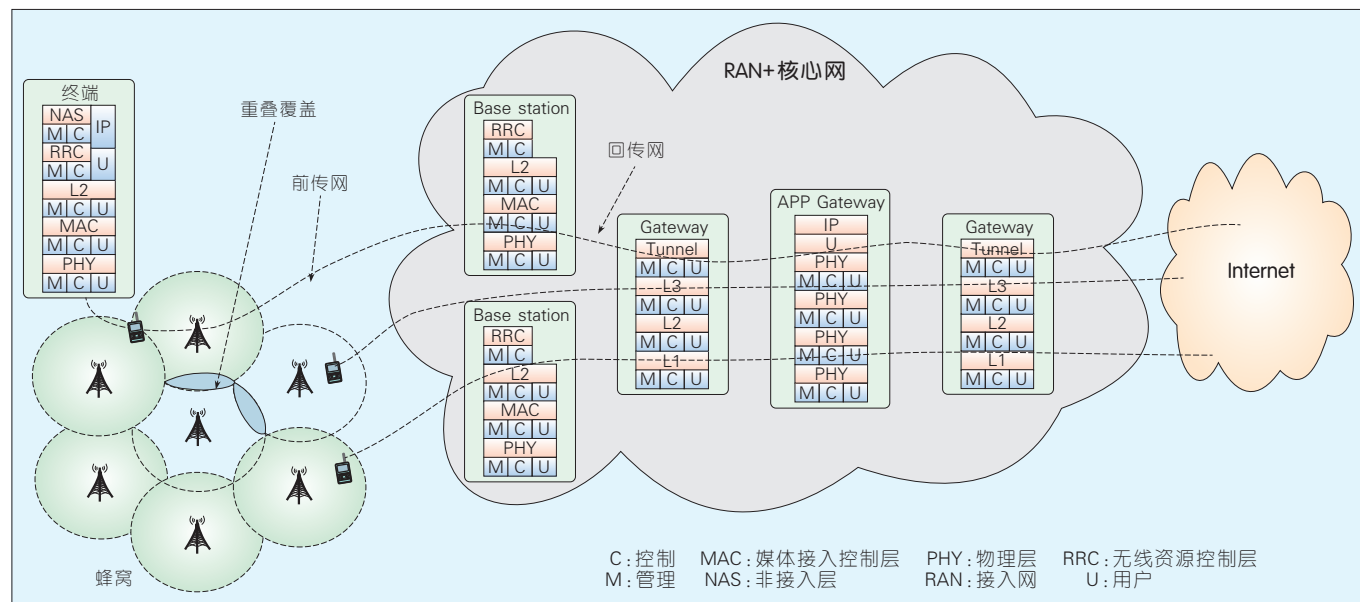
## 1.2 移动通信网络架构面临的技术挑战

从 2G 到 4G 的网络架构和流程基本是稳定的,我们将其概括为“蜂窝模型”和“管道模型”<sup>[13]</sup>。

(1) 蜂窝模型在空口通过小区为单位对空口资源进行划分和管理。在 5G 以前,小区之间重叠覆盖区域(如图 2 中的阴影部分)可通过网络优化而尽量减少,小区间协作较少,基站协议栈主要考虑空口承载的管理,彼此较为独立,具有“垂直封闭”



▲ 图 1 IMT-2020 网络关键技术指标



▲ 图2 蜂窝模型与管道模型

的特点。

(2)管道模型基本遵从开放系统互联(OSI)的7层协议参考模型,及经过宽带综合业务数字网(B-ISDN)/异步传输模式(ATM)充实后的管理(M)/C/U面模型。移动通信网络分为接入网和核心网,由一些具有独特功能的网元为主体,由点到点链路最终构成端到端连接,为终端与Internet提供具有移动性的业务连接,这些网元的协议栈较为独立,具有垂直封闭的特点。

蜂窝模型的特点如下:

- 地理上,通过基站对覆盖进行划分,并以小区为单位对频谱资源进行复用;
- 小区内,主要以双工和多址等正交方式对空口资源(时间、频率、空间和功率)进行划分;
- 小区间,以功控和切换来管理干扰;
- 移动性和承载上,通过接入、切换、漫游和寻呼等手段保障连接在小区间的移动性,承载基本由一个小区负责,并随着切换在小区间传递。

管道模型的特点如下:

- 接入网的基站和核心网的网元,都是具有独立功能的网元,维护

某段点到点承载,进而形成端到端连接,相互之间的依赖比较少;

- 每个网元的协议栈中不同协议层各有分工,自下而上提供服务,逐级封装;
- 向业务提供若干种质量等级的传输通道,以同一种网络制式服务较长时间内的业务。

面对5G的新需求,传统稳定的蜂窝模型和管道模型都将面临挑战。从蜂窝模型来看,UDN场景下,C/U面覆盖特性并不相同,C面需要高可靠,U面需要高性能,此时C/U面覆盖解耦对于各自的频谱效率来说都是最合适的。在mMTC海量连接场景下,小区内空口资源正交式管理也变得效率低下,至少需要在随机接入和多址机制设计上打破以往封闭的连接管理模式。

从管道模型方面来说,上述新的无线组网形态需要打破以基站为基本单元对空口资源进行管理,和以功能划分网元的接入网架构,使得追求效率的用户面以及追求灵活性和定制化的控制/管理面解耦;解耦后的相应处理可与不同类型基础设施匹配,可由不同技术特征的平台加以支持,也可支持为不同的上层业务与

运营逻辑构建单独的切片。此外,垂直封闭网元和协议栈不利于基于卸载的边缘计算等业务部署模式,其逐段承载管理方式对于mMTC存在效率低下的问题,自底向上逐层封装无法满足按照业务QoE灵活重构网络的需求,所以需要打破垂直封闭网元的界限,将需要提高效率的环节解耦出来集中处理<sup>[14]</sup>。

所以说,即使只从3类技术指标中任意单项的满足方面考虑,传统蜂窝模型与管道模型也必须改变垂直封闭的特征,变迁到开放网络架构。

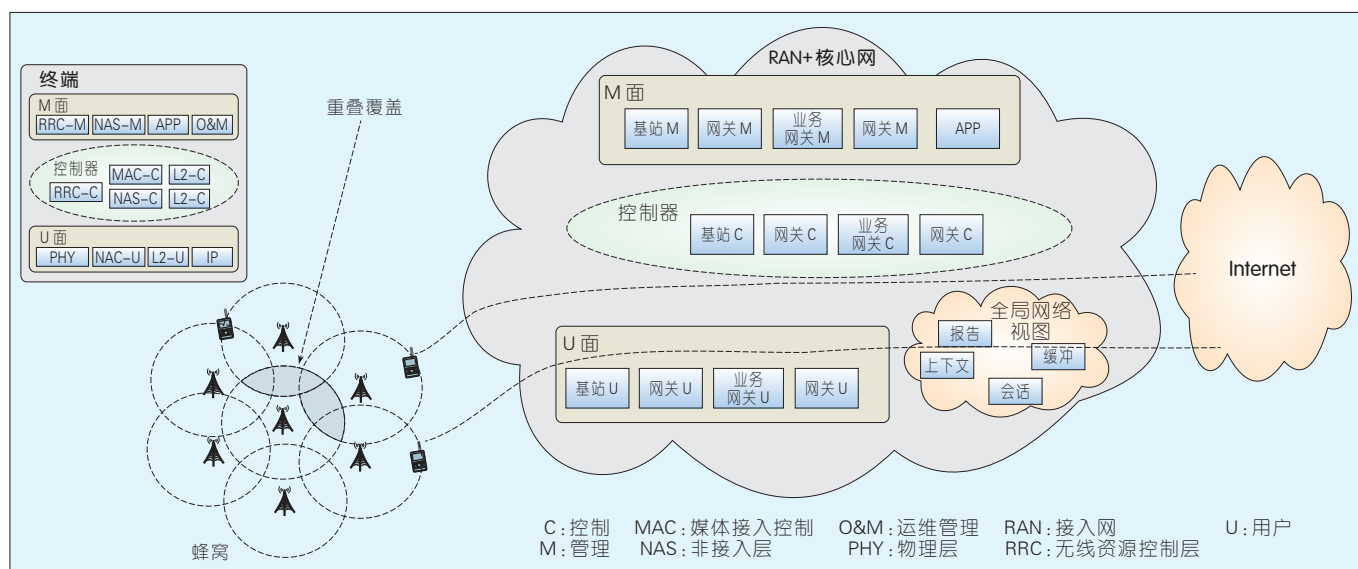
### 1.3 开放网络架构特点

针对上述两部分对于开放网络架构技术必然性的分析,我们给出一种解决方案,比较形化的描述为:将图2中蜂窝模型以及管道模型中的垂直封闭网元“放倒”,形成如图3所示的架构。

所谓“放倒”的学术化描述为:

(1)改变自底向上逐级封装的管道模型,将U面的协议层平坦化,既可灵活重构,又方便与上层业务的紧密结合;

(2)将垂直封闭网元的C面处理,以“虚拟化”的方式形成逻辑集中



▲ 图3 将垂直封闭网元与协议“放倒”的网络架构

的控制器,解决其不容易协调而效率底下的问题;

(3)将垂直封闭网元的M面开放,通过控制器的北向接口营造开放的管理与业务面,解决“公共基础设施与定制业务需求”之间的矛盾;

(4)将网络协议栈的“数据部分”(D),以分布式实时数据库的方式集中为全局网络视图(GNV),使得控制器处理几乎与状态无关,方便定制和重构,增强网元之间沟通效率。

上述思路,可以解决5G的性能、成本与效率以及QoE保障这3种需求之间的矛盾,满足无线网络架构的演进需求。

## 2 一种开放5G网络架构

针对传统蜂窝模型以及管道模型,以放倒的方式对U、C、M与D加以解耦或虚拟化集中,这种解决方案称为非栈式网络架构NoStack。这种架构是整个5G开放网络架构的核心部分,但还需要一个全面框架。

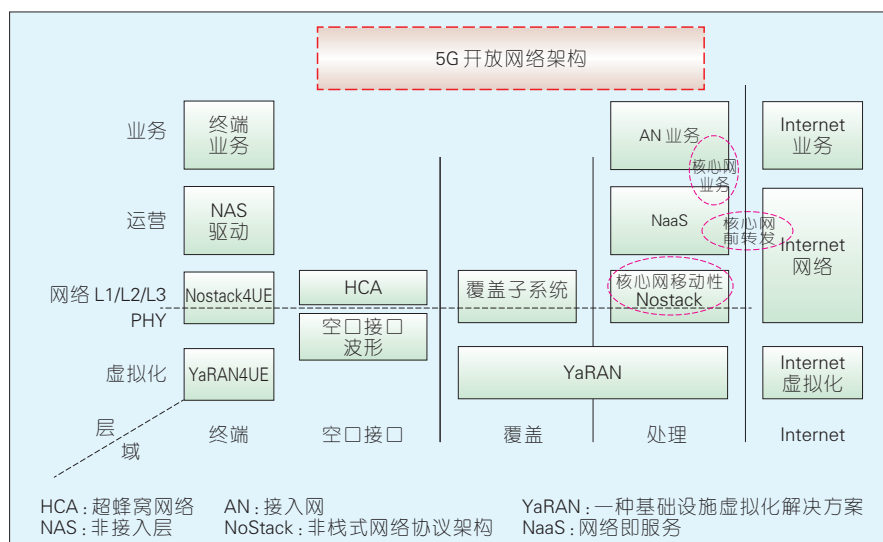
### 2.1 开放5G网络研究框架

我们首先给出包含多层多域的5G开放网络框架,如图4所示。纵向分为4个域:终端域、空口域、覆盖域和处理域;横向分为3层:基础设施

虚拟化层、网络层、运营/业务层,每个层与域的交叉点,都存在一个研究模块。

将覆盖域从接入域分出来是因为未来5G的天线与基带处理单元(BBU)不再一一对应,即前传网不再是简单的一对一连接,而是存在复杂的组网映射关系。设立基础设施虚拟化层,是因为未来的5G网络基础设施需要尽可能利用商用现成设备(COTS),比如通用服务器和交换机等,所以也需要虚拟化层屏蔽基础设施的具体细节。

开放网络架构中的网络协议层主要有3个模块:NoStack、覆盖子系统 and 超蜂窝网络(HCA)。其中HCA是对此前所说蜂窝模型的突破,而NoStack与覆盖子系统则是对传统管道模型的颠覆。HCA与NoStack/覆盖子系统是镜像关系,HCA所描述的新无线组网蜂窝模型有赖于NoStack+覆盖子系统在接入网去实现。在上述框架中,还包括基础设施虚拟化模块YaRAN、终端域的虚拟化架构YaRAN4UE以及网络协议架构NoStack4UE。YaRAN是一种适用于



▲ 图4 开放5G网络研究框架

5G 的网络功能虚拟化(NFV)解决方案,其使命是为 5G 开放网络协议架构营造合适的运行时环境,包括高效的业务面处理环境,灵活可重构的控制面状态机环境,以及向业务开放和可敏捷定制的管理和业务面环境。按照 NFV 的理念,开放网络协议架构例化的虚拟网络功能(VNF)模块,需要被 YaRAN 所调度并投射在适当的基础设施资源上。终端侧的 YaRAN4UE 和 NoStack4UE 是接入网侧 YaRAN 以及 NoStack+覆盖子系统的对偶模块。网络即服务(NaaS)模块主要是针对业务与行业的定制化服务,并且依赖于开放网络协议架构的支持。

## 2.2 一种开放 5G 网络架构解决方案

基于开放网络研究框架,我们给出一种 5G 开放网络协议架构的较详细设计,如图 5 所示。开放网络协议架构层,包括前述的放倒接入网架构 NoStack、覆盖子系统和 HCA。

HCA 的特点如下:

(1)打破独立封闭小区的垂直封

闭协议栈,构建多天线协作控制架构,以此来实现跨小区的空口资源管理;形成横跨多个小区的鲁棒控制覆盖,对所覆盖区域内的空口资源进行统一管理。

(2)区别与以往的小区内靠双工和多址、小区间靠频率复用、功控和切换的模式,小区业务覆盖淡化传统以时间和频率为主的正交多址模式,主要是采用空间复用类非正交多址模式。

(3)蜂窝模型的工作流程发生较大变化,不再是终端主动与某个基站进行同步,接收广播信息,然后进行随机接入,而是由网络采用新型检测算法,从空口多天线信号中感知终端的存在及其定时,如图 5 中的用户感知覆盖。这样做的好处是:对 mMTC 类业务的海量连接和高连接密度,可以提高管理效率。

(4)3种覆盖相解耦,通过不同的组合,可以为不同业务场景需求有针对性的定制其空口制式。

覆盖子系统的作用是两重的:

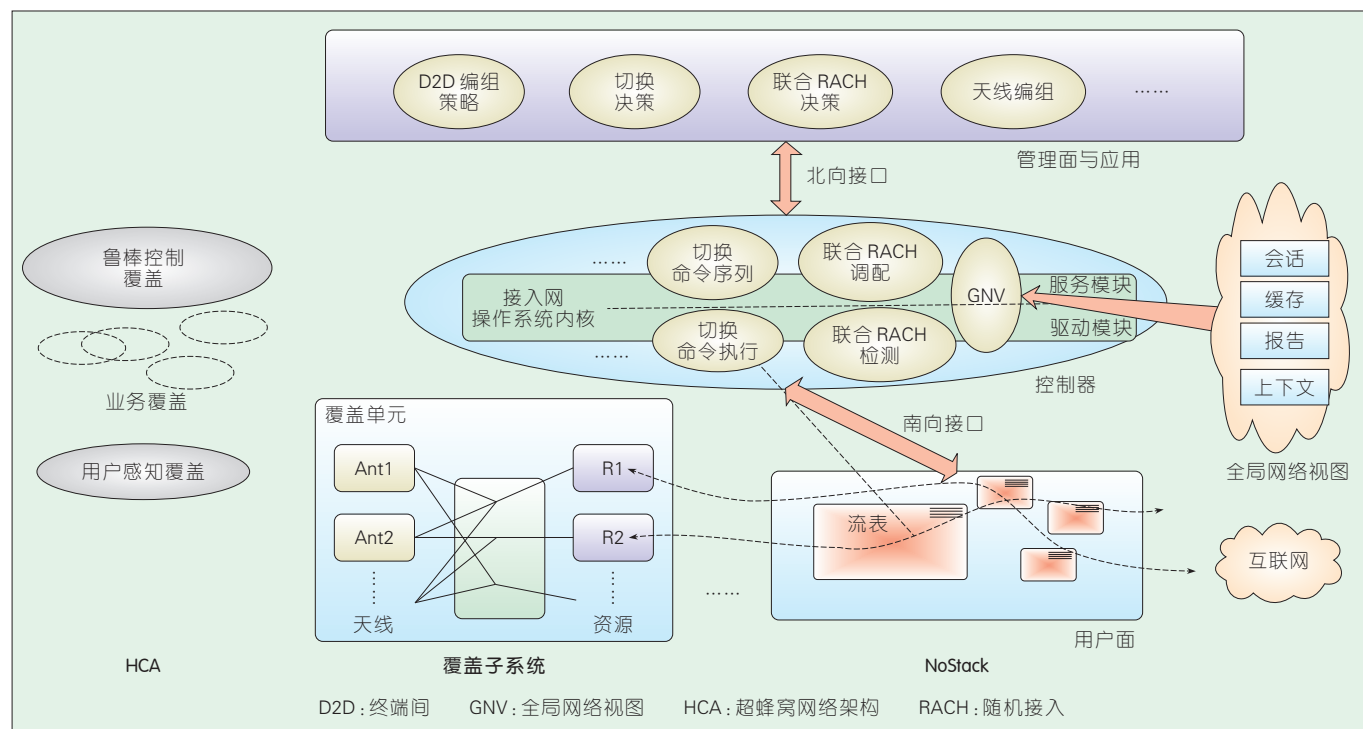
(1)一端以天线为提供覆盖服务

的主体,并不从属于某个小区,将小区级业务/控制流和用户级业务流向空口资源映射,包括时间和频率的划分,空间的预编码和功率的分配。覆盖子系统主要关注用户面,其控制放在 NoStack 的控制器中进行,上述划分、分配和配置都由控制器主导,天线只需要被动接受。

(2)另一端以小区控制流或用户业务流为输入,满足其对空口资源的请求,业务流之间也不需要协调,业务流在天线上只是线性叠加;当天线覆盖能力不足时,比如功率受限,由控制器确定分配方式。

通过上述设计,天线与小区控制流和用户业务流是解耦的,没有任何两个流的覆盖必须采用相同的天线集,满足 HCA 的灵活天线协作、面向用户的覆盖形成和空口无线组网体制可定制等需求,满足 NoStack 的以业务流为单位的处理体系,提高对海量连接的承载管理效率等。

对于 NoStack 来说,主要需要突破传统的管道模型的垂直封闭网络协议架构:



▲图5 以NoStack为核心的5G开放网络协议架构

(1) 淡化用户面协议层之间的耦合关系,制造“平坦化”的灵活处理的模式。

(2) 将 C 面处理从 U 面解耦出来,提高 U 面的处理效率。

(3) 解耦出来的 C 面,以逻辑集中的方式设计为控制器,减少传统架构中独立网元间复杂的信令流程,提高管理效率。

(4) 将 U 面的缓存、C 面的会话、向 M 面的报告,以及相应的半静态上下文,解耦出来存放在全局网络视图中,并且降低 C 面的状态相关处理,提高其可重构能力,以及向业务的开放程度。

(5) 控制器通过北向接口向 M 面提供高级控制服务,既提供面向业务的定制能力,又可以屏蔽底层处理的细节。

在开放网络研究框架中,开放网络架构的核心问题就是开放网络协议模型,我们分别对 3 个模块进行了阐述,探讨了这种设计在性能、效率和定制化方面的优势。

### 3 开放网络运营与开源协作研发

电信行业采用开放网络架构有其行业生态与运营经济发展的必然性,主要是移动互联网行业的 OTT 服务提供商的异军突起,以及由此带给电信行业的收入增速日益平坦与业务成本快速增加之间的剪刀差效应:行业源头的运营商遭遇了互联网行业的价值碾压,其提供的服务无法获得满意的利润分配,随之转移给行业下游的收入就更少。虽然收入增长不快,迫于 Wi-Fi 等替代连接方案的竞争,行业却必须承担 OTT 类业务大幅增长带来的成本压力,行业长时间积累的供给能力也在经历痛苦的消化。在这种状况下,有必要尝试开放与开源的组织模式,打破传统的价值分配模型,向其他行业渗透开放以挖掘价值,行业内部通过开源协作减少竞争成本。

移动通信行业正在经历广泛的分化整合,与上下游行业的关系也发生了深刻变化。行业生态中属于基础设施的部分,日益整合集中;与上下游重合的部分,正日益脱离并渗入各行各业。近年来影响巨大的 NFV 也属于这种趋势,基础设施必须进一步标准化和公共化,从而有利于上层业务的开发,这就必须“开放”和“开源”。开放是基础设施的必备属性,否则无以快速构建上层生态;开源是行业博弈导致的一种减少无效竞争的快速整合手段,通过开源协作形成周边生态是这种先进竞争手段的特征。在变革期,原先的科研、标准化和产品研发次序已经不明显,可以先从科研开始,为标准化和商用产品研发探索一条开放和开源的新道路。

### 4 结束语

文章中,我们尝试从技术层面推导开放网络架构的必要性,给出一种研究框架及开放网络架构解决方案,并初步探讨了开源协作研发模式对于电信行业所能提供的益处;但对于开放网络架构的探讨还需要细致的学理性分析,对于开源协作研发模式也需要在实践中进一步摸索。

#### 参考文献

- [1] Ericsson. Ericsson Mobility Report 2015—On the Pulse of the Networked Society [R]. Sweden: Ericsson AB, 2013
- [2] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020 [R]. USA: Cisco Systems Inc., 2016
- [3] Ericsson Networked Society Lab. ICT & the Future of Transport, Part 2/8 Industry Transformation – Horizon Scan[R]. Sweden: Ericsson AB, 2014
- [4] ITU-R. Report M.2370-0 (2015), IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030 [R]. USA: ITU-R, 2015
- [5] ITU-R. Report M.2083-0 (2015), Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. USA: ITU-R, 2015
- [6] 牛志升,周盛,周世东,等.能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战 [M]. 北京:中国科学, 2012
- [7] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO A, et al. Coordinated Multipoint Transmission/Reception Techniques for LTE-Advanced [Coordinated and Distributed MIMO][J]. IEEE Wireless Communications Journal, 2010, 17(3): 26–34

- [8] 王京,姚彦,赵明,等.分布式无线通信系统的概念平台[J].电子学报,2002, 30(7): 937–940
- [9] China Mobile Research Institute. C-RAN the Road Towards Green RAN[R]. China: China Mobile Research Institute, 2011
- [10] 3GPP. Network Architecture: TS 23.002 [S].2011
- [11] The 1000x Challenge, More Small Cells – Taking Hetnets to the Next Level [EB/OL]. [2016-04-20].<http://www.qualcomm.com/media/documents/wireless-networks-1000x-more-small-cells>
- [12] HOYDIS J, K. HOSSEINI S, BRINK T, et al. Making Smart Use of Excess Antennas: Massive MIMO, Small Cells, and TDD [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(2): 5–21
- [13] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems with Linear Precoding and Downlink Pilots[C]//Proceeding of Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. USA, IEEE: 292–298, 2013. DOI: 10.1109/Allerton.2013.6736537
- [14] Mobile Broadband—Busting the Myth of the Scissor Effect [EB/OL]. [2016-04-22]. [http://www.ericsson.com/news/100622\\_ebr\\_strategy\\_mobile\\_broadband\\_244218601\\_c](http://www.ericsson.com/news/100622_ebr_strategy_mobile_broadband_244218601_c)

#### 作者简介



**赵明**,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心副主任、研究员;主要研究方向为无线与移动通信、软件无线电技术、宽带无线传输技术等;曾承担多项“863”项目;负责的中国第三代移动通信系统研究开发,获国家科学技术进步二等奖,并获得“863”十五周年先进个人称号;发表论文 70 余篇,申请专利 20 项。



**王京**,清华大学信息科学与技术国家实验室副主任,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心主任,微波与数字通信国家重点实验室副主任兼无线传输与个人通信研究室主任等;主要研究方向为无线移动通信、宽带无线传输技术等;曾承担多项“863”项目、科技攻关项目以及国防预研和型号等项目;负责的中国第三代移动通信系统研究开发项目获 2003 年国家科学技术进步二等奖,另获国防科学技术奖二等奖 1 项;发表论文 100 余篇,申请专利 30 余项。



**田志刚**,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心助理研究员;主要研究方向为 5G 网络研究,包括移动通信物理层和 MAC 层算法、软件无线电、网络协议与架构等。

# 5G 空口统一框架初探: 软件定义空口

## A Framework of 5G Air Interface: Software Defined Air Interface

倪吉庆/NI Jiqing  
孙奇/SUN Qi  
崔春风/CUI Chunfeng

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100032)  
(China Mobile Research Institute, Beijing 100032, China)

为了适应未来移动互联网和物联网的爆炸式增长, 下一代移动通信系统 (IMT-2020) 已就应用场景、用户需求、技术趋势及其他领域全面展开讨论。国际电信联盟无线部 (ITU-R) 于 2015 年 6 月定义了 3 类典型应用场景: 增强移动宽带 (eMBB)、大规模机器通信 (mMTC) 和 低时延高可靠通信 (URLLC)<sup>[1]</sup>。其中, eMBB 一般考虑低频和高频两种场景, URLLC 在业务分类中也经常被超可靠机器通信 (uMTC) 替代, 如图 1(a) 所示。中国的 IMT-2020 推进组于 2015 年 5 月发布了 5G 概念白皮书, 其定义了广域连续覆盖、热点高容量、低功耗大连接和低时延高可靠四大场景<sup>[2]</sup>。之后推进组于 2015 年底, 具体细化了 8 个评估场景, 如图 1(b) 所示。

面对未来如此多样化和差异化的业务, 传统单一的空口架构很难进行高效地支撑。中国移动基于“绿色、柔性和极速”的 5G 愿景<sup>[3]</sup>, 提出了

收稿时间: 2016-02-16

网络出版时间: 2016-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展 (“973”) 规划 (2010CB328200、2010CB328201); 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2006AA01Z257); 国家自然科学基金 (60602058、60572120); 国家科技重大专项 (2009ZX03003-002-02)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0012-005

**摘要:** 提出了软件定义空口 (SDAI) 的设计理念和框架, 认为通过 SDAI 可以对多个无线空口功能模块进行灵活编程配置, 有效地满足不同场景需求, 是未来 5G 空口设计的基本理念。基于 SDAI 统一框架, 帧结构、新波形、新型多址、调制编码、双工模式和多天线技术等可以自适应配置, 使得无线信号对业务场景“量体裁衣”。另外, 基本功能模块的可编程性、可配置性和可共享性, 都可有效地提升空口实现效率。

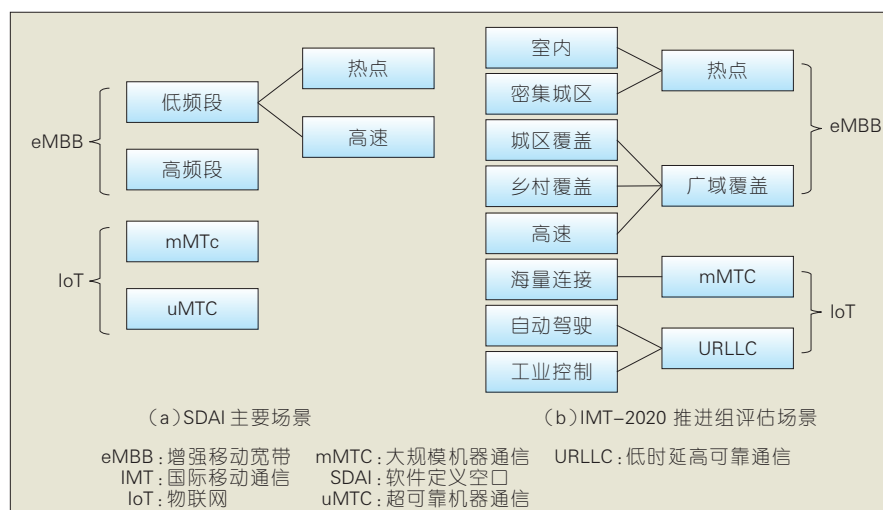
**关键词:** 5G; 软件定义空口; 灵活双工; 新型多址; 新波形

**Abstract:** In this paper, the design concept and framework of software defined air interface (SDAI) is proposed. And it also points that the multiple wireless air interface function module can be flexibly programmed and configured by SDAI, which effectively meet the needs of different scenarios. Under the unified framework, the frame structure, waveform, new multiple access, coding & modulation, duplex mode, and antenna configuration can be adaptively configured. It provides a flexible composition of sets of radio technologies, and programmable and configurable functions and parameters tailored to the application scenarios. By this way, the efficiency of air interface can be greatly improved.

**Keywords:** 5G; SDAI; agile duplex; new multiple access; new waveforms

“软件定义空口” (SDAI) 的设计理念, 以空口定制化的方式让无线信号“量体裁衣”。其基本思想是通过物

理层不同功能模块的可配组合来满足业务的多样化需求, 这些功能模块包括帧结构、双工模式、波形、多址、



▲ 图 1 SDAI 主要场景和 IMT-2020 推进组评估场景

调制编码、多天线技术以及频谱动态适用等。基本功能模块的可编程性、可配置性和可共享性,及尽可能共享功能模块,都可有效地提升空口效率。SDAI 通过优化的定制能力满足 eMBB、mMTC 和 uMTC 3 类典型场景需求。

## 1 SDAI 理念及框架

### 1.1 SDAI 基本理念

传统移动通信的演进一直以来都是以提升峰值速率和系统容量为主要目标,5G 将面临更加多样化的场景和极致的性能挑战。采用传统单一定制化的空口技术和参数设计无法满足上述需求。面对 5G 极为丰富的应用场景和极致的用户体验需求,5G 空口应该具备足够的“弹性”来适配未来多样化的场景需求,从而以最高效的方式满足各场景下不同的服务特性、连接数、容量以及时延等要求。此外,未来 5G 空口设计需要能够实现空口能力的按需及时升级,具备 IT 产业敏捷开发、快速迭代

的特征。从某种意义上讲,5G 将是“第 1 代多维度”通信系统标准,它将具备自我完善自我发展的能力。SDAI 的目标是建立统一、高效、灵活、可配置的空口技术框架,可针对部署场景、业务需求、性能指标、可用频谱和终端能力等具体情况,灵活地进行技术选择和参数配置。最终,形成 eMBB、mMTC 和 uMTC 3 类应用场景的空口技术方案,从而提高资源效率,降低网络部署成本,并能够有效应对未来可能出现的新场景和新业务需求<sup>[4]</sup>。

SDAI 的基本理念可以概括为如下两点:

(1)敏捷。SDAI 通过可编程可配置功能,实现空口技术灵活构造,以及针对用户和业务模式的参数裁剪能力;

(2)高效。SDAI 构建统一框架,支持不同场景和接入技术,最大化共性功能,同时在保持最小化特殊功能情况下,提供特殊定制化服务。

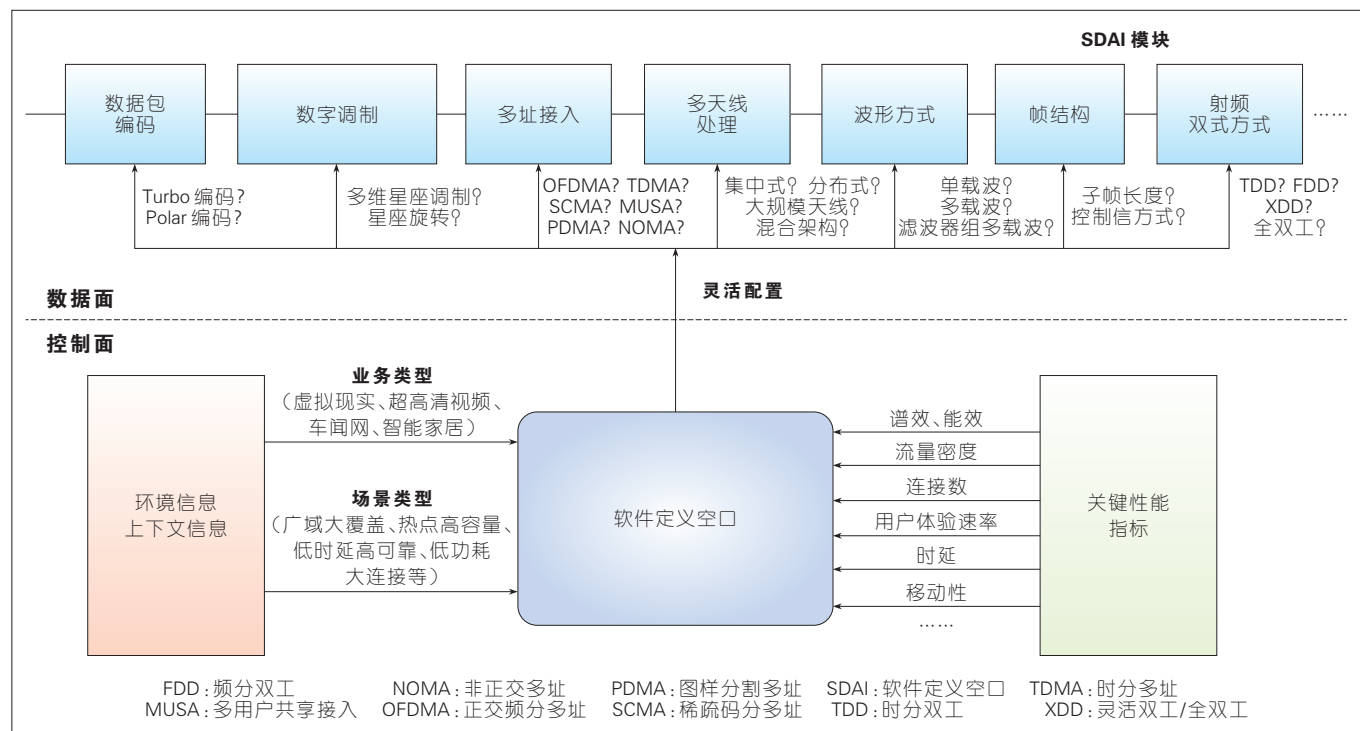
敏捷性体现在 SDAI 能够提供一一个足够多样性的技术集合和相关参

数集合,使得候选技术集合能够支撑不同场景与业务的极端需求。高效性体现在技术方案的性能与复杂度之间的折中。一方面是候选技术方案的数量要控制在一定的范围内;另外一方面是候选技术方案尽量使用统一的实现结构,复用相关实现模块,以提高资源的利用效率,降低商用化成本。

### 1.2 SDAI 技术框架

软件定义空口的基本框架如图 2 所示,其包含数据面以及控制面两个层面。数据面由多个信号处理功能模块构成。在控制面上,逻辑上的智能控制模块将会测量和收集上下文环境信息,例如:场景、业务类型和信道条件等,并根据系统预设的性能指标来决策和配置相应的数据面信号处理模块。此外,需要考虑上层协议栈重构以支持灵活统一空口管理的架构。

SDAI 的挑战主要来自两方面:一是根据场景、业务及链路环境的空口自适应机制;二是典型场景下的空口



▲ 图 2 软件定义空口框架

技术集合选取。在空口自适应机制方面,考虑到典型场景及终端类型的相对固定性,以及用户业务类型及用户链路的动态变化特点,空口自适应可以考虑两种不同时间粒度上的自适应配置:根据场景和部署的需要等进行半静态配置;针对用户链路质量、移动性、传输业务类型、网络接入用户量等动态变化的环境参数进行动态空口自适应配置。第1种半静态配置方式,时间变化周期较长,可以通过小区广播信道通知小区的空口配置情况,相应的空口配置可以依据5G场景归纳为几种典型的无线空口技术配置;第2种动态配置方式,时间变化周期短并且具有用户区分性,需要通过控制信道向用户实时通知其空口配置参数,并且动态配置方式会以半静态的配置为基础,依据信道环境变化、上下行业务量、用户移动性以及传输业务类型等瞬时变化。此外,考虑统一空口架构,可将空口的数据处理和参数配置分层,将数据处理层中的功能模块通过标准的应用程序接口开放给空口配置层,空口配置层通过无线资源管理功能按需进行配置。

## 2 SDAI 关键使能技术

SDAI的核心在于提高空口的灵活性,使得空口在承载不同业务时可以具有不同的传输特征以最佳匹配业务的需求。这种灵活的空口配置需要相应空口技术的支持,如统一自适应的帧结构、灵活的双工、灵活的多址、灵活的波形、大规模天线、新型调制编码及灵活频谱使用等。

### 2.1 自适应帧结构

自适应帧结构是实现SDAI灵活高效设计理念的基础。其灵活设计可以支撑5G场景和业务的多样性,统一架构可以减少干扰并实现高效性。SDAI帧结构类似一个容器,承载着多种无线空口技术。比如,对于mMTC业务,可能需要设计专门的窄

带系统;对于高频段热点场景,采用单载波技术,需要全新的帧结构设计;采用多载波技术,较大的子载波间隔是降低复杂度和峰均比及对抗频偏影响的有效途径。对于低时延业务,更短帧及更快速的上下行切换是实现低时延性能的保障<sup>[5]</sup>。此外,灵活双工、新波形等新技术应用也需要新型帧结构进行支撑。图3给出了一种带内灵活帧结构的设计实例。其通过复用和绑定一些基本单元,可以提供可扩展的传输时间间隔(TTI),以匹配不同的业务。另外,基于非正交波形的帧结构,可以有效地支持异步传输。

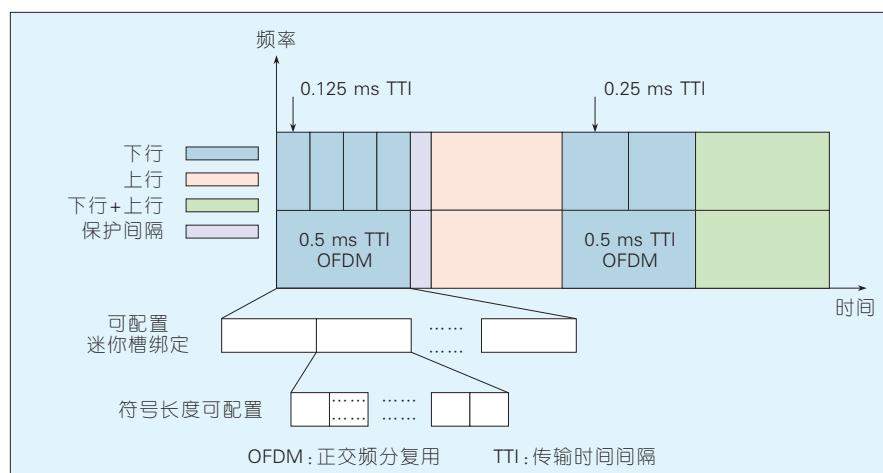
### 2.2 灵活双工

随着未来上下行业务随时空变化越加明显,采用目前相对固定的时分双工(TDD)资源分配无法适应动态变化需求。灵活双工作为一种有效利用上下行资源的方式,可以动态配置时频资源以适配上下业务流量;也可以在半双工和全双工方式间进行转换,从而根据整个系统业务需求进行灵活调整<sup>[6]</sup>。应用灵活双工以及全双工需要解决该技术带来的大量干扰问题,其干扰抑制是未来应用亟待解决的问题。全双工和灵活双工方式重点应用为孤站的热点高容量需求场景,因为在此场景下,系统干扰主要是基站自身发射对接收的干

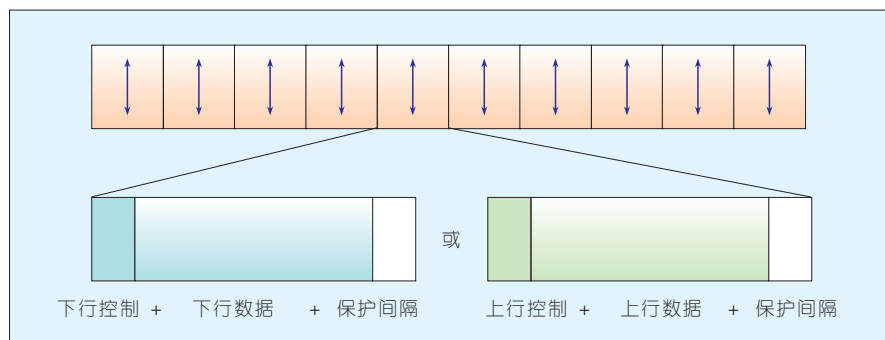
扰和小区内干扰。通过引入云无线接入网(C-RAN)架构,基站可以进行联合信号处理,全双工和灵活双工也可以应用在广域连续覆盖和热点高容量连续覆盖场景<sup>[7]</sup>。图4为一种灵活双工帧结构实例。其每个子帧均可任意为上行传输或者下行传输,不再局限于现有系统中的固定上下行配置。

### 2.3 灵活多址

当前5G多址技术主要包括现有的正交多址技术:正交频分多址(OFDMA)、单载波频分多址(SC-FDMA),以及正在研究的多用户共享接入(MUSA)、非正交多址(NOMA)、图样分割多址(PDMA)和稀疏码分多址(SCMA)等非正交多址技术<sup>[8]</sup>。面对5G更为多样化的业务场景,需要灵活的多址技术匹配不同的场景与业务需求。新型多址技术主要面向低功耗大连接场景和低时延高可靠场景,目标是针对物联网场景,在满足一定用户速率要求的情况下,尽可能地增加接入用户数量,同时支持免调度接入,降低系统信令开销、时延和终端功耗。其中,非正交多址接入技术通过多个用户在时域、频域、空域或码域上的复用,可大大提升用户连接数。由于用户有更多机会接入,网络整体吞吐量和频谱效率可显著提升。此外,面对低延时或低功耗的



▲图3 一种自适应帧结构实例



▲ 图4 一种灵活双工帧结构实例

业务场景,采用非正交多址接入技术可以更好地实现免调度竞争接入,实现低延时通信,并且减少开启时间,降低设备功耗。

## 2.4 灵活多天线

大规模天线是 5G 关键技术之一,由于空间自由度的大幅度提高,可以有效地提升系统谱效、能效、用户体验及传输可靠性,同时也为异构化、密集化的网络部署提供了灵活的干扰控制与协调手段。未来主要应用场景有广域连续覆盖和热点高容量。广域宏基站部署对天线阵列尺寸限制小,使得在低频段应用大规模天线技术成为可能。其可以发挥高赋型增益等特点增强小区覆盖并提升小区边缘用户性能。另外,预波束跟踪等先进技术可以对高速移动场景进行支撑。在热点场景,大规模天线和高频段通信可以很好地结合,支持极高的速率传输<sup>[9]</sup>。分布式天线与新型网络构架可以有机地融合,实现异构化、密集化的网络部署。

## 2.5 灵活波形

OFDM 作为无线宽带传输技术,不仅在 4G 中广泛使用,也是 5G 重要候选波形。基于滤波器的新波形技术<sup>[10]</sup>,例如通用滤波多载波(UFMC)、基于滤波的 OFDM(f-OFDM)、广义频分复用(GFDM)、滤波器组多载波(FBMC),可以有效地降低带外泄露,且不需要严格的同步,可以满足未来急剧增长的窄带小包业务传输需求

和异步海量终端接入,并支持碎片化的频谱接入。对于毫米波频段,考虑到功耗、复杂度等问题,单载波成为可能的技术候选。对于高速场景,正交时频偏移(OTFS)波形由于对多普勒频偏的鲁棒性,引起了学术界和产业界广泛的注意。目前,如何设计合理波形以满足 5G 典型场景的挑战,以及如何实现多种波形的灵活聚合,以同时提供多样化的业务体验,是亟需解决的关键问题。图 5 描述了一种新波形发射机实现结构,其最小化硬件功能单元以降低复杂度,并通过灵活参数配置,实现多种不同的波形方案。例如,如果 5G 采用带内支持 eMBB 和 mMTC 两种业务,此架构可以生成 OFDM 匹配 eMBB,同时可以生成非正交波形以匹配 mMTC 业务。

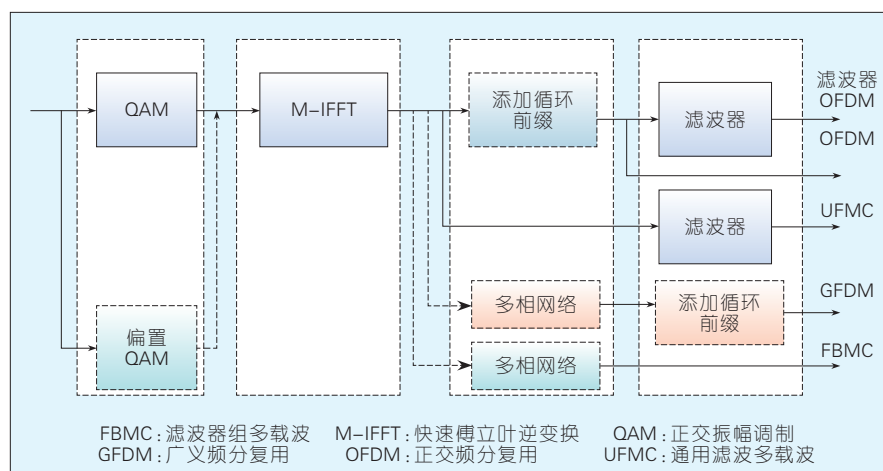
## 2.6 高级调制编码

Turbo 编码与正交振幅调制

(QAM)已在现有系统中广泛应用,但未来不排除一些新型的调制编码技术。其中,面向 eMBB 场景下的大编码块,多元域低密度奇偶校验码(LDPC)具有更优异的码字纠错性能,且更容易和多天线、高阶调制方式相结合,成为 5G 潜在的关键技术。极化码具有优良的差错性能且编译码复杂度相对更低,这一特点可以被用于增强覆盖,提高传输效率,适用于广域覆盖、低功耗大连接等场景<sup>[11]</sup>。网络编码能够通过多跳传输机制来增加系统的总吞吐量,也成为 5G 潜在的候选方案<sup>[12]</sup>。

## 2.7 灵活频谱使用

面向 eMBB 大容量高速率场景,6 GHz 以下的低频段资源对增强覆盖至关重要,高频段大带宽是热点地区提升系统容量的有效手段。高低频协作是满足 eMBB 场景的基本方式。同时,新型的频谱使用方式也是 5G 提升系统容量的重要补充手段,比如授权共享使用(LSA),允许多个运营商以同等的授权接入某些频段<sup>[13]</sup>。mMTC 场景通常是低速率的小包传输,覆盖必须得到保障,因此低频段(尤其是<1 GHz 的频段)具有更高的优先全。授权频谱是 mMTC 的保障,其他频谱使用方法有待研究。uMTC 是低时延高可靠场景,因此需要授权频谱保证其极高的可靠性要求,其他



▲ 图5 一种新波形统一实现构架

▼表 1 典型场景候选技术集合

典型场景	广域连续覆盖 (<6 G)	高密度流量 (中高频)	低功耗大连接 (低频段 <1 G)	低时延高可靠 (<6 G)
技术需求	移动性, 高数据速率	大带宽, 高数据速率	大连接, 深覆盖, 低功耗	低时延, 高可靠, 异步突发
波形	DL: OFDM UL: DFT-S-OFDM 高速: OFDM 或 OTFS	OFDM 或单载波	OFDM 或非正交波形	OFDM 或非正交波形
多址	DL: 正交或 MUST	正交	UL: 非正交	UL: 正交或非正交
调制编码	Turbo&QAM 或多元域 LDPC	大数据块 编解码能力	低复杂度 Polar 码, 卷积码	快速编解码能力
双工	动态 TDD/全双工	TDD	TDD/FDD	TDD/FDD
多天线	大规模天线	数模混合 mMIMO 或单天线	天线数目较少	天线数目较少或 大规模天线
帧结构	动态 TTI, 动态上下行配比	较大载波间隔	半静态上下行 配比长 TTI	半静态上下行 配比短 TTI
备注: 不同典型场景下的帧结构尽量保证一致性设计, 以避免带内干扰; 此表仅表示作者当前认知下的观点, 未来可能根据技术的成熟度, 进行调整。				
DFT-S-OFDM: 基于 DFT 扩展的正交频分复用 DL: 下行链路 FDD: 频分双工 LDPC: 低密度奇偶校验码				
mMIMO: 大规模天线 MUST: 多用户叠加传输 OFDM: 正交频分复用 OTFS: 正交时频空域调制 QAM: 正交振幅调制				
TDD: 时分双工 TTI: 传输时间间隔 UL: 上行链路				

频谱使用方法暂不考虑。5G 典型场景各有不同的频谱需求, 因此 5G 必须在相应授权规则下, 灵活地工作在不同的频段, 以灵活自适应的机制来实现系统操作和控制。

3 典型场景下的技术集合

通过分析 5G 关键使能技术特点及适用场景, 在 SDAI 统一框架指导下, 总结了典型场景下的候选技术集合, 见表 1。各技术方案应基于统一的架构实现, 尽量复用相关实现模块, 以提高资源的利用效率, 降低商用化成本。

4 结束语

从“绿色、柔性和极速”研发理念出发, 我们提出了一种 5G 空口统一框架——软件定义空口, 它通过建立统一、高效、灵活、可配置的空口技术框架, 可灵活地进行技术选择和参数配置, 以满足多样化业务和场景需求。SDAI 能够实现空口能力的按需及时升级, 具备敏捷开发、快速迭代的特征。另外, 我们还重点对 SDAI 的关键使能技术进行了介绍, 给出了

eMBB、mMTC 和 uMTC3 类典型场景的空口技术集合, 供产业参考。

参考文献

[1] ITU-R WP5D. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. USA: ITU-R M, 2015

[2] 中国 IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书 [R]. 北京: IMT-2020, 2015

[3] CHUIH L I, ROWELL C, HAN S F, et al. Toward Green and Soft: A 5G Perspectiv [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52 (2): 66-73

[4] 未来论坛 5G SIG. Rethink Mobile Communications for 2020+ [R]. 2014

[5] HAN H F, CHUIH L I, XU Z K, et al. Full Duplex: Coming into Reality in 2020[C]//2014 IEEE Goble Communications Conference. USA: IEEE, 2014: 4776-4781. DOI: 10.1109/ GLOCOM.2014.7037562

[6] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81

[7] 中国移动. C-RAN:无线接入网绿色演进白皮书 V3.0 [R]. 北京: 中国移动, 2013

[8] HAN S F, CHUIH L I, XU Z K, et al. Large Scale Antenna Systems with Hybrid Analog and Digital Beamforming for Millimeter Wave 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186-194. DOI: 10.1109/ MCOM.2015.7010533

[9] WANG H L, PAN Z G, CHUIH L I. Perspectives on High Frequency Small Cell with Ultra Dense Deployment[C]//2014 IEEE

International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN). USA: IEEE, 2014: 263-270. DOI: 10.1109/ ICCChina.2014.7008329

[10] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5GNOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105. DOI: 10.1109/ MCOM.2014.6736749

[11] ABBE E, TELATAR I E. Polar Codes for the M-User Multiple Access Channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(8): 5437-5448. DOI: 10.1109/ TIT.2012.2201374

[12] PAN C K, LIU J J, HU Z P. Detection Algorithms for Physical Network Coding[C]// 2012 CHINACOM, 2012. USA: IEEE, 2012: 63-67. DOI: 10.1109/ ChinaCom.2012.6417449

[13] AHOKANGAS P, MATINMIKKO M, YRJOLA S, et al. Business Models for Mobile Network Operators in Licensed Shared Access (LSA)[C]//2014 Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN). USA: IEEE, 2014: 263-270

作者简介



倪吉庆, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心研究员; 主要研究方向为 5G 无线关键技术, 及关键技术原型平台设计; 已发表论文 10 多篇。



孙奇, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心研究员; 主要研究方向为 5G 无线关键技术, 具体包含新型多址与新波形、超密集网络下的干扰管理、高效无线资源管理等; 已发表论文 20 多篇, 申请专利 10 余项。



崔春风, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心主任; 主要研究方向为 5G 无线及网络架构、虚拟化无线网络技术、无线节能技术等; 已发表论文 10 多篇。

# 大规模 MIMO 下行预编码技术

## Precoding Technique for Massive MIMO Downlink

陆晨/LU Chen

王闻今/WANG Wenjin

高西奇/GAO Xiqi

(东南大学, 江苏 南京 210096)

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

**多**输入多输出(MIMO)技术因具有大幅提高系统容量的能力而获得广泛研究和应用,例如高速下行分组接入(HSDPA+),全球微波接入互操作性(WiMAX)和长期演进(LTE)。为了满足持续增长的移动终端数量和移动数据业务需求,下一代移动通信系统(5G)在数据传输速率、频谱效率、能耗、延时等性能方面要比LTE系统提高一个数量级甚至更多。大规模MIMO技术<sup>[1-2]</sup>凭借进一步提升的频谱效率和能量效率优势成为无线通信领域的又一个研究热点,成为5G移动通信系统的关键技术之一。

在大规模MIMO系统中,基站(BS)可配置100根甚至更多的天线,天线数量远大于当前LTE系统中使用的4/8根天线,配备巨大数量天线的基站同时服务多个移动台(MS)。在文献[1]中,Marzetta考虑了无限制天线数目基站的非合作多用户大规模MIMO系统,基于传播信道的独立

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868(2016)03-0017-005

**摘要:** 考虑大规模多输入多输出(MIMO)中导频序列开销过大以及预编码复杂度的问题,提出了两种适用于大规模MIMO的预编码技术:基于用户调度和波束选择的波束分多址(BDMA)下行传输技术,即通过简单高效的贪婪算法进行用户调度和波束分配,使不同的用户在正交的波束上进行传输;基于用户分组的两级预编码技术,即基于用户分组的两级预编码方法,利用聚类算法将信道特性相似的用户分为一组,基站进行第一级组间干扰消除预编码,基站获取分组的等效瞬时信道后,进行第二级组内干扰消除预编码。研究结果证明:两种下行传输技术在解决大规模MIMO中导频开销过大和系统复杂度问题方面都是切实有效的。

**关键词:** 大规模MIMO系统;用户调度;波束分多址;两级预编码

**Abstract:** Considering the problem of costly pilot training and computation complexity in massive multiple input multiple output (MIMO) systems, two precoding techniques adapted to massive MIMO are proposed: beam division multiple access (BDMA) downlink transmission based on user scheduling and beam allocation, which can realize the orthogonal transmission of different users on non-overlapping beams by a simple and effective greedy algorithm; two-stage precoding technique based on user grouping, which partitions the users into multiple groups each with approximately channel covariance matrix by a clustering algorithm, the first-stage precoding aims to suppress inter-group interference, the second-stage precoding is conducted to mitigate intra-group interference after the base stations obtain the instantaneous effective channel of different groups. Research results demonstrate that both downlink techniques are practical in solving the costly pilot and complexity problem of massive MIMO.

**Keywords:** massive MIMO system; user scheduling; beam division multiple access; two-stage beamforming

同分布的假设,不同用户的传播信道在天线数目趋向于无穷时渐进正交,在此类场景中,简单的匹配滤波器(MF)接收机或者波束成形(BF)预编码是最优的。与此同时,噪声和小区内干扰的影响也渐进消失。利用时分双工(TDD)系统上下行信道互易特性,基站可以通过上行信道导频训练得到下行信道状态信息(CSI)。然而,由于多个小区之间导频序列的重用,导致多小区之间的干扰不会随着

天线数目的增加而消失<sup>[3-4]</sup>,产生所谓的导频污染问题。在实际通信系统中,传输信道独立性假设并不成立,实际基站天线数目也并不可能无穷大,因此MF接收机/BF预编码性能也远低于理论值,无法直接应用于实际系统中。此外,CSI的获取问题也使得大规模MIMO的实现变得极具挑战性。TDD系统可以利用信道互易性通过上行链路导频训练得到估计的下行信道信息,训练开销与所有用户

收稿时间:2016-02-20

网络出版时间:2016-04-21

基金项目:国家自然科学基金(61320106003、61471113、61401095);国家高技术研究发展(“863”)计划(2015AA01A701)

的天线数之和成正比,但是当用户数目非常巨大或者每个用户配备多天线的時候,训练开销将随之变得非常巨大。除此以外,随着用户移动速度的增加,信道相关时间变得相对很短,因而获得准确的瞬时发送端信道状态信息(CSIT)将变得更加困难。在频分双工(FDD)系统中,由于没有信道互易特性,下行链路训练开销以及反馈数据比特与基站端天线数目成正比<sup>[5]</sup>,因此纯粹的下行训练、上行反馈获得 CSIT 的方法在大规模 MIMO 中不可实现。正是由于这个原因,目前很多关于大规模 MIMO 的研究都是针对 TDD 系统。尽管如此,TDD 系统的很多不足<sup>[6]</sup>也限制了其性能增益。

为了解决多用户大规模 MIMO 系统面临的导频开销问题、实现复杂度问题以及 FDD 系统中高速移动场景下面临的上下行信道互易性问题,波束分多址(BDMA)传输方案<sup>[7]</sup>被提出。利用大规模天线阵列的空间局部性特点,即大规模 MIMO 信道在波束域的稀疏性,寻找互不干扰的多个波束用户对,不同空间方向的用户在不同的波束集合与基站进行通信,以实施较高维度的空分多址传输。文献[7]已经从理论上证明:当不同用户的传输波束完全正交时,波束域传输是最优的。

此外,美国南加州大学提出了联合空分复用(JSDM)传输方案以适用于 FDD 大规模 MIMO 系统。JSDM 下行链路中使用一种基于用户分组的两级预编码技术<sup>[8-10]</sup>,并获得了进一步的研究<sup>[11-12]</sup>:第一级预编码利用统计 CSI 进行用户分组,将信道空间特性相似的用户分成一组,从而将多用户大规模 MIMO 传输转换为多个小规模 MIMO 的传输问题;第二级预编码消除组内用户间的干扰,从而提高系统可达遍历和速率。

## 1 传统预编码方法

传统下行预编码方法是以基站

获得完整瞬时 CSIT 为前提。对于小规模天线阵列,一种典型的系统设计是基站天线单元向移动端发送训练序列,移动端进行信道估计,并将 CSI 通过反馈信道反馈给基站。这样的信道估计方案没有依赖信道的互易特性。然而随着基站天线数目的增加,所需要的训练序列长度和基站天线数成正比,不仅导致频谱效率下降,而且发送导频所需的时间会超过信道相关时间,无法支持移动性的相关要求。

为了能够在信道相关时间内完成训练序列的发送,需要利用信道的互易特性。用户端向基站发送导频,基站对上行信道进行估计,根据信道互易性利用上行信道信息进行下行预编码,此时训练序列长度只是与所有用户天线数目之和成正比,在用户数目适当的情况下,导频开销可以被接受。由于信道互易性在一般情况下只存在于 TDD 系统中,所以本部分我们讨论的预编码方法仅适用于 TDD 系统。

配置  $M$  根天线的基站同时服务  $K$  个单天线用户,基站端发射总功率  $\rho$ ,在基站天线和用户数目趋于正无穷( $M, K \rightarrow \infty$ ),但是比值固定( $\alpha = M/K$ )的大规模天线系统限制条件下,给出传统预编码方法的信噪比(SNR)/信干噪比(SINR)渐进表达式,具体结果见表 1。

我们首先讨论无干扰(IF)系统的性能,作为其他方法的性能参考基准。如果存在一种编码方式,使得基

站到指定用户的所有信道能量都用来给该用户进行数据传输,而没有任何其他用户造成的干扰,那么这种编码方式将可以达到最好的性能表现。可以证明,每个接收单元的 SNR 收敛于  $\rho\alpha$ 。

在各类预编码方法中,最简单且直观的预编码就是求信道矩阵的伪逆,这也被称为迫零(ZF)预编码<sup>[13]</sup>。ZF 预编码的一种变化方法被称为块对角化(BD)预编码<sup>[14]</sup>,适用于用户配备多天线的情况。每个用户端接收 SNR,表达形式见表 1。ZF 预编码存在的一个问题就是需要对  $K \times K$  维矩阵进行求逆,这是一个非常耗时的操作。ZF 预编码存在的另一个问题就是噪声放大,当信道矩阵病态时,接收端信噪比会急剧降低,从而性能受到很大的影响。因此基于 ZF 预编码的一种改进预编码方法,被称为正则化迫零(RZF)预编码。

当天线数目趋于无穷时,结果 ZF 预编码矩阵趋近信道矩阵的转置形式,这正是 MF 预编码。根据大维随机矩阵理论可以推导得到 MF 预编码渐进 SINR 表达式,如表 1 中所示。同样,从表 1 中还可以看到,MF 和 ZF 预编码在非完美信道下的 SNR/SINR 表达式。

由表 1 的理论公式可知:ZF 预编码在基站天线数目远远大于用户数目时(即  $\alpha \gg 1$ ),性能接近于 IF 系统的性能上界;但是当基站天线数目和用户数目相近(即  $\alpha \approx 1$ )时,性能急剧下降,甚至会趋于 0。MF 预编码在基站发送能量很小时,接近 IF 系统性能,但是由于 MF 预编码没有进行任何干扰消除,所以在高信噪比下,干扰为系统性能的主要影响因素,SNR 趋于一个常数,远差于 ZF 预编码性能。

图 1—3 为 ZF、RZF 和 MF 预编码的遍历和速率仿真结果,同时也给出了 IF 系统的性能上界基准。在仿真中,有 10 个用户被同时服务,分别对应了基站天线数目为 10、30、100 的

▼表 1 基本预编码技术在大规模 MIMO 下 SNR/SINR 表达式

预编码	完美 CSI	非完美 CSI
IF 系统	$\rho\alpha$	
ZF 预编码	$\rho(\alpha - 1)$	$\frac{\xi^2 \rho(\alpha - 1)}{(1 - \xi^2)\rho + 1}$
MF 预编码	$\frac{\rho\alpha}{\rho + 1}$	$\frac{\xi^2 \rho\alpha}{\rho + 1}$

注:  $M, K \rightarrow \infty, M/K = \alpha$   
 CSI: 下行信道状态信息  
 IF: 无干扰系统  
 MF: 匹配滤波  
 SINR: 信干噪比  
 SNR: 信噪比  
 ZF: 迫零

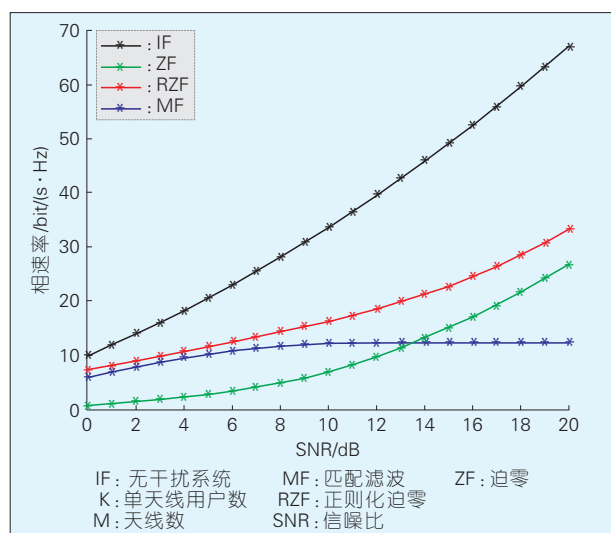


图1  
当  $M=10, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

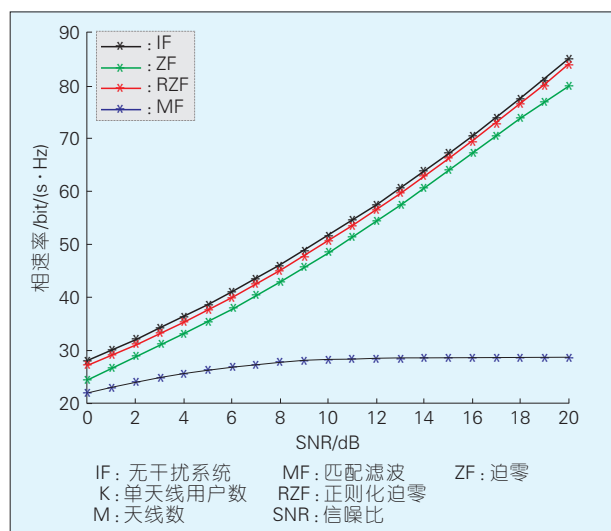


图2  
当  $M=30, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

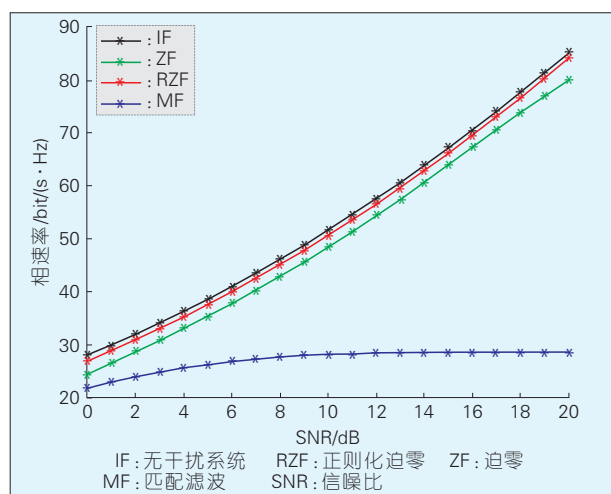


图3  
当  $M=100, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

情景。从仿真结果可知:对于天线数目为 10 的情况,此时 ZF 性能远差于

IF 系统基准性能,甚至在中低信噪比时比 MF 预编码性能还要差,但是在

高信噪比时,由于噪声影响较小,用户间干扰占主导作用,因而 MF 预编码性能较差。随着天线数目的增加, ZF 性能也不断接近 IF 基准性能。由于 RZF 考虑了噪声放大问题,所以在所有信噪比范围内,其性能都要比 ZF 和 MF 要好。MF 预编码虽然随着天线数目的增加,性能会有所提升,但是由于没有进行任何干扰消除的操作,因而在高信噪比时的性能较差,这正和理论分析一系列的结果相符合。

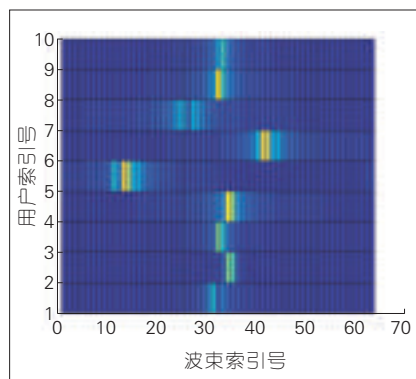
## 2 大规模 MIMO 下行预编码

上述预编码技术都必须在基站能够获得完整 CSIT 的基础上才能够应用,并仅适用于 TDD 系统,随着用户数目的增加,同样会面临导频开销过大的问题。为了应对大规模 MIMO 系统中的各种困难,针对大规模 FDD 系统的 BDMA 传输方案被提出。在 BDMA 下行传输过程中,利用一种贪婪算法进行用户调度,使得不同用户在不同波束上进行数据传输。此外,文献[8-9]提出的一种基于用户分组以及组内干扰消除的两级预编码方式,同样能够有效地应对大规模 MIMO 下行传输过程中导频开销过大问题。

### 2.1 BDMA 下行传输

在这节中,我们考虑远场散射环境,即散射体远离基站,基站端角度扩展(AS)相对较小的环境。可以证明:当天线数趋于无穷时,波束域信道可以由实际物理信道右乘离散傅立叶变换(DFT)矩阵得到,利用第三代合作伙伴项目(3GPP)的空间信道模型(SCM),可以产生基站天线数目 64,用户为 10 的实际用户信道,并且还可以利用 DFT 矩阵转换成波束域信道,转换后的波束域信道能量分布见图 4。

从图 4 可以看到:每个用户波束域信道的信道能量只集中于少数几个波束,例如,用户 1 的信道能量主



▲图4当  $M=64, K=10$  时的波束域信道能量分布与索引

要集中于第30、31个波束上,用户2的信道能量主要集中于第34、35个波束上。正是由于波束域信道的这种稀疏特性,使得用户信道的压缩成为可能。用户的波束信道能量分布可以通过统计CSI来获知,由文献[10]和[15]可知,用户的统计CSI独立于子载波,并且相对于瞬时CSI来说变化速度比较慢,所以获取统计CSI的开销就会大大减小,从而变得可以接受。

在基站获取到统计CSI之后,如何进行用户调度和用户波束的分配显得非常重要。在文献[7]中已经证明,当不同用户使用的波束集合交集为空时,为最优传输。我们采用一种贪心算法,并根据用户统计CSI进行用户调度以及用户波束的选择,在很小的算法复杂度下达到了很好的效果。图5分别显示了被调度用户所占用波束的信道能量和各用户占用波束的索引。由图5可见:在10个用户中,只有4个用户被调度,每个用户占用4个波束,并且各个用户占用的波束都不重叠。

根据BDMA下行传输方案,用户调度之后,基站需要在波束域信道发送导频,以便让用户进行信道估计以获取波束域瞬时CSI。由于调度后的不同用户波束域信道几乎正交,而且维度很小,所以获取波束域瞬时CSI的开销将变得非常小。一旦用户得到了波束域信道的瞬时CSI,便可以

与基站在波束域信道上进行数据的传输。

## 2.2 两级预编码

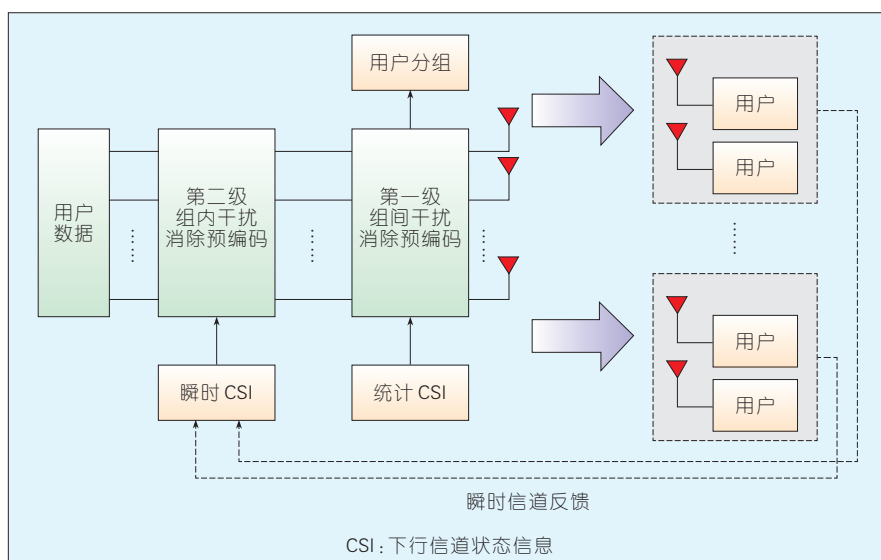
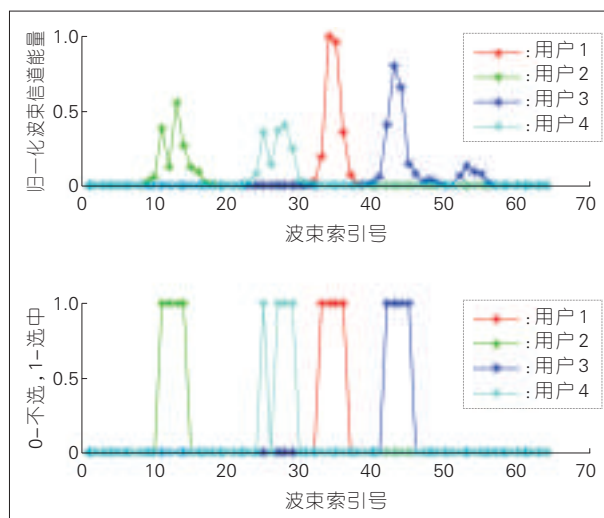
不同于BDMA下行传输,基于用户分组的两级预编码方法利用聚类算法根据统计CSI进行用户的分组操作,使得信道空间特性相似的用户被分成一个组,由于不同的组之间信道的正交特性,大规模MIMO被等效成多个小规模MIMO传输问题。第一级预编码将大维度的信道矩阵进行了块对角的转换,对角线上的每个块为一个等效分组信道,利用这种转化达到组间干扰消除的目的。第二级预

编码只需获得小维度的等效分组信道信息后,便可以进行组内干扰消除预编码,如RZF预编码等。两级预编码系统结构如图6所示。图7为在基站天线数目64、用户数目20的场景下,两级预编码和完整信道RZF预编码算法的性能对比图。可以看到,两级预编码在有效地降低信道估计开销的同时,性能接近于知道完整CSI情况下的RZF预编码。

## 3 结束语

文章中我们首先回顾了大规模MIMO下行链路中几种传统的预编码算法,并做了相应的对比分析。针对

图5  
用户占用的波束域信道能量与索引



▲图6 两级预编码系统结构

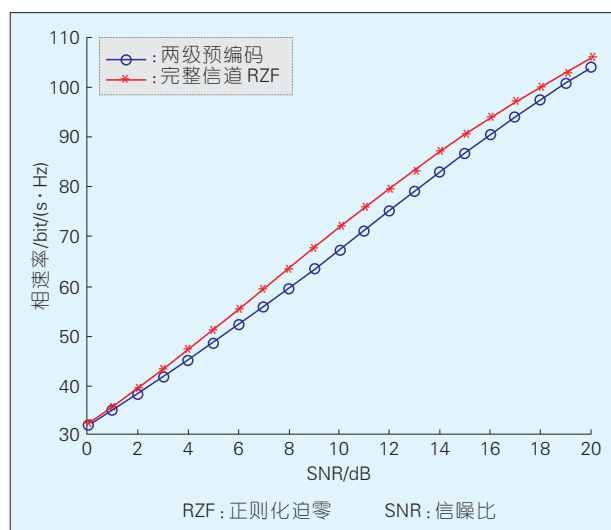


图7  
两级预编码与RZF预编码  
和速率性能对比

传统预编码所需完整瞬时CSIT无法获取的问题,研究了两种针对大规模MIMO提出的预编码方法:BDMA下行传输方法,通过简单高效的贪婪算法进行用户调度和波束分配,使不同的用户在正交的波束上进行传输;基于用户分组的两级预编码方法,则是利用聚类算法将信道特性相似的用户分为一组,基站进行第一级组间干扰消除预编码,基站获取分组的等效瞬时信道后,再进行第二级组内干扰消除预编码。这两种方法都能够有效地解决大规模MIMO中导频开销过大的问题。

#### 参考文献

- [1] MARZETTA T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2010, 9(5): 3590–3600. DOI:10.1109/TWC.2010.092810.091092
- [2] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40–60. DOI: 10.1109/MSP.2011.2178495
- [3] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. The Multicell Multiuser MIMO Uplink with Very Large Antenna Arrays and a Finite-Dimensional Channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(6): 2350–2361. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.032713.120408
- [4] ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Pilot Contamination Precoding in Multi-Cell Large Scale Antenna Systems[C]//2012 IEEE International on Information Theory Proceedings. USA: IEEE, 2012: 1137–1141. DOI: 10.1109/ISIT.2012.6283031
- [5] JINDAL N. MIMO Broadcast Channels with Finite-Rate Feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5045–5060. DOI: 10.1109/TIT.2006.883550
- [6] CHOI J, LOVE D J, BIDIGARE P. Downlink Training Techniques for FDD Massive MIMO Systems: Open-Loop and Closed-Loop Training with Memory [J]. IEEE Journal Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 802–814, Mar. 2014. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2313020
- [7] SUN C, GAO X, JIN S, et al. Beam Division Multiple Access Transmission for Massive MIMO Communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2170–2184. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2425882
- [8] ADHIKARY A, NAM J, CAIRE G. Joint Spatial Division and Multiplexing—The Large-Scale Array Regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10): 6641–6663. DOI: 10.1109/TIT.2013.2269476
- [9] NAM J, ADHIKARY A, AHN J, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing: Opportunistic Beamforming, User Grouping and Simplified Downlink Scheduling [J]. IEEE Journal Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 876–890. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2313808
- [10] ADHIKARY A, SAFADI A E, SAMIMI M, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing for mm-Wave Channels [J]. IEEE Journal Selected in Areas Communications, 2014, 32(6): 1239–1255
- [11] KIM D, LEE G, SUNG Y. Two-Stage Beamformer Design for Massive Downlink by Trace Quotient Formulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2200–2211. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2429646
- [12] LIU A, LAU V. Two Stage Cosnt-Envelope Precoding for Low Cost Massive MIMO System [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2015, 99: 1–1. DOI: 10.1109/TSP.2015.2486749
- [13] PEEL C B, HOCHWALD B M, SWINDEHURST A L. A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity

- Multiantenna Communication, Part I: Channel Inversion and Regulation [J]. IEEE Transactions Communications, 2005, 53(1): 195–202. DOI: 10.1109/TCOMM.2004.840638
- [14] SPENCER Q H, SWINDELHRST A L, HAARDT M. Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2004, 52: 461–471. DOI: 10.1109/TSP.2003.821107
- [15] LIU K, RAGHAVAN V, SAYEED A M. Capacity Scaling and Spectral Efficiency in Wideband Correlated MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2504–2526. DOI: 10.1109/TIT.2003.817446

#### 作者简介



陆晨,东南大学移动通信国家重点实验室硕士研究生;研究方向为宽带大规模MIMO无线通信。



王闻今,东南大学移动通信国家重点实验室副教授;研究方向为无线通信中的信号处理、5G移动通信关键技术。



高西奇,东南大学教授、博士生导师,移动通信国家重点实验室副主任;研究方向为移动通信理论与关键技术;已发表论文200余篇,获授权发明专利近50项。

# 一种适合 5G 的新型多载波技术 ——FB-OFDM

## FB-OFDM: A Novel Multicarrier Scheme for 5G

张万春/ZHANG Wanchun

辛雨/XIN Yu

郝光辉/YU Guanghui

(中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057,  
China)

长期演进技术(LTE)是 4G 无线蜂窝通信技术。LTE 采用正交频分复用(OFDM)技术,子载波和 OFDM 符号构成的时频资源组成了 LTE 系统的无线物理时频资源<sup>[1]</sup>。目前 OFDM 技术在无线通信中已经广泛应用。通过使用循环前缀(CP),CP-OFDM 系统能很好地解决多径时延问题,并且将频率选择性信道分成了一套平行的平坦信道,简化了信道估计方法,提高了信道估计精度。然而,由于 CP-OFDM 系统带外泄漏较大,目前 LTE 系统在频域上使用了保护间隔,这就降低了频谱效率,且 CP-OFDM 系统性能对相邻子带间的频偏和时偏比较敏感,要求相邻子带间的用户严格同步,因此不利于不同子带间不同业务的应用。

现在各大公司开始了无线通信 5G 技术的研究,其中,抑制带外泄漏是一个重要方向。文献[2-8]提到了一些新型多载波技术,如基于滤波器组多载波的移位正交幅度调制(FBMC-OQAM)技术,基于子带滤波

收稿时间:2016-03-02  
网络出版时间:2016-04-21

中国分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2016) 03-0022-004

**摘要:** 提出了一种适合 5G 的新型多载波技术——基于滤波器组的正交频分复用(FB-OFDM)技术,即在收发端通过多相滤波器进行子载波级滤波,简化实现的复杂度,与 LTE 系统兼容。认为在 FB-OFDM 系统中,根据不同场景的需求侧重点,选择合适的波形函数调制发射数据,能够灵活地适用于不同的业务。最后以扩展根升余弦函数为例,通过仿真验证了 FB-OFDM 系统的带外泄露小,异步性能好。

**关键词:** 多载波;滤波器组;多相滤波器;波形函数

**Abstract:** In this paper, a new type of multi-carrier technology—filter bank—orthogonal frequency division multiplexing (FB-OFDM) technology, which is suitable for 5G, is proposed. Subcarrier level filtering is carried out at the transceiver through polyphase filter, so as to simplify the implementation and be compatible with LTE system. According to the focuses of requirements in different scenes, FB-OFDM system can select appropriate waveform function modulation to transmit data which can be flexibly applied into different businesses. At last, taking expanding raised cosine as an example, it is verified through simulation that the out-of-band leakage of the FB-OFDM system is low and the asynchronous performance is good.

**Key words:** multicarrier; filter bank; polyphase filter; pulse function

的正交频分复用(F-OFDM)技术,通用滤波的多载波(UFMC)技术和通用频分复用(GFDM)技术。这些技术可以在一定程度上抑制带外泄漏,但也都有一定的缺点,如 FBMC-OQAM 技术的信道估计和与多输出多输入(MIMO)技术相结合是个难点<sup>[9-10]</sup>;UFMC 技术和 F-OFDM 技术子带间需要一定的保护间隔,对同一子带上的用户仍然需要严格同步;GFDM 技术时频域数据间不正交,接收端解调复杂度会比较高<sup>[11-12]</sup>。

2015 年 12 月 3GPP RAN 会议上的 5G SI 提案里提出了对基于 OFDM 的新波形方案的研究。文章介绍的就是 OFDM+滤波器组(FB)的方案,简称为基于滤波器组的正交频分复用

技术(FB-OFDM)。与其他新型多载波技术相比,FB-OFDM 技术具有一定的优势<sup>[13]</sup>。

### 1 FB-OFDM 技术原理

FB-OFDM 技术在原理上是通过多个滤波器(即滤波器组)对传输带宽里的多个子载波分别滤波,然后再叠加在一起形成时域数据信号。

FB-OFDM 与其他方案的区别为:

(1) UFMC 和 F-OFDM 都是对整个子带进行滤波,而 FB-OFDM 是子载波级滤波。

(2) FBMC-OQAM 是基于实数调制,实数+设计好的相位因子,可以使不同资源元素(RE)的数据之间准正交,而 FB-OFDM 是基于复数调制。

(3) GFDM 时频域数据间不正交, 而 FB-OFDM 根据不同场景选择合适的波形函数和符号间隔, 可以使得时频域数据间准正交, 且 FB-OFDM 在收发侧采用相匹配的多相滤波器来实现, GFDM 并没有提及这一点。

FB-OFDM 技术在原理上是对传输带宽里的每个子载波进行滤波, 但是当传输带宽里的子载波个数非常多时, 这种操作方式就会非常复杂, 而且也不利于与 LTE 技术兼容。为了简化实现技术的复杂度, 我们可以使用多相滤波器来处理。

### 1.1 FB-OFDM 系统发射端原理

FB-OFDM 技术在发射端的具体实现如下: 先对子帧内每个符号的频域数据进行快速傅里叶反变换 (IFFT) 处理, 然后对子帧内 IFFT 处理后的时域数据使用多相滤波器进行处理。

FB-OFDM 系统发射端原理如图 1 所示, 其中虚线框内是多相滤波器模块的操作, 这个操作代替了 LTE 的加 CP 操作, 其余模块与 LTE 的完全相同。

图 1 的多相滤波器框图中,  $Z^{-1}$  为延时移位处理,  $S \downarrow$  为下采样,  $S \uparrow$  为上采样, 滤波器 1、滤波器 2、……、滤波器  $N$ 。多相滤波器的参数与选择的波形函数有关, 先对预先选择的波

形函数进行处理, 将处理后的参数值传递给多相滤波器。

当波形函数为矩形且符号间隔  $T_1 = T_0 + CP$  ( $T_0$  为子载波间隔的倒数,  $CP$  为循环前缀) 时, 多相滤波器模块的操作就等价于 LTE 里的添加 CP 的操作, FB-OFDM 方案就变回到 LTE 方案了。

在 FB-OFDM 系统侧可以配置波形函数参数, 不同的参数值对应着不同的波形函数。根据不同场景的需求侧重点, 用户设备 (UE) 可以选择合适的波形函数调制发射数据, 如对于带外泄漏抑制要求比较高的场景, 可以选择升余弦函数、IOTA 函数等等; 对于数据解调性能要求比较高, 但对带外泄漏抑制要求不高并且频偏和时偏比较小的场景, 可以选择矩形函数回退到 LTE。

符号间隔  $T_1$  也可作为 FB-OFDM 系统侧参数, 当信道条件非常好时,  $T_1$  可以小于  $T_0$ , 实现超奈奎斯特传输, 提高系统容量; 当信道条件差时,  $T_1$  可以大于  $T_0$ , 使得 FB-OFDM 系统的符号间子载波间的数据接近正交。符号间隔  $T_1$  也在多相滤波器模块里实现。

不同波形函数及其相应的参数对带外泄漏抑制以及数据解调性能的影响也不同。我们需要对波形函数做更多研究, 以挑选出一些更好的

波形函数。

### 1.2 FB-OFDM 系统接收端原理

FB-OFDM 系统接收端原理如图 2 所示, 其中虚线框内是多相滤波器模块的操作, 这个操作代替了 LTE 去 CP 操作, 其余模块与 LTE 的相同。

图 2 的多相滤波器框图中,  $Z^{-1}$  为延时移位处理,  $S \downarrow$  为下采样,  $S \uparrow$  为上采样。这里采用了最小均方差 (MMSE) 算法的滤波处理, 可以抑制符号间的干扰, 提升接收端解调性能。

## 2 FB-OFDM 技术性能仿真及分析

为了很好地抑制带外泄漏, FB-OFDM 系统可以选择不同的波形函数进行调制。文章中, 我们就以扩展根升余弦函数为例进行介绍。

### 2.1 一种适合 FB-OFDM 技术的波形函数

扩展根升余弦函数由两个函数乘积构成, 其中一个函数为: 频域上的根升余弦函数通过傅里叶变换到时域上的函数; 另一个函数为: 时域升余弦函数。由于是通过根升余弦函数扩展而获得的新函数, 在文章中, 我们将此新函数定义为扩展根升余弦函数。

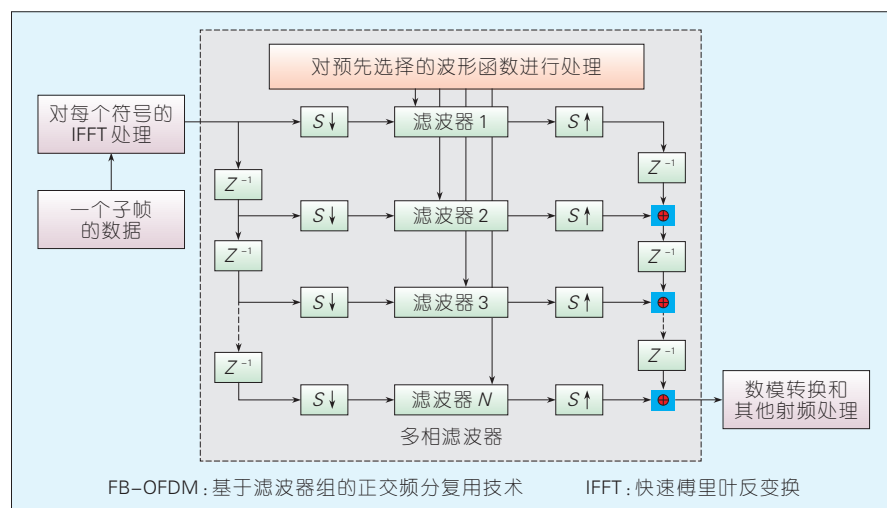
我们可以推导出频域上的根升余弦函数通过傅里叶变换到时域上的函数具体生成。设频域上的升余弦函数  $y(f)$  表达式为:

$$y(f) = \begin{cases} A & 0 \leq |f| < f_0(1-\alpha) \\ \frac{A}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{|f| - f_0(1-\alpha)}{2f_0\alpha}\pi\right) \right) & f_0(1-\alpha) \leq |f| < f_0(1+\alpha) \\ 0 & |f| \geq f_0(1+\alpha) \end{cases}$$

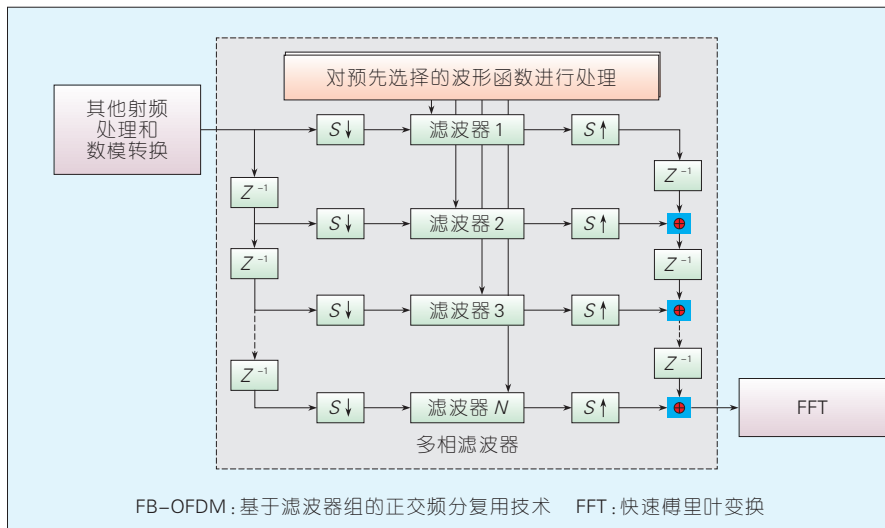
那么, 频域根升余弦函数 (根升余弦函数即为升余弦函数的平方根) 为  $\text{sry}(f) = \sqrt{y(f)}$ 。

其中,  $A$  为常数;  $\alpha$  为滚降因子, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $| \cdot |$  为绝对值运算符;  $f_0$  为频域升余弦函数在频域上的半值宽度的一半。那么, 频域根升余弦函数在时域的表达形式为:

$$IF\text{sry}(t) = IFFT(\text{sry}(f)) \quad (1)$$



▲ 图 1 FB-OFDM 系统发射端原理



▲图2 FB-OFDM系统接收端原理

其中,  $IFFT()$  表示对频域函数做IFFT变换, 成为时域函数。

我们还可以推导出时域升余弦函数具体生成过程。

设时域升余弦函数表达式为:

$$x(t) = \begin{cases} B & 0 \leq |t| < T_0(1-\beta) \\ \frac{B}{2} (1 + \cos(\frac{|t| - T_0(1-\beta)}{2T_0\beta} \pi)) & T_0(1-\beta) \leq |t| < T_0(1+\beta) \\ 0 & |t| \geq T_0(1+\beta) \end{cases}$$

其中,  $B$  为常数;  $\beta$  为滚降因子, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $|t|$  为绝对值运算符;  $T_0$  为升余弦函数的半值宽度的一半。

扩展根升余弦函数  $W(t)$  为:

$$W(t) = IFsry(t)x(t) \quad (2)$$

函数  $IFsry(t)$  具有很窄的频谱特性, 其频谱的半值宽度为  $f_0$ , 而且该函数的相关特性比较好, 有利于保证符号间正交; 但是该函数在时域上无限长, 如果直接用来调制 IFFT 之后的符号数据, 则符号数据也将无限长。函数  $x(t)$  具有很窄的时域特性, 其时域的半值宽度为  $T_0$ 。因此将这两个函数乘积获得的扩展根升余弦函数同时具有很好的频域特性和时域特性。

## 2.2 性能仿真结果及分析

以扩展升余弦函数为例, FB-OFDM 技术方案与 OFDM (即 LTE) 的仿真性能对比, 本节内容包括以下几

个方面: 功率谱密度 (PSD), 无时偏无频偏 BLER (误比特率) 性能, 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能 (子带间无保护子载波), 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能。

FB-OFDM 技术方案的仿真参数如表 1 所示。

### (1) PSD

图 3 显示, 与 OFDM 相比, FB-OFDM 的带外泄漏很小, 而且在传输带宽之外的边缘, FB-OFDM 能量泄漏衰减很快, 这有利于减少保护子载波个数。

### (2) 无时偏无频偏 BLER 性能

#### ▼表 1 仿真参数

信道	AWGN
调制方式、码率	QPSK 1/3 (MCS7, 实际码率 0.36)
子载波间隔/kHz	15
系统带宽/MHz	10
总的可用 RB 数	50
信道估计	理想
接收端检测方法	MMSE
帧结构	与 LTE 相同
相邻子带存在其他异步用户干扰时	3 个用户使用连续 3 个相邻子带, 子带宽度为 3 RB, 中间用户受到相邻子带 2 用户的干扰, 这 2 用户与中间用户异步, 时偏为 1/2 符号。
同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时	3 个用户使用连续 3 个相邻子帧, 中间用户受到相邻子帧 2 用户的干扰, 这 2 用户与中间用户异步, 时偏为 1/2 符号。
AWGN: 加性高斯白噪声 LTE: 长期演进技术	MCS: 调制编码机制 MMSE: 最小均方差
	QPSK: 正交相移键控 RB: 资源块

图 4 显示, 在加性高斯白噪声 (AWGN) 和无时偏无频偏情况下, 与 OFDM 相比, FB-OFDM 性能降低的非常小。因此 FB-OFDM 以非常小的代价就能够换取带外泄漏的明显降低。

(3) 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

图 5 显示, 当相邻子带存在其他异步用户干扰时, FB-OFDM 明显好于 OFDM 方案。这有利于子带间用户的异步及使用不同特性的业务。

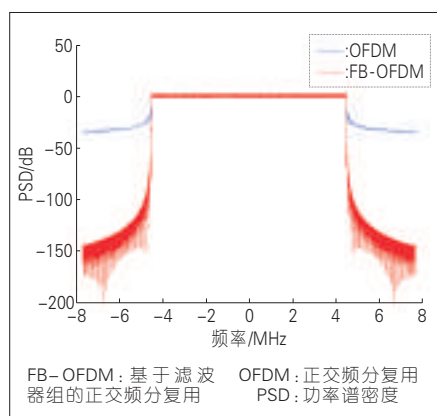
(4) 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

图 6 显示, 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时, FB-OFDM 方案明显好于 OFDM 方案。这有利于降低对用户同步的要求。

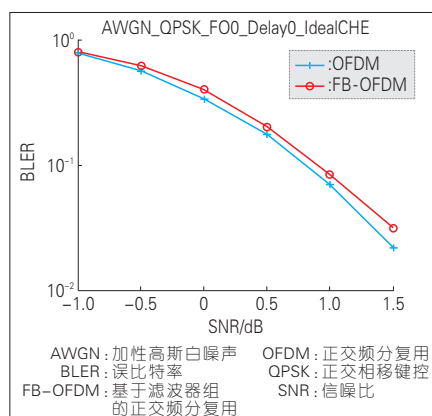
## 3 结束语

文章首先介绍了 FB-OFDM 技术原理, 随后给出了一种波形函数的性能仿真结果。从仿真结果可以看出, FB-OFDM 技术有很多优势:

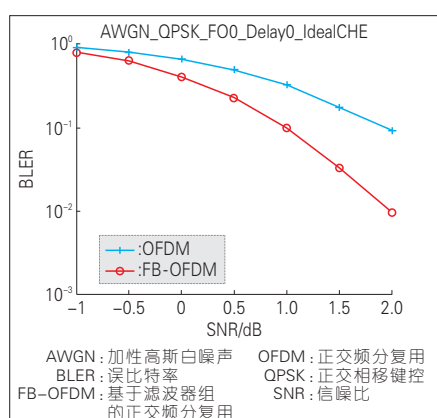
(1) 与 LTE 技术兼容性好。可以很方便地回退到 LTE 的 OFDM 技术, 兼容 LTE 的 MIMO 方案。从前文中 FB-OFDM 方案发射端和接收端原理框图可以看出, 与 LTE 相比, FB-OFDM 方案仅仅是多了一项多相滤波器模块的操作, 而且这个操作可以独立进行, 因此从技术实现的角度看,



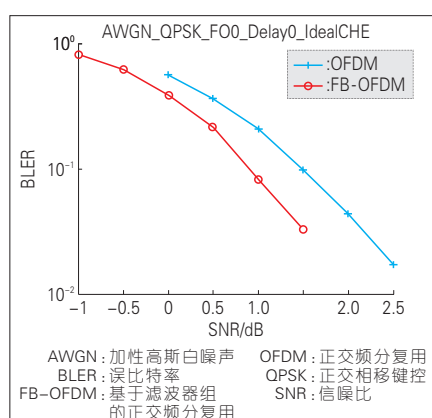
▲ 图3 功率谱密度 PSD



▲ 图4 无时偏无频偏 BLER 性能



▲ 图5 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能



▲ 图6 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

FB-OFDM 方案与 LTE 具有着很好的兼容性。

(2) 波形函数选择灵活性好。不同场景使用不同的波形函数,以满足不同场景的重点需求。

(3) 带外泄漏小。通过选择合适的波形函数,可以很好地抑制带外泄漏,有利于减少保护子载波个数,并且提高频谱效率,特别是提高窄带频谱效率。

(4) 异步性能好。不同子带间可以异步,不同子带的子载波间隔和符号长度可以不同,以满足不同业务的需求,而且子带间不需要保护间隔。同一子带的不同子帧用户对同步的要求也降低了。

(5) 资源调度灵活。由于是子载波级滤波,因此子带的最小单位可以是单个子载波,即可以基于单个子载

波进行调度,并且每个子载波之间可以异步。

#### 参考文献

- [1] 3GPP. TS36211 Physical Channels and Modulation [S]. 2008
- [2] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3):92-112
- [3] METIS. 5G Waveform Candidate Selection: 5G NOW\_D3.1\_V1.0 [S]. 2015
- [4] SAHIN A, GUVENC I, ARSLAN H. A Survey on Multicarrier Communications: Prototype Filters, Lattice Structures, and Implementation Aspects [J]. IEEE Communications Survey & Tutorials, 2013, 16(3):1312-1338. DOI:10.1109/SURV.2013.121213.00263
- [5] SIOHAN P, SICLET C, LACAILLE N. Analysis and Design of OFDM/OQAM Systems Based on Filterbank Theory [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5):1170-1183. DOI:10.1109/78.995073
- [6] DU J F, SIGNELL S. Time Frequency Localization of Pulse Shaping Filters in OFDM/OQAM Systems [C]//2007 6th International Conference on Information,

Communications & Signal Processing. USA: IEEE, 2007:1-5. DOI: 10.1109/ICICS.2007.4449830

- [7] CCSA. Spectrum Localized OFDM Waveform: IMT-2020\_TECH\_FBMC\_2014\_0023 [S]. 2014
- [8] FETTWEIS G, KRONDORF M, BITTNER S. GFDM-Generalized Frequency Division Multiplexing [C]//VTC Spring 2009, IEEE 69th. USA: IEEE, 2009:1-4. DOI: 10.1109/VETECS.2009.5073571
- [9] JAVAUDIN J, LACROIX D, ROUXEL A. Pilot-Aided Channel Estimation for OFDM/OQAM [C]//VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Annual. USA: IEEE, 2003:1581-1585. DOI: 10.1109/VETECS.2003.1207088
- [10] LETE C, JAVAUDIN J, LEGOUABLE R, et al. Channel Estimation Methods for Preamble-Based OFDM/OQAM Modulations [J]. European Transactions on Telecommunications, 2008, 19(7):741-750. DOI:10.1002/ett.1332
- [11] DATTAR R, MICHAEL N, LENTMAIER M, et al. GFDM Interference Cancellation for Flexible Cognitive Radio PHY Design [C]//VTC Fall. USA: IEEE, 2012:1-5. DOI: 10.1109/VTC Fall.2012.6399031
- [12] MICHAEL N, LENTMAIER M, ROST P, et al. Integration of a GFDM Secondary System in an OFDM Primary System [C]//Future Network & Mobile Summit. USA: IEEE, 2011:1-8
- [13] CCSA. IMT-2020\_TECH\_FBMC\_2016 一种新型多载波技术\_FB-OFDM\_ZTE [S]. 2016

#### 作者简介



张万春,中兴通讯股份有限公司无线研究院院长,高级工程师;主要研究方向为无线产品研发。



辛雨,中兴通讯股份有限公司资深技术预研工程师;主要研究方向为无线通信技术预研;已在 3GPP 及 3GPP2 国际会议上提交了上百篇标准提案,发表论文 10 余篇,申请专利近百项。



郁光辉,中兴通讯股份有限公司资深技术预研工程师;研究方向为无线通信系统标准预研;已向 IEEE、3GPP 等组织提交 200 篇以上标准提案,其中 50 余篇被接受,发表论文 20 余篇,申请专利 50 余项。

# 一种应用于 5G 基于 LDPC 码的物理层包编码

## A Physical Layer Packet Coding Based on LDPC Codes for 5G

徐俊/XU Jun

许进/XU Jin

胡留军/HU Liujun

(中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

目前,学术界和众多企业单位也密切关注着 5G 相关技术的研究和发展<sup>[1]</sup>。大量智能终端和移动设备的应用,均要求未来 5G 移动通信系统具有更大的系统容量和更高品质的用户体验。5G 移动通信主要有 3 个场景:增强移动宽带(eMBB)、大规模机器通信(mMTC)和高可靠低延迟通信(URLLC)。

在 5G 时代的 eMBB 场景中,小编码块和大传输块(源数据包)将成为趋势,小的编码块可以保证足够低的接收延迟,足够快的处理速度,并能更好地应对突发差错;大的传输块可以保证承载足够多的传输数据。包编码技术一方面可以改善首次传输和重复传输的性能,另一方面可以明显减少码块的接收延迟,同时可以保证足够低的硬件实现复杂度,因此具有很好的应用前景。

在传统数据包中,码块分割后的每个纠错编码块之间不存在关联,只要有一个纠错码块出错,整个传输块都可能接收失败。整个数据包的误包率(BLER)和每个纠错编码块的误

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2016) 03-0026-005

**摘要:** 提出了一种基于 LDPC 码的物理层包编码方法。在该方法中,通过建立多个码块特定位置上简单异或关系,使得任何一个码块在译码过程中、在该特定位置上从其他码块获得一份额外的边信息,并且译码过程中还引入了类似码字串行干扰抵消(SIC)接收机的思想。该方法具有性能增益明显,复杂度低,接收延迟小,克服突发差错等优势,非常适合未来 5G 的应用场景。

**关键词:** 包编码;物理层;单奇偶校验编码;最小和译码;迭代译码;低密度奇偶校验码

**Abstract:** In this paper, we propose a physical layer packet coding method based on low density parity check codes (LDPC). By establishing the simple XOR relationship on specific position of multiple codes blocks, any code block in the specific position can get additional extrinsic information from other code blocks in the process of decoding, and the idea of serial interference cancellation (SIC) receiver is also used. This method has many advantages, including obvious performance gain, low complexity, low receiving latency and well performance on combating burst errors, and is very suitable for the future 5G application.

**Keywords:** packet code; physical layer; single parity code; min-sum algorithm; iterative decode; low density parity check codes

码率(BCER)之间的关系为:  $BLER = 1 - (1 - BCER)^n \approx n \times BCER$ 。其中,  $n$  为数据包中纠错编码块的数目。从该公式可以看出:如果系统传输的数据包比较大或者数据量比较大时,进行码块分割后得到的纠错编码块数就会比较多。如果数据包的整体 BLER 要求在较低工作点时,就要求纠错编码块的 BCER 工作点更低。这会导致系统需要付出较大的信噪比,特别是在信道条件比较差的情况下系统效率将受到很明显的限制。

在 5G 移动通信系统中, eMBB、URLLC 和 mMTC 的共存将变成突出问题,大量 mMTC 设备和 URLLC 设备

产生大量的短突发数据包, eMBB 设备则产生大的数据包,所以在组网时, eMBB 设备的大数据包上将出现少量的突发差错,码块级的包编码方法可以更加有效地克服突发差错。

数据包编码的概念及应用起源于在数据应用层或者链路层对数据包进行编码,以提高应用层多传输数据包的性能。但是,由于应用层的数据包都是硬比特(即 0 或 1),所以其最大纠错能力比较有限<sup>[2-4]</sup>。目前,低密度奇偶校验码(LDPC)<sup>[5]</sup>在 WiFi 标准、全球微波互联接入(WiMAX)标准、数字广播标准有所应用, LDPC 码具有内在并行特征和

收稿时间: 2016-02-24  
网络出版时间: 2016-04-25

较低的成本,非常适合于超高速的链路,有较大可能在5G的高频通信或者超密网络的本地网络中应用。

5G系统要求更低的传输时延和更高的吞吐量。从物理层信道编码的角度出发,可以将一个传输块分割为多个独立编码的短码块,这样有利于减小译码器的复杂度并降低处理时延。然而,经典的编码理论告诉我们:编码块变小会使得整个传输块的编码增益下降,从而导致译码器的吞吐量降低。为了解决这一矛盾,我们提出一种基于LDPC码的物理层包编码方法,在该方法中,多个码块还是保持各自的独立性编码,通过建立多个码块特定位置上简单单或关系,任何一个码块在译码过程中在该特定位置上可以从其他码块获得一份额外的边信息,并且译码过程中还引入了类似码字串行干扰抵消(SIC)接收机的思想,译码的主要复杂度还是在各个码块本身。这种方法能够在保证传输块性能的前提下,极大地降低译码器的复杂度,并实现基于在线译码的处理时延。物理层包编码技术非常适合未来5G的应用场景。

## 1 基于LDPC码的包编码技术原理

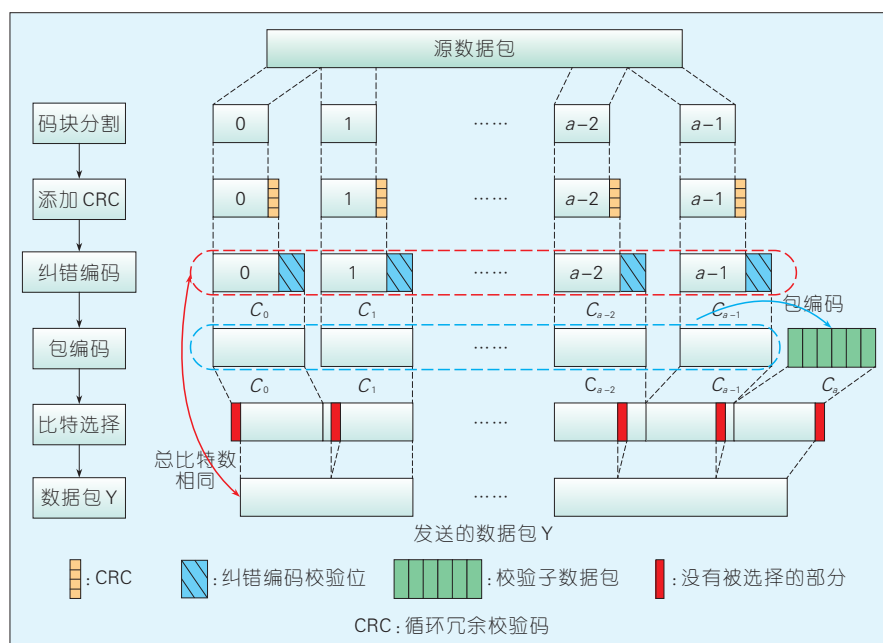
### 1.1 基于LDPC码的包编码发送

具体包编码方案如图1所示,大概分为如下的步骤:

- (1) 传输块(源数据包)进行码块分割 $a$ 块子数据块;
- (2) 对每个子数据块添加码块的循环冗余校验码(CRC)序列;
- (3) 对每个子数据块进行纠错编码处理;
- (4) 数据包编码(奇偶校验编码)得到1个校验数据包;
- (5) 比特选择将得到发送的数据包Y。

对比于传统数据包,这里主要添加了步骤(2)、步骤(4)和步骤(5)。

在步骤(2)中,包编码的译码需



▲图1 具体包编码方案结构框架

要采用CRC辅助的译码算法,同时需要采用类似码字级SIC的译码过程,所以每个LDPC编码块都需要增加码块CRC,码块CRC为8 bit。

在步骤(4)中,总共有 $a$ 块纠错编码块( $C_0, C_1, \dots, C_{a-1}$ ),经过数据包编码得到1块校验数据包,包编码过程包括:将所有纠错编码块的第 $j$ 个比特构成长度为 $a$  bit的序列 $S_j$ ;再对该序列 $S_j$ 进行奇偶校验编码并得到1 bit的第 $j$ 个校验序列 $P_j$ ;将序列 $S_j$ 和校验序列 $P_j$ 串联起来得到第 $j$ 个奇偶校验编码序列 $T_j=[S_j, P_j]$ ,其中 $j=1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 是纠错编码块的比特长度。将所有校验序列 $P_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )顺序组合起来得到1块校验数据包 $C_a$ ,即 $C_a = C_0 \oplus C_1, \dots, C_{a-2} \oplus C_{a-1}$ 。合并原始 $a$ 个纠错编码块和数据包编码得到校验数据包,进而得到需要发送的数据包Y。当然,这里的包编码可以采用其他的编码方式,如多重奇偶校验码、汉明码等。

由于采用了包编码,相对传统的编码后数据而言增加了一个额外的校验包,使得编码后数据块长度变大了。在步骤(5)中,为了与传统的信道编码保持相同的码率,还需要一个

额外的比特选择模块,将一些码字比特打孔掉,打孔比特数目就是校验包的比特数目,最终使得整体编码后的数据块长度保持不变,也就是说码率不变。

在步骤(5)中,比特选择后的总数据大小要与包编码之前的总比特数相等。此时,每个纠错编码块和校验包打掉的比特数基本按照平均打掉原则,这里的纠错编码编码方法采用IEEE 802.11ad高频通信标准的LDPC编码<sup>[6]</sup>,编码后码块长 $N$ 总是为672 bit,扩展因子 $z=42$ ,基础矩阵大小是 $Mb \times Nb$ ,其中 $Nb=16$ ,支持的码率包括1/2、5/8、3/4和13/16。比特选择中,对于每个编码块或校验包被打掉的比特数需要按照如下的2个规则确定:

(1) 如果码块数小于等于15,则每个LDPC码块打掉42 bit,这里的42正好是等于扩展因子的大小,剩余 $(672-42 \times a)$  bit由校验包打掉;

(2) 如果码块数大于15,此时生成一个长度为672 bit的校验包,然后对每个编码块以及校验包进行均匀地打孔,打孔后每个编码块或者校验包具有相同的长度或者相差1 bit,

并选择打孔后码字作为最终编码输出。根据这种方法,所有码块和校验包性能差不多,从而可以让整体数据包的性能达到最优。

## 1.2 基于LDPC码的包编码接收

接收端解调计算出每个比特的对数似然比(LLR)信息,然后进行LDPC码译码和包编码译码,其中LDPC码译码和包译码结合在一起进行迭代译码,迭代步骤如下:

(1)对每个LDPC编码块进行译码,更新译码输出每比特的LLR值。

(2)根据码块CRC判断每个LDPC编码块的正确性,如果正确则输出,则标识其正确;如果错误,则标识其错误;如果所有LDPC编码块都正确,则进入步骤(4)。

(3)通过单奇偶校验码(SPC)译码计算出每个错误码块的新LLR值,进入步骤(1)。

(4)结束译码。

在步骤(1)中,如果是首次译码,则需要对所有LDPC编码块进行译码;如果进入迭代译码时,只需要对错误译码的LDPC编码块进行译码更新。LDPC译码输出软比特信息,其中包括系统位部分的LLR信息和校验位部分的LLR信息,如果校验包长度大于系统比特数,由于其是LDPC码字空间,需要进行LDPC译码输出LLR值,否则只要解调输出的LLR值。在步骤(2)中,我们可以通过CRC序列以及码字空间等判断出LDPC码块正确性。以上步骤是一种迭代过程,所以可以设置最大迭代次数,当迭代达到一定次数后即退出译码。在迭代译码过程中,任何一个码块可获得从其他码块在特定比特位置上提供的一份额外边信息。判断正确的LDPC码字索引集合为 $\Psi_1$ ,而错误索引集合为 $\Psi_2$ 。一旦遇到译码正确的LDPC编码块则直接采用硬比特结果来迭代译码,即在不断迭代过程中减去译码正确的LDPC码字,该迭代译码方法类似于SIC操作。

包编码每个比特的译码过程如公式(1)和(2):

$$LLR'_s = LLR_s + LLR_s^{extrinsic} \quad (1)$$

$$LLR_s^{extrinsic} = (-1)^{\Delta n_s} \cdot 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{m \in \varphi_s} \tanh(|LLR_m|/2) \right) \approx (-1)^{\Delta n_s} \cdot (-1)^{[n_s+1]} \cdot \beta \cdot \min_{m \in \varphi_s} (|LLR_m|) \quad (2)$$

在公式(1)和(2)中, $LLR_s$ 是更新前的所有译码错误中的第 $s$ 块LDPC纠错编码块LLR矢量, $LLR_s^{extrinsic}$ 为其他码块提供给第 $s$ 个码块的纠正信息, $LLR'_s$ 是更新后LLR矢量, $\Delta n_s$ 是所有译码正确LDPC码块中对应索引比特为1的数目矢量, $\varphi_s$ 是指所有译码错误LDPC码块索引集合 $\Psi_2$ 中除了第 $s$ 块以外的其他码块索引矢量, $n'_s$ 是指所计算的索引集合为 $\varphi_s$ 的对应每比特的LLR值中符号为正数的数目矢量。

## 2 比特选择方法对LDPC包编码的性能影响

每个LDPC码块打掉比特位置的不同,也会影响到整体数据包的译码性能,所以我们需要选择一种最优的比特选择方法,使得接收译码性能达到最好。

### 2.1 4种比特选择的方法

在比特选择方法介绍中,主要以

码块数 $a=10$ 为例进行介绍,对应每个LDPC码块打掉比特数为42,而校验包打掉的比特数为252。

比特选择的方法包括如下4种方式(如图2所示):

(1)对于每个LDPC编码块都从后到前打掉一些比特,对于校验包则从前到后打掉一些比特;

(2)对于每个LDPC编码块从前到后打掉一些比特,对于校验包是从后到前打掉一些比特;

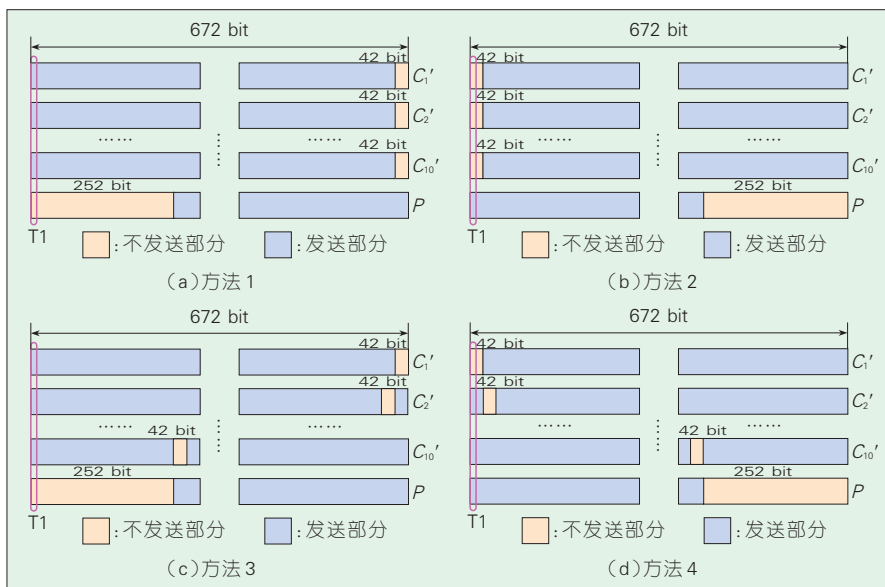
(3)对于每个LDPC码块和校验包依次从后到前打掉一些比特,对于所有LDPC码块和校验包打掉比特的位置索引都没有相同的;

(4)对于每个LDPC码块和校验包依次从前到后打掉一些比特,对于所有LDPC码块和校验包打掉比特的位置索引都没有相同的。

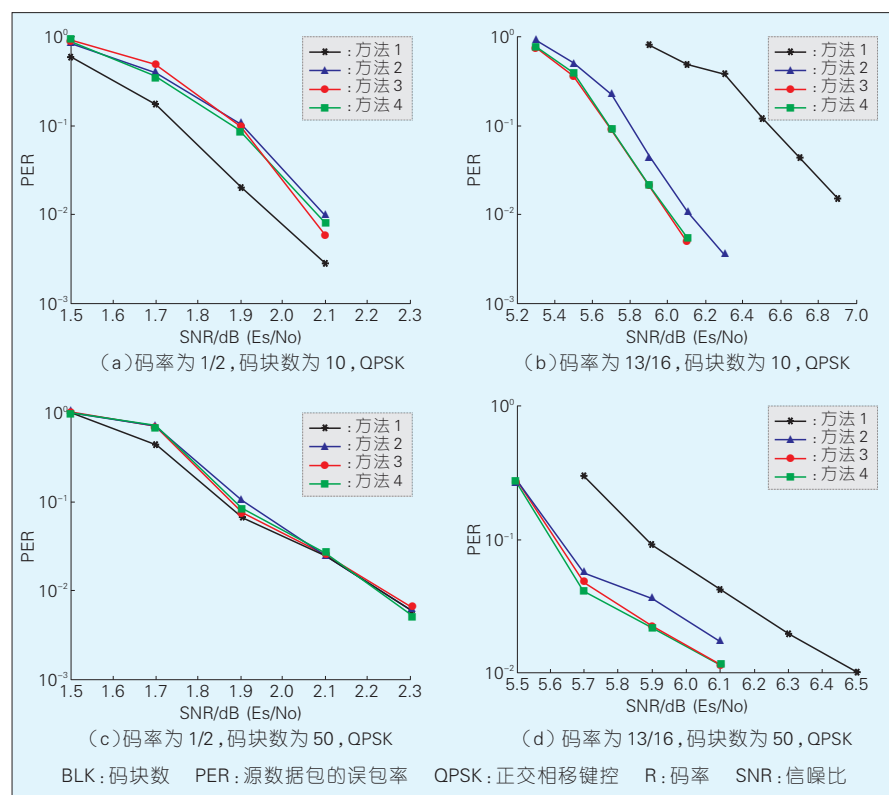
### 2.2 4种方法的性能比较

我们对4种方法在加性高斯白噪声(AWGN)信道下的性能进行比较,共分4种情况:码率为1/2(低码率),码率为3/4(高码率),编码块数目为10个和50个,这里采用一次单奇偶校验(SPC)译码。

通过以上仿真,我们得到以下结论:在图3(a)中方法1稍好于其他方



▲图2不同的比特选择的方法



▲图3 不同的比特选择方法的性能比较

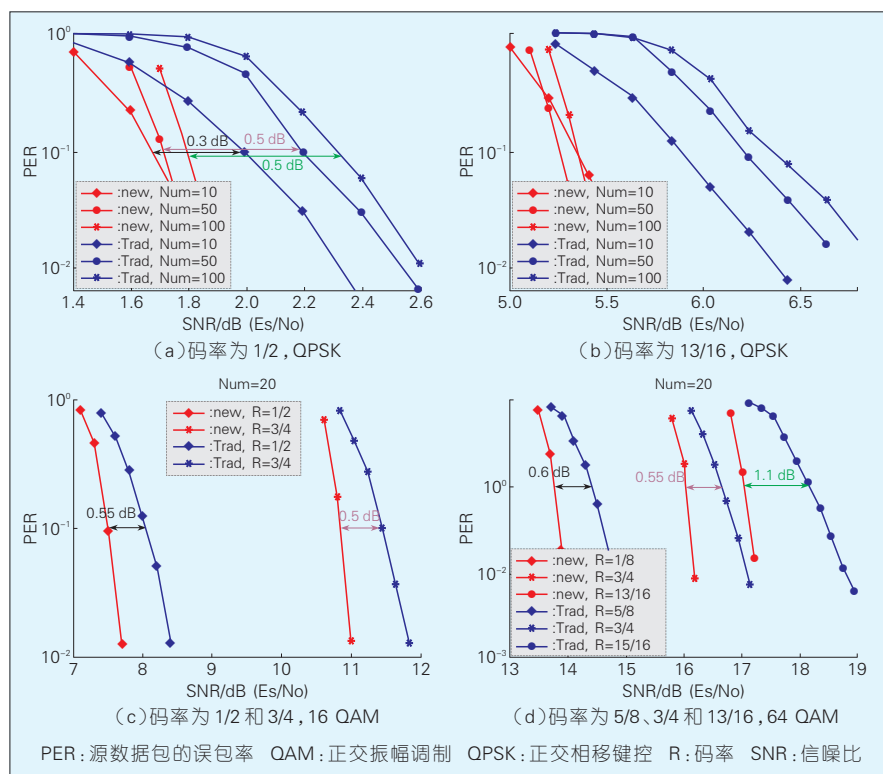
法;在图3(b)中方法3和4明显好于方法1,且略好于方法2;在图3(c)中4种方法性能相当;在图3(d)中方法3和4明显好于方法1,且略好于方法2。基于以上结果的折衷,方法3和方法4是优先选择。

### 3 包编码方案的性能增益

我们给出了有包编码方案 and 传统的无包编码方案的性能比较,信道为 AWGN, 调制为 QPSK, 码率为 1/2 (低码率) 和码率为 13/16 (高码率), 编码块数目分别为 10、50 和 100 个, 共有 4 种仿真情况, 比特选择方法采用方法 4, 采用至多 4 次 SPC 译码, 码块 CRC 被看为编码开销而不是信息比特, New 是指有包编码方案, Trad 是指无包编码的传统方案。

根据以上仿真结果,图4(a)中包编码在码块数目为 10、50、100 和码率为 1/2 条件下带来了 0.3 dB、0.5 dB 和 0.5 dB 的性能增益;图4(b)中包编码在码块数目为 10、50、100 和码率

为 13/16 条件下带来了 0.5 dB、1 dB 和



▲图4 有包编码和无包编码的传统方案的性能比较

1 dB 的性能增益;图4(c)中包编码在调制为 16QAM、码块数目为 20 和码率分别为 1/2 和 3/4 条件下分别带来了 0.55 dB 和 0.5 dB 的性能增益;图4(d)中包编码在调制为 64QAM、码块数目为 20 和码率分别为 5/8、3/4 和 13/16 条件下带来了 0.6 dB、0.55 dB 和 1 dB 的性能增益。

### 4 结束语

文章首先介绍了基于 LDPC 码的包编码技术原理,随后给出了不同比特选择方法对包编码方案的性能影响,最后给出了有包编码方案和传统的无包编码方案的性能比较。从仿真结果可以看出:基于 LDPC 码的包编码技术方案技术具有明显的性能优势。我们对物理层包编码技术方案的优势进行总结:

(1) 有较明显的性能增益。包编码方法可以有效地提高一个包括多个编码块的传输块的链路性能,在码块数目较多和码率较高条件下尤为明显。

(2)复杂度较低。在发送端进行包编码时,只需要比较少量的异或门,所以编码复杂度很低。在接收端,虽然 SPC 外迭代导致了额外的复杂度,但是外迭代次数至多 4 次,码块间的 SPC 译码很简单且可串行实现,外迭代仅需对少量错误码块进行 LDPC 译码,所以额外的复杂度比较低,是可以接受的。

(3)接收延迟小。包编码方法可以将较大编码块划分成短编码块,每接收到一个短编码块即可进行译码,进而可以采用在线译码,减少整体译码时延。

(4)大大提升混合自动重传请求(HARQ)重传性能。如果首传是包括多个编码块的源数据包,并且重传是校验包,重传性能得到大大提高,仿真论证了这一点。

综上所述,物理层包编码技术不仅可以提升链路性能,而且可以减少

硬件复杂度和降低时延,还可以克服突发差错,非常适合未来 5G 的应用场景。

#### 参考文献

- [1] 徐俊. 5G 链路增强技术进展[J]. 中兴通讯技术(通讯), 2014, 12: 12-14
- [2] GOMEZ- BARQUERO D, BRIA A. Forward Error Correction for File Delivery in DVB-H [C]// 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring. USA: IEEE, 2007: 2951-2955. DOI: 10.1109/VETECS.2007.605
- [3] SHOKROLLAHI A. Raptor Codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2251-2567
- [4] STOCKHAMMER T, SHOKROLLAHI A, WATSON M, et al. Application Layer Forward Error Correction for Mobile Multimedia Broadcasting [M]. Handbook of Mobile Broadcasting: DVB-H, DMB, ISDB-T and Media Flo. USA: CRC Press, 2008
- [5] GALLAGER R G. Low-density Parity Check Codes [J]. IRE Transactions Information Theory, 1962, 8: 21-28
- [6] IEEE. IEEE802.11ad: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band [S]. 2012

#### 作者简介



徐俊,中兴通讯股份有限公司高级工程师;长期从事 4G/5G 链路增强的标准预研和新技术研究;曾负责过多个国家项目;已发表论文 10 余篇,专利 100 余篇。



许进,中兴通讯股份有限公司高级工程师;长期从事新型调制编码、网络编码等无线新技术的研究;已发表论文 10 余篇。



胡留军,中兴通讯股份有限公司算法部部长,高级工程师;主要研究方向为移动通信网络及其关键技术;已发表论文 10 余篇,专利 80 余篇。

## 综合信息

### 《中兴通讯技术》第 7 届编辑委员会新增编委简介



陆建华,中国科学院院士,清华大学电子工程系教授、航天航空学院副院长,国家基金委创新群体项目负责人,教育部长江学者特聘教授,国家“863”计划专家、“973”项目首席科学家,中国电子学会常务理事,国务院学位委员会信息与通信工程学科评议组召集人,IEEE Fellow;主要从事无线传输的理论与应用研究;取得多项创新科技成果,并在国家探月等重大工程中获得重要应用,曾获国家自然科学二等奖、国家技术发明二等奖等奖项;发表论文 200 余篇,并获得国家发明专利 65 项。



李尔平,浙江大学信息与电子工程学院特聘教授,ZJU-UIUC 学院院长,信息学部副主任,浙江大学射频与纳米电子研究中心创始人,2006 年长江学者讲座教授,首批国家千人计划特聘教授,IEEE Fellow;主要从事高速电子、新型微纳光电子器件集成技术、微波电子射频天线及电磁兼容等领域的研究;荣获多个国际奖项和荣誉,包括 2015 年荣获国际 IEEE 最高奖之一——理查德-司徒达特奖,2006 年荣获 IEEE EMC 技术成就奖,2006 年入选教育部“长江学者”讲座教授,2007 年荣获新加坡杰出工程成就奖等;发表论文 400 余篇,出版英文专著两部,申报多项美国、新加坡和中国专利。

# 基于 GRT 平台的全双工 WiFi 设计与实现

## Full-Duplex WiFi Design and Implementation Based on GRT platform

吴浩洋/WU Haoyang

王韬/WANG Tao

焦秉立/JIAO Bingli

(北京大学, 北京 100871)

(Peking University, Beijing 100871, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0031-005

**摘要:** 提出了一种基于 GRT 平台的全双工 WiFi 通信系统设计和实现, 它可以支持 20 MHz 的带宽, 能够提供不同的调制/解调方式, 包括 802.11a/g 模式中的标准二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、16 正交振幅调制(QAM)和 64 QAM 调制。测试结果显示: 基于 GRT 的全双工系统的吞吐率可以达到 92.45 Mbit/s, 相当于 802.11a/g 标准吞吐率的 1.7 倍, 两帧之间的延迟可以低至 9.85  $\mu$ s。

**关键词:** 全双工; WiFi; 软件定义无线电; 吞吐率

**Abstract:** In this paper, we propose the full-duplex WiFi design and implementation based on GRT platform. The system supports 20 MHz bandwidth operation, and offers various modulation/demodulation schemes, including binary phase shift keying (BPSK), quadrature phase shift keyin (QPSK), 16 QAM, and 64 quadrature amplitude modulation (QAM), for standard 802.11a/g frames in the full-duplex mode. Our system further delivers throughput up to 92.45 Mbit/s, about 1.7 times compared with the half-duplex 802.11a/g standards, and the frame interaction intervals can be as small as 9.85  $\mu$ s.

**Keywords:** full duplex; WiFi; software defined radio (SDR); throughput

## 1 全双工技术和 GRT 系统

### 1.1 全双工技术

由于全双工技术理论上可以将频谱利用率提高 1 倍, 并能够更加灵活地利用频谱资源, 因此近年来随着器件技术和信号处理技术的发展, 同频同时全双工技术逐渐成为研究热点, 是 5G 移动通信系统充分挖掘无线频谱资源的一个重要方向。

传统的无线通信系统无法实现同频同时全双工传输, 因为当无线设备处于全双工的工作状态时, 接收天线会接收到很强的由其自身发射机产生的信号, 这一信号被称为自干扰信号。因此, 要实现全双工通信, 需要解决的首要问题就是如何消除自干扰信号。从理论上讲, 由于设备完全了解自身的发射机所发出的信号, 因此自干扰信号可以通过一些特殊的处理完成消除<sup>[1-2]</sup>。

自干扰消除方法大体分为 3 类: 天线消除、模拟消除以及数字消除。天线消除利用了天线的极化与方向特性, 尽可能地让发射和接收天线隔

离; 模拟消除指的是利用设计好的模拟电路, 分离出发射信号与接收信号; 数字消除是通过基带处理算法, 完成自干扰信号的消除。数字消除通常分为两个步骤: 首先, 在两台设备同时发送数据帧之前, 训练信号将会被分别发送, 这个过程同时对目标信道以及干扰信道做出估计; 之后, 根据已知的信道信息, 就可以从接收的信号中减去自干扰信号得到目标信号<sup>[3-4]</sup>。

### 1.2 GRT 系统

GRT<sup>[5-6]</sup> 系统是一种高性能、可编程、小型化的基于现场可编程门阵列(FPGA)的软件无线电系统。用户可以基于 GRT 系统完成小型化无线系统的快速开发, 并实现当前主流无线协议所需的性能要求(包括吞吐率和

延迟)。GRT 系统主要由 4 部分组成: 主机、物理(PHY)层、媒体访问控制(MAC)层和射频前端<sup>[1]</sup>。主机为用户提供了一些非常灵活方便的用户接口, 无线协议中 MAC、PHY 的大部分功能都是基于 FPGA 实现的, 射频前端完成无线基带信号和射频信号的互相转换。

研究人员普遍希望用于研发的软件无线电平台同时满足 3 个要求: 高性能、可编程和小型化。可编程的平台可以让研究者快速实现新的设计想法, 研究者同时希望无线平台能够提供足够的用户接口及应用程序编程接口(API), 保证用户可以灵活、方便地在无线平台上完成开发。

高性能则可以保证系统工作的高吞吐率和低延迟, 由于无线环境的复杂性, 传统的软件仿真方式无法验

收稿时间: 2016-02-18

网络出版时间: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61531004); 港澳台科技合作专项资助(2014DFT10290)

证系统在真实环境中的工作情况,即便是在低速、高延迟的无线平台上完成了系统实现,其信道模型仍然和系统工作于高性能时是有区别的,因此也无法完全验证系统在高性能情况下的工作情况。

小型化对于研究者来说是一个比较容易忽略的特征。一般情况下,无线设备的终端是具备移动性的。如果研究者在大型化的系统中完成系统实现,就很难模拟无线终端在无线环境中的移动,大型化无线系统同样也不利于在不同无线环境中的系统测试。

### 1.3 相关工作

人们已经在一些软硬件开发平台上实现过全双工系统,包括开源软件无线电平台(GNU Radio)<sup>[5]</sup>,基于FPGA的无线平台WARP<sup>[2,4,6]</sup>,以及基于WARPLab<sup>[7]</sup>实现的全双工系统。基于GNU Radio实现的全双工系统最多只能支持几个Mbit/s速率的实时吞吐量,这远远达不到当前WiFi标准(例如802.11a/g要求达到54 Mbit/s的数据吞吐量<sup>[1]</sup>)。基于WARP实现的全双工系统<sup>[2,4,6]</sup>可以工作在20 MHz带宽,但帧与帧之间的响应延迟较大(75  $\mu$ s)<sup>[4]</sup>,因此无法满足短帧间间隔(SIFS)的定时标准。基于WARPLab实现的全双工系统使用WARPLab来完成全双工的核心算法,其处理延迟最高可达50 ms<sup>[7]</sup>,这比802.11a/g的延迟要求整整高出了3个数量级。根据我们的调研,当前已有的全双工系统实验平台在性能上还有许多不足之处<sup>[8-10]</sup>。

## 2 全双工WiFi系统设计

### 2.1 GRT平台设计

GRT平台的系统设计面临以下两个挑战:

(1)对于一个软件无线电平台,要同时达到可编程性与高性能的目标是较为困难的。基于软件的无线

平台,中央处理器(CPU)的处理速度是主要的瓶颈。虽然软件平台具有良好的可编程性,但它们却不能保证当前主流无线协议的吞吐率和延迟要求。基于硬件的平台虽然有较好的性能,但因其逻辑结构固定,不易编程,因此大幅度地延长了无线系统的开发周期和成本。

(2)全双工WiFi平台应能够提供多变的应用编程接口。一般一个全双工WiFi系统由以下几个组件构成:PHY、MAC、射频(RF)前端以及用于控制的主计算机。在不同的应用设置下,研究人员会应用不同的模块,且需要模块间实现不同的连接方式,因此各模块之间必须要有灵活的接口。

为解决第1个问题,GRT平台中的PHY层基于FPGA,并采用模块式设计以同时满足系统高性能与可编程性的需求。FPGA能够确保PHY层模块的并行处理,确保了无线系统的高性能要求,在GRT平台中,每一个PHY模块作为一个算术单元独立工作。通过使用通用异步先进先出(FIFO),信号可以在任意两个模块之间互相传输,且每个模块可以工作于不同的时钟域。

图1展示了PHY层中的模块连接架构。例如,如果要将模块5插入到模块1与模块2之间,只需要删除原来连接它们的FIFO并直接插入模块5即可。这种灵活的模块设计可以实现绝大多数PHY结构,包括全双工、多输入多输出(MIMO)以及其他

异构型PHY架构。

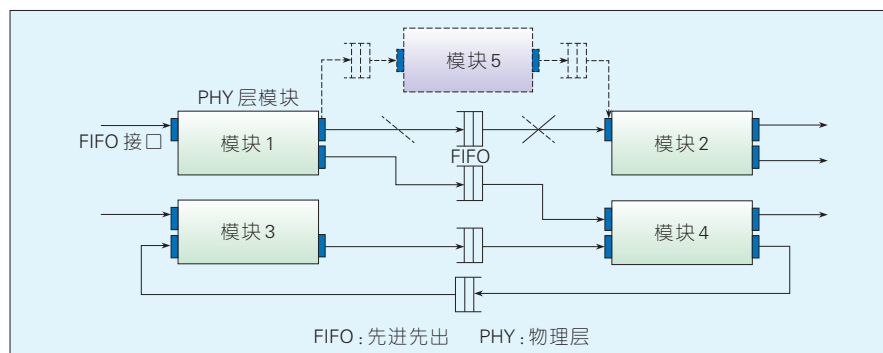
为了解决第2个问题,可以使用不同的接口来保证灵活的连接方式。GRT有4个组成部分:PHY层、MAC层、RF前端以及主计算机。它们彼此之间共有3种交互式接口:直接存储器存储接口(DMA)、可编程输入输出接口(PIO)和中断接口,以满足不同的需要。特别地,DMA接口支持高速数据流,PIO接口可以传输某些状态信息,中断接口能够保证低延迟控制。

灵活的系统连接方式保证了系统的小型化需求。对于需要开发小型化无线系统的研究者来说,可以选择更为小型的RF前端和便携性高的笔记本电脑作为主计算机。GRT平台如图2所示。

总之,我们提出了一种新型的基于硬件的模块化结构,以保证高性能、可编程和小型化的需求。这种设计不仅适合全双工WiFi的研究,还适用于不同的复杂PHY层的实现,包括MIMO系统等。

### 2.2 全双工帧结构设计

为了实现基带部分的数字消除,需要完成目标信道与干扰信道的信道估计。为此需要在数据帧发送之前发送若干训练序列,很显然,训练序列所占时间越长,信道估计结果也越为准确。但由于冗余增多,数据传输速率也会大幅度降低。因此设计高效的帧交互方式是全双工设计的重点。



▲图1 GRT系统PHY层模块架构



◀图2  
GRT 软件无线电  
开发平台实物

为了实现数字消除,我们同时对目标信道与干扰信道做出估计。当两台设备工作于全双工模式时,目标信号与干扰信号会混合在一起,使得信道估计难度增大。因此需要设计一种新的帧交互方式。图3中可以看到全双工帧交互的设计细节。

全双工 MAC 使用点协调信道接入机制。为了开始全双工数据交换,无线访问节点(AP)和某装置必须分别先传输一个训练帧。首先,AP 发出一个 AP 训练帧,此时 AP 和设备分别对干扰信道与目标信道进行估计;随后,设备发出一个设备训练帧,AP 和设备再次分别对目标信道与干扰信道进行估计;在两次握手过程后,AP 和设备同时发出和接收对方的等长帧,并用 32 位循环冗余校验(CRC)来验证收到帧的有效性。如果 CRC 校验错误,则需要完成重发。

训练帧与全双工数据帧都是标准的 802.11a 帧。因此,其他的非全双工设备可以解调这个全双工帧,全双工设备在完成“握手”过程之前也

可以看做是一个非全双工设备。在全双工设备发出训练帧之前,它应当先完成退避过程。这里设置了 SIFS 时间( $16\ \mu\text{s}$ )使得全双工设备可以在非全双工环境下工作。

### 3 全双工 WiFi 系统实现

#### 3.1 高性能、可编程的全双工 WiFi 实现

为了确保全双工系统的高性能,我们需要考虑每一个运算模块的运算性能。由于采用了模块化的设计思路,且模块之间相互独立,系统的总延迟等同于每个模块的延迟之和,每个模块的延迟需要尽可能地降至最低。因此,采用模块化的设计思路,就将整个系统的性能优化简化为对每个模块的性能优化,有效地提升了开发效率。

对于射频部分,这里考虑了两种射频前端设备,包括了通用软件无线电外设(USRP)和一款高性能射频前端设备 AD9361。USRP 使用以太网电缆来同时传输数据以及控制信息,

这会造成系统的高延迟。其中以以太网网络电缆至少会引起  $20\sim 30\ \mu\text{s}$  的延迟,达不到全双工通信中的 SIFS 实时性要求( $16\ \mu\text{s}$ )。因此我们选择了只有不到  $2\ \mu\text{s}$  延迟的 AD9361 RF 前端。

在模块化的设计框架下,用户可以灵活的增、删、改其中的任何模块。此外,我们还提供了很多的用户接口及 API,用户可以灵活地对系统进行编程开发。

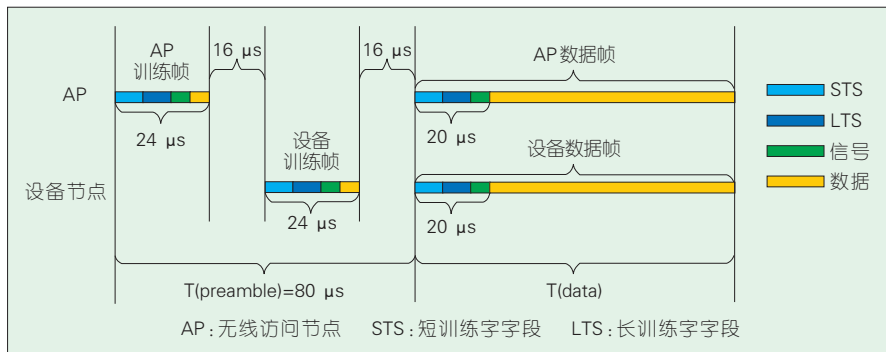
#### 3.2 小型化全双工 WiFi 的实现

之前提到,GRT 系统主要由 4 部分组成,且每一部分都可以按照研究者的需求进行设备的选择。这里选取了笔记本电脑作为主机,射频前端也采用了 AD9361 设备,直接通过 AD9361 和 FPGA 进行连接,尽可能地减小天线和射频消除设备的体积与重量。系统的实现如图4所示。

其中,基于 GRT 的 PHY 层以及 MAC 层在 Xilinx Virtex-7 FPGA 开发板上实现。同时又加装了包括天线对消以及模拟对消模块设置的两个 AD9361 前端,并使用一台电脑,采用 PIO 接口来监测全双工的工作状态以及控制操作模式。这里采用 VIVADO 2013.4 版本完成系统的 Verilog 代码。此外采用自主研发的前端设备实现了模拟消除与天线消除——通过这两部分的消除算法,能够去除  $40\sim 50\ \text{dB}$  的自干扰。

#### 3.3 GRT 模块库

商用 WiFi 网卡一般采用无线芯片完成 WiFi 的 PHY 层算法,因此用户无法在上面进行编程。基于其他平台实现的标准 WiFi 系统也很难将其扩展为全双工 WiFi。因此我们首先实现了一套完整的 802.11a 协议模块库,再利用这一模块库实现标准的 802.11a 协议。在主机上增加无线驱动,系统就可以像普通网卡一样工作。之前的工作显示:GRT 系统已经可以完成 802.11a 的完整功能,手机等商用 WiFi 设备可以顺利连接上



▲图3 帧交互设计



图4  
小型化全双工  
WiFi 的系统实现

GRT 搭建的 AP, 并通过 GRT 搭建的 AP 连接上网络。

### 3.4 GRT 系统 PHY 层实现

图 5 表示了基于 GRT 的全双工 WiFi 的 PHY 层硬件架构。其中黑色模块代表库存内提供的模块, 绿色部分表示为实现全双工而新增的模块。从图中可以看出, 由于 GRT 平台的可编程特性, 只需要做少量的修订就能够实现较为完整的全双工 WiFi 系统。

## 4 测试评估

### 4.1 实验环境

用户可以通过 PIO 接口任意设置 GRT 平台的中心频率、采样率, 以及发送与接收增益。实验平台支持 802.11a 协议中的所有数据速率 (6 ~ 54 Mbit/s) 以及帧长度 (1 ~ 4 095 字节)。每一个 GRT 设备都可以通过 PIO 接口的适当设置来作为 AP 或者用户设备。

在实验中采用 802.11a 中的所有 8 种调制方案, 数据帧长度定为 1 500 字节, 中心频率为 2.457 GHz, 抽样率为 20 MHz——这些参数正是工作于 10 频道上的商用 WiFi 设备的典型参数。在 MAC 层上的 CRC 结果可以表明一帧是否被成功接收。

### 4.2 GRT 系统可编程性评估

GRT 提供标准化 802.11 协议中的

19 个模块<sup>[10-12]</sup>。为实现全双工 WiFi, 实验中修订了模块库中的 3 个模块, 并额外添加了 4 个模块用于进行数字对消。通过分析, 得知 GRT 系统的模块库中有 92% 的代码是可以直接

复用的。

### 4.3 全双工系统性能评估

实验中, 一个终端能够在 9.85  $\mu\text{s}$  内对对方的请求帧作出回应, 而标准 802.11a 要求在 16  $\mu\text{s}$  内对接收到的帧作出回应。实验结果不仅达到了标准 802.11 WiFi 的要求, 还额外增加了 6.15  $\mu\text{s}$  的容量。

考虑到训练帧的开销, 实验还测试了 MAC 层的理论吞吐量并将结果列在了表 1 中。结果表明: 吞吐量提高到标准 WiFi 系统的 1.71 ~ 1.96 倍。

## 5 结束语

文章介绍了一种基于 GRT 平台的全双工 WiFi 通信系统设计和实

表 1 理论流量测试

调制方式	编码率	标准 802.11a 吞吐量/Mbit/s	全双工 WiFi 吞吐量/Mbit/s	吞吐量提高倍数
BPSK	1/2	6	11.76	1.96
BPSK	3/4	9	17.48	1.94
QPSK	1/2	12	23.11	1.93
QPSK	3/4	18	34.02	1.89
16-QAM	1/2	24	44.59	1.86
16-QAM	3/4	36	64.68	1.80
64-QAM	2/3	48	83.49	1.74
64-QAM	3/4	54	92.45	1.71

BPSK: 二进制相移键控 QAM: 正交振幅调制 QPSK: 正交相移键控

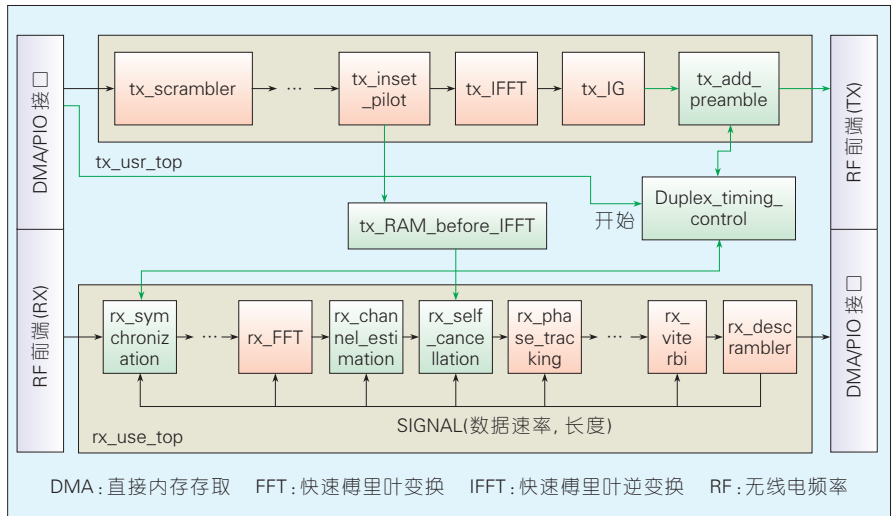


图 5 基于 GRT 的全双工 WiFi 的实现

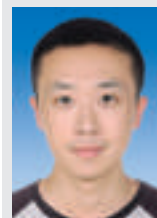
现。该设计可以利用 GRT 提供的 802.11a 协议模块库,完成了高性能、可编程、小型化的全双工无线系统。实验结果表明:基于 GRT 平台实现的全双工 WiFi 系统达到 92.45 Mbit/s 的吞吐率,帧响应延迟最低达 9.85  $\mu$ s。

#### 参考文献

- [1] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication[C]// MobiCom '10 Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2010. USA: ACM, 2010: 1-12. DOI: 10.1145/1859995.1859997
- [2] GNU-Radio [EB/OL]. [2016-04-21]. <http://gnuradio.org>
- [3] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full Duplex Radios [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 375-386
- [4] JAIN M, CHOI J I, KIM T M, et al. Practical, Real-time, Full Duplex Wireless[C]// MobiCom '11 Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2011. USA: Stanford University, 2011: 301-312
- [5] WANG T, SUN G, CHEN J, et al. GRT: A Reconfigurable SDR Platform with High Performance and Usability [J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News (CAN), 2014, 42(4): 51-56
- [6] CHEN J, WANG T, WU H, et al. A High-Performance and High-Programmability Reconfigurable Wireless Development Platform (demonstration paper)[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT 2014). USA: IEEE, 350-353, 2014. DOI: 10.1109/FPT.2014.7082817
- [7] WU H, WANG T, CHEN J, et al. GRT: A High-Performance Customizable HW/SW Open Platform for Underlying Wireless Networks [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(1): 23-128
- [8] IEEE 802.11 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. USA: IEEE Standards Association, 2012
- [9] BHARADIA D, KATTI S. Full Duplex MIMO Radios[C]// Proceedings of the 11th USENIX Symposium on NSDI '14, 2014. USA: USENIX, 2014: 359-372
- [10] ARYAFAR E, KHOJASTEPUR M A, SUNDARESAN K, et al. MIDU: Enabling MIMO Full Duplex[C]//Mobicom '12 Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile Computing and Networking, 2012. USA: USENIX: 257-268
- [11] WU D, ZHANG C, GAO S, et al. A Digital Self-Interference Cancellation Method for Practical Full-Duplex Radio[C]// 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2014. USA: IEEE, 2014: 74-79
- [12] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A. Passive Self-Interference Suppression for Full-Duplex Infrastructure Nodes [J]. IEEE

Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 680-694

#### 作者简介



**吴浩洋**, 北京大学信息科学技术学院高效计算与应用中心博士生; 主要研究方向为无线通信、无线局域网体系结构。



**王韬**, 北京大学信息科学技术学院副教授, 北京大学高效计算与应用中心副主任, IEEE 高级会员, 中国计算机协会高级会员; 主要研究方向为计算机系统结构、可重构无线网络体系结构、无线医疗; 发表论文章 30 余篇。



**焦秉立**, 北京大学信息科学技术学院教授, 信息科学技术学院无线通信和信号处理中心主任; 主要研究方向包括 CDMA 和 OFDM 等无线接入技术、同频同时全双工(CCFD)技术、MIMO、以及同频同时全双工技术; 发表论文章 100 余篇。

## 综合信息

### 中国稳坐芯片专利申请榜首 排头兵中兴通讯跻身全球 30 强

国际知名专利检索公司 QUESTEL 发布《芯片行业专利分析及专利组合质量评估》报告指出,全球芯片专利数量在过去 18 年里实现了 6 倍增长,中国芯片专利申请量在过去 18 年里则实现了 23 倍的惊人增长,数量上中国已成为目前芯片专利申请的第一大国,这与中国的专利申请总量连续 5 年蝉联全球第一的大环境相符合。

QUESTEL 报告以 ORBIT 专利数据库收录的 99 个国家及组织的专利数据为数据源,检索截至 2016 年 4 月 6 日的专利数据。该报告指出,在全球芯片专利申请量前 30 位专利权人中,日本公司居多,日立、东芝和 NEC,排名前三位,其次是美国的 IBM、英特尔、德州仪器、高通等老牌企业,中国企业在芯片专利数量上已逐步赶上国外老牌企业,中兴通讯的专利申请在中国企业中排名靠前,位列全球第 23 位。具体而言,中兴通讯是国内

芯片专利申请量领先的企业,表现抢眼的科研院校代表则为浙江大学和清华大学。

积极申请芯片专利和取得较好成绩的背后,与中国芯片产业的现状和企业自主研发的意识增强相关。QUESTEL 报告认为,经过多年的技术和专利积累,中国企业已初步具备和国际领先企业竞争合作的技术基础和知识产权基础。但国外企业无论从市场还是专利数量来说,仍然在全球占据了大部分席位,本土企业在诸多方面都与国际领先企业存在着较大差距。

业内人士指出,国产芯片主要应用于消费类领域,而在对稳定性和可靠性要求很高的通信、工业、医疗和军事等领域,仍主要依赖美国等发达国家。随着以中兴通讯等为首的通信科技企业正在大幅提高国产芯片的自给率,以及与信息安全相关的芯片产业成为国家重点扶持谋求突破的产业,相信中国芯片产业未来 5~10 年将走向新的快车道。

(转载自《C114 中国通信网》)

# 非理想 CSIT 下超密集分布式天线网络的高能效协同波束成形

## Energy Efficient Coordinated Beamforming for Massively Dense Distributed Antenna Networks with Non-Ideal CSIT

王璟 / WANG Jing

冯伟 / FENG Wei

周世东 / ZHOU Shidong

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0036-005

**摘要:** 针对超密集分布式天线网络(md-DAN)的下行场景,基于以用户为中心的虚拟小区模式,在非理想的发端信道状态信息(CSIT)条件下对系统的高能效协同波束成形问题进行研究。提出一种采用连续Taylor展开和Dinkelbach方法的迭代解决问题方案。仿真表明,该方案在不同网络部署密集程度下均可明显提高md-DAN系统能效。

**关键词:** 超密集网络; 超密集分布式天线网络; 高能效; 协同波束成形; 非理想 CSIT

**Abstract:** In this paper, we focus on the downlink of a user-centric virtual cell-based massively dense distributed antenna network (md-DAN), and particularly address the problem of energy efficient coordinated beamforming with non-ideal channel state information at the transmitter (CSIT) condition. By applying the successive Taylor expansion approach and the Dinkelbach method, an iterative scheme is presented to solve the problem. Simulation results illustrate that the presented scheme can markedly improve the md-DAN system energy efficiency under different network deployment densities.

**Key words:** ultra-dense network; massively dense distributed antenna network (md-DAN); energy efficient; coordinated beamforming; non-ideal CSIT

为满足不断增长的通信业务需求,超密集网络已成为未来第5代移动通信(5G)的核心技术之一,它具备容量高、覆盖好、部署灵活等诸多优势<sup>[1]</sup>。但是,随着网络密集度不断增加,系统中的干扰不断加剧,制约系统性能的持续提升<sup>[1-8]</sup>。为了有效控制或消除干扰的影响,网络协同传输正引起越来越多的研究关注<sup>[3-5]</sup>。与传统单纯追求频谱效率不同,绿色高能效的通信网络设计也是5G的重要发展演进方向之一<sup>[1-2]</sup>。因此,高能效协同的超密集网络设计应是5G技术创新发展的重要方面。

分布式天线网络(DAN)是实现5G超密集网络部署的一种颇具前途的系统架构,称之为超密集分布式天线网络(md-DAN)<sup>[3]</sup>。一方面,在md-DAN中分散部署的分布式天线单元

(DAU)通过光纤等高速传输链路与网络的中心处理单元相连,使md-DAN具备了对信号的强大协同处理能力<sup>[3]</sup>;另一方面,由于网络密集分布式部署带来的接入距离减小和发送功率节省等有利因素,也使md-DAN在网络能效优化方面具有很大的优势<sup>[2-3]</sup>。因而,md-DAN在网络协同、能效这两方面兼具优势,契合了5G对超密集网络的高能效协同设计的相关需求。

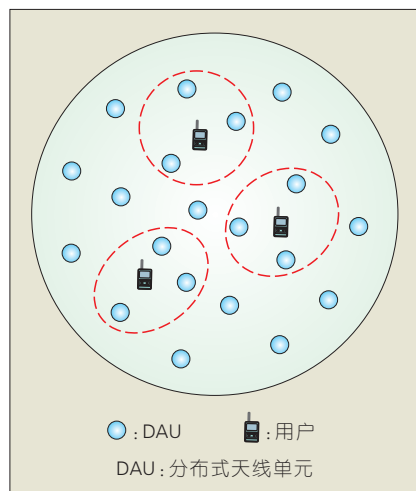
在md-DAN的网络部署应用实践中,在网络中心处理单元处进行全局处理将导致庞大的运行复杂度和系

统开销难题。为克服此困难,一种可行的解决模式是在md-DAN中形成以用户为中心的虚拟小区(如图1所示),从而将复杂的全局处理问题简化为基于各虚拟小区的“本地化”处理<sup>[9]</sup>。然而,采用虚拟小区模式在降低复杂度和开销的同时,亟需网络协同方案以克服干扰的不利影响,在这方面目前已有一些研究成果,如协同天线选择<sup>[4]</sup>、协同波束成形<sup>[5]</sup>、协同功率分配<sup>[6]</sup>等,但总体来说这些研究主要针对高频谱效率进行,往往不能获得较高的网络能效。针对此问题,我们将基于虚拟小区模式在md-DAN

收稿时间: 2016-04-20

网络出版时间: 2016-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2012CB316002); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2015AA01A701); 国家科技重大专项(2014ZX03003003-002); 国家自然科学基金(61201192、61321061);



▲ 图1 md-DAN 系统(含虚拟小区)场景

中进行高能效协同的波束成形方案设计,以顺应未来5G在超密集网络方面的技术创新需求。

为更好地进行md-DAN的高能效协同波束成形方案设计,一些代表性经典方案如全体发送(BT)方案、选择发送(ST)方案等<sup>[7]</sup>的设计思路可以提供有价值的参考,然而这些方案既未进行虚拟小区间协同也未进行能效优化。文献[8]在下行多小区的系统中应用场景下基于理想的发端信道状态信息(CSIT)设计多小区协同的波束成形方案,通过多小区协同进行干扰控制以最优系统的加权和容量性能,然而其未能实现系统的能效优化。文献[9]在下行单小区DAN中、在理想的CSIT下基于最大比发送(MRT)方案进行高能效的波束成形设计,但其在设计时未能考虑虚拟小区间的干扰因素,因而其研究成果无法有效应用到含有多个虚拟小区的md-DAN系统中。此外,以上的工作<sup>[7-9]</sup>都基于理想CSIT进行波束成形方案设计,而未能考虑更切于工程实践的非理想CSIT而进行针对设计。在md-DAN的高能效协同波束成形设计时,相较于假设完全理想的全部CSIT,部分CSIT(仅包含虚拟小区内完整CSIT和虚拟小区间大尺度CSIT,文章中主要针对这种非理想CSIT的假设)因其获知较易、开销较

小而更适于md-DAN的工程实践<sup>[3]</sup>。

综合以上考虑,我们将在下行md-DAN场景中、在非理想的CSIT下,对基于虚拟小区模式的高能效协同波束成形问题进行研究。该问题根据改进的MRT方案而进行设计,通过多虚拟小区协同优化波束成形向量的权重值,高能效地实现虚拟小区间干扰的协同抑制,以获取最大化的能效性能。对于该非凸的优化问题,我们相继采用连续Taylor展开和Dinkelbach方法给出一种迭代解决方案。经仿真验证,该方案在不同网络部署密集程度下均可明显提高md-DAN的能效。

## 1 系统模型

在图1所示的下行md-DAN系统场景中, $M$ 个DAU在系统覆盖范围内随机分散地放置,所有DAU通过光纤等高速传输链路与系统的中心处理单元相连,以支持对信号的协同处理。该下行md-DAN系统共服务 $K$ 个单天线的用户(各用户以 $k \in K = \{1, \dots, K\}$ 标记),系统以用户为中心被划分成 $K$ 个虚拟小区(各虚拟小区也以 $k \in K$ 标记),假设用户 $k$ 就近选取 $N_k$ 个DAU(以 $N_k = \{1, \dots, N_k\}$ 标记)以形成为他提供服务的虚拟小区 $k$ 。

考虑包含大小尺度衰落的复合衰落信道模型<sup>[5]</sup>,则从虚拟小区 $j$ 的各DAU到用户 $k$ 的信道向量

$$h_{j,k} = \left[ h_{j,k}^{(1)}, \dots, h_{j,k}^{(N_j)} \right]^T \in \mathbb{C}^{N_j \times 1} \text{ 的各元素可}$$

表示成  $h_{j,k}^{(n)} = l_{j,k}^{(n)} s_{j,k}^{(n)}$ ,  $j, k \in K$ ,  $n \in N_j$ , 其

中  $l_{j,k}^{(n)}$  代表由路径损耗和阴影衰落两种因素构成的大尺度衰落,  $s_{j,k}^{(n)}$  则代表瑞利分布的小尺度衰落。我们考虑的非理想CSIT条件的详情为:在各虚拟小区内,可获知包含大尺度

CSIT信息  $\{l_{k,k}^{(n)} | k \in K, n \in N_k\}$  和小尺度CSIT信息  $\{s_{k,k}^{(n)} | k \in K, n \in N_k\}$  这两者的完

整CSIT信息  $\{h_{k,k}^{(n)} | k \in K, n \in N_k\}$ ,而在虚拟小区之间,仅可获知大尺度CSIT信息  $\{l_{j,k}^{(n)} | j \neq k, j, k \in K, n \in N_j\}$ 。

可将用户 $k$ 的接收信号如公式(1)来表示:

$$y_k = h_{k,k}^T v_k x_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K h_{j,k}^T v_j x_j + n_k \quad (1)$$

其中,  $x_j$  为发送给用户 $j$ 的数据符号,  $n_k$  为用户 $k$ 端的具有方差  $\sigma_k^2$  的复高斯噪声,  $v_k$  为对用户 $j$ 的发送波束成形向量。在md-DAN系统各虚拟小区内的完整CSIT信息

$\{h_{k,k}^{(n)} | k \in K, n \in N_k\}$  下,依据MRT方案设

计发送波束成形向量能够获取各虚拟小区内的较高性能<sup>[10]</sup>。为此,可参考MRT方案并进行改进,将波束成形向量  $v_k$  设计成

$$v_k = \left[ \sqrt{w_k^{(1)}} h_{k,k}^{(1)*}, \dots, \sqrt{w_k^{(N_k)}} h_{k,k}^{(N_k)*} \right]^T, k \in K, \text{ 其}$$

中  $\{w_k^{(1)}, \dots, w_k^{(N_k)}\}$  为波束成形向量  $v_k$  的

正实数的可调节的权重值。可以看出:一方面,该基于改进MRT的波束成形方案,承继了传统MRT方案能将虚拟小区内各DAU的发送信号进行相位对齐的优点;另一方面,该波束成形方案还通过引入可调权重值进行方案设计改进,从而更进一步地提供了一个对各虚拟小区之间的干扰功率进行调节优化的机会。

## 2 高能效协同波束成形问题描述

标记md-DAN系统的各波束成形向量的权重值为  $w = \left[ w_1^{(1)}, \dots, w_1^{(N_1)}, \dots, w_K^{(1)}, \dots, w_K^{(N_K)} \right]$ 。那么,在系统的非理想CSIT条件(包含虚拟小区内的完整CSIT和虚拟小区间的大尺度CSIT)下,可通过对系统未知的虚拟小区间的小尺度CSIT取期望,求得各用户 $k$ 受到的干扰功率

为  $z_k^2(w) = \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{n=1}^{N_j} w_j^{(n)} \left( l_{j,k}^{(n)} \right)^2 \left| h_{j,k}^{(n)} \right|^2$ 。由此,我们还可推导出系统的一个可达和速率:

$$C(w) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{\left( \sum_{n=1}^{N_k} \sqrt{w_k^{(n)}} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 \right)^2}{z_k^2(w) + \sigma_k^2} \right) \quad (2)$$

进一步地,将系统能效  $U_{EE}(w)$  定义为系统和速率除以系统总功耗<sup>[11]</sup>,则高能效协同波束成形方案的优化问题如公式(3)所示。该问题仅根据虚拟小区间的大尺度 CSIT 信息,通过多虚拟小区协同优化波束成形向量的权重值  $w$ ,高能效地实现虚拟小区间干扰的协同抑制,以获取最大化的能效性能。

$$\begin{aligned} \max_w U_{EE}(w) &= \frac{C(w)}{\rho \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 + P_C} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 &\leq P_k^{\max}, \forall k \\ w_k^{(n)} &\geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\rho = \frac{\tau}{\eta}$ ,  $\eta$  和  $\tau$  分别为射频功放效率和峰均比,而  $P_C$  为系统的电路功耗参数<sup>[11]</sup>,  $P_k^{\max}$  为  $w$  满足的向用户  $k$  的总发送功率约束。虚拟小区间干扰导致的  $U_{EE}(w)$  分子  $C(w)$  的非凸性,以及  $U_{EE}(w)$  的分式结构等原因,使得公式(3)为求解困难的非凸优化问题<sup>[11]</sup>。

### 3 高能效协同波束成形问题求解

把  $U_{EE}(w)$  非凸的分子部分  $C(w)$  进一步写成两个凸函数相减形式  $\alpha(w) - \beta(w)$ , 其中:

$$\begin{aligned} \alpha(w) &= \sum_{k=1}^K \log_2 \left( \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^4 + \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{n=1}^{N_j} w_j^{(n)} \left( l_{j,k}^{(n)} \right)^2 \left| h_{j,k}^{(n)} \right|^2 + \right. \\ &\quad \left. \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{m=1, m \neq n}^{N_k} \sqrt{w_k^{(n)} w_k^{(m)}} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 \left| h_{k,k}^{(m)} \right|^2 + \sigma_k^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\beta(w) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{n=1}^{N_j} w_j^{(n)} \left( l_{j,k}^{(n)} \right)^2 \left| h_{j,k}^{(n)} \right|^2 + \sigma_k^2 \right) \quad (5)$$

若可以把  $U_{EE}(w)$  分子部分转换成  $w$  的凸函数,则能把  $U_{EE}(w)$  转换成求解难度降低的  $w$  的拟凸函数<sup>[12]</sup>。为达成此点,在连续凸近似<sup>[13]</sup>思想指导下,我们采用连续 Taylor 展开<sup>[16]</sup>使得  $\beta(w)$  线性化,从而把  $U_{EE}(w)$  分子转换成  $w$  的凸函数。

那么,给定公式(3)中问题的可行域中某一点  $\bar{w} = [\bar{w}_1^{(1)}, \dots, \bar{w}_1^{(N_1)}, \dots, \bar{w}_K^{(1)}, \dots, \bar{w}_K^{(N_K)}]$ , 把  $\beta(w)$  在  $\bar{w}$  处一阶 Taylor 展开成线性的  $\hat{\beta}(w|\bar{w})$  如公式(6):

$$\hat{\beta}(w|\bar{w}) = \beta(\bar{w}) + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{n=1}^{N_j} d_{k,j}^{(n)}(\bar{w}) (w_j^{(n)} - \bar{w}_j^{(n)}) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} d_{k,j}^{(n)}(w) = \frac{\log_2(e) \left( l_{j,k}^{(n)} \right)^2 \left| h_{j,k}^{(n)} \right|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{n=1}^{N_j} w_j^{(n)} \left( l_{j,k}^{(n)} \right)^2 \left| h_{j,k}^{(n)} \right|^2 + \sigma_k^2} & \text{当 } j \neq k \text{ 且 } j, k \in K \\ d_{k,j}^{(n)}(w) = 0 & \text{当 } j = k \text{ 且 } j, k \in K \end{cases} \quad (7)$$

由线性函数  $\hat{\beta}(w|\bar{w})$  取代  $\beta(w)$ , 则能把  $U_{EE}(w)$  分子部分转换成凸函数,进而  $U_{EE}(w)$  也能够连续近似成  $w$  的拟凸函数

$$\hat{U}_{EE}(w|\bar{w}) = \frac{\alpha(w) - \hat{\beta}(w|\bar{w})}{\rho \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 + P_C} \quad \text{。然后}$$

在此基础上,公式(3)中问题可进一步通过 Dinkelbach 方法<sup>[12]</sup>转换成公式(8)所示的凸优化问题迭代解决:

$$\begin{aligned} \max_w \quad & \psi(w|\bar{w}, \xi) = \alpha(w) - \hat{\beta}(w|\bar{w}) - \\ & \xi \rho \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 - \xi P_C \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 \leq P_k^{\max}, \forall k \\ & w_k^{(n)} \geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\xi$  为 Dinkelbach 方法引入的中间参变量。

综上所述,最后我们可以提出一种迭代解决本文高能效协同波束成形问题的算法。相应地,每次循环迭

代中(用上标  $t$ 、 $s$  标记外、内循环迭代的序号)只要解决公式(9)所示的凸优化问题:

$$\begin{aligned} F(\xi) &= \max_w \psi(w|w^{(t-1,s-1)}, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^{N_k} w_k^{(n)} \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2 \leq P_k^{\max}, \forall k \\ & w_k^{(n)} \geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (9)$$

算法详细如下:

(1) 进行外循环初始化。将外循环迭代门限预设为  $\delta_o$ , 权重值的初值  $w^{(0)}$  为:

$$w^{(0)} = \left[ \left( w_1^{(1)} \right)^{(0)}, \dots, \left( w_1^{(N_1)} \right)^{(0)}, \dots, \left( w_K^{(1)} \right)^{(0)}, \dots, \left( w_K^{(N_K)} \right)^{(0)} \right],$$

将  $w^{(0)}$  的各元素  $\left( w_k^{(n)} \right)^{(0)} = \frac{P_k^{\max}}{N_k \left| h_{k,k}^{(n)} \right|^2}$ ,

$k \in K, n \in N_k$ 。

(2) 外循环迭代第  $t$  次,  $t=1, 2, \dots$ 。对该次外循环过程中的内循环初始化为: 设  $w^{(t-1,0)} = w^{(t-1)}$ , 设  $\xi=0$ , 将内循环迭代门限预设为  $\delta_i$ 。

(3) 内循环迭代第  $s$  次,  $s=1, 2, \dots$ 。对公式(9)中凸优化问题进行解决, 得到  $w$  优化解为  $w^{(t-1,s)}$ 、目标值为  $F(\xi)$ 。将  $\xi$  更新为  $\xi = \hat{U}_{EE}(w^{(t-1,s)}|w^{(t-1)})$ 。

(4) 如  $F(\xi) < \delta_i$ , 将  $w^{(i)} = w^{(t-1,s)}$ , 退出内循环并转至(5)。否则, 则退至(3)。

$$(5) \text{ 如 } \frac{U_{EE}(w^{(i)}) - U_{EE}(w^{(t-1)})}{U_{EE}(w^{(t-1)})} < \delta_o, \quad \text{退出外循环并终结该算法。否则, 退至(2)。}$$

依据文献[6,12]所论证, 算法收敛性可获有效保证。

### 4 性能仿真

性能仿真时, 考虑 md-DAN 系统覆盖以 1 400 m 为半径的区域, 系统同时服务的用户数(也即虚拟小区的数量)  $K=7$ 。为研究不同的网络部署密集程度时本文方案的性能, 考虑

两种网络部署情形分别对系统 DAU 总数  $M$  和各虚拟小区 DAU 数量  $N_k$  进行仿真参数设置: 部署情形 1 为  $M=28$ 、 $N_k=4$ , 部署情形 2 为  $M=56$ 、 $N_k=8$ , 情形 2 的部署密集程度较情形 1 更高。此外, 仿真时将路损指数取 4, 阴影标准差取 8 dB, 噪声的  $\sigma_k^2$  取  $-107$  dBm, 射频功放效率  $\eta$  取 0.35, 峰均比  $\tau$  取 12 dB, 电路功耗参数  $P_c$  取 30 dBm<sup>[9,11]</sup>。性能仿真采取的参考方案如下: 文献[9]的无虚拟小区间协同的高能效波束成形方案、BT 方案以及 ST 方案。

系统在不同的网络部署密集程度下的能效分别见图 2 和图 3, 由其可知本文方案的能效都表现最佳, 且随着发送功率增加, 其能效优势更加突出。原因在于本文方案充分利用非理想 CSIT 而高效地实现了多虚拟小区间干扰的协同抑制。此外, 系统在不同的网络部署密集程度下的频谱效率分别见图 4 和图 5, 由其可知本文方案在频谱效率方面也表现颇佳。

## 5 结束语

在作为未来 5G 关键技术之一的超密集网络中, 需要进行高能效协同的网络设计。为此, 我们在下行 md-DAN 场景中、在非理想 CSIT (包含虚拟小区内完整 CSIT 和虚拟小区间大尺度 CSIT) 条件下基于虚拟小区模式, 对系统的高能效协同波束成形问题展开研究。该问题根据改进的 MRT 方案而进行设计, 通过多虚拟小区之间协同优化波束成形向量的权重值, 高效地实现虚拟小区间干扰的协同抑制。对于非凸的优化问题, 我们相继采用连续 Taylor 展开和 Dinkelbach 方法给出了一种迭代的解决方案。仿真验证说明, 该方案在不同网络部署密集程度下都可以明显提高 md-DAN 的能效。

### 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on

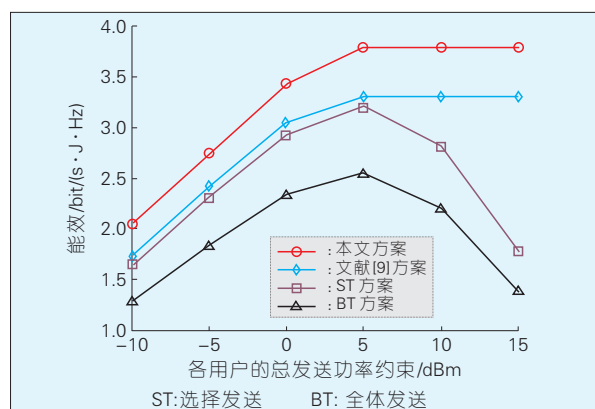


图 2  
系统能效 (部署情形 1)

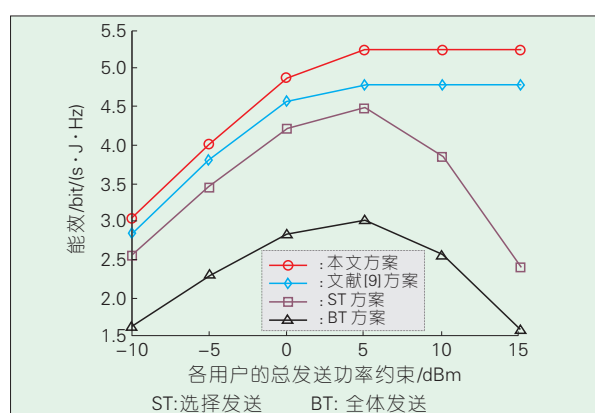


图 3  
系统能效 (部署情形 2)

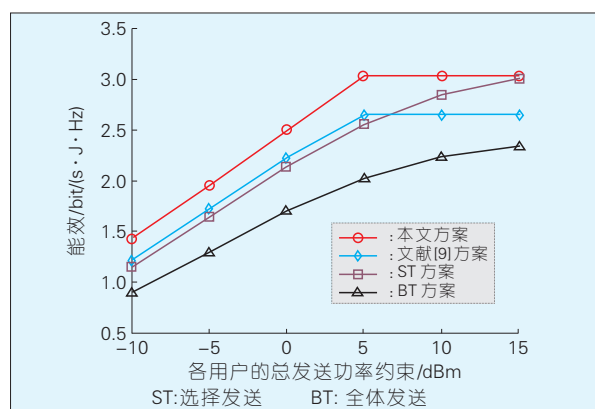


图 4  
系统频谱效率 (部署情形 1)

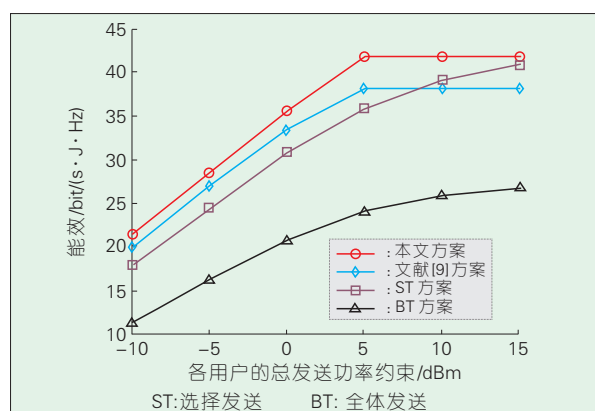


图 5  
系统频谱效率 (部署情形 2)

- Selected Areas in Communications, 2014, 32 (6): 1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] FENG W, CHEN Y, GE N, et al. Optimal Energy-Efficient Power Allocation for Distributed Antenna Systems with Imperfect CSI [Z]. USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/TVT.2015.2497140
- [3] FENG W, GE N, LU J. Hierarchical Transmission Optimization for Massively Dense Distributed Antenna Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(4): 673–676. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2401584
- [4] FENG W, CHEN Y, SHI R, et al. Exploiting Macro-Diversity in Massively Distributed Antenna Systems: A Controllable Coordination Perspective [Z]. USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/TVT.2015.2506720
- [5] WANG Y, FENG W, XIAO L, et al. Coordinated Multi-Cell Transmission for Distributed Antenna Systems with Partial CSIT [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 1044–1047. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.050912.120383
- [6] FENG W, WANG Y, GE N, et al. Virtual MIMO in Multi-Cell Distributed Antenna Systems: Coordinated Transmissions with Large-Scale CSIT [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31 (10): 2067–2081. DOI: 10.1109/JSAC.2013.131009
- [7] CHOI W, ANDREWS J G. Downlink Performance and Capacity of Distributed Antenna Systems in a Multicell Environment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 69–73. DOI: 10.1109/TWC.2007.05207
- [8] VENTURINO L, PRASAS N, WANG X. Coordinated Linear Beamforming in Downlink Multi-Cell Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1451–1461. DOI: 10.1109/TWC.2010.04.090553
- [9] KIM H, PARK E, PARK H, et al. Beamforming and Power Allocation Designs for Energy Efficiency Maximization in MISO Distributed Antenna systems [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2100–2103. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.100713.131715
- [10] ZHANG J, ANDREWS J G. Distributed Antenna Systems with Randomness [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3636–3646. DOI: 10.1109/TWC.2008.070425
- [11] WANG J, FENG W, CHEN Y, et al. Energy Efficient Power Allocation for Multi-Cell Distributed Antenna Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1): 177–180. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2498608
- [12] DINKELBACH W. On Nonlinear Fractional Programming [J]. Management Science, 1967, 13(7): 492–498
- [13] WANG T, VANDENDORPE L. Successive Convex Approximation Based Methods for Dynamic Spectrum Management [C]// 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, Canada: IEEE Press, 2012: 4061–4065. DOI: 10.1109/ICC.2012.6363727

## 作者简介



王璟,清华大学电子工程系博士研究生;主要研究方向为无线通信与网络;已发表论文4篇。



冯伟,清华大学电子工程系助理研究员;主要研究领域为无线通信与网络;已发表论文60余篇。



周世东,清华大学电子工程系教授、博士生导师;主要研究领域为无线移动通信和宽带无线传输技术,包括移动通信系统、分布式无线通信系统、无线信道传播特性、控制业务分离的柔性覆盖、无线资源管理与控制、高能效无线网络等;在3G和4G移动通信系统研究方面承担和参加多项国家级课题。

## 综合信息

## 2025年全球5G服务收入有望达到2 470亿美元

据市场研究公司 ABI Research 发布的统计数据显示,2025年5G服务将为移动宽带运营商带来2 470亿美元的收入。

ABI Research 认为,北美、亚太以及西欧将是全球领先的5G市场,2021年全球5G移动用户将达到1.5亿。目前,全球运营商正在积极推进5G的研究和测试,Verizon Wireless(北美)、NTT DoCoMo(日本)、KT(韩国)以及SK Telecom(韩国)共同成立了5G公开试验规范联盟。在全球产业界的有力推动下,5G有望成为快速增长的蜂窝移动技术。

报告同时指出,5G基础设施建设者以及移动运营商目前仍然面临几大关键问题,包括频谱分散、标准制定、覆盖范围、移动设备可用性以及资本支出/运营支出等。开发出能确保5G盈利的应用也将会成为电信基础设施供应商和移动运营商面临的最重要挑战。

与LTE不同,5G企业都希望努力实现频谱协同;而与LTE类似,5G也拥有未授权频谱以及频谱共享的相关计划。

(转载自《中国信息产业网》)

## IEEE发布首个车载以太网标准 每端口提供100 Mbit/s带宽

IEEE批准了第一个车载以太网标准,以适应汽车市场的需求。IEEE称,高级驾驶辅助系统和信息娱乐系统等主流车载应用程序的兴起,助推了对低成本和高性能带宽服务的需求。

高级驾驶辅助系统,利用安装在车上的各式各样传感器,在汽车行驶过程中可随时感应周围的环境,收集数据,进行静态和动态物体的辨识、侦测与追踪,并结合导航仪地图数据进行系统的运算与分析,预先让驾驶者察觉到可能的危险,有效增加汽车驾驶的舒适性和安全性。

车载信息娱乐系统是指能够实现包括三维导航、实时路况、IPTV、辅助驾驶、故障检测、车辆信息、车身控制、移动办公、无线通信、基于在线的娱乐功能及TSP服务等一系列应用,可极大地提升车辆电子化、网络化和智能化水平。IEEE最新定义的车载以太网标准802.3bw名为“100BASE-T1”,用一对双绞线可以提供100 Mbit/s以太网。

(转载自《C114中国通信网》)

# 5G 环境下系统级仿真建模与关键技术评估

## System Simulation Modeling and Key Technology Evaluation in 5G

李凯/LI Kai<sup>1</sup>

徐景/XU Jing<sup>2</sup>

杨旸/YANG Yang<sup>2</sup>

(1. 上海无线通信研究中心, 上海 201210;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(1. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 201210, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

计算机仿真在移动通信系统的技术研究和标准开发中是评估系统性能的一个非常强大的工具。现代无线通信系统是一个异常复杂的系统,其复杂性体现在应用场景、网络结构等多个方面。第5代移动通信(5G)的候选技术更丰富,应用场景更复杂。

5G 软件仿真测试系统的设计和开发是在早期技术的基础上继承和发展的,早期仿真平台对 5G 软件仿真的搭建有重要的参考价值。同时,由于 5G 系统将引入更多新功能和新技术,需要深入分析各种候选技术的特征和实现方案,才能高效设计和实现 5G 软件仿真系统。一个完整的仿真系统组成,如图 1 所示。

### 1 5G 系统仿真场景

#### 1.1 5G 系统仿真假定

5G 移动通信系统需要满足更加

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0041-006

**摘要:** 根据 5G 关键技术特征给出了 5G 系统仿真场景,并提出了一种基于 5G 系统仿真平台的仿真建模及实现方法。运用动态仿真建模、计算资源虚拟化管理、多核并行仿真以及硬件加速仿真技术建设系统仿真平台,对 5G 候选关键技术进行评估,可以解决由于 5G 高复杂度及多变的仿真环境带来的部分问题,并能够提高仿真效率,增强 5G 系统仿真平台的扩展性。

**关键词:** 5G 候选关键技术; 仿真建模; 评估指标; 系统仿真平台

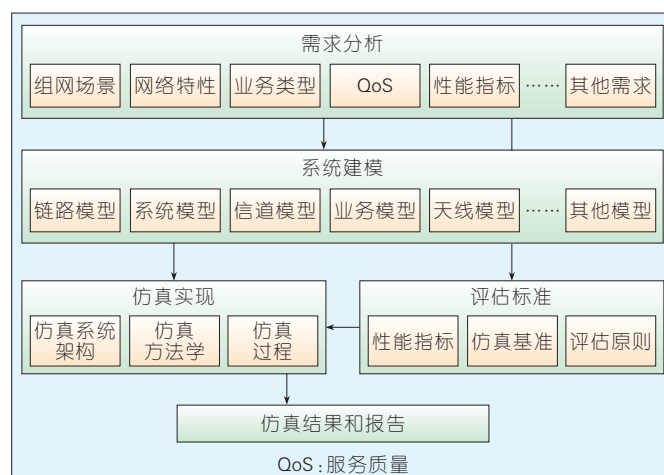
**Abstract:** In this paper, 5G system simulation scenarios based on the features of 5G key technology is introduced, and a simulation modeling and realization method of 5G system simulation platform is presented. By using dynamic simulation modeling, computing resources virtualization management, multi-core parallel simulation and hardware accelerated simulation technology in the system simulation platform construction and 5G key technology evaluation, part of problems bringing by 5G high complex and changeable simulation environment can be solved, and the simulation efficiency can be improved, meanwhile, the scalability of 5G system simulation platform can be enhanced.

**Key words:** 5G candidate key technology; simulation modeling; evaluation index; system simulation platform

多样化的场景和极致的性能挑战。面对多样化的应用场景,5G 的帧结

构参数可灵活配置,以服务不同类型的业务。针对不同频段、场景和信道

图 1  
仿真系统的组成和  
实施过程



收稿时间: 2016-02-18  
网络出版时间: 2016-04-25

环境,可以选择不同的参数配置,具体包括带宽、载波频率等,参考信号和控制信道也可灵活配置以支持大规模天线、新型多址等新技术的应用,按需选取最优技术组合及参数配置。下面我们将分别介绍大规模技术和超密集网络(UDN)技术条件下的系统仿真基线参数配置。

### (1) 大规模天线部署

在大规模天线部署条件下仿真场景集中表示于表1中。针对大规模多输入多输出(MIMO)下的3种仿真场景我们给出了系统仿真相关基线参数,如表2所示<sup>[1]</sup>。

### (2) 超密集网络部署

超密集网络(UDN)是5G核心技术之一。我们对UDN的仿真评估也给出了仿真场景及相关基线参数,如表3所示。

## 1.2 5G 系统性能评估指标

5G网络相对于4G网络不仅仅是“量”的变化,比如容量、速率的变化,还包括其“质”的变化,包括虚拟化、可定义等网络基本特征的变化。原有业务模型下的平均用户吞吐率、边缘用户频谱效率等之外,连接数密度、流量密度等是5G网络新引入的关键业绩指标(KPI)指标。随着5G技术研究的不断深入,可以预见还会出现新的评估指标。对这些可直接度量的指标的设计一方面需要结合新业务的特点,另一方面需要充分借鉴以往KPI指标经验。我们将从以下几个方面介绍无线性能评估指标:

### (1) 无线覆盖性能 KPI 指标

无线覆盖性能的KPI指标主要有参考信号接收功率(RSRP)、信干噪比(RS-SINR)、Geometry(G)以及累积分布函数(CDF)统计。

RSRP是代表无线信号强度的关键参数,是在某个符号内承载参考信号的所有资源元素(RE)上接收到的信号功率的线性平均值<sup>[4]</sup>;RS-SINR定义为 $RS\_SINR = \frac{RSRP}{RS\_RSSI - RSRP}$ ,

▼表1 仿真场景配置参数

仿真场景	3D-UMi	3D-UMa
站间距/m	200	500/200
UE 移动性/(km/h)	3	
UE 数量(全缓冲业务)	10/15/30	
eNB 高度/m	10	25
UE 和 eNB 间最小距离/m	10	35
NB:基站 UE:用户设备 UMa:城市宏小区 UMi:城市微小区		

▼表2 系统仿真基线参数

参数	仿真假设
信道模型	3D UMa ISD 500/200 3D UMi ISD 200
带宽/MHz	10
载波/GHz	2
发射功率/dBm	3D UMi: 41/44 (10/20 MHz) 3D UMa (ISD 500): 46/49 (10/20 MHz) 3D UMa (ISD 200): 41/44 (10/20 MHz)
天线配置	发射器: 64Tx(M, N, P, Q=8, 4, 2, Q) Q=8, 16, 32, 64 128 天线(M, N, P, Q=8, 8, 2) 接收器: 2Tx(M, N, P=1, 1, 2)
反馈方案	Rel-12 增强 CSI 反馈、PUSCH 模式 3-2、理想信道协方差 R、PMI 反馈
调度方式	比例公平
HARQ	跟踪合并
最大重传数	4
业务模型	● FTP1, RU=70%/50%(必选), 20%(可选); ● 全缓冲
CSI: 信道状态信息 FTP: 文件传输协议	HARQ: 混合自动重传请求 ISD: 站间距 PMI: 预编码矩阵指示 RU: 资源单元 UMa: 城市宏小区 UMi: 城市微小区

▼表3 UDN 系统仿真基线参数

仿真场景	办公室	密集住宅	密集街区	大型集会	公寓
站间距/m	宏基站: 500 小基站: 20~100				
载波频率/GHz	宏基站: 2.0 小基站: 3.5(优先)或 2.0				
带宽/MHz	宏基站: 20 小基站: 10/20/40/100				
信道模型	ITU InH	宏基站: 3D UMa 小基站: 3D UMi	室外: ITU UMa、 ITU UMi 室内: ITU InH	宏基站: 3D UMa 小基站: 3D UMi	ITU InH
穿透损耗	2 GHz 室内 UE: 20 dB+0.5 din 不同层间穿透: 18.3n((n+2)/(n+1)-0.46) dB 3.5 GHz 室内 UE: 23 dB+0.5 din 室外 UE: 0 dB 内墙损耗: 5 dB				
业务模型	第 1 次评估 full buffer 业务;第 2 次评估 FTP, 视频流业务(单业务 FTP, 文件大小 0.5 或 2 Mbytes);第 3 次评估混合业务、FTP 和视频流混合				
FTP: 文件传输协议	InH: 室内热点	ITU: 国际电信联盟	UMa: 城市宏小区	UMi: 城市微小区	

RS\_RSSI代表所有基站的总接收信号强度; Geometry(G)定义为

$$G = \frac{\hat{I}_{or1}}{I_{oc}} = \frac{\hat{I}_{or1}}{\sum_{j=2}^{N_g} \hat{I}_{orj} + N}, \quad \hat{I}_{orj} \text{ 为第 } j \text{ 个基站的}$$

平均接收功率( $\hat{I}_{or1}$  为服务小区),  $N$  为噪声功率,  $N_g$  为干扰基站的数目。

### (2) 容量性能 KPI 指标

容量性能主要从整网和用户两方面评估: 整网容量 KPI 考虑连接数

密度和流量密度,而用户容量 KPI 则考虑单终端业务量。连接数密度是指单位面积的平均终端数,单位为终端数/km<sup>2</sup>;流量密度是指单位面积的平均业务量,单位为 bps/km<sup>2</sup>;单终端业务量是指每终端每月的平均业务量,单位为 byte/month/device。

### (3) 速率性能 KPI 指标

用户体验最直接的 KPI 指标是用户速率,我们需要区分下载速率 (DL) 和上传速率 (UL),用户速率评估 KPI 主要采用:平均、5%、50%、95% 用户吞吐率,以及 CDF 统计<sup>[2-4]</sup>。

### (4) 移动性能指标

对于移动状态的用户,在移动过程中业务连续、稳定是基本要求,移动性能评估 KPI 一般采用无线链路失败率、切换失败率、乒乓切换率等,可以参考文献[5]。

### (5) 时延性能指标

时延性能指标主要有往返时间 (RTT) 时延 (用  $T_{RTT}$  表示) 和单程时间 (OTT) 时延 (用  $T_{OTT}$  表示)<sup>[6]</sup>。RTT 时延定义为  $T_{RTT}=T_{A1}-T_{S1}$ , OTT 时延定义为  $T_{OTT}=T_{A2}-T_{S1}$ , 其中  $T_{S1}$  为设备 1 发送数据包的起始时间,  $T_{A2}$  为设备 2 收到设备 1 数据包的时间,设备 2 收到数据包后将会发送反馈消息,  $T_{A1}$  则为设备 1 收到设备 2 发送的反馈消息的时间。

### (6) 能耗性能指标

能耗是衡量网络能量效应的 KPI,能效有两种定义方式,如公式 (1)<sup>[6]</sup>所示:

$$\lambda_I = \frac{E}{I} = \frac{P}{R} \ln[J/bit] \text{ or } [W/bps] \quad (1)$$

$$\lambda_A = \frac{P}{A} \ln[W/m^2]$$

其中,  $E$  为给定评估时间内对应功率  $P$  消耗的能量,  $I$  为对应传输速率  $R$  的消息容量,  $A$  为覆盖面积。

## 2 5G 关键仿真技术

本节重点阐述了 5G 系统仿真软件在平台架构设计及系统仿真过程中运用的关键技术,利用这些关键技术有效提高仿真效率,满足 5G 仿真

需求。

### 2.1 动态仿真建模技术

5G 技术带来了更加复杂的组网场景和业务类型,也增加了各类新技术。传统的采用针对特定场景编码实现的仿真设计模式效率很低,远远不能满足日益增长的仿真需求,必须采用高复用的建模技术,因此提出了动态仿真建模技术。

动态仿真建模技术的核心思想是对网络分层和建模,将各层次的仿真对象模型进行组件化设计<sup>[7]</sup>,同时基于仿真场景、业务模型映射得到仿真模型组件和仿真参数,再通过动态配置的方法组合成为具体的仿真流程。由于仿真对象模型设计实现了组件化,主要的仿真设计实现能够得到充分复用,一方面提升了仿真设计和开发效率,另一方面也提升了仿真平台的可扩展能力。

动态仿真建模技术包含两项关键技术:功能库和参数库的生成;动态分析和配置机制。

#### (1) 功能库和参数库的生成

输出仿真平台的基本功能模块,根据仿真需求进行建模,抽象分解出公共库和特性库两类,通过智能接口实现功能的配合实用,同时满足功能的可扩展性。将功能库和参数库分开设计的目的也是为了保证模型适应于不同的仿真场景和仿真需求,做到充分的解耦。

#### (2) 动态分析和配置机制

在仿真运行过程中提供分析和配置机制,参与仿真的全过程。包括对仿真需求进行分解,并映射到不同的功能库和参数库,再根据仿真的具体要求配置生成仿真流程。

根据仿真需求分解出对应的仿真模型,例如,软件定义网络 (SDN) 技术要求控制面和用户面分离,网络功能虚拟化 (NFV) 要求网络功能从专用硬件设备中解耦出来,UDN 中提出的虚拟小区概念等。

根据模型生成仿真参数库,包括

系统规格、场景参数、各项技术的配置参数等。以仿真模型为中心,基于仿真模型建立组网场景、网络功能的参数化模板,通过合理组合这些参数化模板减少参数库的复杂度。

根据模型映射到对应的功能库。功能库可以通过灵活的接口设计实现解耦和可扩展,根据仿真需求将映射的功能库和参数库有机的组织成为一个完整的仿真流程。将参数库、功能库、仿真流程进行动态配置形成具体的仿真任务,仿真任务直接面向用户,需要提供友好的配置管理界面。

由以上分析可以看出:实现动态仿真建模的关键点在于模型、库组件和参数的设计,通过运用分层、封装、接口解耦等方面的设计解决概念模型和实现模型之间的耦合,才能达到技术变化对实现影响最小的目的。

### 2.2 计算资源虚拟化管理技术

当前提升仿真计算效率的主要手段是计算并行化,由于计算资源可以分布在不同的物理设备上,如何合理配置管理资源就成为核心问题。因此,我们提出了计算资源虚拟化管理技术。

资源虚拟化管理首先将仿真需求映射为可单独部署的计算任务,基于这些计算任务再分解为可单独部署的并行子任务,根据其特点配置相应的虚拟资源,部署在本地的并行计算任务需要分配计算资源、存储资源,部署在从节点上的计算任务还需分配足够的通信资源,以避免数据无法及时传输造成延时。

将各类硬件资源虚拟化为计算、存储和通信 3 类虚拟资源,并将虚拟资源动态绑定给计算任务,仿真子任务所需要的虚拟资源需要提前评估,不同仿真子任务有不同需求,可通过仿真代码静态分析以及运行时统计等手段分析得到,并根据仿真目标确定各个仿真子任务的资源需求。

随着底层软件以及硬件平台的

不断发展,可用的并行虚拟化技术较为丰富<sup>[8]</sup>,比如 MATLAB 提供的 parfor、单程序多任务 (SPMD)、MATLAB 分布式计算引擎 (MDCE) 等并行工具,以及适用于多种开发语言的消息传递接口 (MPI)、OpenMP 等并行编程机制。对于具体的仿真实现来说,不但需要底层的并行技术手段,还需要仿真应用程序也实现并行化设计。仿真应用程序的并行化设计很难给出通用方法,需结合业务特点专门设计并行算法,也是实现仿真系统并行虚拟化的关键路径。

### 2.3 多核并行仿真技术

仿真软件的并行化是仿真平台多核并行设计的关键,能利用现有硬件资源达到最优效果。根据需求先从功能、算法、操作对象等角度将仿真软件并行化分解;其次通过对仿真功能模块的合理划分设计,减少并行子任务的通信数据量,保证各个并行子任务之间的运算量相当,减少因任务同步处理所需的等待时间。

中央处理器 (CPU)+图形处理器 (GPU) 的异构方案作为多核 CPU 并行处理的演变方案,也为提升仿真计算的速度提供了可能<sup>[9]</sup>。CPU 擅长复

杂逻辑运算,而 GPU 往往拥有上百个流处理器核心,其设计目标是以大量线程实现面向大吞吐量的数据并行计算,其单精度浮点计算能力可达同期 CPU 的 10 倍以上,适合处理大规模数据并行计算。因此,采用 CPU+GPU 的异构并行架构,利用多核 CPU 并行执行复杂的逻辑计算,利用 GPU 处理数据并行任务,两者协同工作,发挥计算机并行处理能力。

图 2(a) 中给出了一个典型的异构多核架构,可以看出在多核 CPU 端使用 OpenMP,而在 GPU 使用计算统一设备结构 (CUDA) 进行处理,任务的划分则由程序和操作系统层面指定。两部分均采用外设部件互连标准 (PCI-E) 总线进行互联。

多核 CPU-GPU 异构平台具有任务级和数据级多个层次的并行执行能力,在进行负载分配时要将这些计算能力充分利用起来,可以考虑如图 2(b) 所示的仿真模型结构。

### 2.4 硬件加速仿真技术

硬件加速仿真技术使用硬件模块来替代软件模块以充分利用硬件所固有的快速特性。通常采用计算能力和逻辑处理能力都非常强的

性能现场可编程门阵列 (FPGA) 板卡。硬件加速仿真技术的主要分为 3 个方面:

(1) 基于 FPGA 的高性能硬件加速关键技术研究,包括:高速并行处理、软硬件仿真任务分块及映射、高精度信号处理;

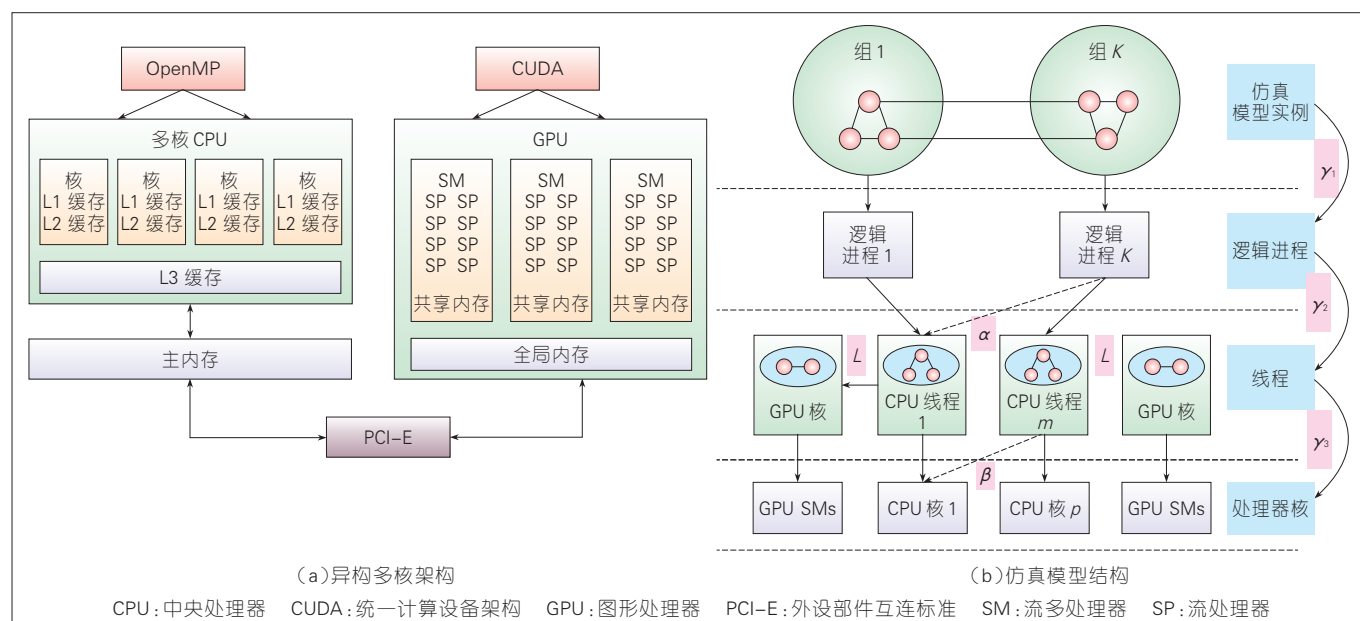
(2) 硬件加速和软仿真平台相结合的接口及中间件设计,包括基于 C 仿真代码的适配、接口层的中间件设计、可重配置计算的设计;

(3) 可重配置的 FPGA 硬件加速卡设计,包括高速 PCI-E 接口设计、高速 USB 3.0 接口与主机的数据交互。

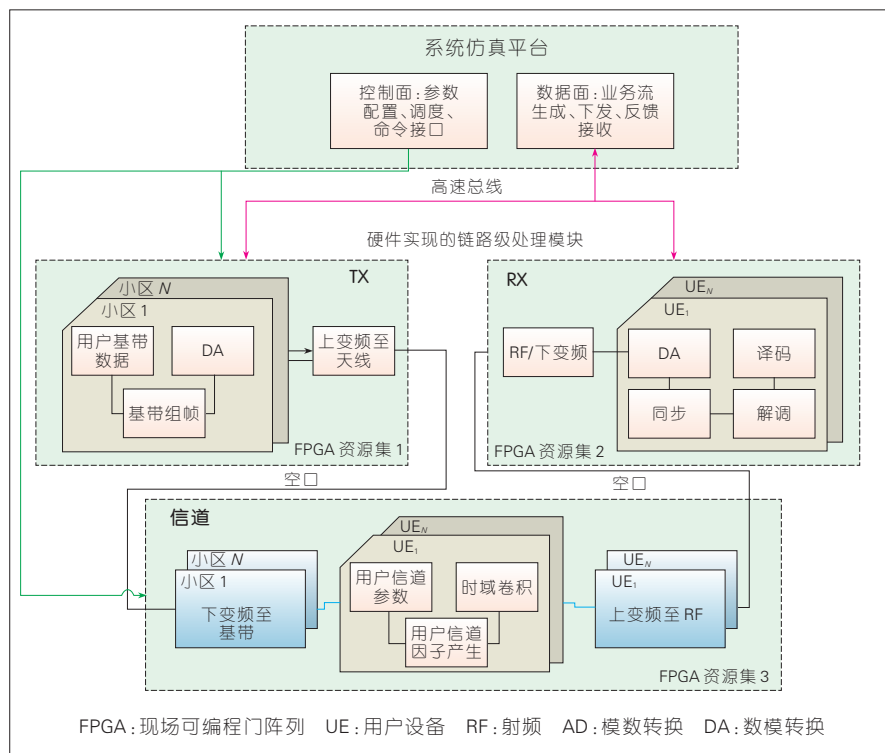
如图 3 所示,在系统仿真平台中部分链路采用了硬件实现的链路。这种软硬件联合仿真方法能够充分发挥硬件的高速处理能力,使得部分链路的系统仿真性能接近实时级别,结合系统仿真平台较为完善的系统功能,就能够更为真实地仿真对系统传输时延等一系列指标要求很高的系统应用场景。

## 3 5G 候选关键技术评估

本节以 5G 关键技术大规模 MIMO (MU-MIMO) 为例,说明如何应用前述的各项关键技术完成 MU-



▲ 图 2 CPU+GPU 异构多核结构



▲图3 软硬件联合仿真的一种系统实现框架

MIMO技术在仿真系统中的设计和实现,以达到减少仿真计算复杂度、加速仿真计算速度的目的。

#### (1) 仿真参数说明

采用MU-MIMO模式,仿真长期演进(LTE)下行系统工作性能。基站发射天线数为128根,单小区内同时调度15个用户,构成MU-MIMO的信道矩阵。

#### (2) 仿真计算环境说明

硬件: GPU服务器XR-4802GK4,其中CPU配置为2颗Intel Xeon Ivy Bridge E5(3.0 G,单颗10核,20线程),GPU配置为8片TESLA K20;

软件: MATLAB R2014a。

#### (3) 计算量分析

根据MU-MIMO特性可知,计算量主要分布在信道计算、预编码计算、接收SINR计算。设子载波数为 $N_c$ ,OFDM符号数为 $M$ ,基站天线数为 $N_t$ ,用户数(单天线)为 $N_r$ ,接收天线数为 $N_r$ ,系统内小区数为 $C$ 。

##### (a) 3D信道

仅以时域信道转为频域信道的

快速傅里叶变换(FFT)变换计算次数来分析,一个小区的3D信道FFT变换的数量约为 $M \times N_t \times N_r$ ,则在天线规模为下行 $128 \times 15$ 的情况下,相比4G天线规模为 $2 \times 1$ 的场景,计算量之比为960倍。

##### (b) 发射端预编码

根据仿真参数设置,发送端预编码方案为迫零算法,预编码矩阵计算如公式(2)所示:

$$W^{ZF} = H(H^H H)^{-1}, H \in \mathbb{C}^{N_{tx} \times N_r} \quad (2)$$

预编码的计算复杂度主要体现在矩阵的乘积和求逆两部分:在迫零算法条件下,第1部分是 $C \times N_c$ 次 $N_r \times N_r$ 维矩阵求逆;第2部分是 $C \times N_c$ 次 $N_t \times N_r$ 维矩阵和 $N_r \times N_r$ 维矩阵的乘法。一般各类矩阵计算的算法复杂度为 $O(n^3)$ ,计算量随天线数的3次幂增加。

##### (c) 信干噪比计算

根据MIMO信号模型,可以分析得到计算量的大致规模,如公式(3)所示:

$$y_{jm}^{dl} = \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{l=1}^L \sqrt{\lambda_l} h_{ljm}^H \sum_{k=1}^K W_{lk} X_{lk}^{dl} + n_{jm}^{dl} = \sqrt{\rho_{dl} \lambda_j} h_{jlm}^H W_{jm} X_{jm}^{dl} + \underbrace{\sqrt{\rho_{dl} \lambda_j} h_{jlm}^H \sum_{k=1, k \neq m}^K W_{jk} X_{jk}^{dl}}_{\text{intra-cell interference}} + \underbrace{\sqrt{\rho_{dl}} \sum_{l=1, l \neq j}^L \sqrt{\lambda_l} h_{ljm}^H \sum_{k=1}^K W_{lk} X_{lk}^{dl}}_{\text{inter-cell interference}} + n_{jm}^{dl} \quad (3)$$

计算一个小区的信号功率需要两次 $N_t$ 维向量乘法,乘法次数为 $2N_t+1$ ,计算干扰功率(含小区内和小区间干扰)需要 $C \times (2N_t+1)$ 次乘法,总乘法次数为 $(C+1) \times (2N_t+1)$ 。

从以上分析可知:MU-MIMO特性的计算量主要集中在信道计算、发射端预编码和接收信干噪比计算模块中,其中发射端预编码计算量随天线数的3次幂增长,是计算开销最大的模块,其次是信道计算,根据阿姆达尔定律,这两个模块也是计算加速最为关键的优化目标。

#### (4) 优化方案

根据不同的模块的特点,我们可以结合前面的关键技术制定加速优化方案。

##### (a) 信道计算

在给定仿真参数的条件下,无线链路信道系数和系统调度等行为无关,因此可以预先完成信道计算,并将计算结果保存在硬盘中,仿真系统初始化时可以直接读取信道矩阵,使用预先计算好的结果,省去信道计算时间,实际时间开销仅仅取决于读取内存的时间。

##### (b) 发射端预编码

发射端预编码主要涉及大矩阵的乘法和求逆计算,这部分计算可以充分利用CPU以及GPU的多核计算能力,在子载波层次进行并行计算。由每个GPU完成矩阵求逆和乘法计算,并行最大可以并行 $C \times N_c$ 路,在本测试样例中,可以并行 $57 \times 300 = 17100$ 路,在GPU核足够多的情况下,综合考虑传输带宽的影响,基本可以满足对发射端预编码的加速优化需求。在本测试样例中,由于仅采用了一台GPU服务器,计算资源有限,因此实际加速效果受限于硬件资源,在多台

组网、超算环境中可以进一步大幅提升加速效果。

#### (c) 信干噪比计算

此部分的计算主要是向量乘法运算,计算量相对信道计算、发射端预编码模块小得多,因此采用 CPU 加速即能够获得较好的效果。

#### (5) 仿真实测结果和分析

仿真实测结果如表 4、表 5 所示。根据不同模块的计算特点,采用的加速方案不同,其最终加速效果也不同。

▼表 4 MU-MIMO 在串行方案和并行方案下各个模块的计算时间开销

计算方案	1 个 TTI 的总时长/s	信干噪比计算/s	消息处理/s	预编码/s	其他模块(未并行优化)/s
串行	9 338.72	772.64	124.88	8 411.95	29.25
并行	153.92	50.8	4.12	66.03	/
TTI: 传输时间间隔		MU-MIMO: 大规模多输入多输出			

▼表 5 MU-MIMO 不同模块下的加速比

加速比实测结果	总加速比(串行/并行)/s	信干噪比计算/s	消息处理/s	预编码/s
加速比	60.67	15.2	30.31	127.4
MU-MIMO: 大规模多输入多输出				

信干噪比计算模块、消息处理模块采用了 CPU 并行计算方案,预编码模块采用了 CPU+GPU 的联合加速方案。从加速比来看,干扰模块的加速比要小于消息处理模块,其原因是干扰模块需要在并行计算任务之间传递大量数据,包括信号功率、信道配置、调度信息等数据,在数据传输上的时间开销要大于消息处理模块,对信干噪比计算模块进一步优化的手段,包括增加并行 CPU 核数、传输数据压缩、增加传输带宽(高速光纤传

输、反射内存技术等)等方案。预编码模块采用了 CPU+GPU 的联合加速方案,加速比可以达到 127 倍,由于受硬件资源的限制,这部分的加速效果远未达到上限。

## 4 结束语

由于 5G 技术的快速发展,仿真对象、场景和技术也在不断变化,仿真架构设计和评估方法也需要同步发展。文章从系统仿真场景、关键仿真技术及 5G 候选关键技术评估方面

介绍 5G 系统仿真评估,为 5G 候选关键技术的评估提供了参考解决方案,进而为 5G 网络架构设计和关键技术研发提供有效的支撑。

#### 参考文献

- [1] 3GPP. 3D channel model for LTE: 3GPP TR36.873 [S]
- [2] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: 3GPP TR36.814 [S]
- [3] 3GPP. Small Cell Enhancements for E-UTRA-Physical Layer Aspects: 3GPP TR36.872 [S]
- [4] 3GPP. Physical layer Measurements: 3GPP TS36.214 [S]
- [5] 3GPP. Mobility Enhancements in

Heterogeneous Networks: 3GPP TR36.839 [S]

- [6] Updated Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System with Recommendations for Future Investigations: METIS\_D1.5\_v1 [S]
- [7] PIRO G, GRIECO L A, BOGGIA G, et al. Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 60(2): 498-513. DOI: 10.1109/TVT.2010.2091660
- [8] DONGARRA J, FOSTER I, FOX G, et al. Sourcebook of Parallel Computing [M]. USA: Elsevier Science and Technology, 2003
- [9] BILELB R, NAVID N, BOUKSIAA M S M. Hybrid CPU-GPU Distributed Framework for Large Scale Mobile Networks Simulation[C]// 2012 IEEE/ACM 16th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, 2012. USA: IEEE: 44-53, 2012. DOI: 10.1109/DS-RT.2012.15

## 作者简介



李凯,上海无线通信研究中心工程师;主要研究方向为 5G 无线仿真系统设计和开发;发表论文 1 篇,已申请专利 3 项。



徐景,中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员;主要研究方向为无线网络性能统计建模及分析、5G(超密集无线网络)和软件定义无线网络;发表论文 30 篇,已申请专利 42 项,编著中文专著 1 本。



杨阳,中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员、学术委员会副主任,中科院无线传感网与通信重点实验室主任,中国通信学会“学术工作委员会”委员;主要研究方向为无线传感器网络(物联网)、新一代移动通信系统(4G/5G)、无线新技术测试验证平台等;发表论文 100 余篇,已申请专利 50 余项。

## 综合信息

### 400G 以太网标准工作组成立

在 2016 年 3 月 26 日举行的 IEEE802 全体会议上,802 执行委员会批准了 400G 以太网标准工作组成立,并随后将其命名为 P802.3bs,由 John D'Ambrosia 担任工作组主席,预计第一届工作组会议将于 2016 年 5 月在

美国弗吉尼亚州北部举行。

据 IEEE400G 以太网研究组预测,平均下来,到 2015 年网络必须支持 TB 每秒的能力,而到 2020 年必须支持 10 TB 每秒的能力,这一数字将可以达到 2010 年的 100 倍。(转载自《中国信息产业网》)

# 5G: 智能移动通信 1.0

## 5G: Intelligent Mobile Communications 1.0

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0047-002

**摘要:** 移动通信发展的下一阶段是智能化;即移动通信网络技术从蜂窝网络走向协同异构智能融合网络,移动通信无线传输技术从提高传输速率走向提高传输能力,并实现移动通信技术与智能计算、云存储、大数据、虚拟现实等信息技术的高度结合。5G 将启动标准化进程,开启移动通信智能化时代。5G 是智能移动通信的 1.0,移动通信智能化将持续几十年或更长。

**关键词:** 移动通信; 5G; 智能化

**Abstract:** The next stage of the development of mobile communications is intelligent. There are some changes in this stage, including collaborative heterogeneous intelligent fusion network is used instead of cellular network, transmission capacity improving has been paid more attention instead of transmission rate improving, and the highly combination of mobile communication technology and intelligent computing, cloud storage, big data, virtual reality is realized. 5G will start the process of standardization, and open the era of intelligent mobile communications. 5G is the intelligent mobile communications 1.0, and the intelligent process on mobile communications will last for decades or longer.

**Key words:** mobile communications; 5G; intelligent

李少谦/LI Shaoqian

(电子科技大学, 四川 成都 610054)  
(University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 610054,  
China)

- 新架构和新变革的核心是移动通信需从宽带化走向智能化
- 5G 网络将呈现出“一个逻辑架构、多种组网架构”的形态
- 移动通信智能化的进程仍将建立在个人化和宽带化的基础上,驱动力源于需求与技术双驱动

## 1 移动通信从个人化到宽带化

1978 年贝尔实验室发明了蜂窝移动通信系统,不到 40 年,移动通信从 1G 到 4G,从窄带到宽带,从话音通信走向移动互联网,深刻地改变了我们的生活和工作,改变了世界。

移动通信 40 年的发展可分为两个阶段:

(1) 1978—1996 年的 20 年,移动通信技术从 1G 到 2G,从模拟到数字,移动通信走向个人化、数字化、小型化、公众化,移动通信开始全球普及。这阶段可称为移动通信个人化

时代,它奠定了移动通信的基础技术和产业,1G、2G 建立的以集中控制为核心的蜂窝网络结构和以广域移动为核心的传输技术架构至今并没有大的改变。

(2) 1996 年以宽带化为特征的 3G 标准开始制订,开始了移动通信宽带化的进程,20 年来,移动通信技术从 3G 到 4G,传输速率大幅度提高,移动通信走向宽带化、多媒体化、IP 化、多层接入化,移动通信成为了移动互联网。这阶段可称为移动通信宽带化时代,这阶段技术发展目标明确,提高无线传输速率和频谱效率成为了 3G、4G 技术的核心目标,无线传输速率的提升成为了 3G、4G 划代的核心标志。

今天,我们开始了发展 5G 的进

程,5G 是新时代的开始还是老时代的延续? 何谓 5G? 5G 的标志又是什么?

## 2 移动通信将走进智能化时代

移动通信从语音的应用走向移动互联网应用,未来移动互联网应用要求新一代移动通信要有海量数据容量、更高信息传输速率、海量的连接、高能效、高可靠短时延等,要满足这样的需求,移动通信从网络到无线传输都需要大的变革。移动通信发展到 4G,无线传输速率和频谱效率得到极大的提高,已逼近香农极限,再大幅提升传输速率和频谱效率已很难,已无法满足未来的需求;蜂窝网络一体化的体系结构,也越来越难

收稿时间: 2016-03-26  
网络出版时间: 2016-04-25

以承载未来的需求,移动通信必须要建立新架构,开始新变革。

新架构和新变革的核心是移动通信需从宽带化走向智能化。

智能化就是移动通信网络技术从蜂窝网络走向协同异构智能融合网络,即以智能业务分流为目标,建立多种移动、无线接入与有线网的统一架构和新型结构,建立统一智能接入协议,从多种接入网络协同、异构演进到接入网络融合统一,建立新型分布式与集中式相结合的小区体系结构,建立 Licensed 和免 Licensed 两种频谱管理模式的混合组网结构。

智能化就是移动通信无线传输技术从提高传输速率走向提高传输能力,从针对比特传输走向针对业务传输,实现智能化传输与控制。系统能针对不同业务自适应地采用不同的传输技术,将传输技术与业务需求高度结合,实现业务与自适应传输的跨层智能化,大幅度提高系统信息有效传输能力和系统容量。

智能化就是要实现移动通信技术与智能计算、云存储、大数据、虚拟现实等信息技术的高度结合,实现结构性的系统创新,终端、基站、网络设备高度软件化、可配置、可重构、自组织、自适应。

### 3 5G 开启移动通信智能化时代

经过了近 3 年 5G 愿景、需求、潜在技术的研究,中国在 2015 年发表了《5G 无线和网络架构白皮书》,明确了 5G 发展的技术目标和路径。2016 年,5G 将启动标准化进程,5G 将开启移动通信智能化时代<sup>[1-2]</sup>。

#### 3.1 5G 无线技术的架构和发展路径

5G 无线技术的架构和发展路径如下:

(1) 5G 空口技术路线可由 5G 新空口和 4G 演进两部分组成。5G 空口技术框架应当具有统一、灵活、可配置的技术特性,通过关键技术和参数

的灵活配置形成相应的优化技术方案,来满足 5G 典型场景差异化的性能需求。

(2) 4G 演进将在保证后向兼容的前提下,以长期演进(LTE)/LTE-Advanced 技术框架为基础,在传统移动通信频段引入增强技术,进一步提升 4G 系统的速率、容量、连接数、时延等空口性能指标,在一定程度上满足 5G 技术需求。

(3) 5G 新空口由工作在 6 GHz 以下频段的低频新空口以及工作在 6 GHz 以上频段的高频新空口组成。5G 低频新空口将采用全新的空口设计,有效满足广覆盖、局部热点、大连接及高速等场景下体验速率、时延、连接数以及能效等指标要求。

(4) 5G 高频新空口需要考虑高频信道和射频器件的影响,针对波形、调制编码、天线技术等进行相应的优化,满足极高容量和极高用户体验速率需求。

#### 3.2 5G 网络技术的架构和发展路径

5G 网络技术的架构和发展路径如下:

(1) 5G 网络是基于网络功能虚拟化(NFV)和软件定义网络(SDN)技术的更加灵活、智能和开放的网络系统。5G 网络将呈现出“一个逻辑架构、多种组网架构”的形态。

(2) 5G 网络架构包括接入平面、控制平面和转发平面。5G 网络的部署包括边缘接入网、城域汇聚网和骨干网 3 个部分。

(3) 在基础设施平台方面,5G 网络将通过引入互联网和虚拟化技术,设计实现基于通用硬件的新型基础设施平台,从而解决基础设施平台成本高、资源配置能力不强等问题。

(4) 在网络架构方面,基于控制转发分离和控制功能重构的技术设计新型网络架构,提高接入网在面向 5G 复杂场景下的整体接入性能。简化核心网结构,提供灵活高效的控制转发功能,支持高智能运营,开放网

络能力,提升全网整体服务水平。

## 4 5G 是智能移动通信 1.0

移动通信已是巨系统,且庞大无比。巨系统的变革和演进是长期的过程,移动通信智能化的进程仍将建立在个人化和宽带化的基础上,驱动力源于需求与技术双驱动。移动通信实现高度智能化将比实现宽带化复杂无数倍,需要几十年甚至更长的时间。

5G 是移动通信智能化迈出的第一步,是智能移动通信的 1.0。

5G 若能在无线空口技术上实现按需自适应统一、灵活、可配置,满足 5G 典型场景差异化的性能需求;在网络架构上实现更加灵活、智能、高效和开放,呈现出“一个逻辑架构、多种组网架构”的形态,则 5G 将在移动通信智能化上迈出坚实的步伐,开启移动通信智能化的新时代。

5G 的愿景很宏伟,当 2020 年 5G 商用时,仅是移动通信实现高度智能化迈出的第一步,5G 以后还有 6G、7G 等,智能移动通信 1.0 后还有 2.0、3.0、4.0,智能化的进程会比前两个 20 年更长。

迎接移动通信智能化时代的挑战,我们通信人任重道远!

#### 参考文献

- [1] IMT-2020 推进组. 5G 无线技术架构白皮书 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2015
- [2] IMT-2020 推进组. 5G 网络技术架构白皮书 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2015

#### 作者简介



李少谦, 电子科技大学教授、博导, 通信抗干扰技术国家级重点实验室主任, 通信与信息工程学院院长, 国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组成员, 国家“863 计划”5G 重大项目总体组成员, 国家“973”计划咨询专家组成员, 国家通信与网络重点研发计划专家组成员, IEEE Fellow 等; 主要研究方向为无线与移动通信技术; 主持完成了 30 余项国家级科研项目; 获国家、国防和省部级科技奖 6 次; 获专利授权 50 余项, 发表论文 100 余篇, 出版专著多部。

**编者按:** 网络空间安全作为一项新的全球治理议程, 已经成为世界关注的焦点、各国政府的战略目标之一, 但人们对网络空间安全的研究, 还缺乏全面系统的理论指导, 针对该问题, 本刊特转载自《科学网》一篇由北京邮电大学杨义先、钮心忻教授撰写的《安全通论》(原文网址: <http://blog.sciencenet.cn/blog-453322-948089.html>)。在该文章中, 由随机变量  $X$  和  $Y$ , 构造了另一个随机变量  $Z=[2(1+X+Y)]\bmod 3$ , 巧妙地将石头剪刀布的游戏问题, 转化成了信道容量问题, 从而对安全通论中的攻防问题进行深入、形象地研究。

# 安全通论——攻防篇之“石头剪刀布”

## The General Theory of Security: "Rock Scissors Paper" in Offensive and Defensive

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0049-003

**摘要:** 给出了“石头剪刀布”的一种“白富美”新玩法。所谓“白”, 即思路清清楚楚、明明白白; 所谓“富”, 即理论内涵非常丰富; 所谓“美”, 即结论绝对数学美。安全通论的魅力也在这里得到了幽默体现。

**关键词:** 概率; 信道; 安全

**Abstract:** In this paper, “clear, rich and charming” can be well explained the “rock scissors paper” in offensive and defensive. “Clear” means the clear thinking, “rich” refers to the rich theory connotation, and “charming” represents the harmony and singularity of mathematics. Charm of the general theory of security is also humorously shown in this paper.

**Key words:** probability; channel; security

杨义先/YANG Yixian  
钮心忻/NIU Xinxin

(北京邮电大学, 北京 100876)  
(Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100876, China)

- “攻防”是安全的核心, 所以在建立安全通论的过程中, 需要多花一些精力去深入研究攻防
- 石头剪刀布的游戏问题, 可以转化成了信道容量问题
- 石头剪刀布游戏是一种“非盲对抗”

利用安全通论, 我们只需一张纸、一支笔, 就把石头剪刀布玩成“白富美”。所谓“白”, 即思路清清楚楚、明明白白; 所谓“富”, 即理论内涵非常丰富; 所谓“美”, 即结论绝对数学美。

### 1 信道建模

设甲与乙玩石头剪刀布, 他们可分别用随机变量  $X$  和  $Y$  来表示: 当甲出拳为“剪刀”、“石头”、“布”时, 分别记为  $X=0$ 、 $X=1$ 、 $X=2$ ; 当乙出拳为剪刀、石头、布时, 分别记为  $Y=0$ 、 $Y=1$ 、 $Y=2$ 。根据概率论中的“大数定律”,

频率的极限趋于概率, 所以甲乙双方出拳习惯, 可以用随机变量  $X$  和  $Y$  的概率分布表示为:

(1)  $P_i(X=0)=p$ , 即甲出剪刀的概率;  $P_i(X=1)=q$ , 即甲出石头的概率;  $P_i(X=2)=1-p-q$ , 即甲出布的概率。这里  $0 < p, q, p+q < 1$ ;

(2)  $P_i(Y=0)=r$ , 即乙出剪刀的概率;  $P_i(Y=1)=s$ , 即乙出石头的概率;  $P_i(Y=2)=1-r-s$ , 即乙出布的概率。这里  $0 < r, s, r+s < 1$ 。

同样, 我们还可以统计出二维随机变量  $(X, Y)$  的联合分布概率为:

(1)  $P_i(X=0, Y=0)=a$ , 即甲出剪刀, 乙出剪刀的概率;  $P_i(X=0, Y=1)=b$ , 即甲出剪刀, 乙出石头的概率;  $P_i(X=0, Y=2)=c$ , 即甲出剪刀, 乙出布的概率。这里  $0 < a, b, c, a+b+c < 1$ ;

$2)=1-a-b$ , 即甲出剪刀, 乙出布的概率。这里  $0 < a, b, a+b < 1$ 。

(2)  $P_i(X=1, Y=0)=e$ , 即甲出石头, 乙出剪刀的概率;  $P_i(X=1, Y=1)=f$ , 即甲出石头, 乙出石头的概率;  $P_i(X=1, Y=2)=1-e-f$ , 即甲出石头, 乙出布的概率。这里  $0 < e, f, e+f < 1$ 。

(3)  $P_i(X=2, Y=0)=g$ , 即甲出布, 乙出剪刀的概率;  $P_i(X=2, Y=1)=h$ , 即甲出布, 乙出石头的概率;  $P_i(X=2, Y=2)=1-g-h$ , 即甲出布, 乙出布的概率。这里  $0 < g, h, g+h < 1$ 。

由随机变量  $X$  和  $Y$ , 构造另一个随机变量  $Z=[2(1+X+Y)]\bmod 3$ 。由于任意两个随机变量都可构成一个通信信道, 所以以  $X$  为输入, 以  $Z$  为输出,

收稿时间: 2016-03-22  
网络出版时间: 2016-04-27

我们就得到一个通信信道( $X;Z$ ),称之为“甲方信道”。

如果在某次游戏中甲方赢,那么就只能有3种情况:

(1)甲出剪刀,乙出布,即 $X=0, Y=2$ ,这也等价于 $X=0, Z=0$ ,即甲方信道的输入等于输出;

(2)甲出石头,乙出剪刀,即 $X=1, Y=0$ ,这也等价于 $X=1, Z=1$ ,即甲方信道的输入等于输出;

(3)甲出布,乙出石头,即 $X=2, Y=1$ ,这也等价于 $X=2, Z=2$ ,即甲方信道的输入等于输出。

反过来,如果甲方信道将1 bit信息成功地从发端送到了收端,那么也只有3种可能的情况:

(1)输入和输出都等于0,即 $X=0, Z=0$ ,这也等价于 $X=0, Y=2$ ,即甲出剪刀,乙出布,即甲赢;

(2)输入和输出都等于1,即 $X=1, Z=1$ ,这也等价于 $X=1, Y=0$ ,即甲出石头,乙出剪刀,即甲赢;

(3)输入和输出都等于2,即 $X=2, Z=2$ ,这也等价于 $X=2, Y=1$ ,即甲出布,乙出石头,即甲赢。

综合以上正反两方面,共6种情况,就得到一个重要引理:

引理1:甲赢一次,就意味着甲方信道成功地把1 bit信息,从发端送到了收端;反之亦然。

再利用随机变量 $Y$ 和 $Z$ 构造一个信道( $Y;Z$ ),称之为“乙方信道”,它以 $Y$ 为输入,以 $Z$ 为输出。那么,仿照前面的论述,我们可得如下引理:

引理2:乙方赢一次,就意味着乙方信道成功地把1 bit信息,从发端送到了收端;反之亦然。

由此可见,甲乙双方玩石头剪刀布的输赢问题,就转化成了甲方信道和乙方信道能否成功地传输信息比特的问题。根据仙农第二定理<sup>[1]</sup>,我们知道:信道容量就等于该信道能够成功传输的信息比特数。所以,石头剪刀布的游戏问题,就转化成了信道容量问题<sup>[4]</sup>。

定理1(石头剪刀布定理):如果

剔除“平局”不考虑(即忽略甲乙双方都出相同手势的情况),那么则有:

(1)对甲方来说,对任意 $k/n \leq C$ ,都一定有某种技巧(对应于仙农编码),使得在 $nC$ 次游戏中,甲方能够胜乙方 $k$ 次;如果在某 $m$ 次游戏中,甲方已经胜出乙方 $u$ 次,那么一定有 $u \leq mC$ 。这里 $C$ 是甲方信道的容量。

(2)针对乙方来说,对任意 $k/n \leq D$ ,都一定有某种技巧(对应于仙农编码),使得在 $nD$ 次游戏中,乙方能够胜甲方 $k$ 次;如果在某 $m$ 次游戏中,乙方已经胜出甲方 $u$ 次,那么则有 $u \leq mD$ 。这里 $D$ 是乙方信道的容量。

(3)如果 $C < D$ ,那么甲方会输;如果 $C > D$ ,那么整体上甲方会赢;如果 $C = D$ ,那么甲乙双方势均力敌。

下面我们就来分别计算甲方信道和乙方信道的信道容量。

(1)甲方信道( $X;Z$ )的转移概率矩阵 $P$ ,该矩阵为 $3 \times 3$ 阶,则有:

$$P(0,0) = P_r(Z=0|X=0) = (1-a-b)/p$$

$$P(0,1) = P_r(Z=1|X=0) = b/p$$

$$P(0,2) = P_r(Z=2|X=0) = a/p$$

$$P(1,0) = P_r(Z=0|X=1) = f/q$$

$$P(1,1) = P_r(Z=1|X=1) = e/q$$

$$P(1,2) = P_r(Z=2|X=1) = (1-e-f)/q$$

$$P(2,0) = P_r(Z=0|X=2) = g/(1-p-q)$$

$$P(2,1) = P_r(Z=1|X=2) = (1-g-h)/(1-p-q)$$

$$P(2,2) = P_r(Z=2|X=2) = h/(1-p-q)$$

使用信道转移概率矩阵 $P$ 来计算信道容量,解方程组 $Pa=b$ ,其中 $a$ 为列向量,则有:

$$a = (a_0, a_1, a_2)^T,$$

$$b = \left( \sum_{j=0}^2 P(0,j) \log_2 P(0,j), \sum_{j=0}^2 P(1,j) \log_2 P(1,j), \sum_{j=0}^2 P(2,j) \log_2 P(2,j) \right) \quad (1)$$

我们可根据公式(1)来判断转移概率矩阵 $P$ 。

(a)若 $P$ 可逆,则此时有唯一解,

$$\text{即 } a = P^{-1}b, \text{ 可计算 } C = \log_2 \left( \sum_{j=0}^2 2^{a_j} \right)$$

则有:

$$P_z(j) = 2^{a_j - C} \quad (j=0,1,2) \quad (2)$$

$$P_z(j) = \sum_{i=0}^2 P_x(i) P(i,j) \quad (i=0,1,2) \quad (3)$$

由公式(3)得到达到信道容量的 $X$ 的概率分布,如果所有 $P_x(i)$ 满足大于等于0,则可确认信道容量为 $C$ 。

(b)若 $P$ 不可逆,则方程有多组解,重复上述步骤,计算出多个 $C$ ,按上述步骤分别计算各自的 $P_x(i)$ ,通过判定是否满足大于等于0,舍去不满条件的解 $C$ 。

(2)我们再来看乙方信道( $Y;Z$ ),首先它的转移概率矩阵 $Q$ ,该矩阵为 $3 \times 3$ 阶,则有:

$$Q(0,0) = P_r(Z=0|Y=0) = g/r$$

$$Q(0,1) = P_r(Z=1|Y=0) = e/r$$

$$Q(0,2) = P_r(Z=2|Y=0) = (r-g-e)/r$$

$$Q(1,0) = P_r(Z=0|Y=1) = f/s$$

$$Q(1,1) = P_r(Z=1|Y=1) = b/s$$

$$Q(1,2) = P_r(Z=2|Y=1) = (s-f-b)/s$$

$$Q(2,0) = P_r(Z=0|Y=2) = (1-a-b)/(1-r-s)$$

$$Q(2,1) = P_r(Z=1|Y=2) = (1-g-h)/(1-r-s)$$

$$Q(2,2) = P_r(Z=2|Y=2) = (1-e-f)/(1-r-s)$$

我们使用信道转移概率矩阵 $Q$ 来计算乙方信道容量,解方程组 $Qw=u$ ,其中 $w, u$ 为列向量,则有:

$$w = (w_0, w_1, w_2)^T$$

$$u = \left( \sum_{j=0}^2 Q(0,j) \log_2 Q(0,j), \sum_{j=0}^2 Q(1,j) \log_2 Q(1,j), \sum_{j=0}^2 Q(2,j) \log_2 Q(2,j) \right) \quad (4)$$

我们可以根据公式(4)来判断转移概率矩阵 $Q$ 。

(a)若 $Q$ 可逆,则此时有唯一解,

$$\text{即 } w = Q^{-1}u, \text{ 计算 } D = \log_2 \left( \sum_{j=0}^2 2^{w_j} \right), \text{ 则有}$$

$$Q_z(j) = 2^{w_j - D} \quad (j=0,1,2)$$

$$Q_z(j) = \sum_{i=0}^2 Q_y(i) Q(i,j) \quad (i=0,1,2) \quad (5)$$

由公式(5)得到达到信道容量的 $X$ 的概率分布,如果所有 $Q_y(i)$ 满足大于等于0,则可确认信道容量为 $D$ 。

(b)若 $Q$ 不可逆则方程有多组解,重复上述步骤,计算出多个 $D$ ,按上述步骤分别计算各自的 $Q_y(i)$ ,通过判定是否满足大于等于0,舍去不满

条件的解 $D$ 。

## 2 巧胜策略

根据定理1,可知甲乙双方在石头剪刀布游戏中的胜负,其实已经事先就“天定”了,某方若想争取更大的胜利,那么他就必须努力“改变命运”。下面分几种情况来考虑:

(1)两个傻瓜之间的游戏。所谓两个傻瓜,意指甲乙双方都固守自己的习惯,无论过去的输赢情况怎样,他们都按既定习惯“出牌”。这时,从定理1,我们已经知道:如果 $C < D$ ,那么整体上甲方会输;如果 $C > D$ ,那么整体上甲方会赢;如果 $C = D$ ,那么甲乙双方势均力敌。

(2)一个傻瓜与一个智者之间的游戏。如果甲是傻瓜,他仍然坚持其固有的习惯出牌,那么双方对抗足够多的次数后,乙方就可以计算出对应于甲方的随机变量 $X$ 的分布概率 $p$ 和 $q$ ,以及相关的条件概率分布,并最终计算出甲方信道的信道容量;然后,再通过调整自己的习惯,增大自己的“乙方信道”的信道容量,从而使得后续的游戏对自己更有利,甚至使乙方信道的信道容量大于甲方信道的信道容量,最终使得自己稳操胜券。

(3)两个智者之间的游戏。如果甲和乙双方,都随时在总结对方的习惯,并对自己的出牌习惯做调整,即增大自己的信道容量。那么最终,甲乙双方的信道容量值将趋于相等,即他们之间的游戏竞争将趋于平衡,达到动态稳定的状态。

## 3 简化版

下面,我们再给出一个更抽象、更简捷的解决办法。

设甲与乙玩石头剪刀布,他们可分别用随机变量 $X$ 和 $Y$ 来表示:当甲出拳为剪刀、石头、布时,分别记为 $X=0$ 、 $X=1$ 、 $X=2$ ;当乙出拳为剪刀、石头、布时,分别记为 $Y=0$ 、 $Y=1$ 、 $Y=2$ 。根据概率论中的大数定律,频率的极限趋于概率,所以甲乙双方的出拳习

惯,可以用随机变量 $X$ 和 $Y$ 的概率分布表示为:

$$\begin{aligned} 0 < P_i(X=x) &= p_x < 1, x=0,1,2, p_0+p_1+p_2=1 \\ 0 < P_i(Y=y) &= q_y < 1, y=0,1,2, q_0+q_1+q_2=1 \\ 0 < P_i(X=x, Y=y) &= t_{xy} < 1, x, y=0,1,2, \sum_{x,y} t_{xy} = 1 \end{aligned}$$

$$p_x = \sum_{0 \leq y \leq 2} t_{xy}, x=0,1,2$$

$$q_y = \sum_{0 \leq x \leq 2} t_{xy}, y=0,1,2$$

石头剪刀布游戏的输赢规则是:若 $X=x, Y=y$ ,那么甲( $X$ )赢的充分必要条件是: $(y-x) \bmod 3 = 2$ 。

现在我们构造另一个随机变量 $F=(Y-2) \bmod 3$ 。考虑由 $X$ 和 $F$ 构成的信道 $(X; F)$ ,即以 $X$ 为输入,以 $F$ 为输出的信道。那么,就有如下事件等式:若在某回合中,甲( $X$ )赢了,那么,就有 $(Y-X) \bmod 3 = 2$ ,从而得出 $F=(Y-2) \bmod 3 = (2+X-X) \bmod 3 = X$ ,也就是说:信道 $(X; F)$ 的输入( $X$ )始终等于它的输出( $F$ )。换句话说,1个比特就被成功地在该信道中被从发端传输到了收端。

反过来,如果1个比特就被成功地在该信道中被从发端传输到了收端,那么就意味着信道 $(X; F)$ 的输入( $X$ )始终等于它的输出( $F$ ),也就是说: $F=(Y-2) \bmod 3 = X$ ,这刚好就是 $X$ 赢的充分必要条件。

结合上述正反两个方面的论述,就有:甲( $X$ )赢一次,就意味着信道 $(X; F)$ 成功地把1 bit信息,从发端送到了收端;反之亦然。因此,信道 $(X; F)$ 也可以扮演甲方信道的功能。

类似地,若记随机变量 $G=(X-2) \bmod 3$ ,那么信道 $(Y; G)$ 就可以扮演乙方信道的角色。

而现在信道 $(X; F)$ 和 $(Y; G)$ 的信道容量形式会更简捷,分别是:

$$\begin{aligned} (X; F) \text{ 的信道容量} &= \text{Max}_i [I(X, F)] = \\ &= \text{Max}_i [I(X, (Y-2) \bmod 3)] = \text{Max}_i [I(X, Y)] = \\ &= \text{Max}_i [\sum t_{xy} \log(t_{xy}/(p_x q_y))] \end{aligned} \quad (6)$$

这里的最大值,是针对所有可能的 $t_{xy}$ 和 $p_x$ 而取的,所以它实际上是 $q_0, q_1, q_2$ 的函数。

$$\begin{aligned} (Y; G) \text{ 的信道容量} &= \text{Max}_i [I(Y, G)] = \\ &= \text{Max}_i [I(Y, (X-2) \bmod 3)] = \text{Max}_i [I(X, Y)] = \\ &= \text{Max}_i [\sum t_{xy} \log(t_{xy}/(p_x q_y))] \end{aligned} \quad (7)$$

这里的最大值,是针对所有可能的 $t_{xy}$ 和 $q_y$ 而取的,所以它实际上是 $p_0, p_1, p_2$ 的函数。

## 4 结束语

“攻防”是安全的核心,所以在建立安全通论的过程中,多花一些精力去深入研究攻防也是值得的。

文章研究的石头剪刀布游戏是一种“非盲对抗”,但由于它的普及率极高(几千年来,全世界每个人在童年时代几乎都玩过),所以我们可以单独一篇论文的形式来研究它。有关其他一些有代表性的非盲对抗,我们将在随后的文章中研究。

### 参考文献

- [1] 杨义先, 钮心忻. 安全通论(1)之“经络篇”[EB/OL]. [2015-12-08] <http://blog.sciencenet.cn/blog-453322-944217.html>
- [2] 杨义先, 钮心忻. 安全通论(2): 攻防篇之“盲对抗”[EB/OL]. [2016-01-01] <http://blog.sciencenet.cn/blog-453322-947304.html>
- [3] THOMAS M C, THOMAS J A. 信息论基础[M]. 阮吉寿, 张华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007
- [4] LIN S, DANIEL J C. 差错控制码[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007

### 作者简介



杨义先, 灾备技术国家工程实验室主任, 北京邮电大学教授、博士生导师, 信息安全中心主任, 首批长江学者特聘教授, 首届国家杰出青年基金获得者, 中国密码学会副理事长; 目前研究方向为网络空间安全、现代密码学和纠错编码等; 获得包括国家发明奖和省部级科技进步奖等在内的各类科技奖励20余项, 授权发明专利4项, 主持和参与多项国家“863”、国家自然科学基金、省部级等科研项目; 发表高水平论文500余篇, 出版专著及教材20多部。



钮心忻, 北京邮电大学计算机学院教授、博士生导师; 长期从事网络与信息安全、信号与信息处理等方面的研究工作。

# M-ICT 时代下的 5G 技术及创新

## 5G Technologies and Innovation in M-ICT Era

朱龙明/ZHU Longming  
朱清华/ZHU Qinghua  
姚强/YAO Qiang

(中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

### 1 5G 的概念

#### 1.1 5G 能做什么

2014 年, 中兴通讯提出构建一个以移动为核心特征的面向人与人、人与物、物与物全面互联的理念, 5G 正是实现中兴通讯 M-ICT 理念的一个重要基石。5G 将渗透到未来 M-ICT 社会的各个领域, 拉近人与人、人与物、物与物之间的距离, 引发巨大的信息革命。

首先, 5G 将以公众用户为中心构建全方位的信息处理系统, 突破时空限制, 为用户带来极速的上网体验和极佳的交互体验, 使信息沟通彻底突破时空的羁绊。

其次, 5G 还将以行业用户为中心构建全方位的信息生态系统, 通过互联网与物联网深度融合的方式, 拉近万物的距离, 促进万物互联, 便捷地实现人与物、物与物之间智能互联。

最后, 5G 还将推动网络架构发生变革, 通过支持多样化的无线接入场景, 驱动终端、无线、网络、业务深度融合, 从而满足端到端的业务体验需求, 实现灵活的网络部署和高效的网

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0052-005

**摘要:** 提出 5G 面临的 3 种技术发展挑战: 增强型移动宽带 (eMBB)、高可靠低时延通信 (URLLC)、大规模机器通信 (mMTC)。围绕 5G 的发展, 中兴通讯创新性地提出统一空口 (UAI) 和云感知软网络 (CAS) 的技术理念, 并围绕该理念, 研发出一系列创新技术用于实现 5G 新型空中接口, 例如滤波器组-正交频分多址 (OFDMA FB-OFDMA)、多用户共享接入 (MUSA)、大规模多输入多输出 (MIMO)、统一帧结构 (UFS)、平滑的虚拟小区 (SVC) 等, 并基于软件定义网络 (SDN)/网络功能虚拟化 (NFV) 技术构建出新型 5G 网络架构。这些技术和方案进一步地促进了 5G 的发展。

**关键词:** UAI; CAS; FB-OFDMA; MUSA; 大规模 MIMO

**Abstract:** In this paper, three technical development challenges faced by 5G are proposed, including enhanced mobile broadband (eMBB), ultra reliable and low latency communication (URLLC), massive MTC (mMTC). ZTE Corporation proposes the technology concept: unified air interface (UAI) and cloud aware soft-network (CAS), and it also develops a series of innovative technologies for the realization of new 5G air interface, such as filter bank-orthogonal frequency division multiple access (FB-OFDMA), multi-user shared access (MUSA), massive multi input multi output (MIMO), unified frame structure (UFS), smooth virtual cell (SVC), and built a new 5G network architecture based on soft-defined network (SDN)/network function virtualization (NFV) technology. These technologies and schemes further promote the development of 5G.

**Keywords:** UAI; CAS; FB-OFDMA; MUSA; massive MIMO

络运营<sup>[1-3]</sup>。

#### 1.2 5G 带来的挑战

5G 将围绕人们居住、工作、休闲、交通以及垂直行业的需求, 广泛部署在密集住宅区、办公室、体育场、地铁、高速公路、高速铁路以及环境监测等场景, 这些场景分别具有超高流量、超高密度、超高连接数、超高移动性、超远覆盖、超低功耗等不同特点, 其面临的技术挑战可以归纳为以下几种<sup>[2]</sup>:

(1) 增强型移动宽带 (eMBB) 场景。该场景指面向移动通信的基本覆盖环境, 能够在保证移动性和业务

连续性的前提下, 无论静止还是高速移动, 覆盖中心还是覆盖边缘, 都可以为用户随时随地提供 100 Mbit/s 以上的体验速率, 在室内、外局部热点区域的覆盖环境, 都可以为用户提供 1 Gbit/s 的用户体验速率和 10 Gbit/s 以上的峰值速率, 满足 10 Tbps/km<sup>2</sup> 以上的流量密度需求。

(2) 高可靠低时延通信 (URLLC) 场景。该场景能够面向车联网、工业控制等物联网的特殊应用需求, 为用户提供毫秒级的端到端时延和接近 100% 的业务可靠性保证。

(3) 大规模机器通信 (mMTC) 场景。该场景指面向环境监测、智能农

收稿时间: 2016-03-20  
网络出版时间: 2016-05-03

业等以传感器和数据采集为目标的应用场景,该应用场景具有小数据包、低功耗、低成本、海量连接等特点,要求支持  $10^6/\text{km}^2$  以上的连接数密度。

以上 3 个场景是 5G 将面临的技术挑战,具体见图 1。这些挑战反映到数字上就是:100 Mbit/s ~ 1 Gbit/s 的用户体验速率和 10 Gbit/s 的峰值速率,10 Tbps/ $\text{km}^2$  的流量密度,  $10^6/\text{km}^2$  的连接数密度,以及毫秒级的端到端时延,这些关键性能指标如图 2 所示。

### 1.3 5G 的演进过程

5G 空口技术演进由 4G 演进和 5G 新空口两部分组成,基于统一空口设计下的 5G 新空口既适用于低频也适用于 5G 高频,4G 演进及 5G 空口在高低频的应用共同满足 eMBB、URLLC、mMTC 3 种场景的用户体验,

如图 3 所示。

长期演进(LTE)是目前在全球得以大规模部署的 4G 标准。从持续提升 4G 用户的体验及支持网络平滑演进的角度出发,5G 标准化阶段自然包括对 4G 技术的进一步增强。在保证后向兼容的前提下,4G 演进将以 LTE 技术框架为基础,在已有频段(主要是 6 GHz 以下的低频段)引入增强技术,包括部分与 5G 新空口共

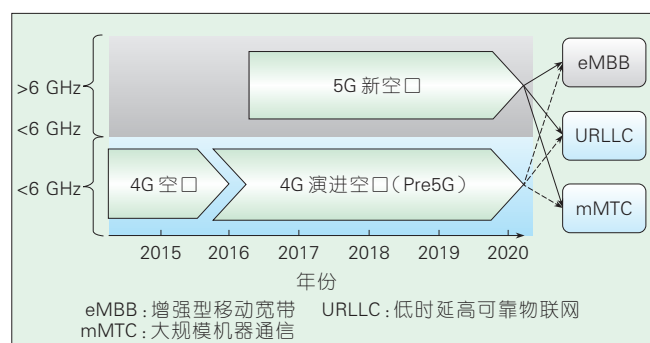


图 3  
5G 空口演进路径

用技术如大规模天线技术的引入,可以使 4G 演进系统达到 5G 的早期能力,也即 Pre5G。Pre5G 系统在速率、容量、连接数、时延等空口性能指标能达到 5G 早期水平<sup>[4]</sup>。

5G 新空口将是 5G 演进的主要方向。新空口的设计将突破后向兼容的限制,被设计成一个全新的空口,通过挖掘各种先进技术的潜力,全面满足 5G 性能和效率指标为目标。5G 新空口需要同时适用于 6 GHz 以下的低频段和 6 GHz 以上的高频段,低频段主要满足大覆盖、高移动性场景下的用户体验和海量连接,高频段则满足热点区域极高的用户体验速率和系统容量<sup>[5-6]</sup>。

新空口将采用全新的空口设计,引入大规模天线、新波形、新多址等先进技术,采用灵活的帧结构,精简的信令流程,灵活的双工方式,有效满足广覆盖、大连接、高速移动等场景下的体验速率、时延、连接数。新空口设计追求技术方案的统一性和可配置性,通过灵活配置参数的方式实现不同场景下的技术需求,高低频技术方案统一,通过参数的调整来适应信道的变化和射频器件的影响,在波形、调制编码、天线技术上进行适应性优化。在覆盖组网上,采用低频与高频联合使用,低频以构建有效的网络覆盖为主,并承担对用户的管理和控制功能;高频则在热点区域用户提供高数据传输。

在网络架构设计上,5G 将引入网络功能虚拟化(NFV)和软件定义网络(SDN)技术,整个网络将转变为一

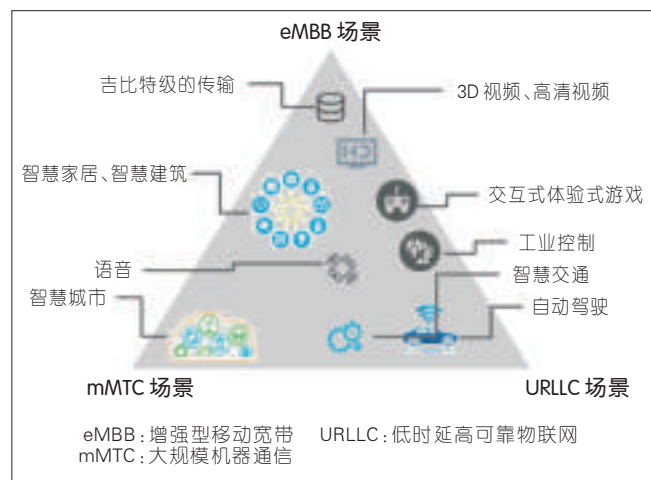


图 1  
5G 面临的 3 个典型场景

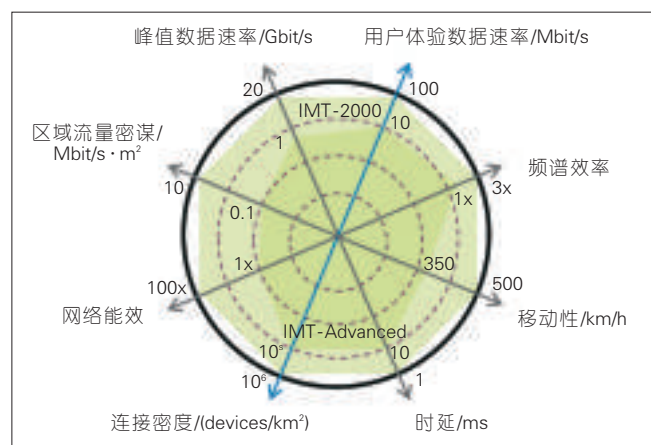


图 2  
5G 关键性能指标

种基于通用硬件的基础设施平台,并且其中的网络控制功能和转发功能彻底分离,通过网络功能模块化、组件化实现控制功能的可重构。网络运营者可以从全局的视角来调度网络资源,方便快捷地把网元功能部署在网络中的任意位置,实现网络连接的可编程。

5G 的标准化工作将在第 3 代合作伙伴项目(3GPP)内完成,如图 4 所示。2016 年开始的 Rel-14 版本周期将开启 5G 第 1 阶段工作的标准化,这一阶段的工作包括也即 5G 新空口的研究以及信道建模等工作;2018 年开始的 Rel-16 版本周期将是 5G 第 2 阶段的标准化,包括 5G 新空口在高频段的使用。随后 5G 将正式进入产业化阶段。

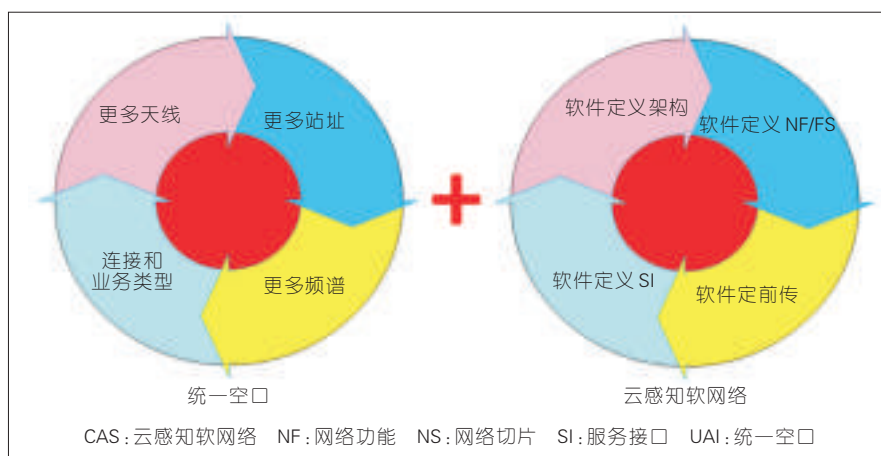
## 2 中兴通讯 5G 技术创新

### 2.1 技术理念

中兴通讯围绕 5G 的发展开展了一系列深入研究,针对 2020 年 M-ICT 社会的需求和未来无线技术及网络技术发展的需求,在总体设计理念上提出构建统一、灵活、可配置的 5G 统一空口(UAI)和基于云感知软网络(CAS)技术的网络架构,如图 5 所示。

### 2.2 UAI 技术创新

UAI 是针对不同场景的技术需求,通过关键技术和参数的灵活配置形成相应的优化技术方案,UAI 的目标是追求统一的波形设计、统一的帧



▲ 图 5 5G 技术理念

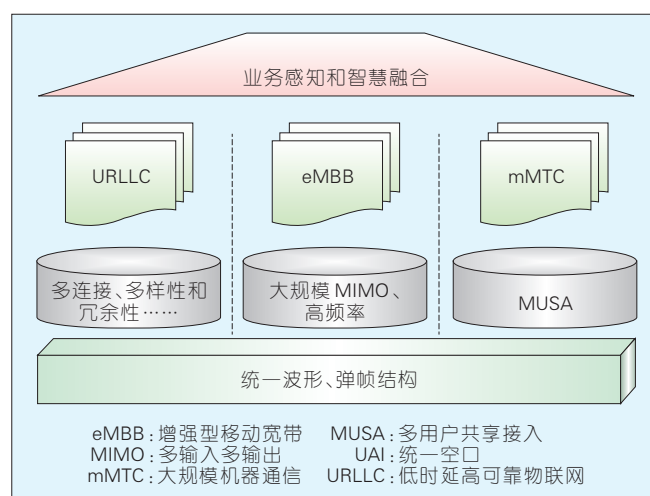


图 6  
统一空口 UAI 架构

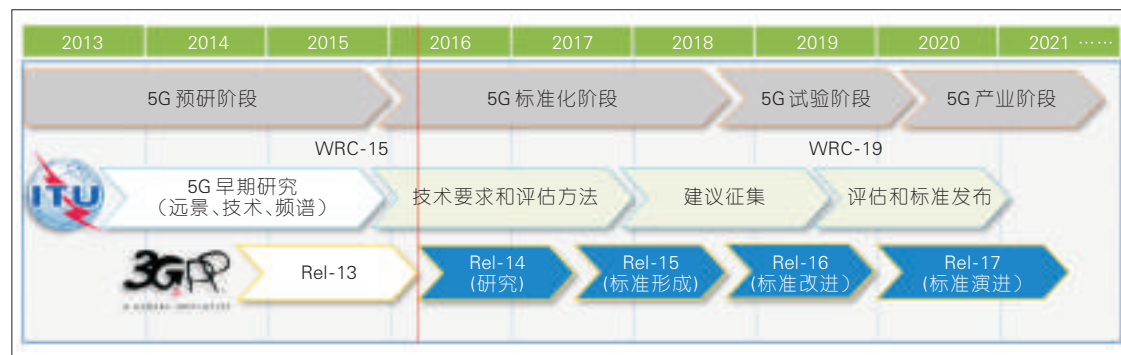
结构和统一的控制。

UAI 包含 3 层结构(如图 6 所示),底层引入抽象物理层,采用统一框架设计的波形和帧结构,灵活适配多种业务和全频段部署的要求,对不同的业务和频段完全透明;中间层可按照业务类型实现灵活的网络切片

和弹性的资源分配;顶层则引入业务感知的功能,并实现动态、智能的业务聚合。

UAI 基于统一的无线网络基础设施和灵活的软件设置满足 5G 时代多样化的行业应用,并兼容从低频段到高频段的部署需求。为实现 UAI 的统一波形、统一帧结构和统一控制的目标,中兴通讯在其基础关键技术如波形、帧结构、多址、调制编码、天线、小区虚拟化等领域提出了一系列创新方案。

(1) 滤波器组 OFDM (FB-OFDM)



▲ 图 4 5G 标准化工作阶段划分

技术。中兴通讯采用基于优化滤波器设计的 FB-OFDM 技术用于 5G 的新波形设计,其机理就是在 4G 的发射和接收基础上增加一组多相滤波器模块。FB-OFDM 具有极低的带外泄露,有效利用零散频段,并与其他波形技术进行共存,同时支持 eMBB、URLLC 和 mMTC 3 种场景的应用,在提升频谱使用率的基础上,有效降低终端对时域和频域同步要求。

(2) 多用户共享接入 (MUSA) 技术。面向 5G “海量连接”和“移动宽带”两个典型场景的新型多址技术,中兴通讯提出 MUSA 技术作为未来 5G 多址接入技术。MUSA 上行接入通过创新设计的复数域多元码以及基于串行干扰消除 (SIC) 的先进多用户检测,让系统在相同时频资源下支持数倍用户的接入,并且可以支持真正的免调度接入,免除资源调度过程,简化同步、功控等过程,从极大简化终端的实现、降低终端的能耗,因此 MUSA 特别适合作为未来 5G 海量接入的解决方案。MUSA 下行则通过新型叠加编码技术,可提供比 4G 正交多址及功率域非正交多址 (NOMA) 更高容量的下行传输,并且能简化终端的实现,降低终端的能耗,可应用于 5G 移动宽带高容量的场景。

(3) 大规模多输入多输出 (MIMO) 技术。5G 基站天线数及端口数将有大幅度增长,中兴通讯采用可支持上百根天线和数十个天线端口的大规模天线方案,并通过大规模 MIMO 技术,来支持更多用户的空间复用传输,达到数倍提升系统频谱效率的目的。大规模 MIMO 适用于高低频段以及集中和分布方式部署,在高频段通过高增益自适应波束赋形技术以补偿高传播损耗,在低频段重点解决了频分双工 (FDD) 系统中的导频开销和反馈开销问题,时分双工 (TDD) 系统中的上行导频污染问题以及信道状态信息反馈增强的问题,并采用空口校准加终端辅助校准的

方式解决分布式天线之间存在的校准问题,大规模天线技术的应用得到了拓展。

(4) 统一帧结构 (UFS) 方案。5G 由于引入低时延高可靠业务,传输时间间隔 (TTI) 可以由 4G 的 5 ms 缩短到 1 ms,循环前缀 (CP)、参考信号、控制信令等帧结构设计中的常规参数面临着开销大幅压缩的挑战。中兴通讯针对帧结构进行了优化改进,采用参数可灵活配置的统一帧结构 UFS,一方面通过减少 TTI 长度,降低 CP 长度,增加子载波间隔,改进调度流程,降低调度时延应对低时延高可靠业务;另一方面又可以针对不同频段、场景和信道环境,选择不同的参数进行配置,如带宽、子载波间隔、循环前缀、传输时间间隔和上下行配比。同时参考信号和控制信道也可以进行灵活配置,以适应大规模天线技术和 MUSA 多址技术的应用。

(5) 平滑的虚拟小区 (SVC) 方案。为了达到 5G 系统要求的热点地区高流量,5G 需要采用超密集组网方式,半规划/无规划部署的要求,无理想回程链路。为此,中兴通讯开发出一种 SVC 方案来解决超密集组网带来的 5G 移动性、干扰、高频链路的传输质量问题。通过采用数据同步技术支撑虚拟小区内传输节点间的联合信号处理和传输节点的快速转换,通过接入链路与自回程链路进行联合资源分配等多种方式灵活动态地组建回程链路,更好地支撑半规划/无规划部署和虚拟小区内各节点的快速协作。

(6) 多种编码技术创新。中兴通讯开发出包编码、短循环冗余码校验码 (CRC) 和低密度奇偶校验码 (LDPC) 3 种调制编码技术应对 5G 多场景下的信道编码。包编码是在传统数据包的基础上添加一个包编码,即在所有纠错编码块之间添加一个异或 (奇偶校验) 包,这样操作的目的在于将所有的码块建立异或关系,有利于在接收端译码时提高整个数据

包传输可靠性;短 CRC 码是通过减小 CRC 的长度并结合码空间检错的一种方案,该方案可以降低开销并保持通信系统的数据传输性能,满足短数据实时通讯和在线通讯;LDPC 采用并行译码技术,译码速度快,特别适用于吞吐量高的系统,可以提升链路的频谱效率以支持高速率业务,满足低频新空口和高频新空口中的高速率业务。

### 2.3 CAS 技术创新

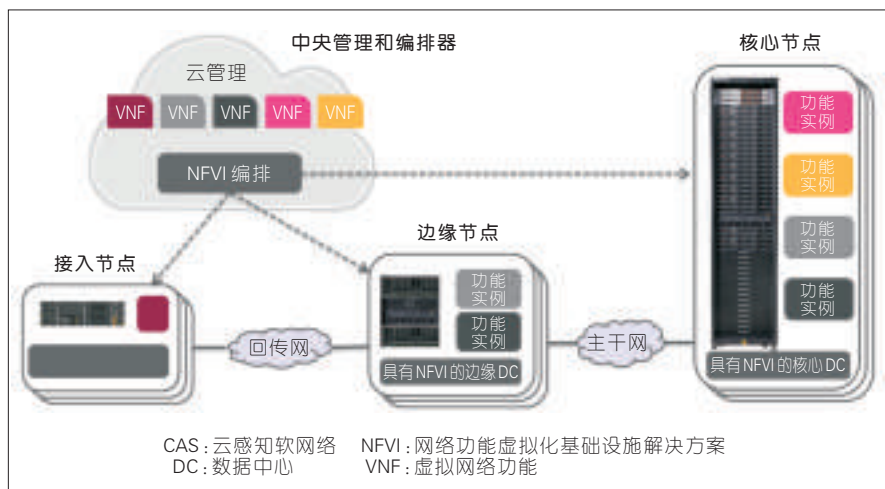
未来 5G 网络需要融合各种无线频段和制式,满足更多差异化的应用场景需求,提供多样化的网络服务能力,使得 5G 网络架构需要比现有网络更加灵活、可扩展性更好。SDN/NFV 作为网络架构创新的核心技术,将成为 5G 网络架构的基础技术;但仅有 SDN/NFV 技术仍然无法满足 5G 网络架构需求,网络还需要在架构层面上进行变革,提供功能组件化动态编排、切片化管理以及按需云部署等关键能力。

中兴通讯利用 SDN/NFV 技术,设计了基于 CAS 的网络架构,如图 7 所示。CAS 将 5G 网络各网元功能进行了重构,提供功能组件化动态编排、切片化管理以及按需云部署等关键能力。

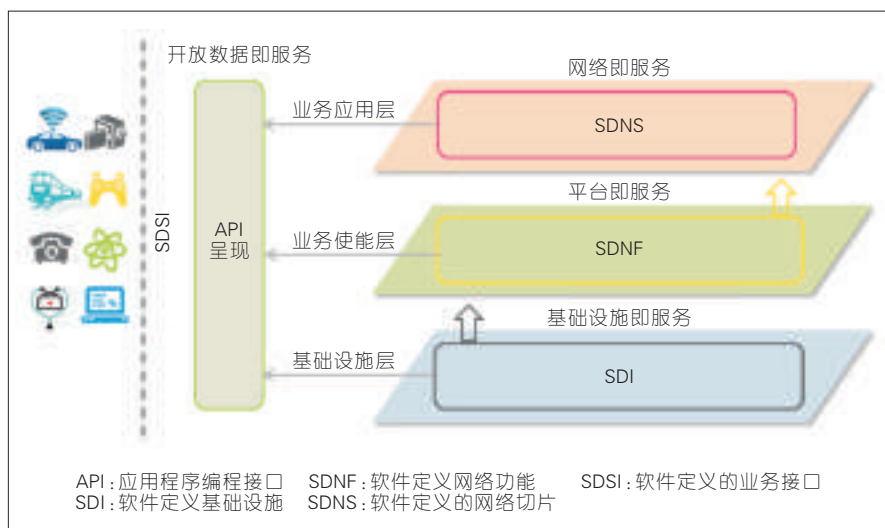
CAS 具有 3 个主要特性:开放性 (3 层通用架构)、灵活性 (软件定义组件和切片) 和可扩展性 (以 DC 为中心的组网部署) 的网络架构。

CAS 是一个开放的、有灵活性的和扩展性的平台网络,通过虚拟化实现软硬件的分离,通过组件化实现功能的灵活编排,通过云管理实现资源的统一管理和部署。

(1) 分层网络。如图 8 所示,CAS 采用开放性的分层网络架构,从底到上分别是:基础设施层、业务使能层、业务应用层。分别提供基础设施即服务 (IaaS)、平台即服务 (PaaS)、网络即服务 (NaaS) 以及开放数据即服务 (DaaS)。分层网络提供的层间解



▲ 图 7 基于云感知的软网络 CAS 架构



▲ 图 8 CAS 的分层网络架构

耦合以及可替换性带来了更加开放的可能。

(2) 软件定义的网络。软件定义的特征使得 5G 网络具有灵活性: 基础设施层提供物理设备虚拟化(即图 8 中的软件定义基础设施(SDI)), 业务使能层提供各种虚拟网络功能(VNF)(即软件定义网络功能(SDNF)), 业务应用层编排各个 VNF, 并提供软件定义的网络切片(SDNS)。各层通过适配可提供开放式服务接口(即软件定义的业务接口(SDSI)), 使得各种软件定义的组件和编排可全局调度资源, 部署网络功能, 给网络带来了灵活性。

(3) 硬件 IT 化。以数据中心为中心的组网, 使网络具备可扩展性。接入数据中心(DC)除基带功能之外, Intel inside 支持 Open Stack, 可部署新业务; 边缘数据中心是业界第一个采用 Intel 机柜式架构(RSA)的基带池, 可部署移动宽带(MBB)、移动边缘计算(MEC)等网络功能; 核心网数据中心则是高集成度的 Intel RSA 的电信级优化的数据中心。

目前为止, 中兴通讯已投入 2 亿元用于 5G 领域的研究和开发, 在未来 3 年当中, 还将陆续投入 3 亿元用于 5G 研发。中兴通讯分布在全球十几个研究所超过 2 000 余位专家同步

从事 5G 研发。

### 3 结束语

5G 的发展过程也是一个技术创新的过程, 中兴通讯创新地提出的 UAI+CAS 的架构理念, 形成了以 FB-OFDMA、MUSA、UFS 等一批新技术并应用在 5G 系统中, 从而推动 5G 的全面发展。

#### 参考文献

- [1] 中兴通讯. 5G 技术白皮书[R/OL]. [2016-04-22]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/424379>
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书[R/OL]. [2016-04-22]. <http://www.imt-2020.org.cn>
- [3] 向际鹰. 从 4G 到 5G 的演进[EB/OL]. [2016-04-22]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/434877>
- [4] 徐俊. 5G 链路增强技术进展[EB/OL]. [2016-04-25]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/434874>
- [5] 中兴通讯. 大规模多天线技术现状研究热点[R/OL]. [2016-04-22]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/434874>
- [6] 中兴通讯. 空口降低时延关键技术[R/OL]. [2016-04-22]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/434872>

#### 作者简介



朱龙明, 中兴通讯股份有限公司标准总工; 负责标准预研规划等工作, 同时参与新一代移动通信网国家科技重大专项总体推进工作。



朱清华, 中兴通讯股份有限公司 5G 产品总工; 负责 5G 新技术、新产品的规划推进工作。



姚强, 中兴通讯股份有限公司产品规划总工; 负责 5G 网络架构设计与规划。

# 大数据技术发展趋势及灯塔大数据行业应用平台

## Big Data Technology Development Trend and DENGTA Application Platform

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0057-005

**摘要:** 指出大数据发展的趋势: 混合数据存储是大数据技术的基础; 融合数据库架构是大数据发展的趋势; 异构数据关联是大数据平台的关键; 行业知识库是产业互联网应用发展的要素; 深度标签是大数据挖掘的核心技术之一。介绍了中国电信灯塔大数据行业应用平台的架构, 及所采用的关键技术和行业应用, 认为该平台的使用可以充分发挥运营商数据与外部数据相结合的优势, 加速产业升级和商业模式创新。

**关键词:** 大数据; 趋势; 灯塔; 应用

**Abstract:** In this paper, trends in big data technology are discussed. Mixed data storage is the foundation of big data technology; database schema integration is the trend of the development of big data; heterogeneous data association is key to big data platform; industry knowledge database is the key elements of the application and development of the Internet industry; depth labels is one of the core technologies of data mining. Then, the Dengta big data industry application platform of China Telecom is introduced. This platform can be fully combined with operator data and external data in order to accelerate industrial upgrading and innovation of business model.

**Key words:** big data; trend; Dengta; application

王若倪/WANG Ruoni  
赵慧玲/ZHAO Huiling

(中国电信股份有限公司北京研究院,  
北京 100035)  
(China Telecom Beijing Research  
Institute, Beijing 10035, China)

大数据是信息时代技术创新的产物, 大数据与云计算、物联网等新技术相结合, 正日益深刻地改变着人们的生产生活方式。大数据产业的出现和发展是现代信息技术与互联网时代海量信息发展到一定阶段的必然结果, 必将对当今社会的信息技术、商业模式和相关的法律法规产生深刻影响。大数据经历了基础理论研究和产业应用探索, 与行业应用结合已成为大数据发展的新机遇。

### 1 大数据技术发展趋势

(1) 混合数据存储是大数据技术

的基础

在大数据环境下, 数据量达到了PB级甚至EB级。大数据存储一方面需要提供超大容量的存储空间, 另一方面需要支持对海量数据的智能检索和分析。为了兼容各种类型的大数据应用, 大数据存储需要提供混合的数据存储模型, 支持文件、对象、键值、块等多种访问接口, 作为大数据技术的基础<sup>[1-2]</sup>。

(2) 融合数据库架构是大数据发展的趋势

随着大数据业务的发展, 除了面向强关系型的结构化查询语言(SQL)数据库之外, 面向各类应用的接口灵活、功能丰富且高效的NoSQL

数据库也得到了蓬勃发展。在应用类型多样、数据种类繁多的大数据平台中, 融合关系型数据库、列数据库、内存数据库、图数据库等多种数据库的混合数据库架构, 能够满足多种场景下的数据处理需求, 是大数据发展的必然趋势。

(3) 异构数据关联是大数据平台的关键

当前, 各行业、企业、系统、平台都累积了海量的数据, 这些数据结构不同且相对独立, 在没有建立起关联关系的情况下, 难以展现出数据的优势。将这些多源异构数据进行关联和融合, 挖掘数据之间的相关性, 能够为数据分析奠定坚实的基础, 最大限度地发挥数据价值, 是大数据平台的关键所在。

(4) 行业知识库是产业互联网发展的要素

随着“互联网+”战略的实施, 各产业尤其是传统产业, 纷纷进行互联网化转型。在“互联网+”的浪潮下, 面向多个行业, 深挖行业知识详情, 构建行业知识库, 形成完整的行业知识体系, 能有效推动数据应用与价值

收稿时间: 2016-02-14  
网络出版时间: 2016-03-04

落地,是产业互联网发展的关键。

(5)深度标签是大数据挖掘的核心技术之一

数据挖掘越来越多地应用到各个行业应用领域,使用数据挖掘技术而打造用户深度标签,已经逐渐成为大数据挖掘的热点。通过针对大数据场景的数据挖掘,深入分析用户行为,打造多层次、多角度的用户深度标签。深度标签是大数据挖掘的核心技术之一,它使得大数据应用更加精准,业务能够更加贴近用户,更好地满足用户的需求<sup>[9]</sup>。

## 2 灯塔大数据行业应用平台总体架构

在大数据的发展浪潮下,中国电信股份有限公司北京研究院通过大数据技术创新,自主研发了业内领先的灯塔大数据行业应用平台。灯塔大数据行业应用平台深入研究大数据平台技术和应用技术,为满足顶层大数据应用需求,自主开发大数据能力,实现电信数据与外部数据相融合

的大数据分析挖掘,打造了ID关联模型、用户深度标签、行业知识库、分布式爬虫、数据可视化等平台即服务(PaaS)层能力,并以标准化应用程序编程接口(API)的形式支持顶层数据的相关应用,打造了市场研究、泛义征信、地理洞察等三大领域的6款大数据应用。

灯塔大数据行业应用平台技术架构如图1所示,其底层平台基于开源技术搭建,融合了离线批处理、内存计算、流计算等多种计算模型,以及关系型数据库、列数据库、内存数据库、图数据库等多种数据库模型,向上提供计算和存储能力;在大数据开放能力层,研发了ID图谱、用户标签等多种大数据分析挖掘技术,并结合第三方的地理信息系统(GIS)等能力,面向多个行业领域,向应用层以API的形式提供多种数据服务。

## 3 灯塔大数据行业应用平台关键技术

灯塔大数据行业应用平台主要

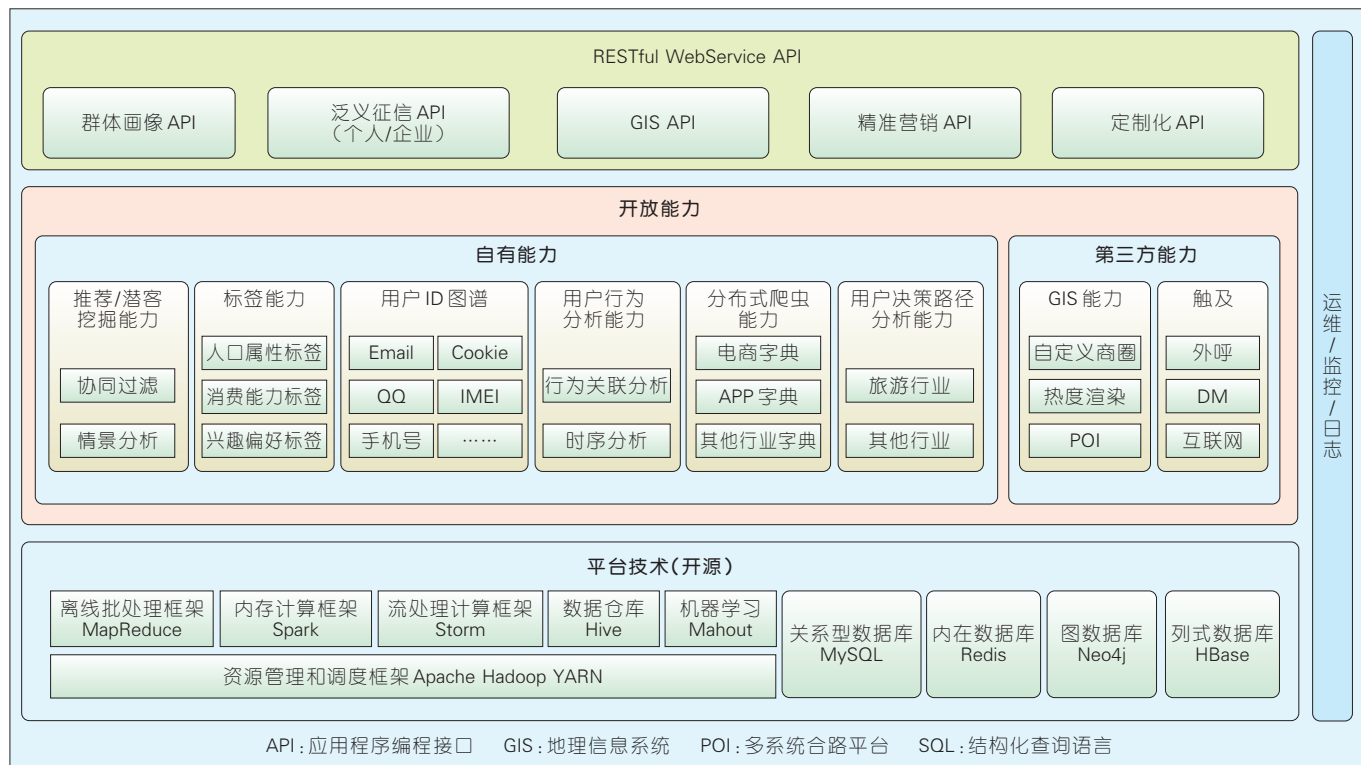
研发了混合数据库、ID关联模型、用户深度标签、行业知识库、统一数据采集与存储等几项关键技术。

### 3.1 混合数据库

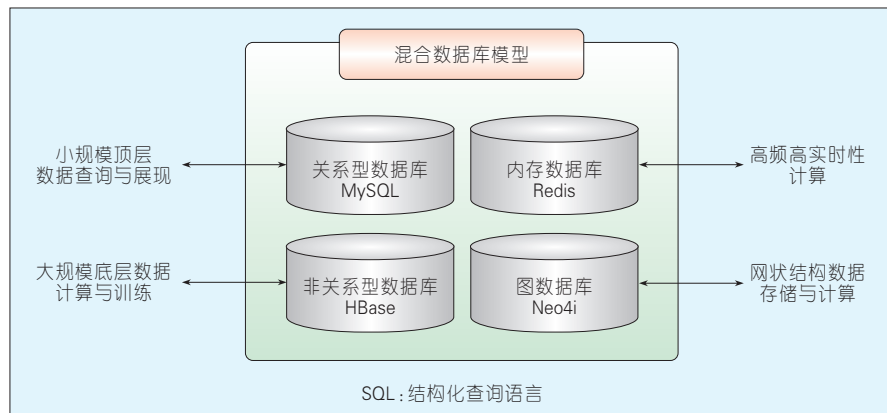
融合关系型数据库、列数据库、内存数据库、图数据库,并提出面向不同存储过程和计算需求的混合数据库模型,可以满足多种场景下的数据处理需求,解决单一数据库模型无法满足大规模数据训练、高频高实时性计算、网状结构计算等不同场景下的数据处理问题。

如图2所示,海量数据计算使用非关系型数据库(NoSQL)来支持;网状结构数据的机器学习训练依靠图数据库(Neo4j)来支持;高频高实时性计算对接内存数据库(Redis);小规模顶层数据查询与展现对接关系型数据库(SQL)。具体来说,包含4点内容:

(1)能够实现有一定实时性需求的、传统千万级及以下的数据查询与展现业务,并基于传统关系型数据库



▲ 图1 灯塔大数据行业应用平台



▲图2 混合数据库模型

MySQL来构建。通过加载数据预读取算法,MySQL的单机处理能力可以达到秒级访问5 000万条多维数据的水平,能够满足一般的数据查询业务需求。

(2)对于千万级以上的数据查询业务,已超出单台MySQL的支持水平,更适宜转化成离线查询业务,直接使用非关系型数据库HBase来支持。此时数据查询的范围可扩展至数十亿甚至上百亿,系统仍可平稳输出查询结果,前提是付出分布式离线计算的延时代价。

(3)对于在深度包检测技术(DPI)数据的K-V查询过程中需同步完成标签数据在灯塔本地服务器的ETL工作的场景,任何传统磁盘输入输出(IO)基本都无法支持该高频数据存取操作,则借助内存数据库Redis来完成。Redis可在典型的单台计算资源下支持100毫秒级的数据ETL操作,并且可以与K-V查询进行无缝衔接,轻松应对每日2亿条标签数据入库。

(4)对于图状数据结构,如灯塔平台中典型的ID知识体系,则适合从边和节点的角度进行数据存储、表达和计算,无论行数据库还是列数据库都不再适合,因此采用图数据库Neo4j来支持。

目前,灯塔大数据行业应用平台支持1 000万级多维数据的秒级查询展现,10亿级多维数据的24 h内基础

演算,100毫秒级的数据流处理,并可秒级完成10亿级边、1 000万级节点的子图查询运算。

### 3.2 ID关联模型

基于图计算技术构建ID关联模型,采用图数据库进行数据存储和模型计算,实现DPI数据内的多种用户ID关联,解决了电信数据与外部数据有效关联和拼接的问题。ID关联模型建立设备标识一场景的图模型,通过图数据库、图计算得到隐性变量用户唯一标识,打通用户各个设备,实现全面的用户画像。

ID关联模型对内实现数据融合,将DPI数据内的多种用户ID关联,实现多场景、多屏幕信息打通,从而实现更全面和精准的用户描述;对外实现数据开放,借助从DPI中挖掘出的外部ID,实现运营商数据与外部数据的打通,从而打破了电信数据开放的壁垒。

目前,灯塔大数据行业应用平台已积累超过100类ID数据,ID总量超5 000万。

### 3.3 用户深度标签

根据用户上网行为、使用机器学习和模式识别等算法,如树状增强型朴素贝叶斯(TAN)分类算法等,推断用户的性别、年龄等基础人口属性,并打造消费偏好、消费能力等其他深度标签,用于支持用户行为分析的大

数据应用。

目前,灯塔大数据行业应用平台已构建超过10个行业的总计6 000余类用户深度标签。

### 3.4 行业知识库

通过整合数据采集、数据存储、数据形式化、数据表达等环节,打造完善的行业知识库,为运营商网络大数据的解析提供必要的支持。其中,行业知识库的构建包含以下环节:

(1)基于分布式爬虫进行数据采集。如图3所示,分布式爬虫DTSpider基于开源技术WebMagic与内存数据库技术Redis而研发,搭建在云主机上,提供行业知识库数据采集解决方案。

(2)面向垂直行业构建知识体系。如图4所示,行业知识库面向如电商、新闻、影视等不同的垂直行业,分别构建树状知识体系,能够直接对接标签能力应用。例如,电商行业的树状知识体系,可按照商品类别进行构建,如图书、服饰、运动健康等。

(3)深挖垂直行业知识详情。基于从页面抓取的标题和正文,经自然语言处理得到知识详情,例如电商库存量单位(SKU)名称、价格、参数、评论等。

目前,灯塔大数据行业应用平台的行业知识库整体字典规模超过2亿,其中电商和视频分别占1.2亿和6 000万。

### 3.5 统一数据采集与存储

面向电信管道数据、互联网公开数据和企业自有数据等多种数据类型,分别构建数据采集能力,并定义了统一的数据采集接口与存储接口,解决了多源异构数据的采集与存储的相关问题。

(1)电信网络大数据采集

电信网络大数据采集包含以下环节:DPI分光采集、数据清洗、数据脱敏、规则匹配预处理、业务数据传输、数据入库等环节,如图5所示。



图3  
分布式爬虫 DTSpider

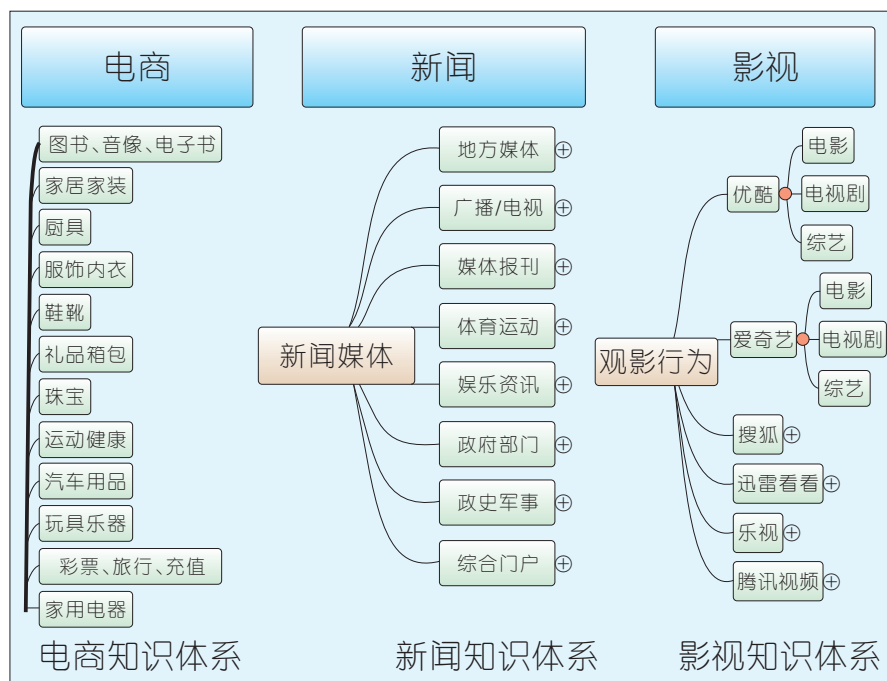


图4 行业知识体系

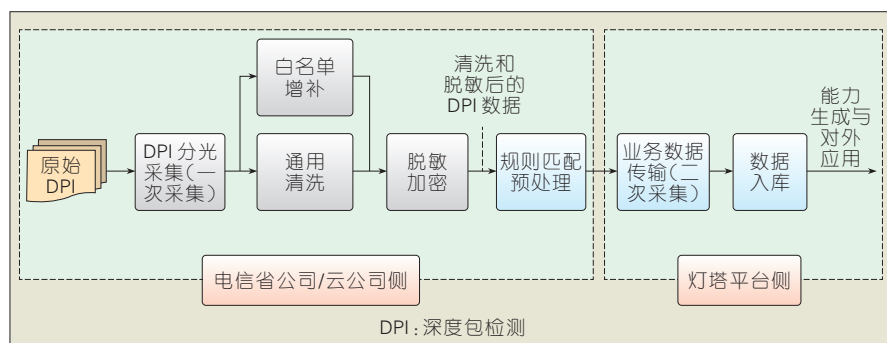


图5 电信网络大数据采集流程

在基层分局进行一次采集与清洗,在业务平台进行二次采集与存储。具体来说,在基层分局分光设备采集(一次采集)得到固网/移动 DPI 数据,然后采用通用清洗规则与白名单规则相结合的方式,过滤掉 DPI 数据

中无效及重复请求,并保证各类业务的数据需求。经过规则匹配预处理,从 DPI 中抽离并编码得到业务所需的数据,以标签形式传输(二次采集)并入库至业务平台,提供给 PaaS 层的生成数据能力,最终对接软件即服务

(SaaS)层的数据应用。

根据生产平台数据接口差异以及顶层业务类型差异,电信网络大数据的二次采集可采用实时或离线模式。如图6所示,实时流处理模式是通过 K-V 查询接口,以流处理模式,逐条传输、ETL、融合并入库至业务平台。离线批处理模式是通过安全文件传送协议(SFTP)传输接口,将数据离线批量采集至业务平台缓存中,再进行批量抽取、加载、转换(ETL)、融合并入库至业务平台。

## (2) 互联网大数据采集

互联网大数据采集通过分布式爬虫 DTSpider 进行。DTSpider 支持节点动态接入,有效提升爬取效率,避免 IP 封锁,具有良好的稳定性和可扩展性。

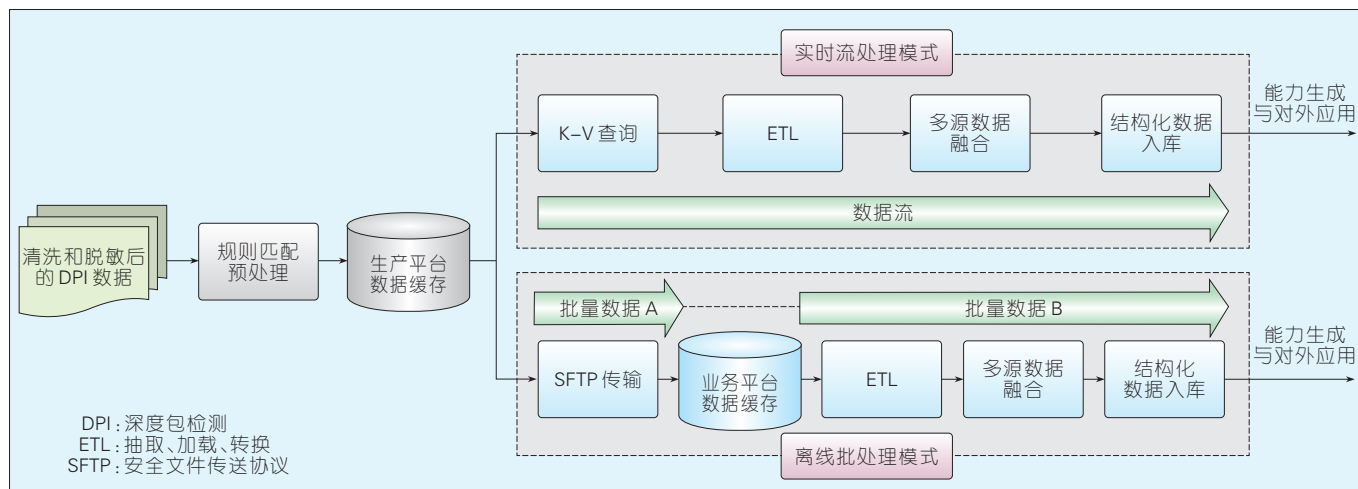
## (3) 企业自有数据接入

基于 ID 图谱,可对企业的客户管理系统(CRM)数据进行导入与融合。订单及其他业务数据,也可导入并可对接灯塔平台主体数据,支持大数据分析。

目前,灯塔大数据行业应用平台已采集并汇聚电信数据 600 多亿条,外部数据 5 亿条。

## 4 灯塔大数据的行业应用

在混合数据库、ID 关联模型、用户深度标签、行业知识库、统一数据采集与存储等几项关键技术的支持之上,灯塔大数据行业应用平台打造了市场研究、泛义征信、地理洞察等三大领域的 6 款大数据应用,实现了数据产品及服务的规范化、流程化,探索出大数据价值落地的商业模式。其中,在市场研究领域,基于灯塔平台行业知识库、深度标签等数据能力,我们研发了零售研究、消费者研究、决策路径分析等方面的大数据应用;在泛义征信领域,基于灯塔平台 ID 图谱、深度标签等数据能力,我们研发了用户画像等技术,应用于人力资源、企业征信等场合;在地理洞察领域,基于灯塔平台 ID 图谱、深度



▲ 图6 电信网络大数据二次采集模式

标签等数据能力,结合第三方GIS能力,我们打造了人群流量监测、迁徙分析、店铺选址等应用。

#### (1) 灯塔在线零研

灯塔在线零研基于电信管道数据,打造电商分析能力,提供在线零售研究业务,数据更新频率最快可达T+1,支持联机分析处理(OLAP)查询,分析维度多达20个。

#### (2) 灯塔消费者洞察

与合作伙伴共同研发的灯塔消费者洞察应用,可以实现电商内容监测、论坛内容监测、用户多维画像等功能,支持基础人口属性和互联网行为画像。

#### (3) 灯塔大数据招聘

与在线人力资源行业相结合,提供求职人员的个人画像新型简历,包括量化的行为偏好、性格特征、个人优势数据,覆盖消费能力、学习指数、作息指数、勤奋程度、运动指数等多种维度,从而基于用户的互联网行为为企业提供客观的招聘参考。

#### (4) 灯塔背景调查

将网络行为报告与第三方个人数据相结合,研发并上线新型在线背景调查产品,打造更加高效、完善的背景调查体系。

#### (5) 灯塔在线人口普查

灯塔在线人口普查基于地理位置及互联网行为数据,为客户提供基

础人口普查、人口迁徙分析和互联网偏好分析等服务。

#### (6) 灯塔慧选址

灯塔慧选址结合灯塔标签数据和线下位置数据,能够为客户提供在线选址、运营分析等功能。

除了以上6种应用之外,灯塔大数据行业应用平台还紧跟市场趋势及热点事件,产出10多份高质量数据分析报告,例如“2015年一季度奶粉市场研究报告”、“2015抗战胜利日大阅兵互联网分析”、“2015双十一未消费人群报告”等,并通过移动互联网进行传播,覆盖近万互联网受众,吸引了大数据行业关注。

台将面向房地产、汽车、金融等行业领域打造更多的行业应用产品并提供服务。

#### 参考文献

- [1] 赵慧玲, 杨明川, 孙静博. 大数据技术发展及其应用[J]. 中国电信建设, 2015, 27(4):36-38
- [2] 张引, 陈敏, 廖小飞. 大数据应用的现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2013(S2): 216-233
- [3] ZHAO H L, XIE Y P, SHI F. Network Function Virtualization Technology: Progress and Standardization [J]. ZTE Communications, 2014, 12(2): 03-07. DOI: 10.3969/j. issn.1673-5188.2014.02.001

## 5 结束语

作为快速发展的新兴产业,大数据已经上升到国家战略层面,成为整个社会最有价值的资产。大数据已经渗透到各个行业领域,其行业应用具有广阔的发展空间。

灯塔大数据行业应用平台立足自主研发,深入研究大数据底层平台能力及数据分析挖掘能力,充分发挥运营商数据与外部数据相结合的优势,加速产业升级和商业模式创新。灯塔大数据旨在充分发挥数据价值,通过技术创新和应用创新共同驱动,与行业合作伙伴共同打造大数据行业应用生态圈。未来,灯塔大数据平

#### 作者简介



王若倪, 中国电信股份有限公司北京研究院工程师; 主要研究领域为大数据技术和应用。



赵慧玲, 中国电信股份有限公司北京研究院总工, 教授级高工, 中国通信学会常务理事, 信息通信网络技术专业委员会主任委员, 中国通信学会北京通信学会副理事长, 中国通信标准协会网络与交换技术工作委员会主席, 中国SDN/NFV产业联盟技术委员会副主任; 主要从事宽带网络和下一代网络的技术研究以及通信网络发展战略研究等工作。

# 面向未来移动通信的核心网架构

## Future Mobile Communication Oriented Core Network Architecture

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0062-005

**摘要:** 提出了一种基于虚拟化网络和软件定义网络(SDN)的虚拟核心网架构,该架构简化了核心网的接口和协议,融合了业务链的处理,还引入智能化管理模块,可以支持未来移动网络的自动化部署、自动配置、自优化、自愈等功能,从而更好地支持了5G复杂多变的场景。另外,该架构将核心网功能集成,将处理模块和用户上下文分开,从而能更好地支持核心网的分布式处理。

**关键词:** 5G核心网;虚拟化;SDN;业务链;智能管理

**Abstract:** In this paper, a virtual core network architecture based on virtual network and software-defined network (SDN) is proposed. This architecture simplifies the interface and protocol of core network and integrates service chain management. This architecture also has an intelligent management module that supports future mobile network automation deployment, automatic configuration, self optimization, self-healing and other functions. In this way, it can better support the complex and changeable scenarios of 5G. In addition, this architecture integrates the functions of core network and separates the processing module and the user context in order to better support core network distributed processing.

**Key words:** 5G core network; virtualization; SDN; service chain; intelligent management

宗在峰/ZONG Zaifeng  
吴瑟/WU Se

(中兴通讯股份有限公司,江苏 南京,  
210012)  
(ZTE Corporation, Nanjing 210012,  
China)

面向未来移动通信的5G网络将是一个支持更快速度、更短时延、更多用户、更高速移动性的网络,它将支持超密集网络、超可靠通信及大规模机器终端的接入。5G网络需求不仅仅对无线技术是个挑战,对移动核心网同样提出了更高的要求。

云计算、软件定义网络(SDN)等新技术是对IT产业的一次革命,它们同样也为未来移动通信提供了新的可能和机遇。随着云计算在IT界的兴起,传统电信运营商很快意识到该技术的优势,并希望将它引入传统电信网络。电信运营商联合设备制造商、IT厂商在欧洲电信标准化协会

(ETSI)成立了网络功能虚拟化(NFV)工作组,讨论如何利用虚拟化技术在通用云计算平台上实现传统电信设备的功能。ETSI NFV定义了基于网络虚拟化技术的管理和编排(MANO)架构<sup>[1]</sup>,使用该架构可方便地将电信网络中物理网元虚拟化。

SDN技术则是对传输网络的一次革命。在传统交换机中,控制面和转发面是紧耦合的。交换机行为的改变需要复杂的配置,有时甚至需要修改交换机软件。SDN架构将现有传输网络中的控制面和转发面分离,使得底层架构对上层应用和网络服务抽象为一个逻辑实体,管理人员可通过编写应用程序(APP)控制转发面的行为<sup>[2]</sup>。

除了上述的网络虚拟化技术和SDN技术之外,业务链也是核心网演进热门技术之一。业务服务器是运营商用来对用户数据流进行优化和提供增值业务的重要手段。在现有网络中,业务服务器和底层传输网络紧耦合,导致网络配置不灵活,扩展性不好。业务服务器通常是插入到传输路径上的,当加入新的业务服务器时需要对网络拓扑做出改变。并且,为了简化配置,业务服务器常常按固定顺序串联在传输路径上,所有数据流都按事先设定的固定顺序流经所有串联的业务服务器,不管数据流是否需要被业务服务器处理。在这种架构中,业务链组合不灵活,增加或修改业务服务器配置复杂,不利于创新业务的开展<sup>[3]</sup>。

全球很多标准组织均已开始考虑如何将网络虚拟化和SDN等新技术应用到移动网络中。例如,开放式网络基金会(ONF)的“Wireless & Mobile”工作组正在讨论如何将SDN与移动网络结合:利用SDN技术可将移动核心网中的用户面转发功能集成到支持SDN的交换机中实现。除此之外,中国通信标准化协会(CCSA)、IMT-2020等组织也有相关

收稿日期: 2015-11-13  
网络出版时间: 2015-12-24

的讨论。

然而,在当前的讨论中,网络虚拟化与移动网络的结合常常只是简单地将4G网络的物理网元进行虚拟化。SDN与移动网络的结合则倾向于简单地将移动网络中的公用数据网网关(PDN GW)、服务GW划分为转发功能和控制功能,并将转发功能放到SDN架构中的交换机中实现,而控制功能则作为SDN控制器上的应用,通过SDN控制器控制位于交换机中的转发功能。这样的结合除了将网元进行了虚拟化之外对4G核心网未做任何优化。

## 1 基于4G架构的核心网虚拟化

在4G网络架构中,核心网由一系列物理网元组成,这些物理网元之间通过标准化的接口互相通信。4G网络架构是控制面和用户面分离的架构,其中移动管理实体(MME)、服务GPRS支持节点(SGSN)、归属签约用户服务器(HSS)、策略和计费规则功能(PCRF)等是控制面网元,负责用户接入管理、鉴权、移动性管理、会话管理、策略控制等功能。服务网关(SGW)、PDN GW是用户面网元,主要负责用户数据包的转发、隧道管理功能、地址管理等功能。尽管4G网络架构是控制面和用户面分离的架构,SGW和PDN GW中仍然有部分控制面的功能,这部分功能负责会话管理、IP地址分配、用户面GTP隧道的建立等。

在核心网虚拟化时,最简单的做法是将4G网络架构的物理网元分别虚拟化,即在通用硬件(如x86)和软件(如VmWare)平台上分别实现MME、SGSN、HSS、PCRF等控制面网元的功能。将用户面网元SGW和PDN GW拆分成GW控制面功能和GW转发面功能,并将其中的GW转发面功能集成到SDN交换设备中;SGW、PDN GW的控制面功能虚拟化为GW控制器。虚拟化的GW控制器

通过SDN接口协议(如Open Flow协议)控制SDN交换设备中的GW转发面。对应的架构如图1所示。

在图1中,GW控制器负责GW转发面位置的选择及一般隧道协议(GTP)隧道的建立。GW控制器接受MME/SGSN的会话建立请求,并选择适合的OFS作为该会话的GW转发面。GW控制器分配GTP隧道信息,建立该会话的转发表,并通过SDN控制器将该转发表发送给OFS。

在该架构中,GW控制器与SGSN/MME间可采用现成的S4/S11接口进行通信,对4G架构和流程没有影响。

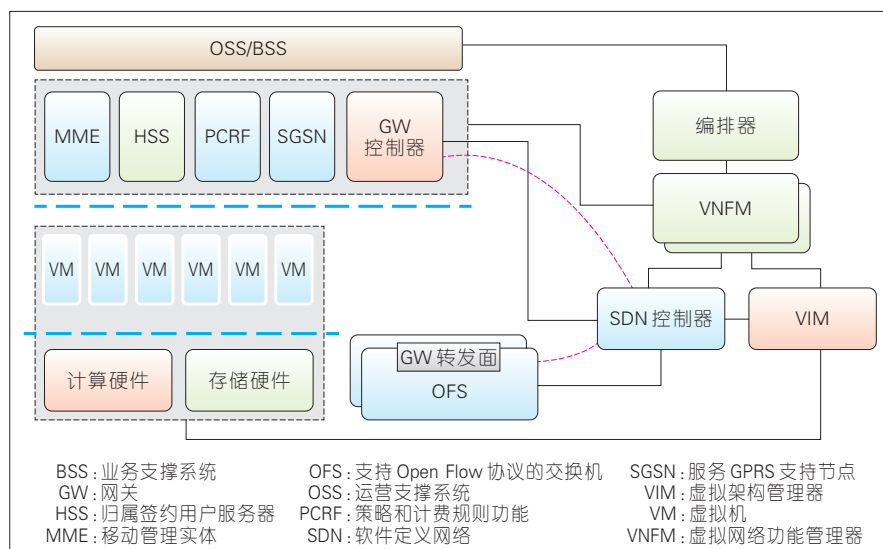
## 2 核心网架构的进一步演进

### 2.1 集成的虚拟核心网架构

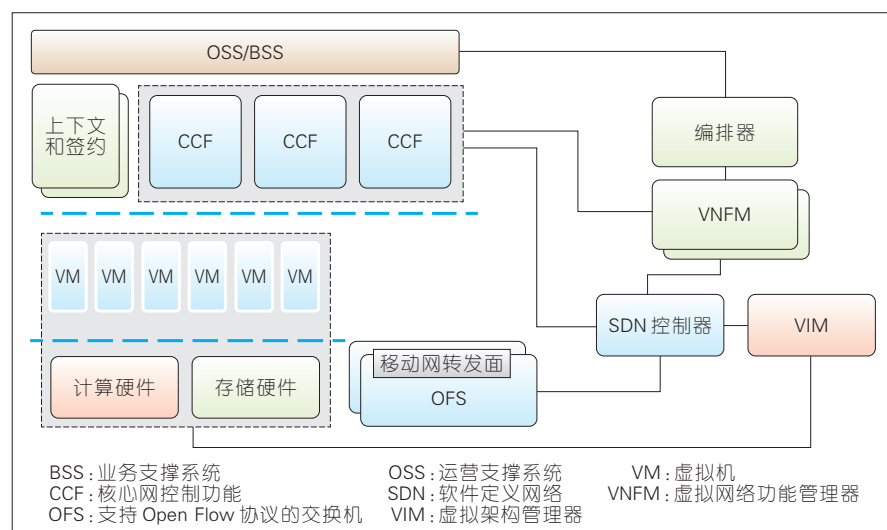
核心网虚拟化是建立在“不改变4G架构”的假设的基础上的。但在4G架构设计之初,设计者假定网元是物理网元,4G架构的设计未针对虚拟化平台做优化。在虚拟化平台上,网元间的数据可共享,这可大大减少网元间的接口和信令交互,降低时延、提高效率。并且,在虚拟化平台上,通过软件实现核心网网元的功能,比之前既要设计硬件又要在该专用硬件平台上设计软件容易得多。

软件化可能会改变商业模式,一个集成的核心网软件包是一种可能的实现方式。集成的核心网软件包的优点是少了网元间的接口,简化了流程,从而降低了时延和系统复杂度。

图2所示为集成的虚拟化核心网。在图中,上下文和签约模块保存用户上下文以及用户签约数据,核心网控制功能(CCF)负责所有核心网控制面的功能,包括接入控制、认证、移动性管理、会话管理、策略管理等。各CCF间负荷分担,移动用户可以由任意CCF提供服务,而无需跨CCF的迁移。一个移动用户的不同事务(如附着(ATTACH)、跟踪区更新(TAU))可动态地由不同CCF为之提供服务,比如ATTACH时由CCF1服务,而TAU时由CCF2服务。在上下文共享域内,这样的架构将不再需要传统4G网络中的跨MME切换和跟踪区更新流程,也不再需要MME间的接口。负荷分担的设计也比以前简单,当一个CCF超负荷或宕机时,只需将后续的事务分配给其他CCF处理,而无需CCF间的用户迁移过程。并且,由于将所有控制面功能集成到CCF中,单个事物的处理不再需要跨不同网元的交互,从而降低了核心网的信令处理时延。跨上下文共享域的移动或切换需要在两个域



▲图1 基于4G架构的核心网虚拟化



▲图2 集成的虚拟化核心网架构

间同步用户上下文,该流程可利用类似4G中的跨MME的切换和跟踪区更新流程,或者利用IT技术进行上下文同步,从而无需CCF间的接口。只要IT技术支持,最好将上下文共享域设置得足够大,从而减少跨共享域的移动和切换,但共享域的大小受IT技术的限制。

考虑与4G系统的共存,CCF需与传统4G网络中的MME、SGW等网元接口,CCF与传统网元间的接口可基于现有4G定义的接口协议进行通信,从而无需改变4G网络。

图2中的架构将所有核心网控制功能都集成到了CCF中,CCF划分为多个模块,如接入认证模块、移动性管理模块、会话管理模块、隧道管理模块、策略控制模块、各种接口模块(如与SDN控制器的接口、与传统网络网元的接口)等。

## 2.2 虚拟核心网中的业务链

IETF业务链(SFC)工作组正在讨论如何更灵活地支持业务链。SFC的最基本的目标是将业务链与网络拓扑解耦。在IETF定义的架构中<sup>[4]</sup>,业务分类器对业务流进行分类和选择业务链路径,并且对业务流进行业务链封装。业务链封装(简称SFC封装)不用于数据传输,数据的传输依

靠外层包头,这样可将业务链与网络拓扑解耦。增加新的业务服务器只需增加业务服务器到业务转发器之间的链路,从而与其他业务服务器解耦(星形架构),也与传输网络解耦。IETF定义的架构如图3所示。

业务转发器负责根据SFC封装将数据包转给相应的业务服务器,当业务服务器不支持SFC封装时,SFC代理负责将SFC封装解开并将原始数据包发送给业务服务器。

在未来运营商网络中,我们可以设想:业务服务器将升级支持业务链,运营商的网络中也会引入业务转发器,用于将业务数据包转发到业务服务器。

业务服务器可利用虚拟化技术,构建在通用平台上,做成虚拟网元。

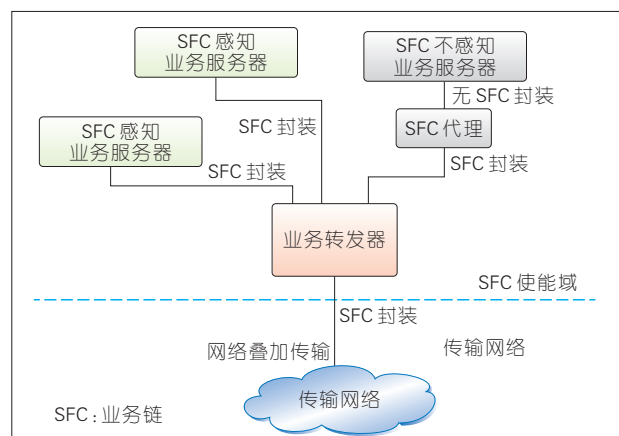
而业务转发器,更适合集成到OFS中。当然,业务服务器也可能会由于某种特殊需要(如性能),采用特殊的硬件实现。将业务转发器集成到OFS上如图4所示。

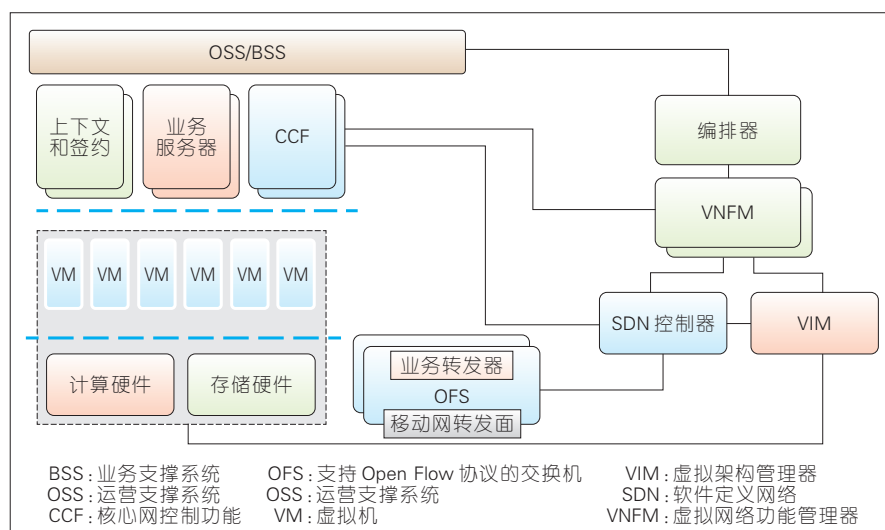
在具体部署时,CCF和业务服务器可能部署在不同的位置。比如,CCF可能部署在比较集中的位置,而业务服务器则可能会部署在靠近边缘的地方。运营商根据运营商的网络拓扑、需求等确定适合的部署方式。

## 2.3 多张网络并存的核心网

5G的网络需求具有多样性,它将是可以满足各种不同场景不同需求的网络。它既要支持超密集网络(UDN),又要支持海量连接(MTC);既要支持超高速,又要支持超可靠性。并非每个5G的需求场景都需要同时支持所有的性能指标:有些场景只需要实时性,但无需高带宽,有时甚至只需很低带宽;有些场景需要很高的带宽,但并不需要很高的可靠性,也不需要实时性;有的场景需要支持高速下的移动性,而有的场景根本无需支持移动性。对所有5G需求均用同一张网络支持,对网络的要求势必很高,也不利于网络性能优化。在现有的4G网络架构中,为了支持不同场景,对网络打了各种补丁。但到了5G,各种不同的需求变得越来越多、越来越高,在一张网络上叠加对所有需求的支持变得越来越困难

图3 业务链架构





▲图4 支持业务链的集成虚拟核心网

和不优化。

网络虚拟化除了能给运营商带来管理、方便部署等好处外,它还带来了一个更大的好处——为未来运营商同时运营多张网络带来了可能。

在运营商现有的网络中,部署一个新的网络涉及到各物理网元的采购、网络的组建和配置、网络调试等环节,从招标开始到最后网络建成往往需要几个月时间,有时甚至更长。

不仅仅时间长,设备成本也很高,并且维护一张新的网络也是一项艰巨的任务。无论是从运营成本(OPEX)还是资本支出(CAPEX)角度上看,运营商同时部署多张专用网络变成艰难和漫长的历程。

利用网络虚拟化技术,可以很方便地构建一张新的移动核心网。方便到只需将不同版本、不同功能的虚拟核心网网元的软件及对网络的需

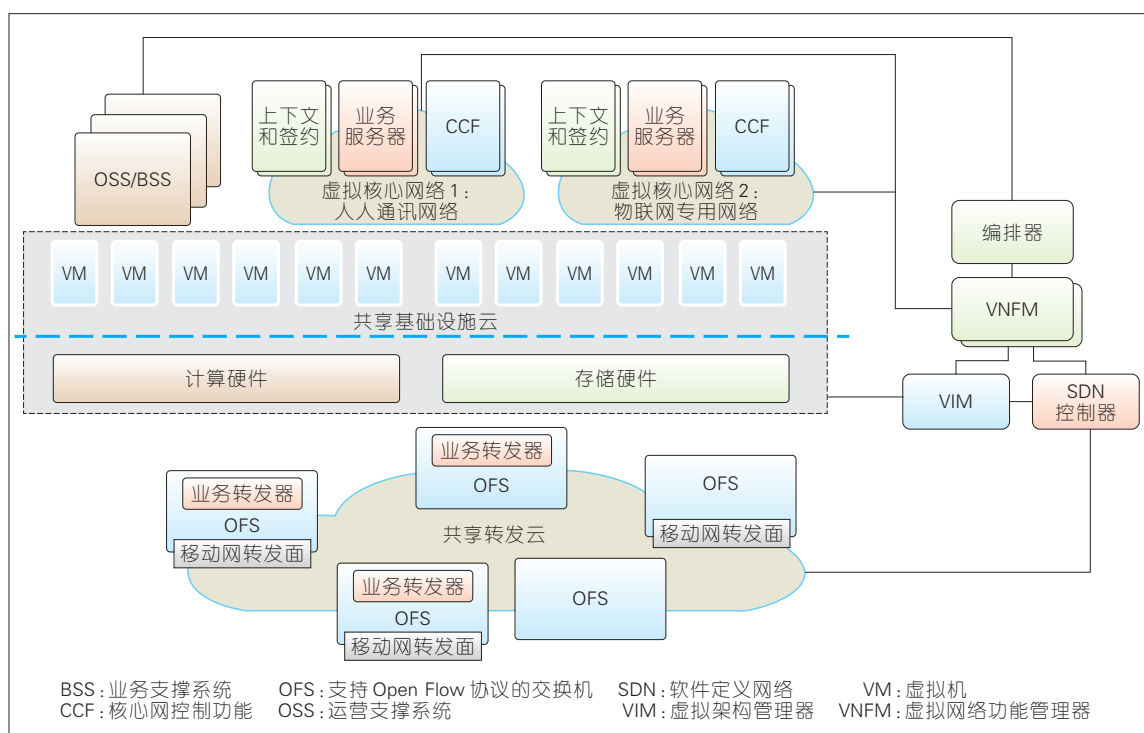
求告诉编排器即可,编排器根据需求自动为核心网分配硬件资源、加载核心网软件、对核心网网元实例化,对核心网网元进行配置、分配网元间的链路,从而能快速组建一张新的核心网。比如,运营商可以为车联网组建专门的移动网络,也可以为远程医疗组建专门的网络。运营商可以将人人通信与物物通信分开,也可以为不同组织或公司的功能类似的网络需求组建不同的网络并为之服务,从而更好地相互隔离。多张核心网并存的未来网络运营模式见图5。

在图5中,运营商同时运营了两张虚拟核心网。虚拟核心网1是针对人人通信的网络,而虚拟核心网2是针对物联网的专用核心网。运营商利用专用网络为物联网终端服务,可针对物联网的特征对网络进行优化,如针对物联网的海量连接需求优化,或物联网的低移动性进行优化。不同的虚拟核心网共享基础设施和转发设备。

## 2.4 智能管理

网络管理是运营商的重要成本

图5  
多张专用核心网  
并存



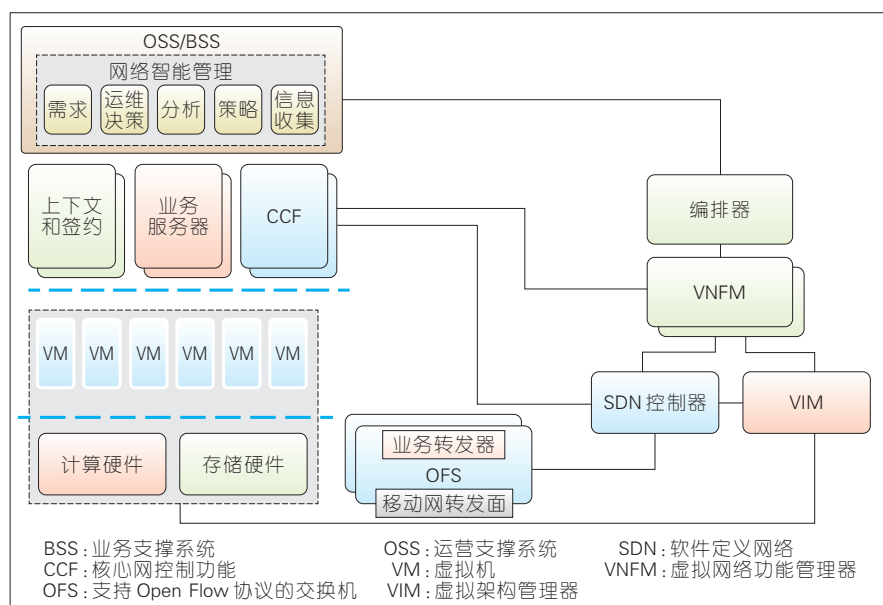
之一,智能的网络管理可以自动对网络进行配置,对正在运行的网络进行监控,并可根据网络运行状况对网络进行调整,以达到最佳运行状态。

自4G开始,自组织网络(SON)技术的引入使得无线基站的配置和管理大大简化。SON技术可实现邻站的自动发现和配置,通过X2接口或S1接口交换基站配置相关信息,实现小区的自动配置、负荷分担、自动优化和自愈等。

到了5G,NFV的引入使得多个并行的专用核心网络成为可能和必然,核心网的配置和维护工作量将大大增加,因此,如何对网络实行自动安装、自动部署、自动配置和自动维护将变得更重要。

为了支持网络智能管理,首先,网络智能管理系统必须能收集正在运行的网络的状态信息,包括,各网元的负荷、容量、能力、部署位置、网络拓扑等信息;其次,网络智能管理系统还需收集空闲资源的情况,如可用计算能力、可用内存、以及可用资源的位置等。此外,网络智能管理系统还会收集与业务相关的信息。在收集了这些信息之后,网络智能管理系统对信息进行分析。对信息的分析有时需大数据处理中心进行处理,比如,对业务数据的分析需借助大数据处理中心。收集业务数据的目的是了解终端的行为模式,并据此对网络进行优化,例如,可根据分析结果决定转发面的位置和是否需要引入业务服务器对用户数据流进行处理。网络智能管理系统从虚拟核心网网元中收集各种状态信息和业务信息,从NFV编排器获取空闲资源信息。

除了从网络中收集各种信息,并对信息进行分析之外,网络智能管理系统还需提供接口用于由运营商管理人员配置必要的信息,如策略信息或者可选的、新的网络服务需求。策略信息包括网络部署策略、优化策略等,网络服务需求是来自企业、政府、



▲图6 未来核心网中的网络智能管理

虚拟运营商等大客户的需求。网络智能管理系统根据网络状态、可用资源、策略信息及可选的网络服务需求做出网络部署或优化决策。

图6为未来核心网中的网络智能管理系统,它集成在对象存储/基本服务集运营支持系统(OSS/BSS)中,当然它也可以位于其他地方,比如作为一个虚拟服务器独立运行。

### 3 结束语

文章结合网络虚拟化、SDN、业务链等5G热点技术对虚拟化的4G核心网进行了进一步简化,提出了一种集成的虚拟化核心网架构,支持智能管理、业务链和多核心网并存。该核心网架构将核心网功能集成,将处理模块和用户上下文分开,从而能更好地支持核心网的分布式处理。集成的核心网还减少了接口,除了与传统网络的接口之外,在内部CCF间切换时无需传递数据,因此无需CCF间的接口。网络智能管理模块的引入使得网络实现运维自动化,包括网络自动化部署、配置、优化和故障处理。

#### 参考文献

- [1] Network Function Virtualization (NFV) Management and Orchestration[EB/OL].http:

//www.etsi.org/deliver/etsi\_gs/NFV-MAN/001\_099/001/01.01.01\_60/gs\_NFV-MAN001v010101p.pdf

- [2] ONF: SDN Architecture Overview[EB/OL].  
https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/SDN-architecture-overview-1.0.pdf  
[3] draft-ietf-sfc-problem-statement-10: Service Function Chaining Problem Statement [EB/OL]. http://tools.ietf.org/pdf/draft-ietf-sfc-problem-statement-10.pdf  
[4] draft-ietf-sfc-architecture-02: Service Chaining Function Architecture [EB/OL]. http://tools.ietf.org/pdf/draft-ietf-sfc-architecture-02.pdf

#### 作者简介



宗在峰,中兴通讯股份有限公司标准预研工程师;从事3GPP移动核心网标准的制订和跟踪,目前主要研究领域为5G核心网架构。



吴磊,中兴通讯股份有限公司核心网规划总工;主要从事移动分组网络技术的研究和产品规划、移动分组网络未来演进、5G等关键技术的研究工作。

# 《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper),并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2)稿件需采用WORD文档格式。
- (3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位,中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。
- (4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6)文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8)参考文献以20条左右为宜,不允许公开发表的资料不应列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:
  - 期刊[序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 论文集析出文献[序号]作者. 题名[C]/论文集编者. 论文集名(会议名). 出版地: 出版者, 出版年(开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 保存地点: 保存单位, 授予年. 数字对象唯一标识符
  - 专利[序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准[序号] 标准名称: 标准编号[S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100kB)。
- (11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12)提供联系方式,如:通信地址、电话(含手机)、Email等。

### 3. 其他事项

- (1)请勿一稿两投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦1201室, 邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356, 联系邮箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)

本刊只接受在线投稿, 欢迎访问本刊投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)

# 中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995 年创刊 总第 128 期  
2016 年 6 月 第 22 卷第 3 期

主管:安徽省科学技术厅  
主办:安徽省科学技术情报研究所  
中兴通讯股份有限公司  
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:陈杰  
常务副总编:黄新明  
责任编辑:徐烨  
编辑:卢丹,朱莉,赵陆  
排版制作:余刚  
发行:王萍萍  
编务:王坤

《中兴通讯技术》编辑部  
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 12 楼  
邮编:230061  
网址: [www.zte.com.cn/magazine](http://www.zte.com.cn/magazine)  
投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)  
电子信箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)  
电话: (0551)65533356  
传真: (0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社  
发行范围:全球发行  
印刷:合肥添彩包装有限公司  
出版日期:2016 年 6 月 10 日  
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/ TN  
广告经营许可证:皖合工商广字 0058  
定价:每册 20.00 元,全年 120.00 元