



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

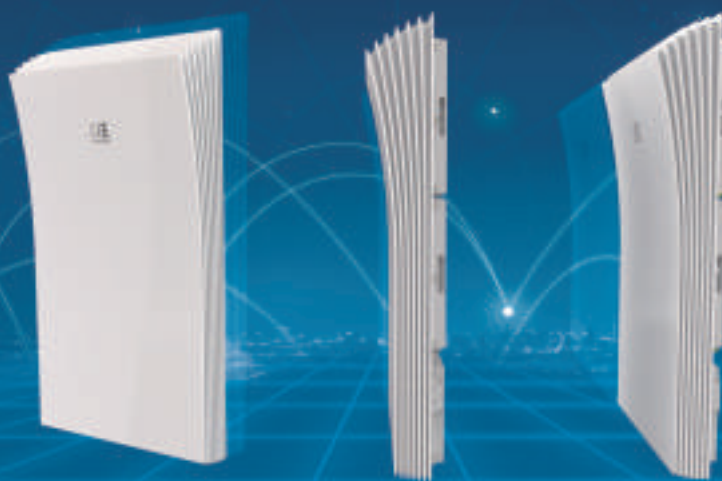
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

tech.zte.com.cn

2017年6月 • 第3期

**专题：5G 无线传输技术**



Pre5G Massive MIMO



# 《中兴通讯技术》第7届编辑委员会委员名单

**顾问** 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） 钟义信（北京邮电大学教授） 陈锡生（南京邮电大学教授）

**主任** 陆建华（中国科学院院士，清华大学教授）

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

**副主任** 马建国（广东工业大学教授） 陈前斌（重庆邮电大学副校长）

## 编委（按姓名拼音排序）

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>曹淑敏</b> 中国信息通信研究院前任院长              | <b>谈振辉</b> 北京交通大学教授                      |
| <b>陈建平</b> 上海交通大学教授                   | <b>唐雄燕</b> 中国联通网络技术研究院首席专家               |
| <b>陈杰</b> 中兴通讯股份有限公司高级副总裁             | <b>童晓渝</b> 中电科软件信息服务有限公司副总经理             |
| <b>陈前斌</b> 重庆邮电大学副校长                  | <b>王京</b> 清华大学教授                         |
| <b>葛建华</b> 西安电子科技大学通信工程学院副院长          | <b>王文东</b> 北京邮电大学软件学院副院长                 |
| <b>管海兵</b> 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长       | <b>王翔</b> 中兴通讯股份有限公司副总裁                  |
| <b>洪波</b> 中兴发展股份有限公司总裁                | <b>王喜瑜</b> 中兴通讯股份有限公司副总裁                 |
| <b>洪伟</b> 东南大学信息科学与工程学院院长             | <b>卫国</b> 中国科学技术大学教授                     |
| <b>纪越峰</b> 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院<br>执行院长 | <b>吴春明</b> 浙江大学教授                        |
| <b>蒋林涛</b> 中国信息通信研究院科技委主任             | <b>邬贺铨</b> 中国工程院院士                       |
| <b>李尔平</b> 浙江大学信息学部副主任                | <b>徐安士</b> 北京大学教授                        |
| <b>李红滨</b> 北京大学教授                     | <b>续合元</b> 中国信息通信研究院技术与标准研究所总工           |
| <b>李建东</b> 西安电子科技大学副校长                | <b>徐慧俊</b> 中兴通讯股份有限公司执行副总裁               |
| <b>李军</b> 清华大学教授                      | <b>薛一波</b> 清华大学教授                        |
| <b>李乐民</b> 中国工程院院士，电子科技大学教授           | <b>杨义先</b> 北京邮电大学教授                      |
| <b>李融林</b> 华南理工大学教授                   | <b>杨震</b> 南京邮电大学校长                       |
| <b>李少谦</b> 电子科技大学通信与信息工程学院院长          | <b>尤肖虎</b> 东南大学教授                        |
| <b>李涛</b> 南京邮电大学计算机学院院长               | <b>张宏科</b> 北京交通大学教授                      |
| <b>李星</b> 清华大学教授                      | <b>张平</b> 北京邮电大学网络技术研究院执行院长              |
| <b>刘建伟</b> 北京航空航天大学教授                 | <b>张云勇</b> 中国联通研究院院长                     |
| <b>陆建华</b> 中国科学院院士，清华大学教授             | <b>赵慧玲</b> 中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作<br>委员会主席 |
| <b>马建国</b> 广东工业大学教授                   | <b>赵先明</b> 中兴通讯股份有限公司总裁                  |
| <b>孟洛明</b> 北京邮电大学教授                   | <b>郑纬民</b> 清华大学教授                        |
| <b>糜正琨</b> 南京邮电大学教授                   | <b>钟章队</b> 北京交通大学教授                      |
| <b>庞胜清</b> 中兴通讯股份有限公司高级副总裁            | <b>周亮</b> 南京邮电大学通信与信息工程学院副院长             |
| <b>孙知信</b> 南京邮电大学现代邮政学院院长             | <b>朱近康</b> 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。

# Contents 目次

中兴通讯技术 总第134期 第23卷 第3期 2017年6月

## 专题:5G 无线传输技术

- 02 类有线的无线接入 ..... 尹华锐,陈晓辉,卫国
- 06 非正交多址接入的关键技术研究 ..... 肖可鑫,夏斌,陈智勇
- 11 毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术 ..... 尤力,高西奇
- 14 宽带毫米波数模混合波束赋形 ..... 朱宇,李先驰
- 20 5G 大规模机器类通信中的传输技术 ..... 宫诗寻,陶小峰
- 24 基于滤波器组多载波的多点协作通信系统 ..... 宋国超,陈达,江涛
- 29 Filtered-OFDM 系统的次优接收机设计与验证 ..... 梁潇,武刚
- 35 干扰对齐技术的发展与应用 ..... 刘伟,李建东,盛敏
- 38 基于加权类分数傅立叶变换的变换域通信系统 ..... 梅林,房宵杰,沙学军

## 专家论坛

- 45 关于移动通信终极形态的部分思考 ..... 唐友喜,李晨兴,邵士海
- 50 5G 大规模接入技术:如何应对差异化服务的挑战 ..... 张朝阳

## 企业视界

- 53 无线网络与产品演进 ..... 张万春,崔丽,段晓伟

## 技术广角

- 58 一种可信身份网络架构及在互联网安全中的应用 ..... 毛玉欣,郝振武,江家仁
- 62 泛在信息化智能制造系统 ..... 于海斌,王鹏,曾鹏

期刊基本参数:CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*64\*zh\*P\*¥ 20.00\*15000\*14\*2017-06

# Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 23 No. 3 Jun. 2017

## Special Topic: Technologies of 5G Wireless Transmission

- 02 Wired-Like Wireless Access ..... YIN Huarui, CHEN Xiaohui, WEI Guo
- 06 Key Technologies for Non-Orthogonal Multiple Access ..... XIAO Kexin, XIA Bin, CHEN Zhiyong
- 11 Key Technologies in Millimeter Wave Massive MIMO Wireless Transmission ..... YOU Li, GAO Xiqi
- 14 Hybrid Digital and Analog Beamforming for Broadband Millimeter Wave Communication Systems ..... ZHU Yu, LI Xianchi
- 20 Transmission Technologies in Massive Machine Type Communication for 5G ..... GONG Shixun, TAO Xiaofeng
- 24 Coordinated Multipoint Communication System Based on Filter Bank Multicarrier ..... SONG Guochao, CHEN Da, JIANG Tao
- 29 Design and Verification of Sub-Optimum Receiver for Filtered-OFDM System ..... LIANG Xiao, WU Gang
- 35 Development and Application of Interference Alignment ..... LIU Wei, LI Jiandong, SHENG Min
- 38 Weighted-Type Fractional Fourier Transform Based Communications System ..... MEI Lin, FANG Xiaojie, SHA Xuejun

## Expert Forum

- 45 Considerations on the Ultimate Form of Mobile Communications ..... TANG Youxi, LI Chenxing, SHAO Shihai
- 50 Massive Access in 5G: Challenges and Solutions for Differentiated Service Provisioning ..... ZHANG Zhaoyang

## Enterprise View

- 53 Evolution of Wireless Network and Products ..... ZHANG Wanchun, CUI Li, DUAN Xiaowei

## Technology Perspective

- 58 A Network Architecture Based on Trusted Identity and Its Applications ..... MAO Yuxin, HAO Zhenwu, JIANG Jiaren
- 62 Ubiquitously Information-Based Smart Manufacturing System ..... YU Haibin, WANG Peng, ZENG Peng

## 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。

## 2017年第1—6期专题

### 1 NB-IoT 体系标准与应用

王喜瑜 中兴通讯股份有限公司 副总裁  
孙知信 南京邮电大学 教授

### 2 通信网络重构新技术

赵慧玲 中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作委员会主席

### 3 5G 无线传输技术

卫国 中国科学技术大学 教授

### 4 神经网络与深度学习

焦李成 西安电子科技大学 教授

### 5 硅基光电子集成技术与器件

陈建平 上海交通大学 教授

### 6 虚拟现实技术与应用

潘志庚 杭州师范大学 教授



中国科学院大学教授,历任国家“863”计划通信技术主题专家组成员、中国第三代移动通信系统研究开发项目总体组成员、国家“863”计划 B3G 移动通信重大项目总体组成员、“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组成员;从事无线通信技术、移动通信网络、信号处理等系统研究和教学工作,在无线通信领域长期参与国家重要科研计划的制定和项目管理工作,并承担完成多项课题的研究工作;获国家科技进步二等奖 1 项、国务院颁发的政府特殊津贴;发表论文 100 余篇,拥有 10 余项国家发明专利。

## 导读

5G 无线传输技术发展与 5G 独特的愿景、需求及应用场景密切相关,并且充满 5G 新需求、新应用带来的新挑战。与移动通信技术从 1G、2G、3G 到 4G 的技术驱动发展过程不同,5G 技术的发展更多的是来自于应用需求驱动。移动互联网和物联网的两大应用背景,以应用倒逼的态势对 5G 技术提出了明确要求。

移动互联网颠覆了传统移动通信业务模式,推动人类社会信息交互方式的进一步升级。对 5G 无线传输技术而言,移动互联网最为主要的需求是移动流量超千倍增长,数据速率大幅提升至每秒数吉比特。增强现实、云桌面、在线游戏等业务同时也对时延提出了“无感知”的苛刻要求,在热点区域对移动通信网络造成了巨大的流量压力。

物联网扩展了传统蜂窝移动通信系统的服务范围,从人与人通信延伸到物与物、人与物智能互联等诸多行业领域。数以千亿计的设备接入网络和海量小数据包频发,将带来前所未有的信令资源挑战。

在此背景之下,面向 5G 的无线传输技术,一方面需要提供更大的传输带宽和传输技术来满足数据吞吐量;另一方面需要发展面向海量连接的新型多址接入技术。在本期专题中,《类有线的无线接入》的作者提出了创新的免信令上行接入,消除大规模接入时的大量信令开销;《非正交多址接入的关键技术研究》的作者对 SCMA、MUSA、PDMA3 种非正交接入方式的理论支撑、码字设计和资源调度等关键问题进行了深入分析;《毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术》和《宽带毫米波数模混合波束赋形》的作者研究了面向 5G 传输的毫米波大规模 MIMO、波束成形等关键技术,是开发 5G 新频段所关注的热点;《5G 大规模机器类通信中的传输技术》的作者介绍了大规模机器类通信场景中的数据采集技术以及其在无线传感器网络应用,这是 5G 应用的一个新场景;《基于滤波器组多载波的多点协作通信系统》、《Filtered-OFDM 系统的次优接收机设计与验证》、《干扰对齐技术的发展与应用》、《基于加权类分数傅立叶变换的变换域通信系统》的作者从不同角度研究探讨面向 5G 的关键技术与实现,提出了一些创新思路和方法。

上述工作从一个侧面反映了中国学术界在 5G 无线传输技术方面的观点以及最新研究成果,希望能够在启发和推动 5G 技术的研究和发展上起到一点作用。

卫 国

2017 年 4 月 25 日





# 类有线的无线接入

## Wired-Like Wireless Access

尹华锐/ YIN Huarui  
陈晓辉/ CHEN Xiaohui  
卫国/ WEI Guo

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)  
(University of Science and Technology of  
China, Hefei 230027, China)

### 1 有线网络接入及资源共享机制

**介** 质访问控制(MAC)机制要解决的基本问题是协调多个用户争用唯一的资源。在各类现场总线发展的历程中,形成了一些有益的访问控制思路,这些思路不仅可以解决总线中的访问控制等相关的一系列问题,也极大地影响了现代网络的MAC协议设计<sup>[1]</sup>。

基于现场总线发展而来的MAC的一些主要技术思想包括以下几种:轮询,主节点定期询问各从节点并决定哪个从节点可以享有传输链路;仲裁,某个特殊节点决定其他节点的权限;时分复用;令牌;载波侦听(CSMA)等。

有线网络与总线中的访问控制类似,所有的节点共享传输介质。如何保证传输介质有序、高效地为许多节点提供传输服务,就是有线网络的MAC协议要解决的问题。无论在何种有线网络中,MAC协议都规定了共用信道的使用产生竞争时,分配信道

收稿日期: 2017-04-10  
网络出版日期: 2017-05-08  
基金项目: 国家自然科学基金(61571412)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0002-004

**摘要:** 提出了针对海量连接的、免调度和免资源分配的、类有线化的无线接入及资源共享方案。该方案为每一个参与传输的无线终端分配虚拟专用传输信道,终端按需在该虚拟传输信道进行数据传输。基于该方案的无线传输和有线传输仅仅在物理层使用不同介质进行,在此之上的各层可实现协议的统一化,有效降低无线传输的信令开销和相应的时延,降低无线传输的协议复杂度。

**关键词:** 无线通信; 海量连接; 多址接入; 虚拟专用信道

**Abstract:** In the paper, a novel wired-like strategy for wireless massive connection without scheduling and resource allocation procedure is proposed. The method allocates a virtual dedicated channel for each terminal, and the terminal can transmit the data packets via its dedicated channel when necessary. The only difference between wired network and wired-like wireless network is transmission media, the protocol of these two class of network can be unified for other layers. Such technique can help us to reduce the signaling cost, transmission latency and the complexity of protocol implementation.

**Keywords:** wireless communications; massive connection; multiple access; virtual dedicated channel

使用权的规则。这些MAC包括早期的ALOHA协议(包含纯ALOHA和Slotted ALOHA)<sup>[2-4]</sup>,令牌环网以及CSMA协议族等。

近年来基于以太网的局域网交换技术发展迅猛,逐步形成了星型、即插即用的主流有线网络标准架设方案,如图1所示,即某台计算机终端等有线终端独占交换机某特定端口及其对应的传输介质,虽然协议上仍然兼容原有的基于CSMA基础上的以太网资源共享机制,但是端口链路资源被某终端独占的方式逐步成为主要的资源利用方式<sup>[5-6]</sup>。

有线网络传输能力取决于中心节点的所能提供的通道数(即中心控制器端口数目和数据缓存器大小)。有线网络支持终端数不受限于传输

通道容量限制,主要取决于中心控制器的端口数目;传输能力取决于控制器数据缓存大小。主流的观点认为:现有的基于交换机为中心的有线网络无需复杂的资源调度即可正常使用(不排除通过流量控制等资源调度控制手段)。事实上,在图1所示结构下,有线网络的传输资源分配可视



▲ 图1 有线网络示意

为对交换机端口的事前分配,按照某个规划技术方案(资源调度为可修改)为某个(批)终端建立一个专有物理通道,该通道一旦建立即该网线对应的单个(若干)终端固定拥有。网线安装是有线网络的主要资源调度方式,辅助的资源管理调度也是管理员发起的对端口的流速(流量)等相关手段。

## 2 无线接入与资源共享方式

无线网络的特殊性在于信息承载信号具有广播和叠加特性,即任何终端辐射的无线信号总是以某种线性组合的方式出现在基站天线。如果我们将空间看成一个共享信道,则无线网络相当于所有参与信息传输的终端以某种方式(竞争、分配等)共享该公共传输信道。这个特性为网络的扩展带来了显而易见的好处:自由空间的广播性和叠加性为终端接入带来便利性,任何被基站(AP)信号覆盖的终端(节点)均可得到网络覆盖,不再受物理媒质严格约束和交换机端口的限制。

另一方面,有线网络地址区分是通过交换机(路由器)端口进行区分,网络对传输资源的控制主要通过交换机或者路由器的缓存管理来实现。无线通信与此不同,核心因素在于空口资源受限,链路地址区分和资源调度必须在物理层实现。

与每个局域网交换机管理有限个(通常从几个到几十个)端口不同,一个无线网络的中心控制器服务的终端数目变化巨大,既有服务数十个终端的WiFi,也有服务上万个传感器物联网(IoT)。无线传输服务节点的大跨度业务需求广泛存在;共享信道下大量数据传输链路的资源管理和协调问题一直都是无线网络的核心问题。

无线网络主要有两大阵营:一类面向短距离覆盖;一类面向广域覆盖。前者的典型代表是WiFi,后者的典型代表是2G/3G/4G移动通信网

络。前者以CSMA方式实现资源的竞争和调配;后者多采用终端(节点)通过竞争接入信道向基站申请传输资源的方式实现资源的使用权,技术上不同的AP的调度下使用包含但不限于如时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)、码分多址(CDMA)、正交频分多址(OFDMA)和空分复用(SDMA)等正交接入技术;另外,面向短距覆盖的无线个人局域网(WPAN)等也有采用资源申请-分配方式。面向广域覆盖的移动网络数据传输过程用图2所示,其中粗虚线上方为终端接入网络的过程。接入过程一般有几个步骤:

(1)终端(节点)进入AP服务区,并且获取AP有关本服务区的一些相关参数;

(2)终端提交接入申请,AP根据终端的相关资料统一接入。

粗虚线下方描述的是数据传输过程,一般有几个步骤(终端进入等待状态,当有数据需要传输时进入下一个状态,否则停留在该状

态):

(1)终端有数据需要传送时,首先竞争随机接入信道;

(2)随机接入信道竞争成功则请求AP分配传输资源,否则继续参与随机接入信道竞争;

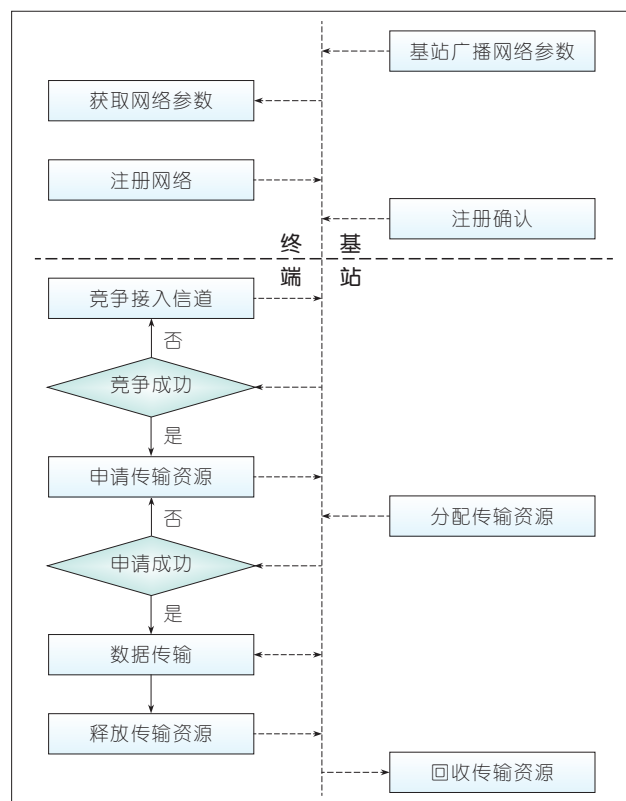
(3)基站根据当前可供调配的资源和资源请求情况,按照某种准则进行资源分配,在基于TDMA、FDMA、CDMA以及OFDMA等正交资源分配的系统,AP通过本地维护互斥的资源调度策略保证不同链路之间至少在一个维度上保持正交;

(4)终端(节点)根据分配的资源进行数据传输;

(5)传输完毕释放链路资源,AP收回传输资源。

从上述过程中,我们可以看出:1个消息的传送需要经历4次交互,对于现有的智能终端大量存在的即时通信业务以及未来5G面临的IoT节点来说,小数据包业务虽然占据上行数据总流量比例不高,但是其高的系统开销使得小报数据业务成为无线

图2  
当前典型无线网络传输  
信息交互流程



通信上行链路资源的重要占用者;对于低时延约束业务,多个超帧级别的信令时延交互成为传输时延的重要贡献因素。当前在窄带物联网(NB-IoT)技术方案中有提出缩短超帧时间来减小数据传输时间;但是若干倍超帧时间长度的时延和数倍于传输数据的传输链路资源管理和调度开销并没有因此而减少。

从上述分析可以看出:基于竞争-分配-传输-释放的方式不仅引入了大量的信令开销,同时也引入了消息传输的时延。因而探寻合适的方法来改变这种现象显得日益重要。借鉴有线网络的发展,最初多个终端利用某种协议(竞争、分配)共享传输介质传输,后来逐步转变到终端独占交换机端口的形式,这种转变简化了网络协议,提高了网络传输效率。若在无线网络中实施类似的设计则会带来两个问题:

(1)能否为无线网络的每个终端固定分配一根虚拟网线,其资源为该终端独占,后续使用无需资源协调和调配?

(2)采用这样的资源协调和管理方式会对无线网络相应技术提出哪些要求,能否有解决的可能性?

近年来非正交的多址方法研究逐步进入学术圈和工业界的视野,其理论基础在于C.E.Shannon的认识:在利用恰当的信道编码的前提下,当链路的等效信号与干扰加噪声比(SINR)大于某个门限时即可以接近1的概率实现正确数据传送。这个结论告诉我们如果可以恰当控制各个链路之间的干扰水平,可实现若干链路的并发传输。基于该假设,相对于正交传输,非正交多址方式可同时容纳的链路数目将远远多于正交多址方式所能支持的链路数目。

非正交多址接入(NOMA)的主要思想是不同终端(节点)之间发送信号不再要求正交,而是利用特定的策略保证不同链路间的干扰低于某个门限。接收端利用干扰消除的方式

实现对不同链路的数据解调。当前学术界和产业界关注的几个主要非正交多址方式有:基于功率域拓展的NOMA<sup>[7]</sup>技术、基于码域的稀疏码分多址(SCMA)技术,以及多用户共享接入(MUSA)技术等。

NOMA技术的核心思想是控制不同数据链路的发送功率,不同链路的信号在接收端形成功率分层。接收端利用串行干扰消除(SIC)实现对不同分层的信号逐次解调和干扰消除。该方案主要应用在下行多址技术方案中。基于功率域的多址方式可以扩展较多的链路资源,但是基于功率分层的NOMA方案在无线传输上行链路应用面临一定的技术困难,困难在于实现功率分层需要链路增益作为输入参数,在此基础上控制各终端(节点)的发送功率使得接收端形成功率梯度,这就意味着系统需要付出较多的信令开销;另外,上行链路的用户调度也需要大量的信令参与才可以完成,因此该技术方案是否能够得到应用产业界和学术界尚处于讨论和观望之中。另一方面由于使用NOMA技术方案,利用不同链路的功率差别进行串行干扰消除,随着期望并发链路数目的增加,功率效率将快速下降,这就意味着如果需要支持的独占链路数目上升将会引起终端发送功率的急剧增加,最终可实现的虚拟独占链路数目将会受到很大的限制。

SCMA<sup>[8]</sup>将同一个用户的发送数据映射到多个子载波上,不同用户在同一子载波上的映射采用不同的星座图旋转的方式实现,接收端则利用了置信度传播的方法。MUSA<sup>[9]</sup>的技术特点是充分利用了远、近用户的发射功率差异,在发射端使用非正交复数扩频序列对数据进行调制,并在接收端使用连续干扰消除算法滤除干扰,恢复每个用户的数据。SCMA允许多个用户复用相同的空口自由度,可以显著地提升系统的资源复用能力。

尽管上述两类多址方式在一定程度上拓展了无线网络中可同时传输的链路数目,但是考虑到实际情况,真正可支持的独立链路数目并不多,无法解决无线传输中的资源使用协调问题。理论上,SCMA和MUSA可以利用竞争的方式实现无调度传输,但是由于可供选择的码本严重不足制约了上述扩展能力,随着参与传输的用户数目越来越多,竞争冲突会使性能急剧下滑。

### 3 类有线的无线传输方法

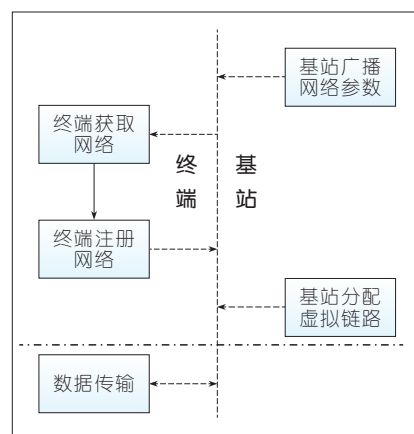
在5G标准化研究过程中,研究者们明确提出了未来5G网络的特性,包括每平方公里 $10^6$ 个活跃连接用户,延迟不超过100 ms等。传统的基于竞争或调度的资源使用方式无法满足上述需求,因此我们提出一种类有线的资源共享方式基础上的无线接入方式。相应的传输过程由图3给出,具体的流程描述如下。

(1)终端(节点)进入AP服务区,获取有关服务区的相关参数;

(2)终端提交接入申请,AP根据终端的相关资料统一接入并分配一条专属于该终端(节点);

(3)终端(节点)进行相关的数据传输。

上述无线接入和传输方法的核心思想在于:终端申请接入时,AP为该终端分配一条专属于该终端的传输链路,该虚拟专用链路在终端停留



▲图3 有线化后的无线传输流程



在 AP 覆盖范围内保持不变。如图 3 所示,此时基站和终端之间的资源分配完成(横向点划分割线上方),从网络接口看相当于基站为每个无线终端预留一个虚拟的专用无线信道,终端(节点)需要发送数据时,无需与 AP 进行有关资源分配的交互,直接利用虚拟独占传输链路进行数据传输。图 4 给出类有线的无线网络结构,注意每用户对应的专用通道实际上是虚拟产生的,我们利用虚线表示该专用链路。所有终端获得虚拟专用通道的类有线的无线传输对网络传输性能有着重要的意义:

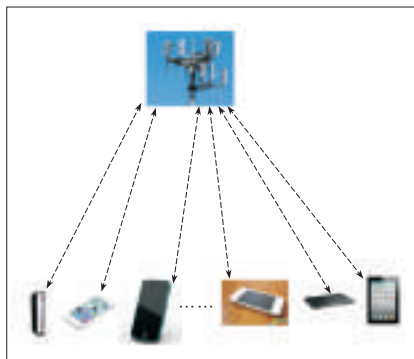
- (1)一旦接入,连接永远保持;
- (2)无需调度即时传输,只要在不超出总吞吐量的前提下,任意用户的组合均可采用类似于有线网络的资源使用方式实现数据传输;
- (3)上层协议实现无线传输和有线传输的统一,降低了协议维护和开发复杂度。

#### 4 类有线的无线接入和资源共享方式存在的技术问题和进展

类有线的无线接入和资源使用方式有着诱人的前景,但是也将面对诸多挑战。

(1)支持海量连接的虚拟专用链路设计。

如何为覆盖范围内的海量终端提供足够多的虚拟专用链路是类有线接入方法面临的首要问题。基于



▲图4 有线化后的无线网络结构

功率域 NOMA 和基于码域的 MUSA、SCMA 等非正交多址方式一定程度上拓展了无线网络可同时支持的虚拟专用链路数目;但可供选择的码本严重不足,尚不足以支撑为每个终端(节点)建立一个虚拟专用链路。

我们针对支撑海量终端虚拟专用链路的可能性开展研究,提出了一种利用预编码实现的上行小数据包免调度传输方法——SpMA<sup>[10]</sup>。该传输方案和现有的基于符号级的预编码方式不同:包括 CDMA、SCMA、MUSA 在内的码域多址传输方案中,同一用户的不同符号会以较快的重复周期重复使用一个码本以对不同符号进行调制,SpMA 方案中每个发送符号使用不同的预编码码本以将每个传输符号均随机扩展到整个时频资源空间,进一步利用 AP 域终端(节点)之间的信道响应实现对空域资源的利用。该方案优势在于:预编码码本可将任意的随机序列作为预编码码本,每个终端(节点)注册网络后即得到与预编码码本相对应的虚拟专用链路。我们在理论上已经证明只要同时参与传输的用户量不超过一个门限,所有参与传输的链路接收性能和单用户传输性能相比损失可小于 1 dB。特别地,我们进一步联合功率域、码域,人为控制和利用远近效应引起的功率分层,实现了对海量用户的虚拟专用链路的支持。数值仿真和理论分析都显示:该方案在基站天线数  $M=8$ ,时频符号数  $T$  的前提下,可以为超过上万个终端(节点)提供专属于每个终端的虚拟链路;传输能力上,在数据符号数  $d$  满足  $T=8d$ ,相对于正交传输存在 2 dB 信噪比损失的前提下,可支持的并发连接数可超过 80。

(2)信道估计。

无线网络和有线网络的区别还体现在信道响应随时间和空间的变化特性。有线网络电磁波传输信道响应相对固定,随时间、空间发生改变极小,不同链路之间的信道差异通

过链路速度自适应技术和信道均衡技术可获得近乎完美的解决;无线网络中接收信号不仅仅取决于发送信号,还取决于随时间和空间变化的信道响应。在类有线方式的无线传输中,作为发送方的终端和接收方的基站对各虚拟专用链路信道响应处于未知状态,信道估计需要面临的问题一是在没有先验知识的前提下快速寻找出发送数据用户的集合;二是在可能参与传输的终端(节点)为小区内全部注册用户的情况下,需要进行信道估计的用户集合庞大,数目上远远超过天线数目。这也是类有线的无线接入和资源使用方式中必须要解决的一个问题。我们的初步研究表明:通过选择恰当的帧结构和参数,信道估计问题可以在一定程度上得到解决。仿真结果显示:使用了信道估计进行接收和准确知道信道状态信息进行接收,其性能差别不到 1 dB。我们认为这个结果工程实践上可以接受的。

(3)载波同步和时钟恢复。

有线网络主要采用光纤和双绞线作为信号传输媒质,数据承载波形多采用数字基带波形。无线网络因为天线辐射效率的原因,多利用载波信号传递数据。为了保证信号的有效接收,必须进行载波同步。理论上终端(节点)可以利用 AP 的 Pilot 信号与 AP 的载波同步,进而使所有参与传输的终端(节点)保持载波同步,但是任何载波恢复算法或者载波跟踪同步环路都不能保证终端(节点)和 AP 之间保持载波的完全同步,这导致多个发送终端(节点)上行数据传输的载波产生偏差,系统留给终端(节点)和 AP 导频进行同步的资源受限。需要注意的是:终端(节点)之间的本振独立,载波偏差彼此不同,载波偏差会使得干扰消除,这使得传统的载波跟踪和同步算法都不再适用,如何解决本问题是实现无线传输有线化的关键;另一方面,由于各终端

►下转第 34 页

# 非正交多址接入的关键技术研究

## Key Technologies for Non-Orthogonal Multiple Access

肖可鑫/XIAO Kexin

夏斌/XIA Bin

陈智勇/CHEN Zhiyong

(上海交通大学, 上海 200240)

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

移动互联网、社交网络和物联网的蓬勃发展, 对未来移动网络提出了更高的需求。爆发式增长的数据流量给有限的频谱资源带来了极大的挑战; 同时, 随着物联网的快速发展, 第5代移动通信(5G)急需解决海量终端同时可靠接入的问题。

为提高无线通信系统的用户容量/数量, 一个常规办法是增加系统的资源, 如更多的频谱资源、更大的发射功率资源、更密集的小区数目和更多的传输天线等空间维度的资源。但因频谱资源稀缺, 低无线辐射要求, 小区站址有限且难以增加, 以及天线物理实现复杂等而面临严峻挑战。另一个方法则是从多址接入技术入手, 通过优化现有多用户分享资源的方式获得系统可同时支持用户数量的提升。多址接入技术在无线通信领域具有至关重要的研究意义, 其技术手段随着通信产业的发展而不断更新换代。目前多址接入技术分为正交多址(OMA)和非正交多

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0006-005

**摘要:** 从负载能力、接收机复杂度、编码方式等方面对比了3种典型的非正交多址接入(NOMA)技术, 并通过仿真验证了其传输可靠性。仿真结果显示: 稀疏编码多址接入(SCMA)具有最好的误码性能, 而多用户共享接入(MUSA)和图样分割多址接入(PDMA)的误码性能相似。此外, 还指出了NOMA技术的未来研究方向。

**关键词:** NOMA; SCMA; MUSA; PDMA

**Abstract:** In this paper, three dominant non-orthogonal multiple access (NOMA) schemes are compared, including sparse code multiple access (SCMA), multi-user shared access (MUSA) and pattern division multiple access (PDMA). And the transmission reliability of NOMA schemes are corroborated through the simulation experiments. It shows that SCMA outperforms the other schemes in terms of bit error rate (BER) while MUSA and PDMA achieve almost the same BER results. Moreover, the future research direction of NOMA is also pointed out in the end.

**Keywords:** NOMA; SCMA; MUSA; PDMA

址(NOMA)两类。常用的频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)等 OMA 方案可以保证不同用户信号间严格的正交性, 避免多址干扰。但是正交方案也存在频谱效率偏低的劣势, 虽然正交方案中的正交频分多址(OFDMA)技术可以利用重叠子载波的方法提高频谱效率, 其依然很难达到最大香农容量界, 需要通过在相同的时频资源上给不同用户分配非正交的波形来达到更大的容量<sup>[1]</sup>。结合先进的多用户检测技术, NOMA 可以在有效提高频谱效率的同时, 容纳更多的接入用户。

近年来的 NOMA 接入技术在理论研究和实现技术等方面不断前进, 取得了一些阶段性成果。大部分都集中在稀疏扩频码分多址(LDS)<sup>[2]</sup>、稀疏编码多址(SCMA)技术<sup>[3-6]</sup>、多用户共享接入(MUSA)<sup>[7]</sup>、图样分割多址

接入(PDMA)<sup>[8-11]</sup>等技术研究。NOMA 接入技术由于可支持用户数量远大于以往码分多址(CDMA)这类 OMA 技术的用户数量, 且能部分获得之前 OMA 技术所忽略的编码增益, 被视为未来支持海量移动终端的候选技术之一。

## 1 SCMA

### 1.1 系统模型

SCMA 接入技术包含两类主要技术: LDS 和 SCMA。LDS 是一种特殊的 CDMA, 其特殊之处在于 LDS 的扩频码字中存在一部分 0 元, 使得在接收端能够采用低复杂度的解调算法。一个 CDMA 编码器利用正交码字将正交幅度调制(QAM)符号扩展成复数符号序列, 因此 CDMA 调制器可以看作是二进制比特映射成复数域

收稿时间: 2017-04-11

网络出版时间: 2017-05-05

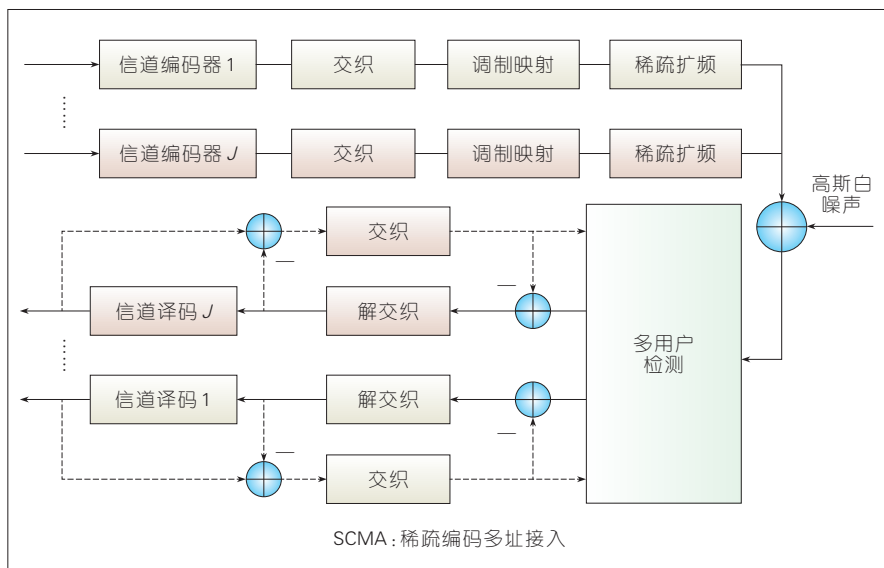
基金项目: 中国科学院无线传感网与通信重点实验室开放课题(课题编号: 2015002); 国家重点研发计划项目(课题编号: 2016YFE0121100)

符号序列的过程。从这个角度来看,不同于 LDS 的是,SCMA 将 QAM 映射模块和 CDMA 编码模块有机地结合在一起,直接将比特序列(向量)映射成发送复符号序列(向量)。正是这种高维码本的设计使得 SCMA 可以获得星座的成形增益。整个过程可以描述成一个从二进制域到高维复数域的编码过程,如图 1 所示。也就是说 SCMA 在发送端将编码比特直接映射为复数域的多维码字,不同用户的码字在相同的时频资源上以扩频的方式非正交叠加。同时在接收端,对于 SCMA 的扩频是稀疏的,它可以采用低复杂度的消息传递算法(MPA)去近似最优的最大后验多用户检测,从而可以可靠的对非正交用户进行译码。这种扩频会使得系统得到扩频增益/分集增益,使链路有更好的性能。

## 1.2 技术特点

首先,SCMA 的码本能够灵活地设计。SCMA 码本灵活设计的好处在于,未来不同的系统场景会有不同的系统性能要求,SCMA 码本设计提供了非常丰富的优化维度,包括:码字数量、扩频长度以及非零码字的个数。这样就可以从覆盖、连接数,以及容量等一些不同的系统衡量维度,针对不同场景进行设计。对于覆盖要求高的场景,如语音业务,我们可以使这些用户连接到更多的资源块上,增加码本中非零元素的个数,这样做可以使得系统的误码率得到降低,并且整个系统可容纳的用户数也将提高;对于连接性要求高的场景,如数据业务或者小包业务,不要求较低的误码率和抗干扰性,我们可以减少连接到资源块上的用户个数,降低码本中非零元素的个数,这样可以提高传输的速率,增强对于小包业务的支持。

其次,由于 SCMA 码字的稀疏性,接收端可以采用低复杂度算法,如利用 MPA 来近似解调各个用户的数



▲图1 SCMA的发送接收示意

据。由于 MPA 利用迭代求解,可以利用迭代特性,结合信道编码实现 Turbo 译码,在提高性能的同时把解调复杂度控制在一定范围内。

此外,SCMA 从平均能量效率角度来看,在高信噪比(SNR)条件下比增强长期演进(LTE-A)系统的平均能量效率高。由于 SCMA 具有正交性,能让更多的用户利用基站能量,因此用户数量大时比 OMA 接入能量效率更高。

## 2 MUSA

### 2.1 系统模型

MUSA 是另外一种基于复数域多元码的上行 NOMA 接入技术,适用于免调度的多用户共享接入方案,非常适合低成本、低功耗实现 5G 海量连接。MUSA 原理如图 2 所示。首先,各接入用户使用易于串行干扰抵消(SIC)接收的,具有低互相关性的复数域多元码扩频序列,将其调制符号进行扩展;然后,各用户扩展后的符号可以在相同的时频资源里发送;最后,接收侧使用线性处理加上码块级 SIC 来分离各用户的信息。扩展序列会直接影响 MUSA 的性能和接收机复杂度,是 MUSA 的关键部分。如果

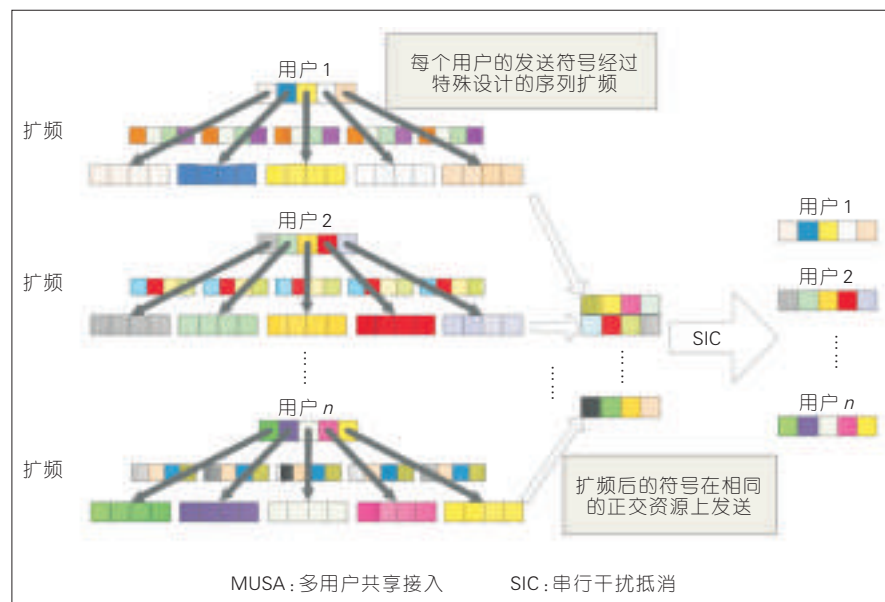
像传统直接序列码分多址(DS-SS-CDMA)(如 IS-95 标准)那样使用很长的伪随机(PN)序列,那序列之间的低相关性是比较容易保证的,而且可以为系统提供一个软容量,即允许同时接入的用户数量(即序列数量)大于序列长度,这时系统相当于工作在过载的状态。我们将同时接入的用户数与序列长度的比值称为负载率,负载率大于 1 即为过载。

长的 PN 序列虽然可以提供一定的过载容量,但是在 5G 海量连接这样的系统需求下,系统过载率往往是比较大的,在大过载率的情况下,采用长 PN 序列常常使得串行干扰抵消过程复杂和低效。在上行链路中,MUSA 使用特殊设计的复数域多元码(序列)来作为扩展序列,此类序列即使很短(往往小于 10 个码片),也能保持相对较低的互相关。例如,其中一类 MUSA 复数扩展序列,其序列中每一个复数的实部\虚部取值于一个多元实数集合。甚至一种非常简单的 3 元 MUSA 扩展序列,其每一个码片元素取值于一个简单 3 元集合{-1,0,1},也能取得相当优秀的性能。

### 2.2 技术特点

由于 MUSA 采用复数域的多元扩





▲ 图2 MUSA上行多址接入方案<sup>[9]</sup>

频码序列,同时在接收端采用先进的SIC接收机,MUSA可以支持相当多的用户在相同的时频资源上共享接入,并逼近多址接入信道的容量域边界。在上行场景中,这些大量共享接入的用户都可以通过随机选取扩展序列,然后将其调制符号扩展到相同时频资源的方式来实现。MUSA可以让大量共享接入的用户随机发送,无数据时则深度睡眠,而不需要先通过资源申请、调度、确认等复杂的过程才能接入。这个免调度过程在海量连接场景尤为重要,能极大减轻系统的信令开销和实现难度。同时,MUSA可以放宽甚至免除严格的上行同步过程,只需要实施简单的下行同步。最后,存在远近效应时,MUSA还能利用不同用户到达SNR的差异来提高SIC分离用户数据的性能,即也能如传统功率域NOMA那样,通过对强信道用户先解码来消除其对另一个用户造成的干扰。从另一角度看,这样可以减轻甚至免除严格的闭环功率控制过程。所有这些为低成本、低功耗实现海量连接提供了坚实的基础。

从5G海量连接的角度,对MUSA和传统功率域NOMA做一些比较:首

先,NOMA不需要扩频,而MUSA上行非正交扩频即使实部和虚部都限制在最简单的3值集合 $\{-1,0,1\}$ ,也可以有足够多的低互相关码;其次,两者都使用干扰消除技术,但NOMA不适合免调度场景,MUSA适合免调度场景(利用扩频码的随机性去估计用户接入情况的稀疏向量);最后,在免调度场景下,NOMA的分集增益不如MUSA。

### 3 PDMA

#### 3.1 系统模型

图样分割多址接入技术是基于发送端和接收端的联合设计的新型NOMA技术。在发送端,在相同的时、频域资源内,将多个用户信号进行功率域、空域、编码域的单或联合编码传输;在接收端,采用SIC接收机算法进行多用户检测,逼近多用户通信的信道容量域。

PDMA的基本原理可以用等效分集度来进行解释。按照垂直贝尔实验室空时结构(V-BLAST)系统的理论,第 $i$ 层干扰抵消能够获得的等效分集度 $N_{div} = N_R - N_T + i$ ,其中 $N_R$ 表示接收分集度, $N_T$ 表示发送分集度<sup>[8]</sup>。

对于使用SIC方式进行检测的NOMA接入系统,因各个用户处于不同的检测层,为了保证多用户在接收端检测后能够获得一致的等效分集度,就需要在发送端为多用户设计不一致的发送分集度。如图3所示,发送分集度可以灵活地在功率、空间、编码等多种信号域进行构造。

在发送端,多个用户采用适宜干扰抵消接收机算法的特征图样进行区分,PDMA进行多用户图样设计时,针对不同信号域特征采用不同的方式。在进行功率域图样设计时,会增加功率和相位旋转因子;在进行空域图样设计时,会在多天线上进行天线映射,并与预编码矩阵进行结合,如图4所示;在进行编码域图样设计时,会基于编码矩阵考虑不同延迟的信道编码等。在接收端,对多用户采用低复杂度、高性能的SIC算法实现多用户检测。与该技术框架相对应,相对于正交系统,PDMA在发送端增加了图样映射模块,在接收端增加了图样检测模块。

PDMA的接收端分为两个部分,分别是前端检测模块和基于SIC的检测模块。其中,前端检测模块包含特征图样模式配置解析模块、功率图样提取模块、编码域图样提取模块和空间域图样提取模块。在特征图样模式配置解析模块通过控制信令控制不同图样提取模块。通过前端检测模块,可以提取出不同用户图样编码特征,然后采用低复杂度的准最大似然检测算法来实现多用户的正确检测接收。

#### 3.2 技术特点

PDMA是一种新型NOMA接入技术,它充分利用多维度处理,从而具有使用范围更大,编译码灵活度高,处理复杂度较低等优点。PDMA能够普遍地应用于面向5G的典型场景,包括提升频谱效率、系统容量的连续广域覆盖、热点高容量场景,提升接入用户数,降低时延的移动物联网场



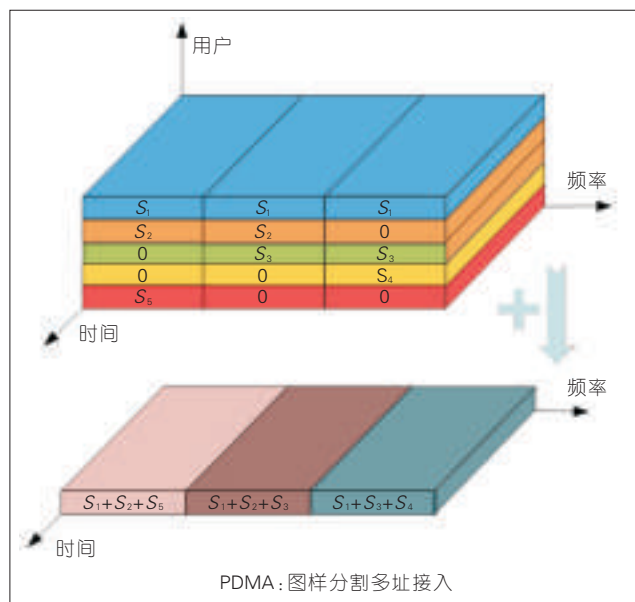


图3  
PDMA 时频资源映射  
方式

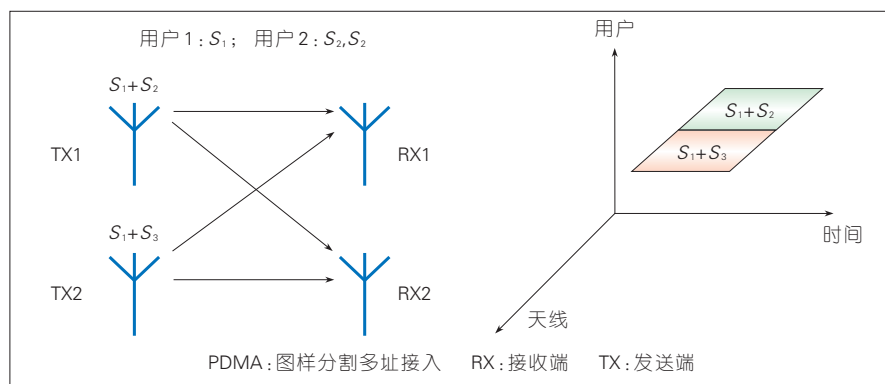


图4 PDMA 空域编码图样设计<sup>[8]</sup>

景。PDMA是一种提高频谱效率和增加接入用户数的有效技术。可以预见：在未来的5G标准化推动过程中，PDMA技术将发挥重要贡献。

PDMA考虑采用多个用户在相同资源上重叠发送，即采用NOMA接入方式，在接收端采用更复杂的检测算法来实现用户的正确检测。NOMA接入技术的引入来源于器件的进步和非线性检测技术的发展。理论上，基于SIC的非线性多用户检测，无论在上行还是下行，都能够达到香农容量的极限。

以长期演进（LTE）正交方式作为参照，在相同时频资源上PDMA可以复用相对于正交方式不同倍数的用户，通常简称为系统负荷。无论从误

块率和吞吐量来看，PDMA相比LTE正交都能有显著的增益，并且这种增益在低信噪比情况下更加明显。对于下行功率受限的系统，用户间的大尺度衰落差值对性能影响比较大，通常多用户功率差值越大，性能增益越明显。

#### 4 技术特点分析和仿真性能对比

相对于OFDMA技术，NOMA接入技术能够在系统容量和系统频谱效率上得到性能的增益。表1展示的是3种不同多址接入技术的特征和优劣势的比较。

通过仿真实验，我们可以对比这几种多址接入技术的误码性能。对

于仿真中，信道为瑞利衰落信道，采用正交相移编码（QPSK）调制方式，6个传输符号，4个正交资源，过载因子为150%。仿真的结果如图5所示。

从仿真的结果中可以看出，SCMA有最好的误码率（BER）性能，这是由于SIC对系统的性能有较为剧烈的影响。另一方面，当PDMA采用和SCMA相同的因子图时，SCMA的性能仍然好于PDMA，原因在于SCMA有更接近最优的稀疏码字设计，更利于性能的提升。

#### 5 结束语

综上所述，我们讨论分析了3种典型NOMA技术：SCMA、MUSA和PDMA，定性阐述了3种系统的收发机理、系统模型以及关键特点，同时我们从负载能力、接收机复杂度、编码方式等方面对3种技术进行了横向地对比，并通过误码性能仿真验证了以上技术的传输可靠性。根据分析结果表明，得益于高维码本的优化设计和近似最优MPA的多用户检测，SCMA展现出了最好的误码性能，而MUSA和PDMA具有十分相似的误码性能。更进一步，我们分析并指出了每种技术现存的问题以及未来的改进方向，例如MC-LDSMA系统的高维码本设计与低复杂度的MPA多用户检测的性能折中，MUSA的低相关序列设计以及PDMA的非正交模式设计等。

通过对现有NOMA技术的对比分析，我们发现其仍然缺少足够的理论指引，同时相应的设计准则以及编码方案大多仅考虑理想的信道模型和固定的用户业务请求，这对于实际的资源调度和网络优化会造成一定程度的失配。我们将问题和展望总结如下：

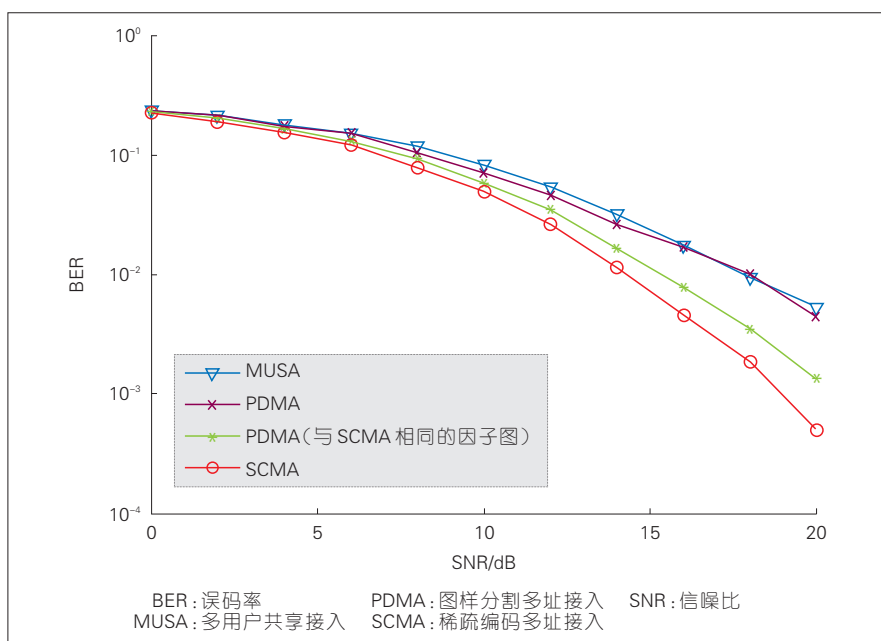
（1）基于新型编码调制技术的NOMA网络的容量极限尚不明确。

（2）现有部分NOMA是多用户区分机制未从理论上充分考虑编码增益、成形增益等增益挖掘；而最新考

▼表1 3种多址接入技术的特征比较

多址接入技术	关键技术	优势	劣势
SCMA	低密度传输;高维调制技术;通过MPA算法的迭代方式的接近最优检测。	提高频谱效率3倍以上;上行容量为OFDMA的2.8倍;下行小区吞吐率比OFDMA提升5%~8%。	很难实现并设计最优的编码;用户之间的干扰增加。
MUSA	SIC检测;复数域的多维编码;叠加编码和叠加符号传输。	低误块率;支持大用户数的接入;提升频谱效率。	用户之间的干扰增加;扩频序列的实现存在困难。
PDMA	整体设计SIC模式低复杂度类似ML-SIC检测。	上行系统的容量提升2~3倍;下行系统的频谱效率提升1.5倍。	设计和优化图样存在困难;用户之间的干扰增加。

ML-SIC:最大似然串行干扰消除 OFDMA:正交频分多址 SCMA:稀疏编码多址接入  
MUSA:多用户共享接入 PDMA:图样分割多址接入 SIC:串行干扰抵消

▲图5 瑞利衰落信道中SCMA、MUSA、PDMA的误码性能比较<sup>[12]</sup>

虑了编码增益的新型多维空间稀疏编码调制多址接入方案也仍尚缺理论上原理性的指导,亟需从理论上开展研究,提供相关设计准则和编码调制、多用户映射方案。且现有方案均未考虑成形损失而进行优化。

(3)网络资源分配和调度时未考虑网络拓扑、信道的随机性,以及用户业务接入请求的多样性和动态性。

## 参考文献

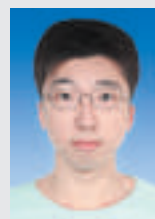
- [1] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory [M]. New York: Wiley, 2012

- [2] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel Low-density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel [J]. IEEE Transaction on Signal Processing. 2008, 56(4):1616-1626. DOI: 10.1109/TSP.2007.909320.
- [3] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse Code Multiple Access [C]//in Proc. IEEE PIMRC, USA:IEEE, 2013:332-336. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666156
- [4] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA Codebook Design[C]//in Proc. IEEE VTC Fall, USA:IEEE, 2014:1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6966170
- [5] ZHANG S, XIAO K, XIAO B, et al. A Capacity-based Codebook Design Method for Sparse Code Multiple Access Systems[C]//in Proc. IEEE WCSP, USA:IEEE, 2016:1-5. DOI: 10.1109/WCSP.2016.7752620
- [6] BAO J, MA Z, DING Z, et al. On the Design of Multiuser Codebooks for Uplink SCMA Systems [J].IEEE Communications Letters, 2016, 20(10):1920-1923. DOI:10.1109/

LCOMM.2016.2596759

- [7] 袁志峰, 郁光辉, 李卫敏. 面向5G的MUSA多用户共享接入[J]. 电信网技术, 2015, 40(5): 28-31
- [8] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向5G的PDMA图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015, 40(5):43-47
- [9] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends [J]. IEEE Communication Magazine, 2015, 53(9):74-81. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263349
- [10] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: Several Technologies of Non-orthogonal Transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 12(10):1-15. DOI: 10.1109/CC.2015.7315054
- [11] CHEN S, REN B, GAO Q, et al. Pattern Division Multiple Access (PDMA)-A Novel Non-orthogonal Multiple Access for 5G Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185 - 3196. DOI: 10.1109/TVT.2016.2596438
- [12] WANG B C, WANG K, LU Z, et al. Comparison Study of Non-orthogonal Multiple Access Schemes for 5G[C]//in Proc. IEEE BMSB, USA:IEEE, 2015:1-5. DOI: 10.1109/BMSB.2015.7177186

## 作者简介



肖可鑫, 上海交通大学博士研究生; 主要研究领域为无线通信的编码调制、多用户通信的非正交多址接入技术等。



夏斌, 上海交通大学电子工程系研究员; 主要研究方向为新型编码调制技术、协作通信、无线资源管理、新一代网络架构等; 已发表论文近60篇, 授权发明专利30余项, 近20项创新专利在多个国际通信标准中被接受。



陈智勇, 上海交通大学电子信息与电气工程学院副教授; 主要研究方向是物理层网络编码技术、无线协作传输、无线资源管理等; 已发表IEEE期刊论文20余篇, 会议论文30篇, 申请专利10项。

# 毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术

## Key Technologies in Millimeter Wave Massive MIMO Wireless Transmission

尤力/YOU Li  
高西奇/GAO Xiqi

(东南大学, 江苏 南京 210096)  
(Southeast University, Nanjing 210096, China)

随着现代信息社会的高速发展, 各种移动新业务需求持续增长, 无线传输速率需求将继续呈现指数增长趋势。预计于 2020 年商用的第 5 代移动通信系统(5G)的传输速率需求将是目前在营的第 4 代移动通信系统(4G)的 1 000 倍<sup>[1]</sup>。在当前无线频谱资源日趋紧张的情形下, 如何进一步满足 5G 无线通信持续增长的速率需求, 成为未来移动通信技术面临的关键问题。

当前, 世界各国正广泛开展对 5G 关键技术的研究。5G 新技术将可能涉及物理层传输技术及载波频段等多个层面<sup>[1]</sup>。在物理层传输层面, 基于大规模多输入多输出(MIMO)的无线传输技术能够深度利用空间维度的无线资源, 进而显著提升系统频谱效率和功率效率, 已经成为当前学术界和工业界的研究热点之一<sup>[2]</sup>。而另一方面, 在载波频段的层面, 由于当前 6 GHz 以下蜂窝频段频谱资源的短缺, 利用毫米波频段实施无线通信

收稿日期: 2017-04-05

网络出版日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61320106003、61471113、61521061、61631018); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2015AA01A701、2014AA01A704); 国家科技重大专项(2014ZX03003006-003)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0011-003

**摘要:** 认为毫米波大规模多输入多输出(MIMO)无线传输能够拓展利用新频谱资源, 深度挖掘空间维度无线资源, 大幅提升无线传输速率, 是未来无线通信系统最具潜力的研究方向之一。基于毫米波大规模 MIMO 无线传输基本架构, 论述了信道建模、信道信息获取、多用户无线传输及联合资源调配等毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术。

**关键词:** 大规模 MIMO; 毫米波通信; 信道信息; 波束赋形

**Abstract:** Millimeter wave massive multiple-input multiple-output (MIMO) wireless transmission is a promising technology for future wireless communications as it can expand the use of new spectrum resources, efficiently exploit the space domain wireless resources, and significantly improve the wireless data transmission rate. Based on the millimeter wave massive MIMO architecture, this paper presents a brief overview of the key techniques in millimeter wave massive MIMO wireless communications, including channel modeling, channel information acquisition, multiuser transmissions, and joint resource allocation.

**Keywords:** massive MIMO; millimeter wave communications; channel information; beamforming

也吸引了广泛的研究兴趣<sup>[3-5]</sup>。

由于毫米波频段上相对较高的电波传播损耗, 毫米波无线传输技术的研究早年大多侧重于短距离通信场景<sup>[6]</sup>, 相关的技术无法直接应用于大范围覆盖的移动通信场景。考虑到毫米波频段上波长相对较短, 大规模天线阵列能够被同时装配到基站与用户侧。进而, 通过大规模天线阵列所提供的较高波束赋形增益能够补偿毫米波频段上相对较高的传播损耗。因此, 探索毫米波大规模 MIMO 无线传输技术在大覆盖移动通信场景中的应用, 正在成为研究者们关注的重要研究方向<sup>[3-6]</sup>。

针对毫米波大规模 MIMO 无线传输, 文献中出现了一些初步的研究工作报告, 这些工作涉及信道建模、信

道信息获取及系统性能分析等多个方面<sup>[7-19]</sup>。从已见报道的工作可见:

(1) 毫米波频段上宽带大规模 MIMO 信道的理论和实际建模的工作相对较少, 还没有出现受到广泛认可的毫米波大规模 MIMO 信道模型。

(2) 移动场景下毫米波信道存在严重的多普勒效应, 瞬时信道信息获取存在瓶颈问题; 文献中所报道的传输方法大多基于准确获取瞬时信道信息的理想假设, 存在实现复杂度较高等问题。

(3) 统计信道信息相对于瞬时信道信息变化较为缓慢, 利用统计信道信息可以辅助毫米波大规模 MIMO 无线传输设计, 提升系统传输性能。

(4) 毫米波大规模 MIMO 无线信道在波束域呈现能量集中等特性, 在



波束域实施毫米波大规模 MIMO 无线传输能够缓解毫米波信道的高路径损耗,同时深度利用空间无线资源,实现多用户共享空间无线资源。

由此可知,毫米波大规模 MIMO 无线传输技术研究尚处在起步阶段,存在着具有挑战性的基础理论和关键技术问题。为充分发掘其潜在的技术优势,需要探明典型移动场景下的毫米波大规模 MIMO 信道模型,并在实际信道模型、适度导频开销以及实现复杂度等约束条件下,分析其系统性能,进而探索最优传输技术,解决毫米波大规模 MIMO 无线传输所涉及的信息获取瓶颈问题、系统实现复杂度问题以及典型移动场景下的适用性问题等。

毫米波大规模 MIMO 无线传输能够拓展利用新频谱资源,并能深度挖掘空间维度无线资源,大幅提升无线传输速率,是支撑未来宽带移动通信最具潜力的研究方向之一。

## 1 信道建模

信道建模是通信系统设计的基础。在毫米波宽带大规模 MIMO 无线通信环境下,基站侧与用户侧均配置大规模天线阵列,信道的空间分辨率得到显著提升。此外,考虑毫米波在大气中的传播特性,毫米波信道在大尺度路径损耗、空间稀疏性、多径特性以及多普勒特性等方面与传统微波信道有着显著不同。研究和利用毫米波宽带大规模 MIMO 信道特性,具有重要的理论和实用价值。当前,尽管毫米波大规模 MIMO 无线传输已引起学术界和工业界的广泛关注,但相关的理论和实际建模的研究工作较少<sup>[7-8]</sup>,尚未有广泛认可的信道模型出现,这在一定程度上制约着毫米波宽带大规模 MIMO 无线传输技术工作的开展,相关的理论研究大多建立于准确已知瞬时信道信息的理想假设。为了突破这一局限,需要开展典型移动场景下毫米波宽带大规模 MIMO 信道的统计特性分析与建模。

值得指出的是:目前已有文献报道了一些初步的信道建模理论和实测结果,展示出在大规模 MIMO 系统中,随着天线数目的增加,不同用户的基站侧信道统计特征模式矩阵趋于一致,仅取决于基站侧天线阵列配置<sup>[9-11]</sup>。利用这一特性,可以着重开展统计特征模式域(物理实现上可解释为波束域)信道特性的研究。一些近期的研究表明:毫米波大规模 MIMO 波束域信道元素在多径扩展以及多普勒扩展等方面呈现出新的特征<sup>[12]</sup>,进一步深入开展各种典型场景,特别是大覆盖移动场景中毫米波大规模 MIMO 波束域信道特性分析和建模研究具有重要的理论意义和实用价值。

## 2 信道信息获取技术

信道信息对于毫米波大规模 MIMO 无线传输性能起着重要影响作用。在毫米波大规模 MIMO 无线通信系统中,随着收发两侧天线数目和带宽的增加,信道参数数目显著增加。同时,毫米波频段信道的多普勒效应与传统频段信道相比更为明显。因此,信道信息获取在毫米波大规模 MIMO 无线通信系统中成为瓶颈问题。目前已有文献报道了毫米波大规模 MIMO 信道信息获取的研究工作<sup>[13,14]</sup>。值得注意的是:利用毫米波频段波束域信道的近似稀疏以及多普勒扩展特性,可以有效降低信道信息获取所需的开销<sup>[10]</sup>。进一步发展完善各种典型场景下波束域信道信息获取技术具有必要性。

统计信道信息可以用于优化导频设计,提升瞬时信道信息估计性能及系统传输性能。当前,尽管利用统计信道信息辅助毫米波大规模 MIMO 无线传输设计已经得到了一些研究者的关注,但是统计信道信息获取的相关研究工作较少。目前已有文献报道了大规模 MIMO 统计信道信息获取的初步研究结果<sup>[15-16]</sup>,然而这些方法大多并未针对毫米波大规模

MIMO 无线传输场景。利用毫米波宽带大规模 MIMO 波束域信道新特性,进一步开展相应的统计信道信息获取方法研究具有重要性。

## 3 多用户无线传输技术

如何优化设计多用户空分多址无线传输系统,涉及发送端和接收端所能获取的信道信息。在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,随着收发两侧天线数目和带宽的增加,信道信息的获取成为瓶颈问题。与此同时,传统传输方案中通常采用的正则化迫零等方法涉及到复杂的大维矩阵求逆运算,实现复杂度较高<sup>[17]</sup>,这意味着毫米波大规模 MIMO 无线传输理论方法将不同于现有的 MIMO 传输理论方法。与瞬时信道信息相比,统计信道信息变化较为缓慢,获取开销较小。能否突破传统传输方案中信道信息获取的瓶颈问题,在发送端仅知统计信道信息的情形下,实现多用户共享空间无线资源和高性能低复杂度的毫米波大规模 MIMO 无线传输,是有待解决的重要问题。

目前已有文献报道了初步的研究工作,结果表明:在发送端仅知统计信道信息的情形下,通过适当的资源调配,在波束域实施毫米波大规模 MIMO 无线传输可以以较低的实现复杂度获取相对较高的性能<sup>[16][18]</sup>。进一步发展完善毫米波大规模 MIMO 波束域多用户无线传输技术具有重要的实用价值。

此外,在完整的无线通信系统中,基站不仅要实现与各个用户之间的高速数据通信,还需要向小区中的所有用户发送控制信息,此时基站发送信号要具有全向特性,如何将具有全向特性的分集传输和空时编码传输理论方法拓展到毫米波大规模 MIMO 无线传输场景,实现高效的控制信息传输,值得深入研究<sup>[19]</sup>。

## 4 多用户联合资源调配技术

为实现多用户空分多址传输,需



要高效的多用户资源调配理论方法,确定可以在同一时频资源上进行空分多址传输的空分用户组与与每个用户通信的空间资源。在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,基站与各个用户进行通信的空间资源通常是基站侧统计特征模式所确定的波束资源,开展利用统计信道信息的资源调配理论方法研究具有理论意义和实用价值。目前文献中已有一些关于资源调配的研究工作报道,然而这些工作大多基于准确已知瞬时信道信息的理想假设,具有一定的局限性。发送端仅知统计信道信息的多用户联合资源调配技术的研究值得进一步深入开展。此外,多小区协作能够降低传输中断概率,进而解决毫米波信道所面临的传播遮挡等问题,开展多小区协作情形下的毫米波大规模 MIMO 分布式低协作开销联合资源调配技术研究具有实用性。值得注意的是:在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,联合资源调配所涉及的问题规模通常较大,结合大数据机器学习等理论<sup>[20-21]</sup>探索相应的低复杂度快速资源调配算法具有重要的实用价值。

## 5 结束语

毫米波大规模 MIMO 无线传输能够拓展利用新频谱资源和深度挖掘空间维度无线资源,大幅提升无线传输速率,是未来无线通信系统最具潜力的研究方向之一。相关理论方法尚处于起步阶段,存在着信道信息获取“瓶颈”和系统实现复杂性问题。基于毫米波大规模 MIMO 无线传输基本架构,文中我们讨论了信道建模、信道信息获取、多用户无线传输及联合资源调配等毫米波大规模 MIMO 传输关键技术的研究进展。

## 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] MARZETTA T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11):3590-3600. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092
- [3] HEATH R W, GONZALEZ-PRELCIC N, RANGAN S, et al. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):436-453. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2523924
- [4] ANDREWS J G, BAI T, KULKARNI M N, et al. Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(1):403-430. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2618794
- [5] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3):366-385. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397
- [6] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-Wave Massive MIMO: The Next Wireless Revolution [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9):56-62. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894453
- [7] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9):3029-3056. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2434384
- [8] HUR S, BAEK S, KIM B, et al. Proposal on Millimeter-Wave Channel Modeling for 5G Cellular System [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):454-469. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2527364
- [9] ADHIKARY A, NAM J, AHN J Y, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing—The Large-Scale Array Regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10):6441-6463. DOI: 10.1109/TIT.2013.2269476
- [10] YOU L, GAO X Q, XIA X G, et al. Pilot reuse for Massive MIMO Transmission Over Spatially Correlated Rayleigh Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6):3352-3366. doi: 10.1109/TWC.2015.2404839
- [11] YOU L, GAO X Q, SWINDLEHURST A L, et al. Channel Acquisition for Massive MIMO-OFDM with Adjustable Phase Shift Pilots [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(6):1461-1476. DOI: 10.1109/TSP.2015.2502550
- [12] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for Millimeter-Wave/Terahertz Massive MIMO Transmission with Per-Beam Synchronization [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/BDMA-for-Millimeter-Wave-Terahertz-Massive-MIMO-You-Gao/86b94c8c1ffff5c38b5e17b036d9a4ef92ad04be>
- [13] ALKHATEEB A, EL AYACH O, LEUS G, et al. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):831-846. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2334278
- [14] KOKSHOORN M, CHEN H, WANG P, et al. Millimeter Wave MIMO Channel Estimation Using Overlapped Beam Patterns and Rate Adaptation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(3):601-616. DOI: 10.1109/TSP.2016.2614488
- [15] MARZETTA T L, TUCCI G H, SIMON S H. A Random Matrix-Theoretic Approach to Handling Singular Covariance Estimates [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(9):6256-6271. DOI: 10.1109/TIT.2011.2162175
- [16] SUN C, GAO X Q, 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
- [17] LU A A, GAO X Q, ZHENG Y R, et al. Low Complexity Polynomial Expansion Detector with Deterministic Equivalents of the Moments of Channel Gram Matrix for Massive MIMO Uplink [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2):586-600. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2506700
- [18] SUN C, GAO X Q, DING Z. BDMA in Multi-Cell Massive MIMO Communications: Power Allocation Algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(11):2962-2974. DOI: 10.1109/TSP.2017.2675862
- [19] MENG X, GAO X Q, XIA X G. Omnidirectional Precoding Based Transmission in Massive MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1):174-186. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2498159
- [20] CHIN W H, FAN Z, HAINES R. Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2):106-112. DOI: 10.1109/MWC.2014.6812298
- [21] XIA X G. Small data, Mid data, and Big Data Versus Algebra, Analysis, and Topology [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2017, 34(1):48-51. DOI: 10.1109/MSP.2016.2607319

## 作者简介



**尤力**, 东南大学移动通信国家重点实验室讲师;研究方向为宽带大规模 MIMO 无线通信。



**高西奇**, 东南大学教授、博导, 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。

# 宽带毫米波数模混合波束赋形

## Hybrid Digital and Analog Beamforming for Broadband Millimeter Wave Communication Systems

朱宇/ZHU Yu

李先驰/LI Xianchi

(复旦大学, 上海 200433)  
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

从无线移动通信发展的脉络来看,第1、2代(1G、2G)先后分别从模拟和数字两种方式解决了人们之间的语音通信需求,第3代(3G)开始增加对数据业务的支持,第4代(4G)系统着重满足人们日益增长的数据业务的需求,未来的第5代移动通信系统(5G)除了继续支持更高传输速率的用户数据业务需求,伴随物联网的飞速发展,还需要支持大量智能设备的接入和连接,来支撑包括智能电网、智慧家庭、智慧城市、虚拟现实、远程教育、远程医疗等多元化的新型业务。预计到2020年将有超过500亿台的智能设备联入无线网络,无线网络的数据容量将会是现在的1 000倍<sup>[1-4]</sup>。为了满足到2020年能达到1 000倍的容量提升,目前比较公认的解决问题的3个维度分别是<sup>[1-4]</sup>:采用更高通信频段以获得更大的通信带宽,增加频谱利用率,划分高密度小区来进行频率复用。

宽带毫米波通信与这3个维度都

收稿日期: 2017-04-10

网络出版日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61271223)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0014-006

**摘要:** 针对宽带多天线毫米波系统面临的频率选择性信道衰落和硬件实现约束,提出结合单载波频域均衡技术的数模混合波束赋形算法。以均衡器输出信号的最小均方误差为准则,优化波束赋形矩阵和均衡器的系数。为降低求解复杂度,应用迭代天线阵列训练技术将原始优化问题分解为在基站和用户端的本地优化问题,使需优化的系数通过通信两端的交替迭代处理获得收敛。仿真表明:提出的新算法在误比特率为 $10^{-4}$ 时较传统算法在信噪比上具有约2 dB的性能增益。

**关键词:** 毫米波通信;单载波频域均衡;数模混合波束赋形;迭代天线阵列训练

**Abstract:** In order to deal with the effect of frequency selective channel fading and the difficulty of hardware implementation in broadband millimeter wave communication systems with multiple antennas, a joint design of hybrid digital and analog beamforming with single carrier frequency domain equalization is proposed. Based on the criterion of minimizing the mean square error of the equalized signal, the coefficients of the beamforming matrices and equalizer are optimized. To reduce the computational complexity, the iterative antenna-array training technique is applied and the original optimization problem is decomposed into two local optimization problems at the base station and the user equipment, respectively. The coefficients are converged after several alternatively iterative processing at the two communication sides. Simulation results show that the proposed algorithm has a performance gain of about 2 dB in signal to noise ratio over the traditional algorithm at a bit error rate of  $10^{-4}$ .

**Key words:** millimeter wave communication; single carrier frequency domain equalization; hybrid digital and analog beamforming; iterative antenna-array training

有着非常紧密的结合:首先毫米波频段定义在30~300 GHz的范围,这一频段可以提供数百兆赫兹乃至数吉赫兹的通信带宽,是解决容量的最直接路径;其次,从提高频谱利用率的角度来看,大规模天线被公认为是一种有效的技术<sup>[1-6]</sup>,现有通信频段因为其波长在分米或厘米级,受尺寸和体积限制,很难形成大规模天线阵列,而毫米波的天然属性决定了其与大规模天线结合的有效性;最后,传统上

人们认为毫米波通信由于频率高而产生的路径损耗大、传输距离短的弱点恰好成为高密度小区频率复用的优点<sup>[6]</sup>。目前商用的毫米波通信标准和系统大多限于60 GHz免费频段的室内通信,例如:IEEE 802.15.3c<sup>[7]</sup>和802.11ad标准<sup>[8]</sup>。随着微电子技术的发展,以及人们对移动通信业务日益增加的迫切需求,毫米波通信已经成为了应用于半径200 m区域内的室外无线移动通信的非常重要的候选技

术之一<sup>[1-4]</sup>。

然而,毫米波频段信号的传播特性为系统设计也带来了新的问题与挑战,在相同天线增益的条件下,毫米波相对于6 GHz以下微波频段路径损耗大,透射绕射能力差<sup>[3-6]</sup>。为应对这一问题,毫米波系统通常需要在收发端配置十几乃至上百根天线组成阵列获得高方向性的增益,来弥补其在传输上的能量损耗。因此,具备自适应波束赋形(BF)的多天线设计是保证毫米波微小区覆盖的首要必备技术<sup>[3-6]</sup>。

相比现有6 GHz以下频段的移动通信系统,宽带毫米波系统在BF设计上具有3个方面的不同与挑战:首先,系统多天线传输的实现方式会受到硬件成本和功率开销的限制。与现有移动通信系统相比,毫米波系统数百兆赫兹乃至数吉赫兹的通信带宽大大增加了硬件成本和功耗。以模数转换器(A/D)为例,基于最新互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺制作的具有12 bits精度、100 Ms/s采样率,并且支持16路天线的A/D的功耗大于250 mW<sup>[5]</sup>。在这些约束下,不可能为每根天线都配置一套射频(RF)链路,因此,实际毫米波多天线技术很难采用全数字实现方案<sup>[9]</sup>。其次,毫米波系统中天线阵列规模很大,天线数目达到十几甚至上百,大规模天线的使用虽然增加了系统设计的自由度,但是也使得BF矩阵优化问题变得更加复杂。最后,相比6 GHz以下频段的移动通信系统,毫米波信道

在延时和角度域上都具有稀疏性,这一特性为降低BF设计的复杂度提供了一条有效途径,但同时也为问题的求解带来了新的挑战<sup>[9]</sup>。基于上述3点,研究者提出了将模拟电路与数字电路相结合的基于数模混合信号处理的混合BF(HBF)方式。HBF也逐渐引起了学术界和工业界的广泛关注,逐步成为毫米波通信的一项关键技术。

### 1 毫米波 HBF 研究现状

图1以基站到用户的毫米波下行链路为例展示了单用户多个数据流传输的HBF示意<sup>[9-11]</sup>。

图1中用红色标记的矩阵 $F_{BB}$ 和 $F_{RF}$ 分别为基站端数字和模拟BF矩阵,用蓝色标记的矩阵 $W_{BB}$ 和 $W_{RF}$ 分别为用户端数字和模拟BF矩阵。

相比现有6 GHz以下频段无线通信系统通常采纳的全数字BF结构,毫米波系统中HBF有以下几个不同点和难点:随着天线数目的增大,HBF矩阵规模增大,优化难度和计算复杂度增加;HBF的优化,特别是对模拟信号的处理,需要考虑模拟电路的实现方式和模拟器件的特性,如相移器<sup>[9-11]</sup>、选通开关<sup>[12]</sup>、相移器与放大器相结合<sup>[13]</sup>等;HBF的结构给信道估计带来了新的挑战,这是因为在数字域上能估计出的信道是实际空口信道与模拟BF矩阵的级联。毫米波传输在延时和角度域的双重稀疏性也为信道估计和HBF矩阵求解带来了新的挑战。在宽带系统中,不同于数

字BF,模拟BF因为是对数模转换器(D/A)后、A/D前的模拟信号进行处理,其对带宽内所有子载波(若对单载波通信而言对应信号的所有频率分量)的处理都是一致的<sup>[14-15]</sup>。

现有的HBF设计研究主要集中在窄带衰落模型<sup>[9-12]</sup>,并且以系统互信息为优化目标,即:

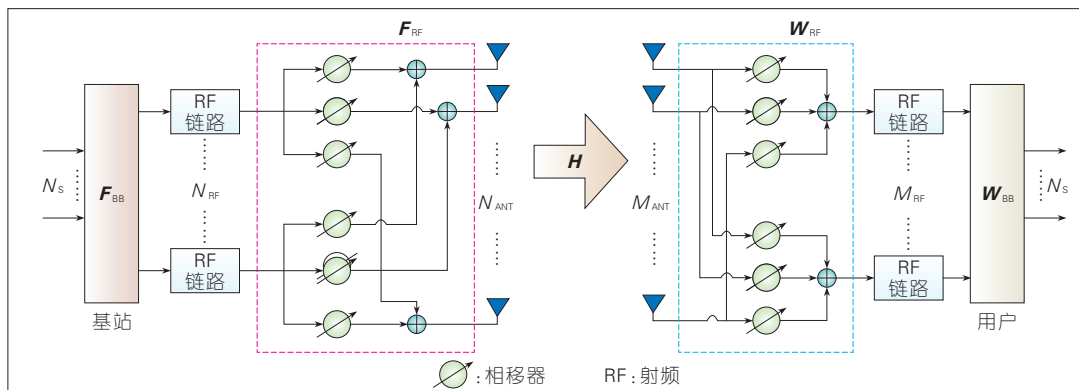
$$\max \log |I + R_n^{-1} W_{BB}^H W_{RF}^H H F_{RF} F_{BB} F_{BB}^H F_{RF}^H H^H W_{RF} W_{BB}| \quad (1)$$

其中,接收信号功率做了归一化处理, $R_n$ 定义为接收端HBF处理后的噪声协方差矩阵。如图1所示,当模拟BF由移相器和加法器构成时,矩阵 $F_{RF}$ 和 $W_{RF}$ 各元素具有模为1的约束(仅相位参数可以优化)<sup>[9-11]</sup>。模拟BF有两种方式,即全连接<sup>[9-11]</sup>和部分连接<sup>[15]</sup>,体现在矩阵 $F_{RF}$ 和 $W_{RF}$ 在前一种方式下每一个元素都需要被优化,而在后一种方式中呈现为块对角矩阵的形式。目前对于式(1)中问题的主流解决方案有两种,先固定 $W_{BB}$ 和 $W_{RF}$ ,然后优化 $F_{BB}$ 和 $F_{RF}$ ,具体而言:

(1) 文献[9-10]利用毫米波信道的角度域稀疏特性,将 $F_{BB}$ 和 $F_{RF}$ 的求解问题转化为稀疏近似问题,并利用正交匹配追踪(OMP)算法进行求解,其算法的局限性在于 $F_{RF}$ 中列向量的取值范围和空间波束角度的标签相对应,因此自由度受限。另外,这一算法在求解的过程中还需要完全信道信息。

(2) 文献[11]认为在大规模MIMO系统中,可以采用 $F_{RF}$ 各列相互正交

图1  
毫米波数模混合波束赋形示意





的假设,这样就可以将 $\mathbf{F}_{\text{BB}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{RF}}$ 的联合优化拆解为对两者的逐级优化。与第1种算法相比,该算法不依赖于信道的稀疏性,对 $\mathbf{F}_{\text{RF}}$ 中的列向量并无标签形式的要求;但该算法基于大规模天线的假设,其性能依赖于天线数目、RF链路数目、基带数据流数目的相互关系。这一算法也需要完全的信道信息。

在窄带HBF的基础上,研究者提出结合正交频分复用(OFDM)的宽带HBF算法,来对抗宽带毫米波信道的频率选择性衰落,其优化目标也扩展为最大化多个子载波上的速率和<sup>[14-15]</sup>

$$\max \sum_k r[k] \quad (2)$$

其中 $r[k] = \log |I + \mathbf{R}_n^{-1}[k] \mathbf{W}_{\text{BB}}^H[k] \mathbf{W}_{\text{RF}}^H[k] \mathbf{H}[k] \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}[k] \mathbf{F}_{\text{BB}}^H[k] \mathbf{F}_{\text{RF}}^H[k] \mathbf{W}_{\text{RF}} \mathbf{W}_{\text{BB}}[k]|$ 。需要注意的是:不同于数字BF矩阵 $\mathbf{F}_{\text{BB}}[k]$ 和 $\mathbf{W}_{\text{BB}}[k]$ 与子载波索引号 $k$ 相关,模拟BF矩阵 $\mathbf{F}_{\text{RF}}$ 和 $\mathbf{W}_{\text{RF}}$ 的取值与子载波索引号 $k$ 无关。现有对式(2)中问题的求解方法延续了HBF在窄带衰落下的设计思路,但是模拟BF矩阵在窄带下被限定为标签的形式<sup>[9-10]</sup>,或者具有近似正交性质的假设<sup>[11]</sup>在宽带通信场景下是否合适,或是否近似最优将有待进一步证明。此外,现有的宽带算法仍然需要完全的信道状态信息,这会进一步降低了算法的实用性。

## 2 单载波宽带毫米波系统中的HBF

单载波频域均衡(SC-FDE)和OFDM是目前公认的能有效对抗信道频率选择性衰落的主要技术<sup>[16-17]</sup>,其中SC-FDE因为采用了单载波传输方式,发送信号的峰均功率比较低的特性被第3代合作伙伴计划(3GPP)长期演进(LTE)/增强的LTE(LTE-A)标准采纳为上行传输方案<sup>[18]</sup>。在宽带毫米波通信系统中,从实现成本和器件功耗上来考虑,为达到支持几百兆赫兹乃至几个吉赫兹的通信宽带,A/D的精度必然有所牺牲,单载波调

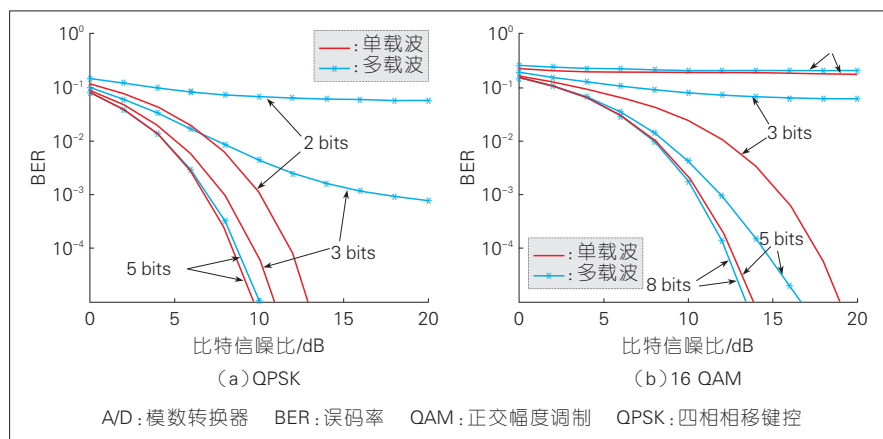
制相对多载波调制具有相对较小的信号动态范围,可以降低对A/D量化精度的要求<sup>[4-5]</sup>。图2显示了在高斯信道下,单载波与多载波(以OFDM为例)在不同A/D量化精度下的分别以四相相移键控(QPSK)和16符号正交幅度调制(QAM)为调制方式的误码率(BER)性能对比,可以看出:OFDM对A/D量化精度的要求更高。从这一角度来说,单载波能很好地兼顾性能与硬件,实现复杂度的要求,因此成为毫米波微小区非常重要的候选空口方案之一<sup>[4-5]</sup>。目前结合SC-FDE的宽带毫米波HBF算法的相关研究还比较少,本文中我们将会以单数据流单个RF链路场景为例阐述单载波宽带毫米波系统中HBF优化问题的建模与求解。

### 2.1 系统模型

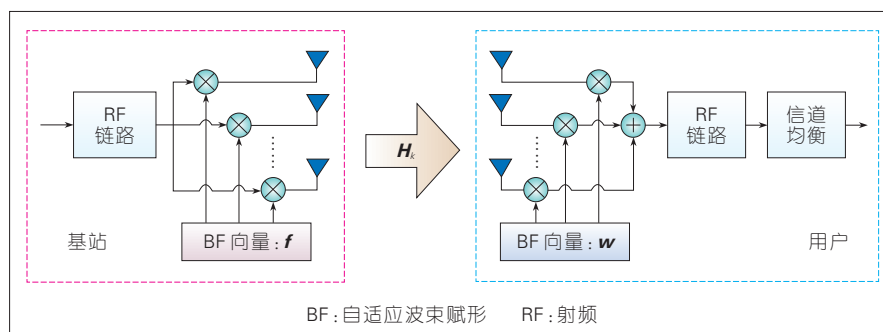
在单个RF链路场景下,图1中的HBF优化问题退化为图3中的模拟

BF向量的优化问题。不同之处在于:经过基站和用户的模拟BF之后,原始的空口多输入多输出(MIMO)频率选择性衰落信道在基带上退化为一个单输入单输出(SISO)频率选择性衰落信道,需要进行频域均衡(FDE)处理。针对这一特点,我们提出将模拟BF与数字FDE相结合的数模混合信号处理,同时以最小化FDE输出信号的均方误差(MSE)为准则,对模拟BF和数字FDE的系数进行联合优化。

定义基站和用户的BF向量分别为 $\mathbf{f}$ 和 $\mathbf{w}$ ,那么在基带的等效SISO信道的频率响应为 $\mathbf{w}^H \mathbf{H} \mathbf{f}$ ,其中 $\mathbf{H}$ 是信道在第 $k$ 个频率分量上的响应矩阵。以线性FDE为例,根据文献[19],可以得到采用最小均方误差(MMSE)准则的最优FDE系数以及对应的MSE,显然它们都是 $\mathbf{f}$ 和 $\mathbf{w}$ 的函数。可以证明基于MMSE准则的单载波HBF优化问题可以建模为<sup>[19]</sup>:



▲图2 有限A/D精度下单载波与多载波系统的性能对比(高斯信道)



▲图3 单载波传输方式下毫米波模拟波束赋形



$$(P1) \min_{w,f} \text{MSE}(wf) = \sum_k \frac{\sigma_s^2 \sigma_n^2}{\sigma_s^2 |w^H H_k f|^2 + \sigma_n^2} \quad (3)$$

$$s.t. \|f\|^2 = 1, \|w\|^2 = 1$$

其中  $\sigma_s^2$  和  $\sigma_n^2$  分别是信号和噪声功率。优化问题(P1)是一个非凸问题,很难得到最优解,而且直接求解也需要知道完全信道信息  $H_k$ 。一种可能的优化方法是由用户先估计信道矩阵,然后基于某一算法得到  $f$  和  $w$  的次优解,再把  $f$  结果反馈给基站。然而,这一方法不适用于毫米波系统,因为此时天线的大规模特性增加了信道估计的复杂度。此外,由于在信道估计时没有足够的天线和空间分集增益,用户的接收信噪比(SNR)非常低,为了保证信道估计的质量,需要采用较长的训练序列,从而增加了训练时间和训练开销。针对这一问题,我们采纳迭代天线阵列训练(IAT)技术<sup>[13]</sup>,如图4所示,利用时分双工(TDD)模式上、下行信道的互易性,通过固定通信链路一端BF向量,优化另一端的BF向量,将原问题拆解为在基站和用户两端的本地子优化问题,然后通过交替迭代优化,使得两端BF向量能够最终收敛到全局或局部最优解。IAT方法的优势在于可以将信道估计的复杂度从  $O(N_s N_u L)$  降低到  $O(N_s L + N_u L)$ , 其中  $N_s$ ,  $N_u$  分别代表基站和用户天线数,  $L$  代表多径信道长度。

虽然基于IAT技术的BF算法在降低信道估计复杂度方面具有很大吸引力,但其在具体算法设计上仍存

在相当的难度和挑战,例如:应该选择何种优化目标?原始优化问题是否能够被拆解为两个子优化问题?收敛性是否能被证明等。我们已经证明(P1)问题可以采用IAT方式拆解为在基站和用户端的两个本地子优化问题,并能最终收敛到原问题的一个次优解<sup>[19]</sup>。在阐述详细的求解步骤之前,我们在2.2节中首先回顾传统的一种以信道总功率为优化目标的基于IAT技术的迭代特征值分解算法<sup>[13][20]</sup>。

## 2.2 传统算法

在配置单个RF链路的毫米波系统中,文献[13]、[20]提出了以最大化等效SISO多径信道的总功率为优化目标的单载波宽带模拟BF算法。该优化问题可以建模为:

$$(P2) \max_{w,f} \Psi(w,f) = \sum_{k=0}^{N-1} |w^H H_k f|^2 \quad (4)$$

$$s.t. \|w\| = 1, \|f\| = 1$$

为了求解优化问题(P2),基于IAT技术,在给定基站的发送BF向量  $f$  时,原始问题(P2)将退化为如下的在用户端的子优化问题<sup>[13]、[20]</sup>:

$$(P2.1) \max_w w^H H_{\text{SIMO}} H_{\text{SIMO}}^H w \quad (5)$$

$$s.t. \|w\| = 1$$

其中  $H_{\text{SIMO}} = [h_{\text{SIMO},0} \dots h_{\text{SIMO},N-1}]$ ,  $h_{\text{SIMO},k} = H_k f$  是从基站RF链路入口到用户天线阵列的等效单输入多输出(SIMO)信道。可以证明优化问题(P2.1)的最优解为  $H_{\text{SIMO}} H_{\text{SIMO}}^H$  矩阵的最大特征值对应的特征向量<sup>[13]</sup>。

类似地,当给定用户的发送BF向量  $w$  时,在基站端存在的子优化问题为:

$$(P2.2) \max_f f^H H_{\text{MISO}} H_{\text{MISO}}^H f \quad (6)$$

$$s.t. \|f\| = 1$$

其中  $H_{\text{MISO}} = [h_{\text{MISO},0} \dots h_{\text{MISO},N-1}]$ ,  $h_{\text{MISO},k} = w^H H_k$  是从基站天线阵列到用户RF链路出口的等效多输入单输出(MISO)信道。子优化问题(P2.1)与(P2.2)具有同样的形式。最优的  $f$  为  $H_{\text{MISO}} H_{\text{MISO}}^H$  矩阵的最大特征值对应的特征向量。

上述BF设计以最大化信道总功率为目标,没有考虑等效SISO信道频率选择性衰落的影响,相比这一传统算法,我们提出的以最小化均衡器输出信号MSE为目标的设计准则能够更好地符合系统的最终传输性能指标。

## 2.3 新算法

在2.1节,我们提出将模拟BF与数字FDE进行联合优化,并以最小化FDE输出信号的MSE为准则的新算法。结合IAT原理(图4所示),我们将原问题(P1)做如下分解:当基站BF向量  $f$  固定时,优化问题(P1)退化为用户端  $w$  的子优化问题。具体如式(7):

$$(P1.1) \min_w \text{MSE}_{\text{用户}}(w) = \sum_k \frac{\sigma_s^2 \sigma_n^2}{\sigma_s^2 |w^H h_{\text{SIMO},k}|^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

$$s.t. \|w\|^2 = 1$$

同样地,当用户在上行固定以  $w$  作为发射BF向量时,根据TDD上、下行信道的互易性,优化问题(P1)又可以退化为在基站端  $f$  的子优化问题,即为:

$$(P1.2) \min_f \text{MSE}_{\text{基站}}(f) = \sum_k \frac{\sigma_s^2 \sigma_n^2}{\sigma_s^2 |h_{\text{MISO},k}^H f|^2 + \sigma_n^2} \quad (8)$$

$$s.t. \|f\|^2 = 1$$

我们在文献[19]中证明了通过(P1.1)和(P1.2)之间的来回迭代优化,最终可以使  $f$  与  $w$  收敛到原问题

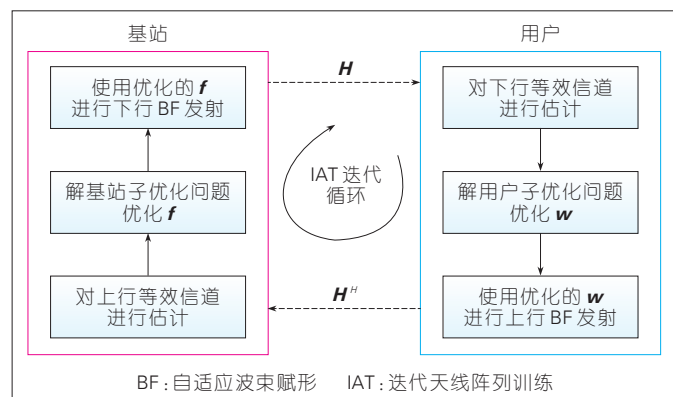


图4  
基于IAT技术的  
迭代优化算法示意

(P1)的一个局部最优解。优化问题(P1.1)和(P1.2)仍然是非凸问题,难以获得全局最优解。我们可以采用经典的梯度下降算法来获得问题的局部最优解<sup>[21]</sup>。

由于(P1.1)、(P1.2)都是非凸问题,梯度下降算法能否收敛到一个较好的局部最优解取决于初始向量的选取。根据文献[21],本地优化问题的初始点可以通过解原始问题的一个近似(或者上下界)问题来获得。可以发现(P1)问题中的目标函数可以看成是多个分项的调和平均值的倒数,根据柯西不等式,它们大于等于其算术平均的倒数,而对这一算术平均的优化与(P2)的目标函数一致,因此一种对于(P1.1)、(P1.2)初始值选取的有效方法就是采用(P2)问题的解。

## 2.4 仿真结果

根据文献[14]和[15],第 $k$ 个频率分量上的MIMO信道可以建模为:

$$H_k = \sqrt{N_t N_r} \sum_{l=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{N_r} \alpha_{l,m} \mathbf{a}_r(\theta_{l,m}^r) \mathbf{a}_t(\theta_{l,m}^t)^H \cdot e^{j2\pi \frac{f_k}{c} \mathbf{r}_r^T \mathbf{r}_t} \quad (9)$$

其中 $N_c$ 和 $N_r$ 分别表示信道中路径簇的数目和每簇中路径的数目, $\theta_{l,m}^t$ 和 $\theta_{l,m}^r$ 分别表示第 $l$ 个簇中第 $m$ 个路径的水平发射角度(AOD)和水平到达角度(AOA), $\alpha_{l,m}$ 表示第 $l$ 个簇中第 $m$ 个路径的传输复增益, $\mathbf{a}_r(\theta_{l,m}^r)$ 和 $\mathbf{a}_t(\theta_{l,m}^t)$ 分别表示基站和用户的天线响应向量<sup>[14-15]</sup>。仿真中基站与用户各配置由16根天线组成的间隔为半波长的线性天线阵,每个数据块包含64个QPSK符号。

图5展示了以最大化信道总功率为目标的传统算法和以MMSE为目标的新算法在不同SNR下的BER性能曲线。为公平起见,两者的IAT总迭代次数均设为6次,在新算法中,根据2.3节的阐述,仿真中以传统算法迭代两次后的结果作为新算法的初始向量,所以新算法的前两次IAT处理与传统算法相同。从图5中可

以看出:相比于传统算法,新算法能够更好地获得空间分集增益。例如:新算法在BER=10<sup>-4</sup>时较传统算法有约2 dB的SNR增益。此外,我们还考虑实际系统中采用有限量化比特的相移器来实现BF,其操作是在原算法的基础上,在每一次迭代中仅保留BF向量各元素的相位部分,而把模固定设为常数。图5展示了当相位量化精度为 $Q=4$ 比特时的BER性能。可以看出:两种算法因为有限精度相移器的实现方式都具有一定的性能损失,但新算法仍然较传统算法具有显著的性能增益。

图6对比了新算法与传统算法在不同迭代次数下的BER性能,其中SNR固定在-4 dB,从图中可以看出,

因为新算法采用了传统算法的两次迭代处理来获得初始向量,所以两种算法在前两次迭代的性能完全相同,但是从第3次开始,传统算法的性能增益十分有限,而新算法在第3次迭代由于以MMSE为目标,BER性能迅速提升约一个量级,并且在随后的迭代中迅速收敛。

## 3 结束语

毫米波通信是能够保证5G乃至未来更新一代无线移动通信系统获得容量极大提升的一项关键技术,而HBF技术是在兼顾硬件实现成本与功耗的情况下,保证毫米波系统能够利用其大规模天线阵列的优势克服传输功率损耗与信道衰落影响的重

图5  
新算法与传统算法  
在不同信噪比下的误  
比特率性能

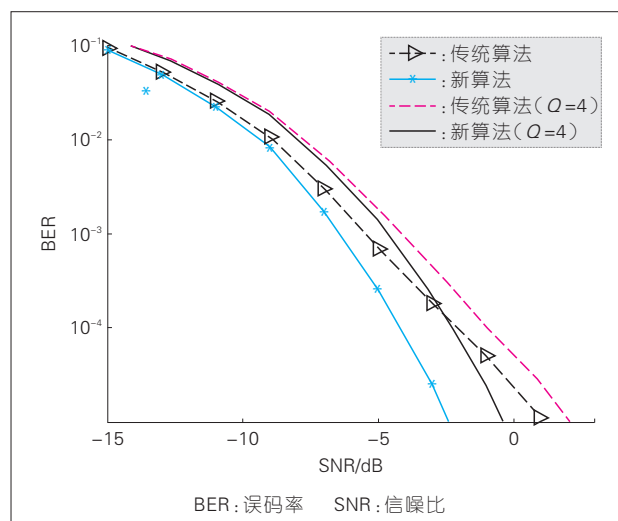
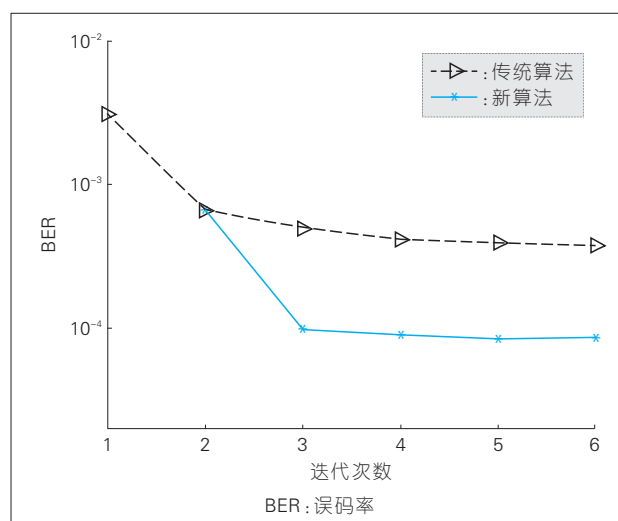


图6  
新算法与现有算法在不  
同迭代次数下的误比  
特率性能



要研究问题。在文章中,我们在回顾现有毫米波 HBF 研究进展的基础上,针对毫米波信道频率选择性衰落以及系统在射频链路上的硬件制约,提出了 SC-FDE 与 HBF 联合优化的设计思路,建立了以最小化信道均衡 MSE 为准则的单载波传输方式下的毫米波 HBF 优化问题。在对问题的求解中,考虑大规模多径 MIMO 信道进行估计的复杂度,我们应用 IAT 方法,将原问题分解为在基站和用户两端的两个本地子优化问题,利用 TDD 上、下行信道的互易性,通过交替迭代处理的方式可以保证两端能收敛到局部最优解。数值仿真结果表明:新算法较传统算法可以在 SNR 上具有 2 dB 以上的性能增益。

在未来工作中,我们会将文中提到的单个 RF 链路、单数据流的系统模型拓展到多个 RF 链路、多个数据流的场景,并利用 IAT 方法设计针对这一场景的 HBF 算法。我们也会考虑在多用户场景下利用毫米波信道延时域和角度域的双重稀疏性的特点,以多用户 MSE 为优化性能指标,结合 IAT 技术,设计高效的宽带毫米波数模混合多用户接入算法,增强系统的多用户空间接入能力。此外,现有的 HBF 研究大都假设理想的信道估计,精确的 A/D 转换,高精度的相移器,但实际中这些参数或者器件的非理想性都会对系统性能带来影响,研究鲁棒的 HBF 设计也具有重要的意义与应用价值。最后,以 IAT 为基础的 HBF 算法依赖于 TDD 模式下上、下行信道的互易性,在实际系统中存在上、下行链路器件特性不一致的问题,如何进行更为有效的信道校准也是非常值得研究的重要问题。

## 致谢

文中图 2 的仿真工作由复旦大学同学鹏飞同学仿真完成,特此感谢!

## 参考文献

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学, 2014, 44

- (5): 551–563
- [2] 张平,陶运铮,张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15–29
- [3] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106–113. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736750
- [4] GHOSH A, THOMAS T A, CUDAK M C, et al. Millimeter-Wave Enhanced Local Area Systems a High-Data-Rate Approach for Future Wireless Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1152–1163. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328111
- [5] RANGAN S, T. RAPPAPORT S, ERKIP E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366–385. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397
- [6] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-Wave Massive MIMO: the Next Wireless Revolution? [J]. IEEE Communications Society, 2014, 52(9): 56–62. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894453
- [7] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs): IEEE 802.15.3c TM[S]. IEEE, 2009
- [8] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 6: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band., IEEE P802.11ad TM/D0.1 [S]. IEEE, 2010
- [9] ALKHATEEB A, MO J, GONZALEZ-PRELCIC N, et al. MIMO Precoding and Combining Solutions for Millimeter-Wave Systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(12): 122–131. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6979963
- [10] AYACH O, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499–1513. DOI: 10.1109/TWC.2014.011714.130846
- [11] SOHRABI F, YU W. Hybrid Digital and Analog Beamforming Design for Large-Scale Antenna Arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 501–513. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2520912
- [12] RIAI R M, RUSU C, PRELCIC N G, et al. Hybrid MIMO Architectures for Millimeter Wave Communications: Phase Shifters or Switches?[J]. IEEE Access, 2016, 4: 247–267. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2514261
- [13] XIA P, NIU H, OH J, et al. Practical Antenna Training for Millimeter Wave MIMO Communication[C]// Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008–Fall. IEEE 68th. USA: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/VETECF.2008.253
- [14] ALKHATEEB A. Frequency Selective Hybrid Precoding for Limited Feedback Millimeter Wave Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(5): 1801–1818. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2549517
- [15] YU X, SHEN J–C, ZHANG J, et al. Alternating Minimization Algorithms for

- Hybrid Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 485–500. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2523903
- [16] WANG Z, MA X, GIANNAKIS G. OFDM or Single-Carrier Block Transmissions?[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 53(3): 380–394. DOI: 10.1109/TCOMM.2004.823586
- [17] ZHU Y, ZHE P, ZHOU H, et al. Robust Single Carrier Frequency Domain Equalization with Imperfect Channel Knowledge[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6091–6103. DOI: 10.1109/TWC.2016.2578332
- [18] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE Physical Layer; General Description : 3GPP TS 36.201 V12.1.0[S]. 3GPP, 2014
- [19] LI X, ZHU Y, XIA P. Enhanced Analog Beamforming for Single Carrier Millimeter Wave MIMO Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, (99). DOI: 10.1109/TWC.2017.2695599
- [20] XIAO X, XIA X, JIN D. Iterative Eigenvalue Decomposition and Multipath-Grouping Tx/Rx Joint Beamformings for Millimeter-Wave Communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1595–1607. DOI: 10.1109/TWC.2014.2370637
- [21] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. England: Cambridge University Press, 2004

## 作者简介



**朱宇**, 复旦大学信息科学与工程学院教授; 主要研究领域为宽带无线移动通信和通信信号处理; 先后主持或参加国家自然科学基金项目 4 项, 国家科技重大专项 4 项, 上海市浦江人才入选者; 已发表论文 40 余篇。



**李先驰**, 复旦大学信息科学与工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为毫米波通信信号处理。



# 5G 大规模机器类通信中的传输技术

## Transmission Technologies in Massive Machine Type Communication for 5G

宫诗寻/GONG Shixun  
陶小峰/TAO Xiaofeng

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

在 4G 商用之后, 5G 技术随即成为最热门的研究内容。3G 和 4G 技术主要集中在移动宽带业务, 旨在解决人与人之间的连接, 而 5G 则着眼于实现“万物互联”<sup>[1]</sup>。可见 5G 的业务形态已经发生很大变化, 将是多业务多技术融合的网络。欧盟早在 2013 年初就在第 7 框架计划启动了“构建 2020 年信息社会的无线通信关键技术”(METIS)项目, 之后又启动了 5G-PPP 项目, 中国和韩国分别成立了 IMT-2020 推进组和 5G 论坛<sup>[2-4]</sup>。目前 5G 的愿景与需求已经完成, 基本特征已经明确, 在不远的将来, 物联网 (IoT)、车联网、虚拟现实、增强现实、高清视频等都将涵盖大量不同类型的行业用户, 这将会是 5G 所必须要面临的挑战<sup>[5-6]</sup>。由国际电信联盟 (ITU) 定义的 5G 三大场景<sup>[7]</sup>分别为增强移动宽带 (eMBB)、大规模机器类通信 (mMTC), 以及低时延高可靠通信 (URLLC), 其中的 eMBB 场景可以看作是 4G 移动宽带技术的演进<sup>[8]</sup>。

机器类通信 (MTC) 一直是 IoT 业务的潜在挑战, 为 IoT 的场景之一<sup>[9]</sup>,

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0020-004

**摘要:** 机器类通信 (MTC) 是物联网 (IoT) 的潜在挑战, 作为 MTC 分支的大规模机器类通信 (mMTC) 涉及 IoT 的大规模部署问题, 是 5G 的重要应用场景之一。针对 mMTC 场景中的传输技术, 重点介绍了 mMTC 场景中的数据收集技术及其在无线传感器网络 (WSNs) 中的应用。此外, 还指出了 mMTC 技术所面临的一些挑战。

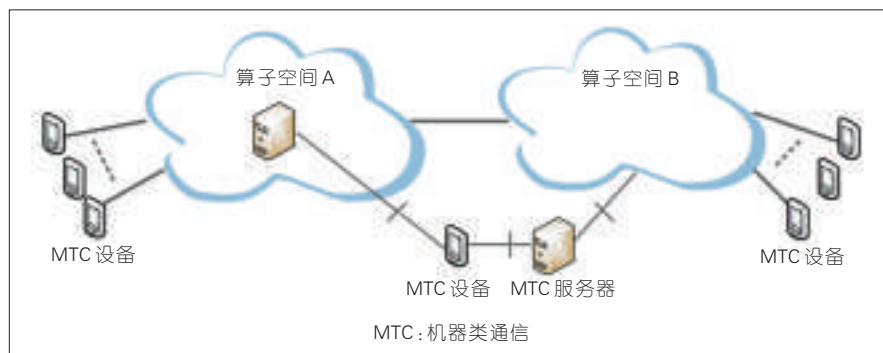
**关键词:** mMTC; 数据采集; WSNs; IoT

**Abstract:** Machine type communication (MTC) is a potential challenge in internet of things (IoT). As the branch of MTC, massive machine type communication (mMTC) involves large-scale deployment of IoT which has been an important application of 5G. In this paper, we focus on the transmission technologies of 5G massive machine type communication, and mainly introduce the technologies of data acquisition in mMTC and its applications in wireless sensor networks (WSNs). Moreover, some challenges of mMTC technology are pointed out.

**Keywords:** mMTC; data acquisition; WSNs; IoT

对带宽和通信的实时性、可靠性要求较高<sup>[10]</sup>。在第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 对 MTC 的定义中, MTC 是一种数据通信形式, 它涉及到一个或多个不需要人机交互的实体, 与传统的移动网络通信相比, MTC 拥有更低的开销, 并且还能够满足海量链接。MTC 涉及到了两种主要通信场景: 一种是 MTC 设备与一个或多个 MTC 服

务器进行通信; 另一种是 MTC 设备与设备之间进行通信<sup>[11]</sup>。如图 1 所示为 3GPP 所定义的 MTC 场景架构<sup>[11]</sup>, 其中, 网络算子提供到 MTC 服务器的网络连接, 这适用于受网络算子控制的 MTC 服务器, 也适用于不受网络算子控制的 MTC 服务器, 这就是说, 在 MTC 设备与服务器之间的通信分为服务器在算子空间内与在算子空间



▲ 图 1 MTC 场景架构

收稿时间: 2017-04-01  
网络出版时间: 2017-05-05



外两种。

另外,爱立信将 MTC 按 5G 需求分为 mMTC 和关键 MTC (cMTC),其中 mMTC 用于满足海量数据连接,cMTC 主要用于实现低时延、高可靠的 MTC 业务。mMTC 作为 5G 三大场景之一,拥有可扩展和灵活的带宽,属于低速率传输,主要面向以传感器和数据采集为目标的应用场景。表 1 所示为 mMTC 主要的应用场景及特点。在 mMTC 场景中往往需要采集和处理海量数据,压缩感知 (CS) 理论<sup>[12]</sup>是一种能够成功恢复稀疏信号的采样方法,又因为 mMTC 用户具有稀疏特性,因此将 CS 应用于 mMTC 场景中能够有效地提升传输性能<sup>[13]</sup>。同样 CS 技术也应用于车联网 (V2V) 的数据采集,而 V2V 即是 5G 中 URLLC 场景的典型应用。

## 1 mMTC 主要传输技术

大规模部署的 IoT 以少量数据和低速率为主,无线传输技术能够将遍布 IoT 的传感器全部连接起来,而 IoT 对无线传输技术的需求主要体现在距离范围、数据速率、带宽、安全和成本等方面,其对能耗方面的要求也非常严格。目前 IoT 中的无线传输技术正在向低功耗广域网 (LPWAN) 方向发展,而 LPWAN 在 MTC 通信中的发展十分迅速,其主要特征体现在了覆盖范围广、低功耗和大容量等<sup>[15]</sup>方面,这些特征也迎合了 mMTC 对无线传输的需求。5G mMTC 场景为了满足海量连接及数据采集的服务需求,诞生了许多种无线传输技术,如表 2 所示。

在 mMTC 中的备选多址接入技术有 15 种之多,非正交多址接入技术 (NOMA) 和稀疏码多址接入技术 (SCMA) 主要应用在 mMTC 场景中的上行传输,由于 mMTC 用户具有稀疏特性,所以 SCMA 主要应用于 mMTC 场景。同时,基于蜂窝技术的 MTC 将成为 5G 的主流,基于蜂窝的典型 IoT 技术为窄带物联网 (NB-IoT),窄带频

率仅为 180 kHz,北京星河亮点公司已经研发出了 NB-IoT 专用测试仪器。LoRa 是一种基于线性扩频 (CSS) 机制的专有扩频方法,适合远距离传输。NB-IoT 和 LoRa 技术主要适用于智能电表、智能家居等场景,这两种技术都属于 LPWAN。另外,mMTC 对于海量数据采集和处理的需求是很大的,CS 技术是一种能够成功恢复稀疏信号的采样方法,将 CS 应用于 mMTC 场景中能够有效提升传输性能。

## 2 mMTC 中的传感数据采集及处理

IoT 中的 mMTC 场景需要对海量数据进行采集和处理,而用户信号的

稀疏特性,使得 CS 成为了一种有效的数据采集方案。表 3 为目前业界主要研究的传感数据采集以及处理方案。

### 2.1 基于 CS 的数据采集

表 4 为笔者团队提出的基于 CS 的数据采集方法。

(1) 正规子空间追踪 (RSP)。

去噪恢复算法是 CS 理论及其应用中的重要技术,考虑到存在于原始稀疏信号  $x$  和压缩测量值  $y$  中的噪声,笔者团队提出了 RSP 去噪恢复算法。RSP 算法首先通过数据预处理操作减轻由  $x$  加性噪声引起的噪声折叠,然后,  $x$  中的非零指数部分由正规测量矩阵选择的列确定,最后,

▼表 1 mMTC 主要应用场景及特点

应用场景	场景特点
智慧城市 <sup>[11]</sup>	大规模城市化场景,有利于解决极度紧张的城市设备资源和基础设施,主要子场景包括智能交通、智能建筑、智能家居等。
智能交通 <sup>[11]</sup>	实时采集车辆、司机、行人、道路传感器和摄像机等海量数据,帮助简化交通流量。例如能够优化交通灯和道路的使用以避免交通堵塞。
智能建筑 <sup>[11]</sup>	5G 连接的传感器/驱动器可以帮助优化建筑温度、湿度和照明,能够检测隐藏管道和电缆,甚至能够处理越权存取、办公用品缺失等情况。
智能家居 <sup>[11]</sup>	家庭安全和自动化应用构成另一个 MTC 服务领域,预计在未来显著增长。例如:关键的家庭安全警报和将家庭监测控制视频数据传输到商业监测站等。
智能电表	一种记录电力、煤气或水的消耗量的电子设备,传输的信息用于监测和计费。智能电表自动发送电表读数到公用事业公司。
环境监测 <sup>[14]</sup>	收集有关生态系统信息的数据,并从中获得新的知识和理解,最终实现适应和减缓,解决退化的生物圈。
工业控制	工业自动化控制,能够减少人力操作,主要对工业生产中的各种参数进行控制。

mMTC: 大规模机器类通信 MTC: 机器类通信

▼表 2 mMTC 主要传输技术及特征

传输技术	技术特征
NOMA <sup>[16]</sup>	最早来自于网络信息论,依赖于 SIC 技术,后由日本 NTT DOCOMO 作为移动通信中正式的多址接入技术提出。优点在于支持更多的终端同时接入网络,其技术表面上并不复杂,甚至可以认为是对 OFDM 技术的简单增补。
SCMA <sup>[17-18]</sup>	依赖于 SIC 技术,是一种能够成倍提升频谱效率的非正交多址技术,对其的研究广泛地集中在海量连接和提高系统容量上。
NB-IoT <sup>[9]</sup>	基于蜂窝的 NB-IoT 技术属于 LPWAN 的一种,为万物互联的重要分支,能够实现大规模物联网应用场景,窄带频率支持 180 kHz,设备寿命长。
LoRa <sup>[15]</sup>	属于 LPWAN 的一种,易于建设和部署,为物联网专用网络传输技术,是一种基于 CSS 机制的专有扩频方法,属于远距离传输。
CS <sup>[12]</sup>	一种能够成功恢复稀疏信号的采样方法,又因为 mMTC 用户具有稀疏特性,因此将 CS 应用于 mMTC 场景中能够有效提升传输性能。

CS: 压缩感知  
CSS: 线性扩频  
LPWAN: 低功耗广域网  
mMTC: 大规模机器类通信  
NB-IoT: 窄带物联网  
NOMA: 非正交多址接入  
OFDM: 正交频分复用  
SCMA: 稀疏码多址接入  
SIC: 串行干扰消除

▼表3 业界提出的数据采集及处理方案

方案名称	方案内容
GFD <sup>[20]</sup>	GFD 机制的提出是为了减少 mMTC 数据包的高信令开销,在 GFD 机制中,LTE 物理随机接入信道中的请求程序被省略,这样便能够有效减少信令开销 <sup>[13]</sup>
OMP <sup>[21]</sup>	CS 恢复算法的一种,有递归特性,性能优于 DS 和 BPDN 算法 <sup>[22]</sup>
DS <sup>[23]</sup>	CS 恢复算法的一种,由于输入噪声的影响性能较差 <sup>[22]</sup>
BPDN <sup>[24]</sup>	CS 恢复算法的一种,将基追踪技术用于噪声信号能够在稳定地抑制噪声的同时保持良好的结构
MWC <sup>[25]</sup>	调制宽带转换器,模拟 CS 中的新技术,但是由于 MWC 的并行结构,其硬件复杂度较高
BPDN: 基追踪去噪算法 CS: 压缩感知 DS: Dantzing 选择器	GFD: 免授予数据传输 LTE: 长期演进 mMTC: 大规模机器类通信
	MWC: 调制宽带转换器 OMP: 正交匹配追踪算法

▼表4 基于CS的数据采集及处理方案

方案名称	方案内容
RSP <sup>[26]</sup>	是 CS 理论中重要技术,能够提升恢复成功率,减少重构误差
SCM-ACS <sup>[27]</sup>	利用 Zadoff-Chu 序列的循环移位来减少物理并行信道数量。其恢复性能优于 MWC,且可降低硬件复杂度
RCOM-ACS <sup>[28]</sup>	利用周期混合函数的循环移位来减少物理并行信道数量,亦可降低硬件复杂度
CS: 压缩感知 MWC: 调制宽带转换器 RCOM-ACS: 基于模拟 CS 的随机循环正交矩阵	RSP: 正规子空间追踪 SCM-ACS: 基于模拟 CS 的采样循环矩阵

这些指数通过保留最小均方误差 (MMSE) 估计信号中的最大值进行更新。研究表明,与正交匹配追踪 (OMP) 算法相比, RSP 算法提高了恢复成功率,同时也有效地减少了重构误差<sup>[26]</sup>。

(2) 基于模拟 CS 的采样循环矩阵 (SCM-ACS) 和随机循环正交矩阵 (RCOM-ACS)。

为了降低 MWC 的硬件复杂度, 笔者团队提出了一种基于模拟 CS 的 SCM-ACS 机制。利用 Zadoff-Chu 序列的循环移位, SCM-ACS 机制能够将物理并行信道的数量从  $m$  减少至 1, 并且需要更长的处理时间, 这里  $m$  的范围从几十到几百。研究表明 SCM-ACS 机制恢复性能优于 MWC<sup>[27]</sup>。另外, 基于模拟 CS 的 RCOM-ACS 也

可以用来降低 MWC 的硬件复杂度, 不过与 SCM-ACS 不同的是该机制是利用周期混合函数的循环移位来减少物理并行信道的数量<sup>[28]</sup>。

## 2.2 无线传感器网络中的数据采集

表5为笔者团队针对无线传感器网络 (WSNs) 提出的数据采集及处理方案。

(1) 基于数据采集算法的自回归模型 (ARDG)。

目前, 在 mMTC 场景中, CS 理论已广泛应用于 WSNs 的研究中, CS 理论提供了一种比较有竞争力的新型数据采集 (DG) 算法用于能效优化。传感器节点具有能量约束, 且记忆和处理能力有限, 同时 CS 机制有利于 WSNs 减少传感器节点的数据通信。

基于以上环境, 笔者团队提出一种适用于 WSNs 的 CS 机制, 即 ARDG, ARDG 能够有效重构信号及减少数据通信业务。在以往的研究中, 这种基于优化问题的自回归 (AR) 模型主要被用作连续重构和减少数据通信, 而在 ARDG 机制中, AR 参数在重构前利用历史传感数据进行估计, 同时也利用到了空间相关性, 且没有受到传感领域的限制。当 AR 参数确定后, 将基追踪去噪 (BPDN) 算法拓展到 AR 模型能够重构传感数据。研究结果表明, 在重构质量和能效等方面, ARDG 的性能要明显地优于随机游动机制<sup>[29-30]</sup>。

(2) 基于分布式存储的压缩网络编码 (CNCDS)。

分布式存储是 WSNs 的重要技术, 尤其是在灾难场景中。为了提高分布式存储的能量效率, 笔者团队提出了一种 CNCDS 机制。该机制利用了传感数据的相关性和 CS 理论以及网络编码技术, 同时 CNCDS 机制能够通过减少收发数量获得更优的能效。理论分析表明, 利用 CNCDS 机制的测量矩阵能够保证优异的 CS 覆盖性能<sup>[31-32]</sup>。

## 3 结束语

未来在人们的生活中, 5G 将无处不在, 在 ITU 提出的 5G 三大场景中, 除现有的 3G、4G 的移动宽带场景进行增强外, mMTC 和低时延高可靠 (URLLC) 场景等将逐步推进 5G 实现万物互联的目标。然而, 由于 mMTC 技术本身就十分复杂, 有些技术还不够成熟, 因此仍然面临着一些重大的挑战:

(1) CS 作为 mMTC 的一种可能的数据采集的方法, 目前案例较少, 且通常的恢复算法为概率恢复, 而这是否能够满足 5G 的需求还有待进一步讨论。

(2) mMTC 中有着大量的传输节点, 如何能更好地提升传输效率, 其中又是否存在延时, 这也是值得研究

▼表5 无线传感器网络中的数据采集及处理方案

方案名称	方案内容
ARDG <sup>[29]</sup>	一种基于数据采集算法的自回归模型, 能够有效重构信号及减少数据通信业务, 在重构质量和能效方面, ARDG 性能明显优于随机游动机制 <sup>[30]</sup>
CNCDS <sup>[31-32]</sup>	一种基于分布式存储的压缩网络编码, 利用了传感数据的相关性和 CS 理论以及网络编码技术, 同时能够通过减少收发数量获得更优的能效, 覆盖性能比较优异

ARDG: 基于数据采集算法的自回归模型 CNCDS: 基于分布式存储的压缩网络编码 CS: 压缩感知

的地方。

(3)此外,mMTC设备未来在安全性方面所面临的挑战也将会更加严峻。

#### 参考文献

- [1] 4G Americas. Recommendations on 5G Requirements and Solutions [EB/OL]. (2015-8-11)[2017-4-5]. <http://www.5gamericas.org/en/>
- [2] METIS. Mobile and Wireless communications Enablers for the 2020 Information Society[EB/OL]. (2015-04-30)[2017-4-5]. <https://www.metis2020.com>.
- [3] 5GPPP.5G PPP 5G Architecture (white papers) [EB/OL].(2016-7)[2017-4-5]. <https://5g-ppp.eu/white-papers/>
- [4] 5G Forum. 5G Spectrum Considerations [EB/OL]. (2016-3) [2017-4-5]. <http://www.5gforum.co.kr/>
- [5] IMT-2020(5G) Promotion Group. White Paper on 5G Vision and Requirements\_V1.0 [EB/OL] (2014-5) [2017-4-5]. [http://euchina-ict.eu/wp-content/uploads/2015/03/IMT-20205GPG-WHITE-PAPER-ON-5G-VISION-AND-REQUIREMENTS\\_V1.0.pdf](http://euchina-ict.eu/wp-content/uploads/2015/03/IMT-20205GPG-WHITE-PAPER-ON-5G-VISION-AND-REQUIREMENTS_V1.0.pdf)
- [6] NGMN. 5G White Paper [EB/OL]. (2015-3) [2017-4-5]. <http://www.ngmn.org/5g-white-paper.html>
- [7] 4GAmericas. 5G Spectrum Recommendations [EB/OL]. (2015-8-11) [2017-4-5]. <http://www.5gamericas.org/en/>
- [8] 5G Americas. Mobile Broadband Transformation LTE to 5G [EB/OL]. (2016-8) [2017-4-5]. <http://www.5gamericas.org/en/>
- [9] 5G Americas. LTE and 5G Technologies Enabling the Internet of Things [EB/OL]. (2016-10) [2017-4-5]. <http://www.5gamericas.org/en/>
- [10] AISSA M, BELGHITH A. Overview of Machine-Type Communications Traffic Patterns[C]//Web Applications and Networking (WSWAN), USA:IEEE, 2015:1-7. DOI: 10.1109/WSWAN.2015.7210318
- [11] 3GPP. TS 22.368.Service Requirements for Machine-Type Communications(MTC)[EB/OL]. (2017-3) [2017-4-5]. <http://www.3gpp.org/>
- [12] DONOHO D L. Compressed Sensing [J]. IEEE Transactions on InformationTheory, 2006, 52(4): 1289-1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582
- [13] YANG X J, WANG X, Zhang J. Compressed Sensing Based ACK Feedback for Grant-Free Uplink Data Transmission in 5G mMTC [C]// Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), USA:IEEE, 2016: 1-5. DOI: 10.1109/PIMRC.2016.7794674
- [14] KUMAR A, KIM H, HANCKE G P. Environmental Monitoring Systems: a Review [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4): 1329-1339. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2233469
- [15] LI L L, REN J C, ZHU Q. On the Application of LoRa LPWAN Technology in Sailing Monitoring System[C]//Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), USA:IEEE, 2017: 77-80. DOI: 10.1109/WONS.2017.7888762
- [16] OTOA N, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K. Performance of Non-Orthogonal Access with SIC in Cellular Downlink Using Proportional Fair-Based Resource Allocation [C]//Proc. of ISWCS, USA:IEEE, 2012:476-480. DOI: 10.1109/ISWCS.2012.6328413
- [17] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends[J]. IEEE Commun. Mag, 2015,53(9):74-81. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263349
- [18] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse Code Multiple Access[C]// in Proc. IEEE PIMRC, USA:IEEE, 2013:332-336. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666156
- [19] 3GPP(Huawei). 3GPP Standards for the Internet-of-Things[EB/OL]. (2016)[2017-4-5]. [http://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP\\_Standards\\_for\\_IoT.pdf](http://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf)
- [20] WANG B C, DAI L L, YUAN Y F, et al. Compressive Sensing Based Multi-User Detection for Uplink Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access[C]//2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), USA:IEEE, 2015: 1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2015.7390876
- [21] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S, et al. Orthogonal Matching Pursuit: Recursive Function Approximation with Applications to Wavelet Decomposition[C]// Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, USA: IEEE, 1993: 40-44. DOI: 10.1109/ACSSC.1993.342465
- [22] LI X L, CUI Q M, TAO X F, et al. Performance Bounds of Compressed Sensing Recovery Algorithms for Sparse Noisy Signals[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), USA: IEEE, 2013:2884-2889. DOI: 10.1109/WCNC.2013.6555019
- [23] CANDES E, TAO T. The Dantzig Selector: Statistical Estimation When p is Much Larger than n[J]. Annals of Statistics, 2007, 35(6):2313-2351.
- [24] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1): 33-61. DOI: 10.1137/S1064827596304010
- [25] MISHALI M, ELDAR Y C. From Theory to Practice: Sub-Nyquist Sampling of Sparse Wideband Analog Signals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 375-391. DOI: 10.1109/JSTSP.2010.2042414
- [26] YANG X J, CUI Q M, DUTKIEWICZ E, et al. Anti-Noise-Folding Regularized Subspace Pursuit Recovery Algorithm for Noisy Sparse Signals[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), USA:IEEE, 2014:275-280. DOI: 10.1109/WCNC.2014.6951980
- [27] YANG X J, TAO X F, GUO Y J, et al. Subsampled Circulant Matrix Based Analogue Compressed Sensing [J]. Electronics Letters, 2012, 48(13):767-768. DOI: 10.1049/el.2012.0366
- [28] YANG X J, GUO Y J, CUI Q M, et al. Random Circulant Orthogonal Matrix Based Analog Compressed Sensing[C]// Global Communications Conference (GLOBECOM), USA:IEEE, 2012: 3605-3609. DOI: 10.1109/GLOCOM.2012.6503675
- [29] LI X L, TAO X F, LIU Y J, et al. Autoregressive Model Based Data Gathering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Compressive Sensing[C]// Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), USA:IEEE, 2015: 2044-2048. DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343634
- [30] LI X L, TAO X F, LI N. Energy-Efficient Cooperative MIMO-Based Random Walk Routing for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016,20(11): 2280-2283. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2599183
- [31] YANG X J, DUTKIEWICZ E, CUI Q M, et al. Compressed Network Coding for Distributed Storage in Wireless Sensor Networks[C]// Communications and Information Technologies (ISCIT), USA:IEEE, 2012:816-821. DOI: 10.1109/ISCIT.2012.6381014
- [32] YANG X J, TAO X F, DUTKIEWICZ E, et al. Energy-Efficient Distributed Data Storage for Wireless Sensor Networks Based on Compressed Sensing and Network Coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10):5087-5099. DOI: 10.1109/TWC.2013.090313.121804

#### 作者简介



宫诗寻, 北京邮电大学信息与通信工程专业博士研究生; 主要研究方向为物理层安全。



陶小峰, 北京邮电大学移动互联网安全技术国家工程实验室主任、无线新技术研究所副所长、博士生导师, 英国工程技术学会会士, IEEE 通信学会北京分会主席, 中国科协联合信息咨询专业委员会委员; 主要研究方向为 5G 移动通信理论与技术; 曾主持国家杰出青年科学基金、国家“863”计划重大项目、北京市自然科学基金等项目, 被评为北京市科技新星、科技北京百名领军人才、万人计划科技创新领军人才, 曾 2 次获得国家技术发明奖; 已发表论文 160 余篇, 获授权专利 80 余项, 出版学术专著 2 部。



# 基于滤波器组多载波的多点协作通信系统

## Coordinated Multipoint Communication System Based on Filter Bank Multicarrier

宋国超/SONG Guochao

陈达/CHEN Da

江涛/JIANG Tao

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)  
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**作**为经典的多载波调制技术, 正交频分复用 (OFDM) 已经成为主流宽带通信的标准, 如长期演进 (LTE) 和 IEEE 802.11ac 等。通过在信号头部加入足够长的循环前缀 (CP), CP-OFDM 可以有效对抗多径衰落, 将频率选择性宽带信道转化为一组并行平坦窄带子信道, 降低信道估计与均衡实现复杂度。但是, CP-OFDM 还存在一些问题, 例如: CP 的加入降低了频谱利用率, 也增加了发送功率开销; CP-OFDM 信号基于矩形脉冲成形, 频谱带外泄漏较大, 难以对抗因时间或频率偏差导致的干扰, 要求不同用户之间的信号严格同步。

作为 OFDM 的升级技术, 最近兴起的滤波器组多载波 (FBMC) 被研究者认为是未来无线通信中最具潜力的多载波技术之一<sup>[1-3]</sup>。FBMC 使用具有良好时频聚焦特性的滤波器, 信号带外泄漏极低, 用户间无需保护频

带, 提高了频谱利用率, 并且 FBMC 不需要 CP 也可以有效抵抗多径衰落。此外, FBMC 基于非正交处理, 不要求严格的信号同步, 特别适用于异步通信场景, 例如: 上行非同步接入、认知无线电<sup>[4]</sup>及多点协作 (CoMP) 等。

CoMP 传输技术在第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 的演进的 LTE (LTE-A) 方案中被提出, 是一种能够消除小区间干扰的新技术<sup>[4]</sup>, 同时也在第 5 代移动通信 (5G) 中备受关注<sup>[5-6]</sup>。CoMP 也是一种多输入多输出 (MIMO) 技术, 利用空间信道上的差异进行信号传输, 通过多基站联合预编码, 为小区边缘用户提供更高的服

务质量, 能够大幅提高无线网络容量。但是, CoMP 基于非同步处理, 基站信号到达不同用户的时间存在很大差异。如果采用 OFDM 作为调制技术, 为保持信号的正交性, 必须采用很长的 CP, 从而严重降低系统容量。考虑到 FBMC 信号不需要严格同步的技术优势, 我们认为将 FBMC 与 CoMP 结合是一种极具潜力的未来通信技术<sup>[7]</sup>。

### 1 FBMC 技术原理

FBMC 采用时频聚焦特性良好的原型滤波器 (例如: IOTA、PHYDYAS 等<sup>[8-9]</sup>), 相比 OFDM 具有更低的带外

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0024-005

**摘要:** 提出了一种基于滤波器组多载波 (FBMC) 的多点协作 (CoMP) 传输技术, 并搭建了基于软件无线电设备 (USRP) 的 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台, 认为通过设计预编码可以消除小区间干扰。为验证所提出 FBMC-CoMP 传输技术及预编码设计的可行性, 在原型验证平台上进行了 FBMC-CoMP 异步能力及误码率等性能的测试。测试结果显示: FBMC-CoMP 能够抵抗的最大基站延时差为 0.7  $\mu$ s, 此时通信误码率小于 0.003。

**关键词:** FBMC; CoMP; 异步传输; 原型验证平台

**Abstract:** In this paper, a new coordinated multipoint (CoMP) transmission technology based on filter bank multicarrier (FBMC) is proposed, and a prototype verification platform for FBMC-CoMP communication system using the universal software radio peripheral (USRP) is built. And the co-channel interference among cell edge users can be eliminated by the precoding design. In order to verify the FBMC-CoMP transmission technology and the precoding, a test on the asynchronous ability and the bit error rate of FBMC-CoMP is made. Experiment results show that the maximum base station delay difference which FBMC-CoMP could resist to is 0.7  $\mu$ s, and the bit error rate is less than 0.003.

**Keywords:** FBMC; CoMP; asynchronous transfer; prototype verification platform

收稿日期: 2017-04-17

网络出版日期: 2017-05-03

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2015AA01A710)

频谱泄漏和更高的频谱利用率。

图1是FBMC的系统原理,调制过程可分为下面3个步骤:

(1)发送端的数据经过串并转换后,进行脉冲幅度调制(PAM)生成实数符号 $a_{m,n}$ ,其中 $m$ 为第 $m$ 个子载波, $n$ 为第 $n$ 个PAM符号。PAM符号周期为 $MT_s/2$ , $M$ 为子载波个数, $T_s$ 为采样间隔。

(2)将 $a_{m,n}$ 乘以相位旋转因子 $e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}}$ 后进行 $M/2$ 点上采样,再将上采样得到的数据通过原型滤波器 $g[i]$ 。 $g[i]$ 具有实偶对称性,其长度为 $KM$ ,其中 $K$ 为重叠因子。

(3)将通过滤波器的信号乘以调制因子 $e^{\frac{j2\pi mi}{M}}$ ,对不同子载波求和后发送出去。

经过上述操作后,发送端的信号 $s[i]$ 可表示为:

$$s[i] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} g[i - \frac{nM}{2}] e^{\frac{j2\pi mi}{M}} e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}} \quad (1)$$

在理想信道下,接收信号与发送信号相同,即 $r[i] = s[i]$ 。FBMC的解调过程与调制过程类似,这里不再赘述。接收端得到的解调符号可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{m_0, n_0} &= \sum_{k=0}^{\infty} r[k] g[k - \frac{n_0 M}{2}] e^{\frac{-j2\pi m_0 k}{M}} e^{\frac{-j(m_0 + n_0)\pi}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} s[k] g[k - \frac{n_0 M}{2}] e^{\frac{-j2\pi m_0 k}{M}} e^{\frac{-j(m_0 + n_0)\pi}{2}} \quad (2) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} g_{m,n}[k] g_{m_0, n_0}^*[k] \end{aligned}$$

为了完美恢复出原始输入符号,滤波器组 $g_{m,n}[k]$ 需要满足如下条件:

$$\zeta_{m,n}^{m_0, n_0} = \sum_{k=0}^{\infty} g_{m,n}(k) g_{m_0, n_0}^*(k) = \begin{cases} 1, & (m_0, n_0) = (m, n) \\ \text{纯虚数}, & (m_0, n_0) \neq (m, n) \end{cases} \quad (3)$$

在满足上述条件时,解调符号 $\hat{a}_{m_0, n_0}$ 可以改写为:

$$\hat{a}_{m_0, n_0} = a_{m_0, n_0} + \sum_{\substack{(m,n) \neq (m_0, n_0) \\ ja_{m,n}^{(m_0, n_0)}}} a_{m,n} \zeta_{m,n}^{m_0, n_0} \quad (4)$$

其中 $ja_{m,n}^{(m_0, n_0)}$ 为纯虚数。可以看到:对

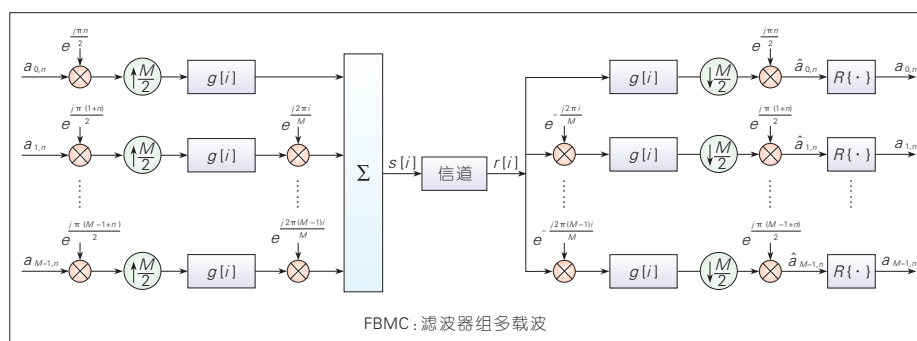


图1 FBMC原理

$\hat{a}_{m_0, n_0}$ 进行取实操作 $\Re\{\cdot\}$ 后就能够完美恢复出原始输入符号 $a_{m_0, n_0}$ 。

为了降低实现复杂度或提升解调性能,也可以借助于快速傅里叶变换将FBMC用频域扩展或者多相滤波器的方式实现<sup>[10-11]</sup>。

## 2 FBMC-CoMP

### 2.1 FBMC-CoMP传输技术

为充分结合FBMC与CoMP的优势,我们提出基于FBMC的CoMP传输技术,其中所有基站使用FBMC作为调制技术,并同时同频向用户传输数据。基于FBMC-CoMP传输技术的通信场景如图2所示,其中我们定义处在小区面积70%以外的用户为小区边缘用户。不难看出小区边缘用户面临着通信质量降低的问题:小区

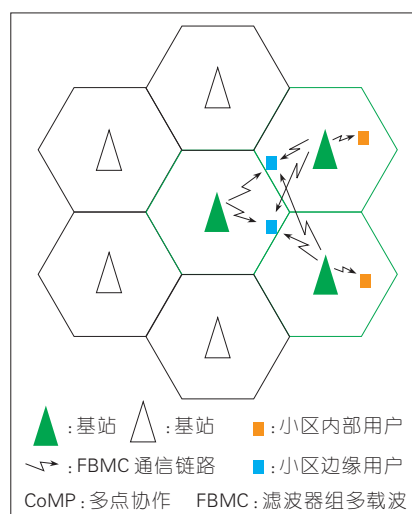


图2基于FBMC-CoMP传输技术的通信场景

边缘用户离本小区基站与其他小区基站距离相近,其他小区的基站会对小区边缘用户产生同频干扰,导致小区边缘用户的信干比较低;边缘用户所在不同基站的地理位置差异,不同小区的基站信号到达边缘用户存在不同时延,使信号之间正交性变差,进一步降低小区边缘用户的信干比。为克服上述问题,FBMC-CoMP传输技术利用FBMC波形的非完全正交特性,通过基站控制器对不同地理位置的基站信号进行联合处理,使得原来相互独立的通信链路组合成协作簇。

### 2.2 FBMC-CoMP通信系统原型验证平台

由于FBMC-CoMP信道信息状态的反馈、馈线的布置以及数据集中处理都具有极大挑战性,还未见FBMC-CoMP通信系统的原型验证平台。本研究团队经过多年技术攻关,搭建了一套基于软件无线电设备(USRP)的FBMC-CoMP通信系统原型验证系统,并验证了FBMC-CoMP的技术优势。FBMC-CoMP通信系统参数配置如表1所示。

#### 2.2.1 硬件架构

基于USRP原型验证平台的硬件架构如图3所示,其中主要包括:基站控制器、基站、用户3个部分。整个系统可看成一个 $12 \times N_t$ 的分布式MIMO系统,其中 $N_t$ 为用户个数。

基站控制器主要使用美国国家

▼表 1 FBMC-CoMP 通信系统参数配置

参数	配置
基站数	3 个
用户数	4 个
中心频率	3 GHz
滤波器类型	Phydyas
子载波个数	64 个
基站天线数	4 根
用户天线数	1 根
采样率	20 MHz
调制方式/码率	16 QAM 1/2
符号个数	20 个

QAM: 正交振幅调制

仪器公司(NI)的外围组建互连总线(PXIe)机箱搭建而成,机箱内插有一些不同的功能模块,其中包括主频为 2.3 GHz 8 核的嵌入式控制器 PXIe-8880,负责完成各个基站的调度、数据的汇集、预编码矩阵求解等;现场可编程门阵列(FPGA)协处理单元 Flex 可支配的输入输出(RIO),完成 MIMO 处理,如联合预编码、MIMO 检测等;PXI 数据路由器 CPS-8910,负责基站数据汇总与分发;时频同步器 6674T,用作基站的频率同步以及定时同步。

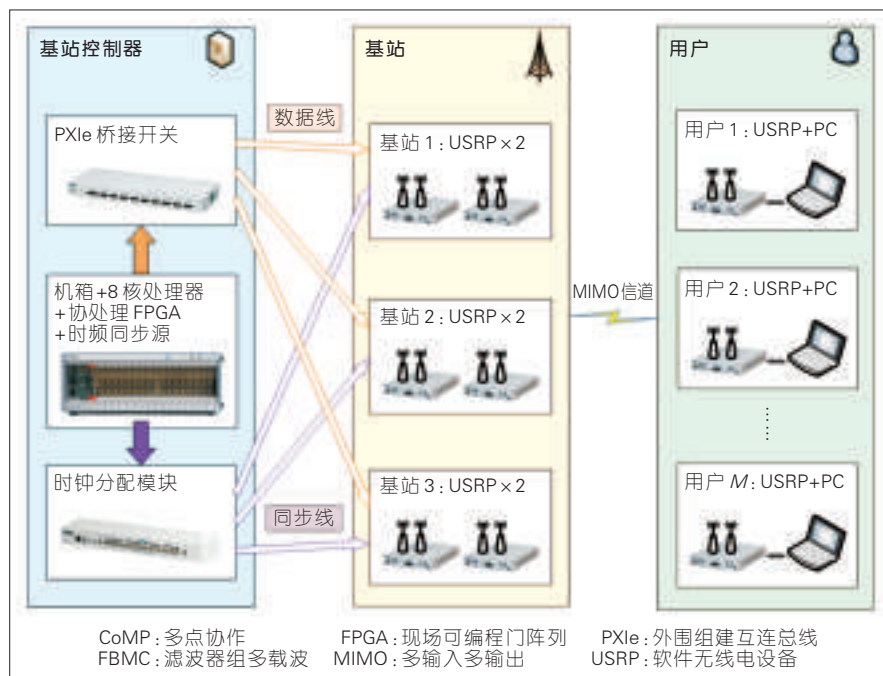
原型验证平台包含 3 个基站,每个基站由 2 个嵌有高性能 FPGA 处理单元的 USRP 组成,每个 USRP 则包含了 2 个射频单元,每个基站一共有 4 根发送天线。

用户由 1 台 USRP 与 1 台计算机组成,共有 4 个单天线用户。

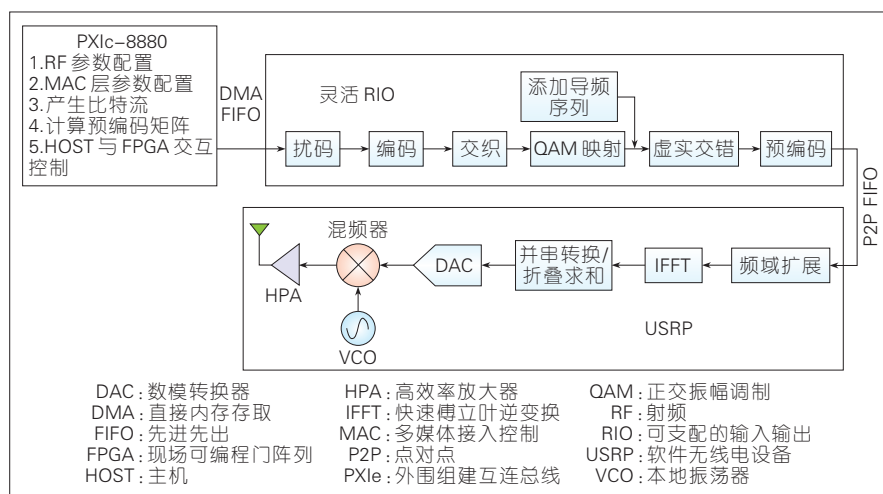
### 2.2.2 软件架构

FBMC-CoMP 通信系统的软件架构如图 4 所示,软件架构取决于硬件,同样将数据流进行分层处理。

在基站控制器中,通过 PXIe 总线完成射频参数的配置、多媒体接入控制(MAC)层数据的配置、预编码矩阵的计算,以及与 Flex RIO 和 USRP 的交互处理等操作,基站控制器与 Flex RIO 间的传输是通过直接内存存取(DMA)先进先出(FIFO)队列实现。



▲图 3 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台的硬件架构



▲图 4 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台的软件架构

Flex RIO 需要完成扰码、信道编码、正交振幅调制(QAM)映射及联合预编码等操作,我们分别使用了 FBMC-CoMP-ZF 算法与 FBMC-CoMP-MMSE 算法完成对基站数据的预编码操作, Flex RIO 预编码后的数据通过点对点(P2P)的队列传送给基站中的 USRP。

在基站 USRP 的 FPGA 中完成 FBMC 波形的调制及数字上变频,然后将 FPGA 生成的数字中频信号依次

经过数模转换与频谱搬移后由天线发送出去。我们使用 Phydyas 滤波器,重叠因子设置为 4,并利用频域扩展的方式实现 FBMC 的波形调制,具有实现架构简单、预编码更精细等优点。参考 5G NOW 的方案,在帧头插入块状导频,使用干扰近似法(IAM)完成信道估计。

## 3 FBMC-CoMP 预编码设计

在 FBMC-CoMP 通信系统中,多



个基站要对边缘用户同时进行信号的传输,在已知系统信道参数的情况下,基站通过设计预编码对每个发送天线赋予不同的加权系数,产生具有指向性的波束,从而消除小区间与用户间的同频干扰。

假设多基站与用户间的信道矩阵为  $H \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$ , 预编码矩阵为  $W \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ , 所有用户数据信号矢量为  $S \in \mathbb{Z}^{N_t \times 1}$ , 则用户接收到的信号为  $R = HWS + N$ , 其中  $N \in \mathbb{Z}^{N_t \times 1}$  为高斯噪声,  $N_t$  与  $N_r$  分别为发送天线与接收天线的个数,且  $N_t \geq N_r$ 。

按照信号处理方式的不同,可将预编码分为线性预编码与非线性预编码。由于非线性预编码实现复杂度极高,不适用于实际通信场景。因此,下面我们将首先介绍两种常用的线性预编码方法,然后提出针对 FBMC-CoMP 的预编码设计方法,从而消除边缘用户小区间的同频干扰。

### 3.1 迫零预编码

迫零预编码可将等效信道矩阵完整对角化,从而消除其他用户的干扰,达到同一频率资源内传输多个并行数据流的目的。在迫零(ZF)预编码中,对信道矩阵求广义逆矩阵可以得到其预编码矩阵为  $W_{ZF} = H^+ = \beta H^H (HH^H)^{-1}$ 。此时,用户接收信号可以写为  $R = HW_{ZF}S + N = \beta IS + N$ 。ZF 预编码算法易于实现,但会使基站的发送功率增大,且信道相关性越强则消耗功率越大。

### 3.2 MMSE 预编码

最小均方误差(MMSE)预编码的准则是使接收信号与发送信号的均方误差最小,从而在消除其他用户干扰时,减小信道中的高斯白噪声的干扰。MMSE 的预编码矩阵为:

$$W_{MMSE} = H^H \left( (HH^H)^{-1} + \frac{\sigma^2}{E_s} I \right)^{-1} \quad (5)$$

其中  $\sigma^2$  为加性高斯白噪声功率,  $E_s$  为接收信号功率。MMSE 算法可以有

效消除高斯白噪声,但是实现复杂度较大。

### 3.3 FBMC-CoMP-ZF 与

#### FBMC-CoMP-MMSE 预编码

当信道频率选择性较强时,不同子载波对应的信道矩阵会有很大差异,如果所有子载波使用同一个预编码矩阵,会导致波束赋形的效果很差,用户间的干扰不能消除,因此必须对每个子载波分别进行预编码。

假设第  $m$  个子载波的信道矩阵为  $H_m \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$ , 其预编码矩阵为  $W_m \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ , 基站所有天线发送信号矢量  $S[i] = [s_1[i] \ s_2[i] \ \cdots \ s_{N_t}[i]]^T$  表示为:

$$S[i] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} W_m A_{m,n} g[i - \frac{nM}{2}] e^{\frac{j2\pi mi}{2}} e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}} \quad (6)$$

其中  $A_{m,n} = [a_{m,n}^1 \ a_{m,n}^2 \ \cdots \ a_{m,n}^{N_r}]^T$  为  $N_r$  个用户在第  $n$  个符号与第  $m$  个子载波处的 PAM 符号的数据矢量。

发送信号经过信道后到达各个用户,所有用户在第  $n_0$  个符号与第  $m_0$  个子载波处的信号恢复矢量

$$\hat{A}_{m_0,n_0} = [\hat{a}_{m_0,n_0}^1 \ \hat{a}_{m_0,n_0}^2 \ \cdots \ \hat{a}_{m_0,n_0}^{N_r}]^T \text{ 表示为:}$$

$$\begin{aligned} \hat{A}_{m_0,n_0} &= \sum_{m=0}^{M-1} H_m W_m S[k] g_{m_0,n_0}^*[k] + N \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} H_m W_m A_{m,n} g_{m,n}^*[k] g_{m_0,n_0}^*[k] + N \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} H_m W_m A_{m,n} g_{m,n}^{m_0,n_0} + N \\ &= H_{m_0,n_0} W_{m_0,n_0} A_{m_0,n_0} + \sum_{(m,n) \neq (m_0,n_0)} H_m W_m A_{m,n} g_{m,n}^{m_0,n_0} + N \end{aligned} \quad (7)$$

假设信道相关带宽大于 3 个子载波间隔,则在第  $m_0$  个子载波相邻的子载波处有  $H_m \approx H_{m_0}$  和  $W_m \approx W_{m_0}$ 。基于等效信道矩阵完整对角化的一系列思想,我们提出 FBMC-CoMP-ZF 预编码为:

$$W_{FBMC-CoMP-ZF} = H_m^+ = \beta H_m^H (H_m H_m^H)^{-1} \quad (8)$$

经过 FBMC-CoMP-ZF 预编码后,  $\hat{A}_{m_0,n_0}$  可以重写为:

$$\hat{A}_{m_0,n_0} = A_{m_0,n_0} + \sum_{(m,n) \neq (m_0,n_0)} A_{m,n} g_{m,n}^{m_0,n_0} + N_{real} + jN_{imag} \quad (9)$$

其中  $N_{imag} \in \mathbb{C}^{N_r}$  和  $N_{real} \in \mathbb{C}^{N_r}$  分别

为信道对  $\hat{A}_{m_0,n_0}$  的虚部与实部的高斯白噪声。对  $\hat{A}_{m_0,n_0}$  信号取实部后恢复出的信号为  $A_{m_0,n_0} + N_{real}$ 。为减小高斯白噪声  $N_{real}$  对  $\hat{A}_{m_0,n_0}$  的干扰,我们提出 FBMC-CoMP-MMSE 预编码为

$$W_{FBMC-CoMP-MMSE} = H_m^H \left( (H_m H_m^H)^{-1} + \frac{\sigma^2}{E_s} I \right)^{-1} \quad (10)$$

## 4 仿真与测试结果

### 4.1 MATLAB 仿真结果

为验证所提出的 FBMC-CoMP 传输技术及预编码的优势,我们对系统中一个基站引入  $\tau$  个采样点的延时,并在高斯信道下评估应用 FBMC-CoMP-ZF 与 FBMC-CoMP-MMSE 预编码的系统误码率(BER)性能。图 5 是 MATLAB 仿真所得的 FBMC-CoMP 误码率曲线。从图 5 中可以看出:

(1) 在高斯信道下 FBMC-CoMP-MMSE 算法优于 FBMC-CoMP-ZF 算法,并能够提供较好的 BER 性能。

(2) 随着延时采样点  $\tau$  的增大, BER 性能会逐渐变差,但在采样点小于 14 时误码率小于 5%,系统能够进行可靠的通信。

### 4.2 原型验证平台测试结果

为了模拟基站信号传播过程中的衰减,我们人为降低基站的发送功率,以 FBMC-CoMP-ZF 预编码算法为例子,分别测试了发送端在 -5 dBmW、-3 dBmW、-2 dBmW 的 BER 曲线。从图 6 中可以看出:当采样点小于 14 (延时差为 0.7 us) 时,系统仍然能够为用户提供可靠的服务,且随着 FBMC 调制子载波数目的增多,FBMC-CoMP 能够适应的延时也会线性增大。基站同时同频对 4 个用户进行信号传输,所以容量增益为 4 倍 (6 dB)。

## 5 结束语

我们首先提出了一种基于 FBMC 的 CoMP 传输技术,并搭建了基于 USRP 的 FBMC-CoMP 的原型验证平

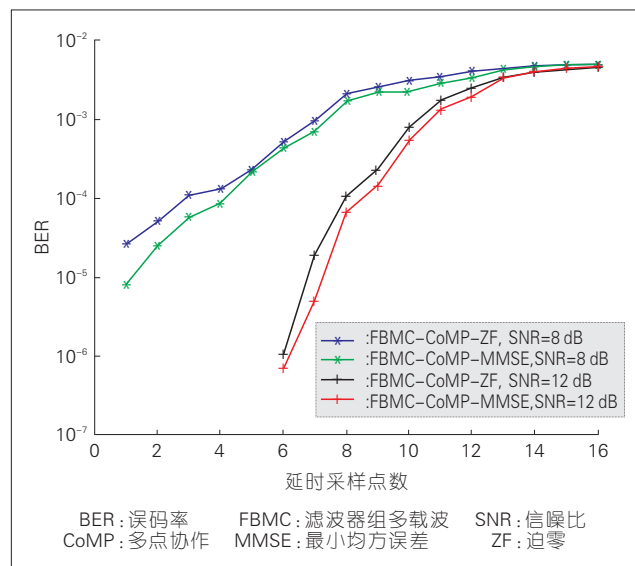


图5  
仿真所得的  
FBMC-CoMP 通信系统  
误码率

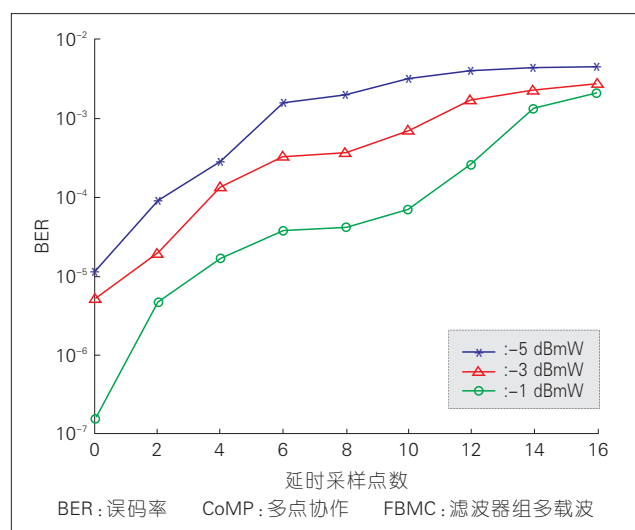


图6  
原型验证平台测试的  
FBMC-CoMP 通信系统  
误码率

台,然后提出了 FBMC-CoMP 中的预编码设计以消除小区间干扰。最后,我们通过 MATLAB 仿真与原型验证平台的测试,验证了 FBMC-CoMP 无需循环前缀且能够进行可靠通信的技术优势。测试结果表明:所提出的 FBMC-CoMP 传输技术能够忍受不同基站信号到达的时延差,并为边缘用户提供可靠的通信服务,大幅提高了通信容量。

#### 参考文献

- [1] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3): 92-112. DOI: 10.1109/MSP.2011.940267

- [2] SCHAICH F, WILD T. Waveform Contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFM[C]// 2014 6th International Symposium on Communications. USA: IEEE, 2014: 457-460. DOI: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912
- [3] 5GNOW\_D3.2\_final: 5G waveform candidate selection[EB/OL]. [2014-04-07]. (2017-04-17). [http://www.5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW\\_D3.2\\_final.pdf](http://www.5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW_D3.2_final.pdf)
- [4] 3GPP. Multiplexing and Channel Coding: TS36.212 [S]. 2010
- [5] JUNGnickel V. The Role of Small Cells, Coordinated Multipoint, and Massive MIMO in 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 44-51. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815892
- [6] CUI Q. Evolution of Limited-Feedback CoMP Systems from 4G to 5G: CoMP Features and Limited-Feedback Approaches[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(3): 94-103. DOI: 10.1109/MVT.2014.2334451
- [7] CHENG Y, LI P, HAARDT M. Coordinated Beamforming for the Multi-User MIMO Downlink Using FBMC/OQAM[C]//2014 6th

International Symposium on Communications. USA: IEEE, 2014: 465-469. DOI:10.1109/ISCCSP.2014.6877914

- [8] PHYDYAS Deliverables D3.2: Optimization of transmitter and receiver[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.ict-phydyas.org/delivables/PHYDYAS-D3-2.pdf/view>
- [9] HAAS R, BELFIORE J C. Multiple Carrier Transmission with Time-Frequency Well-Localized Impulses[C]//IEEE Second Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux. USA: IEEE, 1994:187-193. DOI:10.1109/SCVT.1994.574163
- [10] BELLANGER M. FS-FBMC: A Flexible Robust Scheme for Efficient Multicarrier Broadband Wireless Access[C]//Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE. USA: IEEE, 2012: 192-196. DOI:10.1109/GLOCOMW.2012.6477568
- [11] CHANG S L, KYUNG Y Y. Polyphase Filter-Based OFDM Transmission System[C]//IEEE 60th Vehicular Technology Conference. USA: IEEE, 2004: 525-528. DOI:10.1109/VETECF.2004.1400062
- [12] QU Q, QIU Y and JIANG T. Finer SVD-Based Beamforming for FBMC/OQAM Systems[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2016: 1-7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2016.7841842

#### 作者简介



宋国超, 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)博士生; 主要研究方向为 OFDM 和 FBMC 等多载波技术。



陈达, 华中科技大学电子信息与通信学院讲师; 主要研究方向包括 OFDM 和 FBMC 等多载波通信技术、毫米波通信, 以及异构网络; 已发表论文 10 余篇。



江涛, 华中科技大学电子信息与通信学院二级教授、博士生导师; 研究方向为宽带无线通信和天地一体化信息网络理论与方法; 已发表论文 160 余篇, 出版专著 2 部、编著 2 部, 参编 4 部。

# Filtered-OFDM 系统的次优接收机设计与验证

## Design and Verification of Sub-Optimum Receiver for Filtered-OFDM System

梁潇/LIANG Xiao  
武刚/WU Gang

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

由于正交频分复用(OFDM)存在带外辐射过高、峰均比(PAPR)过大等缺点,面向第5代移动通信(5G)的第3代合作伙伴计划(3GPP)的新无线空口(NR)标准,各大通信厂商都提出了包括滤波正交频分复用(Fixed-OFDM)、加窗 OFDM、滤波器组 OFDM (FB-OFDM)等新波形技术。考虑到 5G 更高的通信速率及带宽需求,并需适用于 6 GHz 以上的高频通信(尤其是毫米波频段),5G 候选波形需要更高的时频效率和更优的带外辐射特性,以满足 5G 通信的要求<sup>[1]</sup>。

在 3GPP RAN1 第 86 次会议中,确定了 5G 中下行波形采用基于 OFDM 的新型多载波技术,而上行波形和 40 GHz 以上的高频通信则采用基于离散傅立叶变换(DFT)扩展的多载波技术。其中,Filtered-OFDM 又可分为基于子带滤波的 OFDM (f-OFDM)和统一滤波的 OFDM (UF-OFDM)<sup>[2]</sup>。FB-OFDM 的带外衰减性能最好,但其复杂度高,与多输入多输出

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2017) 03-0029-006

**摘要:** 提出了一种针对基于子带滤波的正交频分复用(f-OFDM)系统的次优接收机算法。针对限幅滤波的滤波多载波信号,提出充分利用失真信号部分的方法,通过减少欧氏距离的方式最小化失真的影响,在保证系统复杂度的同时提升了系统的性能。同时,通过软件无线电搭建了原型验证平台,对滤波多载波的非线性接收机处理算法进行了验证。计算机仿真及验证结果表明:新的算法使得误码率(BER)性能得到了提升。

**关键词:** 滤波器; OFDM; 接收机; 软件无线电

**Abstract:** In this paper, a sub-optimum receiver for filtered-orthogonal frequency division multiplexing (f-OFDM) system is proposed. The new receiver will make full use of the nonlinear distortion of filtered-OFDM signals, improving system performance by reducing the Euclidean distance between received signals and decoded signals, while the system complexity won't increase a lot. A experimental platform by software defined radio to verify the validity of new algorithm is also set up. The results show that the new algorithm improve bit error rate (BER) performance greatly.

**Keywords:** filter; OFDM; receiver; software defined radio

(MIMO)不易结合等缺点限制了对 5G 的适应性<sup>[3]</sup>。UF-OFDM 带外辐射较小,更能支持短突发业务,但 UF-OFDM 会放大噪声功率,同时对定时偏差格外敏感<sup>[4]</sup>。文中,我们着重研究了 f-OFDM,并对其进行了仿真及验证。

f-OFDM 是文献[5]中提出的一种新波形技术。f-OFDM 对 OFDM 信号进行滤波处理,能有效抑制带外辐射,从而抵抗不同子带间干扰,并减少频带保护间隔,提升了频谱利用率。f-OFDM 能继承 OFDM 的各项优点并兼容 OFDM。同时,f-OFDM 的帧结构比较灵活,载波间隔、循环前缀(CP)、滤波器系数等各种参数可以

根据信道条件、业务需求进行不同配置,满足了 5G 的多样性需求。基于以上优点,f-OFDM 已经成为 5G 新波形技术的备选方案之一,并在 3GPP 上得到了广泛的研究与讨论。

f-OFDM 继承了 OFDM 中低复杂度、高频谱效率等优点,也克服了 OFDM 中带外辐射高、帧结构固定等缺点。但是,f-OFDM 中依然存在 PAPR 过高的缺点。过高 PAPR 会使得发送信号进入功率放大器(PA)的非线性区域,从而产生信号失真。在 3GPP 86 次会议上讨论并仿真了在新的 PA 模型下 f-OFDM 和 OFDM 的系统性能,结果显示在 3 个用户功率平均分配、保护间隔为 12 个子载波时,

收稿日期:2017-04-13  
网络出版日期:2017-05-04



f-OFDM 会获得 1 dB 的性能提升<sup>[6]</sup>。OFDM 中可以采用迭代限幅滤波的方式进行 PAPR 抑制<sup>[7]</sup>,并通过次优接收机的设计来消除此方法带来的非线性失真<sup>[8]</sup>。文中,我们分析了迭代限幅滤波方法对 f-OFDM 系统的影响,同时也仿真了次优接收机对 f-OFDM 系统的性能影响,并且在硬件实验平台上进行了测试。结果显示:次优接收机提升了 f-OFDM 的系统性能。

## 1 基于限幅滤波的 f-OFDM 系统原理

### 1.1 基于迭代限幅滤波的 f-OFDM 系统整体链路

用于验证接收机处理算法的迭代限幅滤波 f-OFDM 链路如图 1 所示。其中第  $k$  个时间段上的频域发送数据矢量为  $S_k = [S_0 S_1 \dots S_{N-1}]^T \in C^N$ ,  $S_k$  为调制后的信号,占据了  $N$  个子载波。经过多载波调制后的发送信号矢量为  $x_T$ 。经过多径信道后,接收端接收到的信号矢量为  $x_R = Hx_T + Z_k$ 。其中  $(N_{sc} + L_{cp}) \times (N_{sc} + L_{cp})$  维矩阵  $H$  为信道矩阵。经过多载波解调和接收机的处理后,最终恢复出来的子带数据矢量为  $X$ 。

### 1.2 发送端链路

(1) OFDM 调制模块。f-OFDM 信

号是对基带 OFDM 信号进行数字滤波而产生。一个  $(N_{sc} + L_{cp}) \times 1$  维基带 OFDM 信号可表示为  $x_{OFDM} = C_{CP} V_k S_k$ , 其中,  $S_k$  可表示正交振幅调制(QAM)数据和用于信道估计的导频序列,共占据  $N$  个子载波;  $N_{sc} \times N$  维矩阵  $V_k$  表示快速傅立叶逆变换(IFFT),将  $N$  个数据映射到  $N_{sc}$  个子载波上;  $(N_{sc} + L_{cp}) \times N_{sc}$  维矩阵  $C_{CP}$  表示添加 CP 操作。

(2) 发送滤波模块。f-OFDM 的滤波操作可采用时域滤波,将信号与滤波器进行卷积运算完成。滤波操作可用一个  $(N_{sc} + L_{cp}) \times (N_{sc} + L_{cp})$  维托普利兹矩阵  $F_k$  为与基带 OFDM 信号的乘法表示<sup>[9]</sup>。滤波后的信号可表示为  $x_F = F_k x_{OFDM} = F_k C_{CP} V_k S_k$ 。

为了保证波形的连续性,滤波前需要连接前后两帧数据,并截取与之前数据相同长度的序列进行滤波<sup>[10]</sup>。

(3) 限幅滤波模块。限幅是为了降低 f-OFDM 信号的 PAPR,但限幅会使得带外频谱产生较大回升,因此需要进行再次滤波以抑制这种回升。为减小复杂度,根据 f-OFDM 的系统特性,此阶段采用了和原 f-OFDM 系统相同的滤波器。限幅滤波过程是可以迭代重复进行,进一步降低 PAPR 的同时降低带外辐射。为了方便运算,在文中设定迭代次数为 1。

因此,基于迭代限幅滤波的发送

信号为<sup>[10]</sup>:

$$x_T = \text{Clip}(F_k^2 C_{CP} V_k S_k) \quad (1)$$

式(1)中  $\text{Clip}$  表示限幅运算。

(4) 同步导频添加模块。为了完成接收端的信号同步,发送端添加了基于 Chu 序列的导频序列。Chu 序列的定义为<sup>[11]</sup>:

$$x(i) = \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}i^2}, & N \text{ 为偶数} \\ e^{j\frac{\pi}{N}(i+1)^2}, & N \text{ 为奇数} \end{cases}, i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

为了获得更好的同步性能,同步采用了 Park 同步算法<sup>[12]</sup>。根据此算法,导频的格式可以被设计为如式(3)所示:

$$s_{\text{Park}} = [A \ B \ A^* \ B^*] \quad (3)$$

其中  $A$  为 Chu 序列,  $B$  为  $A$  的倒序排列。  $A$  采用的是 64 位 Chu 序列,故整个导频序列的长度为 256。将这 256 个导频序列连接在一帧 f-OFDM 符号前,作为发送序列送入软件无线电的发射天线。

### 1.3 接收端链路

(1) 帧检测定时同步模块。为完成发送信号的帧同步,可利用 Park 算法<sup>[12]</sup>,对不断滑动截取的数据进行如下的运算:

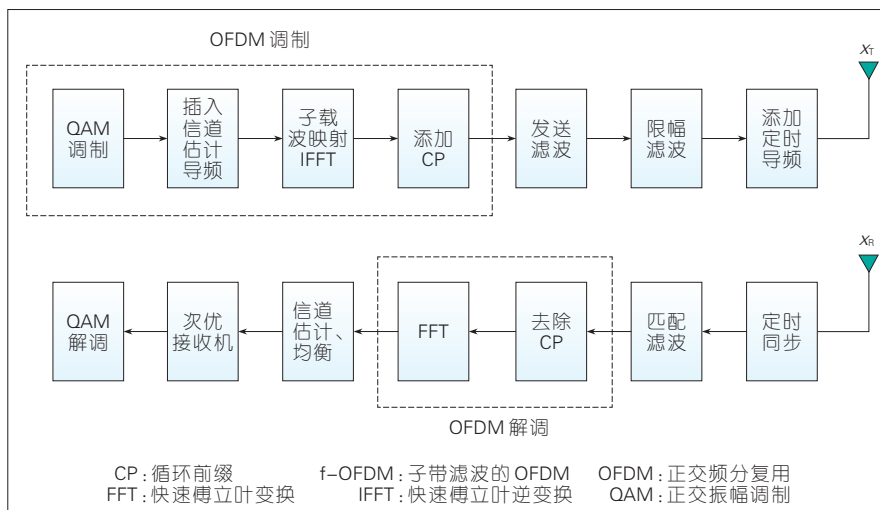
$$M(d) = \frac{P(d)^2}{R(d)^2} \quad (4)$$

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N/2} r(d-k) \cdot r(d+k) \quad (5)$$

$$R(d) = \sum_{k=0}^{N/2} |r(d+k)|^2 \quad (6)$$

式(4)中  $d$  为数据的索引。对所有数据索引计算此公式,其中最大值对应的索引即为数据的起始位置。

(2) 匹配滤波模块。发送信号是通过连续两帧数据进行拼接、截取,然后滤波得到,因此,接收端需进行相应的逆过程以得到恢复数据。并且,接收端采用了对应于发送端的匹配滤波器。



▲ 图 1 基于迭代限幅滤波的 f-OFDM 基本链路

经过  $(N_{SC} + L_{CP}) \times (N_{SC} + L_{CP})$  阶托普利兹矩阵  $\mathbf{F}_k^{(2)}$  匹配滤波后,得到的信号为:

$$\mathbf{X}_{\text{OFDM}}^{(2)} = \mathbf{F}_k^{(2)} \mathbf{x}_R \quad (7)$$

(3) OFDM 解调模块。经过快速傅立叶变换 (FFT) 后的频域信号可以表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}_k \mathbf{M}_{\text{CP}} \mathbf{X}_{\text{OFDM}}^{(2)} = \mathbf{D}_k \mathbf{M}_{\text{CP}} \mathbf{F}_k^{(2)} \mathbf{x}_R \quad (8)$$

其中,  $N \times (N + L_{CP})$  维矩阵  $\mathbf{M}_{\text{CP}}$  用于去除 CP。  $\mathbf{D}_k$  用于对信号做 FFT, 并提取出其中的  $N$  个有用信号。

(4) 信道估计及均衡模块。多径信道在时域上表现为卷积, 在频域上表示为乘。因此, 多径信道对信号的影响可以表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}_k \mathbf{M}_{\text{CP}} \mathbf{F}_k^{(2)} \mathbf{x}_R = \mathbf{H} \mathbf{D}_k \mathbf{M}_{\text{CP}} \mathbf{F}_k^{(2)} \mathbf{x}_T + \mathbf{Z}_k \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{H}$  为  $N$  阶对角矩阵, 且每一个对角元素对应该频域信号的信道系数。  $\mathbf{Z}_k$  为  $N \times 1$  的高斯白噪声, 其中每个元素相互独立, 且均服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。

文中, 我们采用了和传统 OFDM 相同的迫零均衡。先通过发送端定义的导频序列估计了指定子载波上的信道系数, 然后通过线性插值的方法得到了信道估计矩阵  $\hat{\mathbf{H}}$ , 最后采用迫零均衡方式消除了信道影响。

## 2 次优接收机的设计

### 2.1 非线性失真对 f-OFDM 的影响分析

发送端的限幅是非线性操作, 会使得发射信号产生非线性失真。本节将对这种非线性失真进行分析。

经限幅后的 OFDM 失真信号可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$\mathbf{y}_{\text{OFDM}} = \text{Clip}(\mathbf{x}) = \alpha \mathbf{x}_{\text{OFDM}} + \mathbf{d} \quad (10)$$

其中  $\mathbf{x}$  表示原信号,  $\mathbf{d}$  表示限幅产生的非线性失真,  $\alpha$  表示限幅后有用信号与原信号的比值,

假设  $R = |\mathbf{x}_n|$ 。  $p(R)$  为  $R$  的概率密度函数。考虑 OFDM 信号的高斯特性<sup>[13]</sup>,  $R$  服从瑞利分布, 故:

$$p(R) = \frac{R}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) u(R) \quad (11)$$

限幅信号在频域可表示为:

$$\mathbf{Y}_{\text{OFDM}} = \alpha \mathbf{X}_{\text{OFDM}} + \mathbf{D} \quad (12)$$

f-OFDM 系统中, 调制产生的 OFDM 信号会通过有限长单位冲激响应 (FIR) 滤波器进行滤波处理。假设频域滤波器系数向量为  $\mathbf{F}$ , 则 f-OFDM 的限幅信号可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \alpha \mathbf{F} \mathbf{X} + \mathbf{F} \mathbf{D} \quad (13)$$

接收机的性能与两信号的最小欧氏距离有关<sup>[14]</sup>, 故通过分析发送信号的欧氏距离则可近似分析接收机的性能。现假设两个 f-OFDM 信号只  $\mathbf{X}^{(2)}$  和  $\mathbf{X}^{(1)}$  只在第  $k_0$  个子载波上有一个比特不相同, 其对应的时域信号分别为  $\mathbf{x}^{(2)}$ 、 $\mathbf{x}^{(1)}$ 。则:

$$\mathbf{X}^{(2)} = \mathbf{X}^{(1)} + \mathbf{F} \mathbf{E}_{\text{OFDM}} \quad (14)$$

其中  $\mathbf{E}_{\text{OFDM}} = [\mathbf{E}_0^{\text{OFDM}}, \mathbf{E}_1^{\text{OFDM}}, \dots, \mathbf{E}_{N-1}^{\text{OFDM}}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  为 OFDM 信号的频域误差向量, 对应在时域上的 OFDM 误差向量为  $\mathbf{E}_{\text{OFDM}} = [\mathbf{E}_0^{\text{OFDM}}, \mathbf{E}_1^{\text{OFDM}}, \dots, \mathbf{E}_{N-1}^{\text{OFDM}}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。假设发射信号为正交相移键控 (QPSK) 信号 (即  $[\mathbf{X}]_k = \pm A \pm jA$ ), 则此时频域误差向量的第  $k$  个元素可以表示为:

$$[\mathbf{E}_{\text{OFDM}}]_k = \begin{cases} \pm 2A \text{ 或 } \pm j2A, & k = k_0 \\ 0, & k \neq k_0 \end{cases} \quad (15)$$

因为信号通过的是滤波器通带, 所以  $|\mathbf{F}_k| = 1$ 。又因为 FIR 滤波器的线性相位特性<sup>[15]</sup>, 故  $\arg(\mathbf{F}_k) = \frac{2\pi\lambda k}{N}$ , 其中  $\lambda$  为相位的线性系数。所以 f-OFDM 信号时域的误差向量元素可以表示为:

$$\begin{aligned} [\mathbf{E}]_k &= \frac{2A}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{j2\pi n k_0}{N} + j \arg([\mathbf{F} \mathbf{E}_{\text{OFDM}}]_{k_0})\right) \\ &= \frac{2A}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{j2\pi (n + \lambda) k_0}{N} + j \arg([\mathbf{E}_{\text{OFDM}}]_{k_0})\right) \\ &= \Delta \exp(j\phi_n), n = 0, 1, \dots, N-1, \Delta = 2A/\sqrt{N} \end{aligned} \quad (16)$$

为表示方便, 简记  $\mathbf{E}$  的相位为  $\phi$ , 而针对 OFDM 信号, 误差向量元素为:

$$[\mathbf{E}_{\text{OFDM}}]_n = \frac{2A}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{j2\pi n k_0}{N} + j \arg([\mathbf{E}]_{k_0})\right) \quad (17)$$

对比 (19) 和 (20) 可以发现: OFDM 信号通过滤波后, 任意两个信号之间的误差项幅度没有改变, 只是相位改变了一个常数。因此, f-OFDM 系统中,  $\phi$  可以被假设为在  $[0, 2\pi]$  内服从均匀分布。根据文献[9]的分析, 此时限幅后的  $\mathbf{y}^{(2)}$  和  $\mathbf{y}^{(1)}$  的欧氏距离可以表示为:

$$\begin{aligned} D^2 &= \|\mathbf{y}^{(2)} - \mathbf{y}^{(1)}\|^2 \\ &\approx NE \left[ \left| y^{(2)} - y^{(1)} \right|^2 \right] \\ &= N \Delta^2 \left( \left( 1 - e^{-\frac{s_M^2}{2\sigma^2}} \right) + \int_{s_M}^{+\infty} \frac{s_M^2}{2r\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \right) \end{aligned} \quad (18)$$

式 (18) 的第 1 项表示未失真部分间的欧氏距离, 第 2 项即为非线性失真带来的欧氏距离增加量。从式中可以看出, 随着限幅比  $s_M/\sigma$  的增大, 两个信号之间的欧氏距离也会增加, 从而使得 f-OFDM 的系统性能得到恶化。

### 2.2 f-OFDM 的次优接收机设计

针对限幅产生的非线性失真, 文献[9]提出了最优接收机和次优接收机。最优接收机即搜索所有可能的比特序列, 并将其与接收信号的欧氏距离进行比较, 以欧氏距最小的序列作为解调数据。最优接收机虽能获得最好的性能, 但复杂度太大, 在实际中几乎不可能实现。因此, 文中, 我们提出了利用相同原理并减小了系统复杂度的次优接收机。

次优接收机迭代变化解调信号比特, 并比较接收信号与变化后信号的欧氏距离, 选取距离最小的信号作

为新的解调信号。为了减化系统的复杂度,我们将从序列的第一个比特开始,每次变化一个比特,将其进行多载波调制并与接收信号比较欧氏距离,并选取欧氏距离最小的比特序列作为解调信号。搜索完整个比特序列即表示接收处理完成。该算法在 OFDM 中已经体现出了优势。文中,我们将该算法应用到了 f-OFDM 系统中并进行了仿真测试。

次优接收机的算法如下。

步骤 1: 将解调得到的数字比特序列  $x$  进行与发端完全相同的 OFDM 调制,并进行相同的限幅处理,得到恢复信号  $X_0$ ;

步骤 2: 计算  $X_0$  与接收信号  $X_R$  的欧氏距离,初始化为  $R$ ;

步骤 3:  $k=1$ , 将数字比特序列  $x$  的第  $k$  位比特取非,得到变化序列  $x_k$ ,并将  $x_k$  进行同样的 OFDM 和限幅,得到  $X_k$ ;

步骤 4: 计算  $X_k$  与  $X_R$  的欧氏距离  $R_k$ 。如果  $R_k < R$ , 则令  $R=R_k$ ,  $x=x_k$ ; 反之,则  $R$  与  $x$  保持不变;

步骤 5:  $k=k+1$ , 则重复第 3 步回步骤;

步骤 6: 当  $k=N$  时停止搜索。

### 3 f-OFDM 次优接收机的仿真及测试

#### 3.1 f-OFDM 次优接收机 MATLAB 仿真

本节中,我们对 f-OFDM 中次优接收机的性能进行了 MATLAB 仿真。仿真采用了蒙特卡洛法,仿真次数为 1 000 次。信道定义为扩展步行者信道模型(EPA),信道估计采用了理想信道估计。同时,图 1 中的添加同步导频和定时同步模块在本仿真中为被涉及。仿真参数表如表 1 所示,仿真结果如图 2 所示。图中横坐标  $E_b/N_0$  为信噪比,纵坐标误码率(BER)为系统的误码率性能。结果显示:经过了次优接收机纠正的系统性能和传统的接收方法相比可以提

▼表 1 仿真及测试参数

仿真参数	参数值
调制方式	QPSK
子载波数	1 024
CP 长度	64
滤波器阶数	512
滤波器窗	汉宁窗
限幅系数	1.2
发送比特数/子帧	500
信道估计导频长度/子帧	50
映射数据子载波编号	300 ~ 599
定时同步导频长度	256
子载波数	1 024

CP: 循环前缀 QPSK: 正交相移键控

升 0.5 dB。

#### 3.2 f-OFDM 的次优接收机的硬件验证平台

文中,我们采用了通用无线电外设(USRP)<sup>[16]</sup>,基于 LabVIEW<sup>[17]</sup>编程,完成对波形设计及接收端处理,搭建并完成了 f-OFDM 系统原型的测试。

首先根据章节 1 中的链路产生了限幅滤波后的 f-OFDM 信号。1 个 f-OFDM 信号帧由 14 个子帧组成,每个子帧为一个 OFDM 符号。同时,对 14 个 OFDM 符号组成的帧滤波得到了一个完整的 f-OFDM 发送帧。具体的参数设置如表 1 所示,得到的 f-OFDM 信号的频谱特性如图 3 所示。图 3 中深色为滤波前的信号频谱,浅色为滤波后的信号频谱。从图 3 中

可以看出,经过滤波处理后,信号的旁瓣得到了 30 dB 的抑制。

PAPR 通过信号的互补累积分布函数(CCDF)来体现,CCDF 的定义为多载波传输系统中峰均值超过某一门限值  $z$  的概率。限幅滤波抑制了 f-OFDM 信号的 PAPR。图 4 为原信号和限幅滤波信号的 CCDF 对比。图中横坐标为超过信号均值的大小  $z$ ,单位为 dB;纵坐标为超过对应门限值信号所占总信号的百分比。结果显示:限幅滤波后系统性能提升了近 2 dB。

接收端中,首先通过定时同步频率来对信号进行精确同步,以准确提取出隐藏在噪声中的信号部分。定时同步的算法如 1.3 中所示。相关运算后的相关峰值如图 5 所示,图中最大值对应的索引即为截取的所有信号中数据的起始位置。

信号部分被提取后,经过匹配滤波、OFDM 解调得到了包含信道影响的数据信号。信道估计及均衡算法在 1.3 中已给出。图 6 显示了均衡前和均衡后的信号星座图。从图中可以看出:通过均衡后信道影响已经得到了很好的消除。

最后,解调得到的比特序列经过次优接收机来提升性能。测试过程中,整个链路的采样及写入速率设置为 1 MHz,通过改变发送信号的幅值来改变信噪比(SNR)。通过 100 次测试,并将测试结果放在 MATLAB 中作图。最后得到的误码率结果如图 7

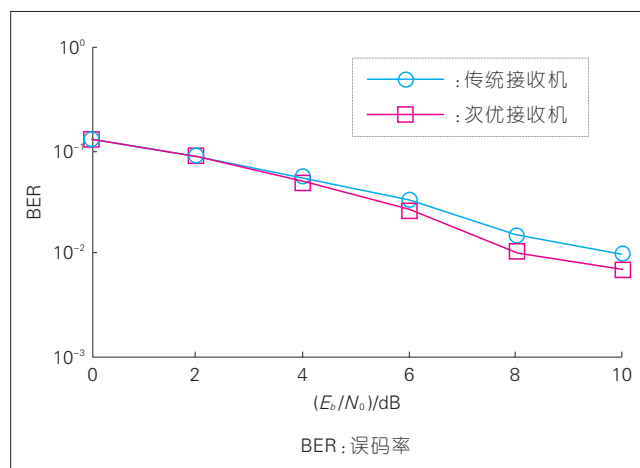


图 2 次优接收机与传统接收机性能对比



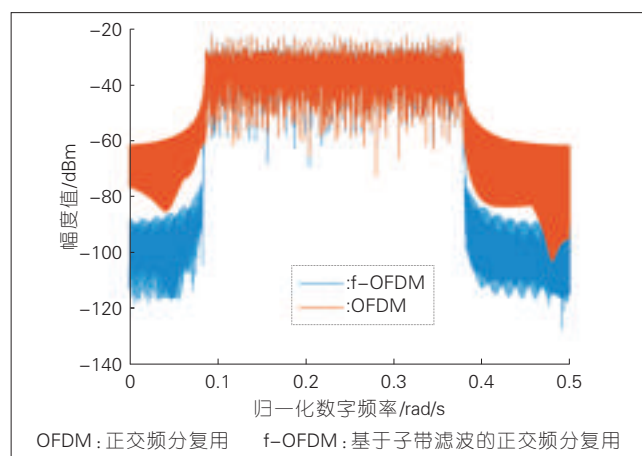


图3  
发送信号频谱

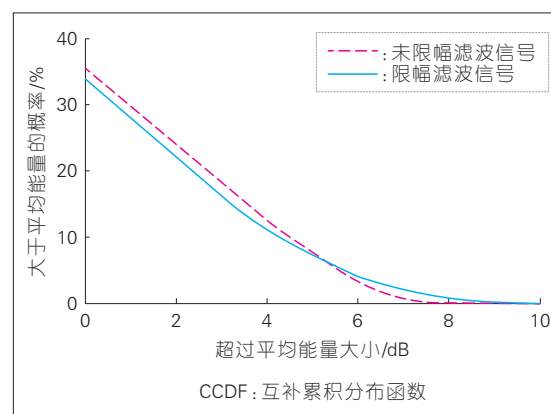


图4 CCDF对比

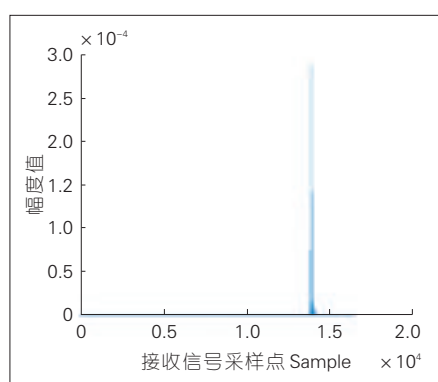


图5 相关同步峰

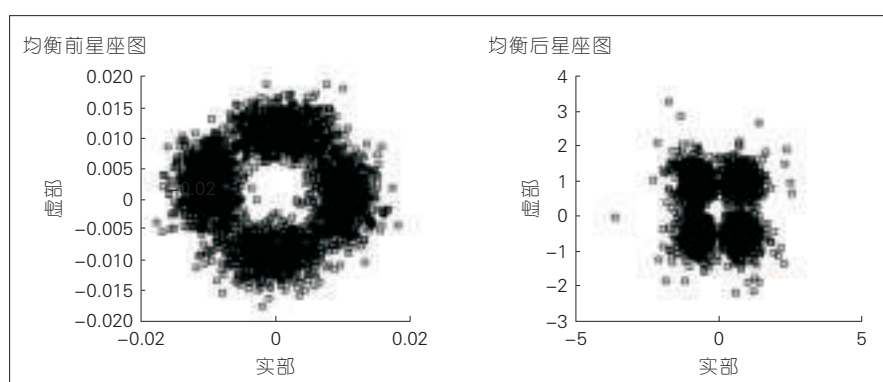


图6 均衡前后星座图对比

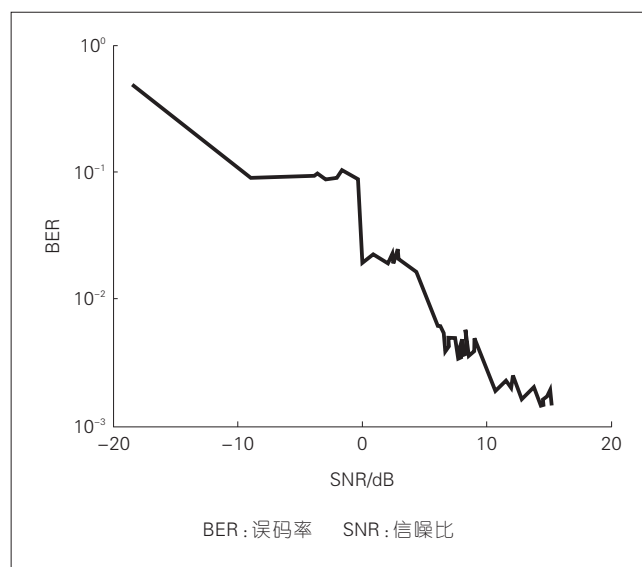


图7  
硬件测试结果

所示。

## 4 结束语

OFDM作为多载波系统的典型已经在4G长期演进LTE中得到了广泛

应用。f-OFDM作为5G备选方案之一也是得到了广泛的研究与关注。文中,我们将OFDM中消除非线性失真的次优接收机技术应用到了f-OFDM系统中,并在软件无线电平台

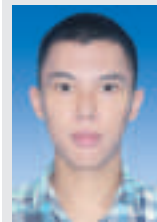
上进行了实际的硬件测试。结果显示:次优接收机在f-OFDM中仍然具有比传统接收机更好的性能。

## 参考文献

- [1] AT&T. Summary of Link Level Analysis of Candidate Waveforms for NR: R1-1609383 TSG-RAN WG1 #86bis[S]. 3GPP, 2016
- [2] NTT DOCOMO, INC. Initial Link Level Evaluation of Waveforms: R1-163110 TSG-RAN WG1 #84bis[S]. 3GPP, 2016
- [3] Huawei, HiSilicon. OFDM Based Flexible Waveform for 5G: R1-162152 TSG-RAN WG1 #84bis[S]. 3GPP, 2016
- [4] LIU Y, CHEN X, ZHONG Z, et al. Waveform Candidates for 5G Networks: Analysis and Comparison[EB/OL].[2016-08]. <https://arxiv.org/abs/1609.02427>
- [5] ZHANG X, JIA M, CHEN L, et al. Filtered-OFDM-Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks[C]//Global Communications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2015: 1-6
- [6] Huawei, HiSilicon. Waveform Evaluation Results for Case 3: R1-166090 TSG RAN WG1 Meeting #86[S]. 3GPP, 2016
- [7] WANG L, TELLAMBURA. A Simplified

- Clipping and Filtering Technique for PAR Reduction in OFDM Systems[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2005, 12(6): 453–456. DOI: 10.1109/LSP.2005.847886
- [8] GUERREIRO J, DINIS R, MONTEZUMA P. Optimum and Sub-Optimum Receivers for OFDM Signals with Strong Nonlinear Distortion Effects[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3830–3840
- [9] GUERREIRO J L, DINIS R, MONTEZUMA P. On the Optimum Multicarrier Performance with Memoryless Nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 63(2): 498–509. DOI:10.1109/TCOMM.2015.2388484
- [10] 张玉松. 新一代滤波器多载波调制技术研究: Filtered-OFDM 信号设计与接收处理[D]. 成都:电子科技大学, 2016
- [11] LUKE H D, SCHOTTEN H D, MAHRAM H. Binary and Quadriphase Sequences with Optimal Autocorrelation Properties[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(12): 3271–3282. DOI:10.1109/TIT.2003.820035
- [12] PARK B, CHEON H, KANG C, et al. A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 239–241. DOI:10.1109/LCOMM.2003.812181
- [13] DARDARI D, TRALLI V, VACCARI A. A Theoretical Characterization of Nonlinear Distortion Effects in OFDM Systems[J]. IEEE transactions on Communications, 2000, 48(10): 1755–1764. DOI:10.1109/26.871400
- [14] GUERREIRO J, DINIS R, MONTEZUMA P. Approaching the Maximum Likelihood Performance with Nonlinearly Distorted OFDM Signals[C]//2012 IEEE 75<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC Spring). USA: IEEE, 2012: 1–5
- [15] VINAY K. In e, John G Proakis. 数字信号处理及其 MATLAB 实现[J]. 1998: 208–214
- [16] National Instruments. Why Choose USRP [EB/OL]. [2011–09]. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/zhs/nid/212990>
- [17] 陈树学, 刘莹. LabVIEW 宝典[J]. 2011: 99–106

## 作者简介



梁潇, 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室在读硕士研究生; 主要研究方向为新型多载波技术。



武刚, 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室教授; 从事无线通信教学和科研工作, 研究方向为无线通信中的信号处理和资源管理技术; 获 2012 年 IEEE Globecom 最佳论文奖; 已发表 50 余篇期刊论文和 80 余篇国际会议论文。

## ◀ 上接第 5 页

(节点)距离 AP 距离各不相同, 因此无线信号到达接收端的时延差各不相同。如何设计恰当的信号格式或找到合适的解调算法以适应不同到达时延差的信号叠加后的解调接收, 目前尚没有针对性的研究工作公开, 这将是未来该领域研究的重要问题之一。

应当指出: 上述方法仅仅是基于简单建模下的初步理论分析。模型中并未考虑临近小区的干扰问题以及网络同步问题, 从实现上也没有考虑到算法复杂度的问题。距离真正使用还需要做更深入的分析和优化。我们相信通过进一步的深入工作, 类有线的无线接入和资源使用方式可以走向实用。

## 5 结束语

随着非正交多址相关研究的逐步深入, 特别是支撑海量连接的虚拟化专有链路的技术的出现, 使用类有线的无线接入和资源利用方式成为可能。我们相信这种尝试必然将简化无线接入和资源使用协议上的改变, 极大地提高资源使用效率, 降低传输时延。这将是未来值得关注的一个研究方向。

## 参考文献

- [1] 徐应跃, 吴爱国. 现场总线 MAC 层分析[J]. 化工自动化及仪表, 2001, 28 (2): 4–7
- [2] ABRAMSON N. THE ALOHA SYSTEM: Another Alternative for Computer Communications[C]// AFIPS '70 (Fall) Proceedings of the November 17–19, 1970, fall joint computer conference. USA: ACM, 1970: 281–285. DOI: 10.1145/1478462.1478502
- [3] KLEINROCK L, TOBAGI F. Packet Switching in Radio Channels: Part I – Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics[J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23 (12): 1400–1416. DOI: 10.1109/TCOM.1975.1092768
- [4] TOBAGI F, KLEINROCK L. Packet Switching in Radio Channels: Part III – Polling and (Dynamic) Split-Channel Reservation Multiple Access[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(8): 832–84. DOI: 10.1109/TCOM.1976.1093393
- [5] 王达. 深入理解计算机网络[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013
- [6] TANENBAUM A S, WETHERALL D J. Computer Networks[M]. 5th Edition. USA: Prentice Hall, 2011
- [7] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access[C]// Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th. USA: IEEE, 2013: 2–5
- [8] NIKOPOUR H, BALIG H. Sparse Code Multiple Access[C]//Personal Indoor and Mobile Radio Conference 2013. USA: IEEE, 2013: 332–336
- [9] 袁志锋, 郁光辉, 李卫敏. 面向 5G 的 MUSA 多用户共享接入[J]. 电信网技术, 2015, (5): 28–30
- [10] XIE R, YIN H, CHEN X H, et al. Many Access for Small Packets Based on Precoding and Sparsity-Aware Recovery[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4680–4694. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2605094

TCOMM.2016.2605094

## 作者简介



尹华锐, 中国科学技术大学副教授; 主要从事无线通信理论及系统实现工作; 作为项目负责人承担多项国家自然科学基金项目; 发表论文 30 余篇, 拥有 10 项发明专利。



陈晓辉, 中国科学技术大学副教授, 电子工程与信息科学系副主任; 主要从事无线通信协议、网络优化、多媒体通信系统等方面的科研与教学工作; 参与研制中国首个超宽带无线网络系统, 完成 MAC 协议的设计与实现、多媒体业务示范、资源调度优化等关键设计, 承担、参与了多项国家科技重大专项课题、国家“973”、“863”课题; 发表 SCI/EI 检索论文 30 余篇。



卫国, 中国科学技术大学教授, 曾任国家“863”计划通信技术主题专家组成员、中国第三代移动通信系统研究开发项目总体组成员、国家“863”计划 B3G 移动通信重大项目总体组成员、“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组成员; 主要从事无线通信技术、移动通信网络、信号处理等方面的研究; 获国家科技进步二等奖 1 项; 发表论文 100 余篇, 拥有 10 余项国家发明专利。

# 干扰对齐技术的发展与应用

## Development and Application of Interference Alignment

刘伟/LIU Wei  
李建东/LI Jiandong  
盛敏/SHENG Min

(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)  
(Xidian University, Xi'an 710071, China)

干扰对齐(IA)作为干扰管理技术问题中的一个重大突破引起了本领域学术界的重视<sup>[1]</sup>。IA技术由美国加州大学欧文分校的IEEE Fellow Syed Ali Jafar教授领导的研究小组率先发明<sup>[2]</sup>。IA采用自由度作为系统可达容量的近似,通过设计各发射端的发射机向量矩阵和接收端的接收机向量矩阵,使得在每个接收端收到的干扰信号尽可能地“对齐”到维度较低的子空间,使未被干扰占用的信号子空间保留较高的维度,以供有用信号传输。

### 1 可行性问题

IA可以用一组IA条件进行描述。对于一组给定的IA条件,该条件是否可行是一个关键问题。对于IA条件的可行性问题,我们可以从充分条件和必要条件两方面来考虑。针对不同的系统配置,IA条件的可行性分析成为一个研究热点。

#### 1.1 全连接系统的可行性分析

对于 $K$ 用户多输入多输出(MIMO)

收稿日期: 2017-04-06

网络出版日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231008); 国家自然科学基金(61401326)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0035-003

**摘要:** 认为干扰对齐(IA)技术是异构无线网络干扰管理的研究热点,可以极大地提升系统的自由度。IA研究过程中的关键问题包括IA条件的可行性以及IA条件的求解算法。同时,IA和其他方法相结合可产生更多的新方法。因此,IA技术是异构无线网络干扰管理的重要方法。

**关键词:** IA; 自由度; 异构无线网络; 家庭基站; 可行性

**Abstract:** Interference alignment (IA) attracts intensive research interests for interference management in the context of heterogeneous wireless networks, and it can substantially improve the degrees of freedom for the system. The key research issues about interference alignment include the feasibility and the algorithms for finding a solution. Meanwhile, by combining IA with other techniques, new methodology can be developed. IA is one key technique for interference management of heterogeneous wireless networks.

**Keywords:** IA; degrees of freedom; heterogeneous wireless network; femtocell; feasibility

干扰信道(IC)系统,在每个发送端发送单个数据流的情况下,文献[3]研究了IA条件的可行性问题,将线性IA条件的可行性与代数几何理论中具有泛化系数的多元多项式系统的适当性之间建立了联系。

对于 $K$ 用户( $K, N, N, d$ ) MIMO IC系统,在发送端和接收端均配置 $N$ 根天线,且每个发送端均传输 $d$ 个数据流的条件下,文献[4]基于代数几何理论证明了IA可行的充要条件。针对任意配置的MIMO IC场景,文献[4]基于代数几何理论提出了IA条件可行的必要条件。

同样,针对任意配置的MIMO IC系统,文献[5]基于代数几何理论对IA条件对应的多元多项式方程组的可解性与该方程组中一阶项的独立性间建立了联系。同时,还提出两个定理来论证IA条件可行的充分必要

条件。对于任意配置的MIMO干扰广播信道(IBC)系统,基于代数几何理论,文献[6]证明了IA条件可行的必要条件,并且对于一类特殊配置的MIMO IBC系统,证明了IA条件可行的充要条件。

对于 $K$ 用户( $K, M, N, 1$ ) MIMO IC系统,当每个发送端均配置 $M$ 根天线,每个接收端均配置 $N$ 根天线,并且每个发送端均发送单个数据流时,在 $T$ 倍有限信道扩展的场景下,文献[7]分别针对有限独立信道扩展和有限相关信道扩展两种情况,基于代数几何理论分析了IA条件的可行性,提出了两个定理,得到系统的最大可达自由度的上界。对于 $K$ 用户单输入单输出(SISO)IC系统,在每个发送端均发送 $d$ 个数据流、 $L$ 倍有限信道扩展的场景下,文献[8]通过定义扩张算子、收缩算子,对齐宽度、稀



疏度、线性独立条件等,分析了IA条件的可行性;并针对有限独立信道扩展和有限相关信道扩展2种情况,提出了3个定理,得到系统的最大可达自由度的上界。

## 1.2 部分连接系统的可行性分析

由于路径损耗、阴影效应等,无线信号的传输可能会存在较大损耗,从而导致实际的无线通信系统可能是部分连接的。

对于 $K$ 用户部分连接MIMO IC系统,在每个用户至多接收到 $L$ 个干扰的条件下,基于代数几何理论,文献[9]提出了IA条件所对应的多元多项式方程组具有适当性的充分条件,并证明了在特定条件下该充分条件同时也是适当性存在的必要条件。对于部分连接MIMO干扰多址接入(IMAC)系统,每个基站至多接收到 $L$ 个小区内用户的干扰,文献[10]提出了IA条件所对应的多元多项式方程组具有适当性的充分条件,同样也证明了在特定条件下该充分条件同时也是适当性存在的必要条件。同时,文献[10]指出该必要条件也是IA可行的必要条件。对于一类 $(L+J+1, M, N, 1)$ 部分连接下行异构网络,基于代数几何理论,文献[11]提出了IA条件可行的必要条件。针对文献[11]中相同的系统,在 $T$ 倍有限信道扩展的场景下,文献[12]分别针对无信道扩展、有限独立信道扩展、有限相关信道扩展3种情况,基于代数几何理论,通过分析系统IA条件可行性,提出3个定理,分别得到系统IA可行的必要条件。

## 2 IA技术的算法

IA的另一个重要问题是如何得到一组可行解。由于IA条件是一组由发射机和接收机向量耦合在一起构成的多项式方程,针对普适的干扰网络的求解IA的方法是一个NP-Hard问题<sup>[13]</sup>。为此,研究者们提出了很多非最优的求解发射机和接收机

向量的算法。

### 2.1 迭代算法

针对MIMO IC网络,文献[14]利用了IA的互易性,提出了两种IA可行解的迭代算法:一种是最小化干扰泄露的接收矩阵迭代设计方案;另一种是最大化信干噪比的接收矩阵迭代设计方案。同样针对MIMO IC网络,文献[15]将IA条件近似为一个带有秩约束的干扰空间的秩最小化问题,并设计了迭代方法进行求解。

### 2.2 非迭代算法

考虑到由发射机和接收机向量耦合构成的多项式方程组求解困难,可以将问题进行简化处理,分别设定发射机和接收机的需要完成的功能,将发射机和接收机的设计进行分离,从而使得在满足一定的系统配置条件下,可以采用非迭代的方法求解IA的发射机和接收机向量。针对不同的系统配置,设计方案也有不同。例如:针对MIMO IBC网络,在发射天线数和接收天线数相等的条件下,文献[16]首先将用户进行丰足,然后利用广义特征值分解,设计了用户端的接收机向量,从而实现分组后干扰可以对齐在相同的空间,最后利用零空间方法设计了基站端发射机向量。

针对一类部分连接的异构网络,文献[11]提出了一种两级IA方案。在该方案中,网络包括一个宏基站和多个家庭基站(Femtocell),其中家庭基站分为两组:一组相互之间有干扰,形成一个全连接干扰网络;另一组相互之间没有干扰,和宏基站构成了一个部分连接的网络。该方案首先设计宏基站的发射机向量,从而消除宏基站对部分连接网络中某些用户的干扰,然后设计部分连接网络中家庭基站的发射机向量。

## 3 IA技术的应用

由于IA技术在干扰管理方面的出色性能,其已经被应用于通信网络

中的多种场合。

### 3.1 在密集家庭基站网络干扰管理中的应用

家庭基站作为一种低功率配置的可管理的小型基站,已成为异构无线蜂窝网络的重要组成部分。其布设成本很低,能够有效地弥补宏小区部署的覆盖空洞,增大频谱复用增益,提升网络吞吐量。因此,近年来,家庭基站的部署密度日益增大。然而,由于重叠覆盖与频谱复用,如果没有合适的配置,家庭基站小区间干扰将会随着家庭基站密度的增加而恶化。

如何在正交资源分配的基础上,发挥IA技术的优势,更好地消除家庭基站小区间的干扰,已得到广泛的研究。文献[17-18]针对密集家庭基站网络中IA与资源分配的联合优化,给出了较完整的优化问题模型,并提出了一种直观简洁的求解方法——基于图论的求解方法。在系统建模方面,该项研究首次考虑了当每个用户都传输相同数目的数据流时IA用户与不参与IA的用户在资源分配上的公平性。在问题求解方面,该项研究首次针对包含IA组合的网络,提出了转化冲突图,并基于转化冲突图提出了一种低复杂度的3阶段求解方案:转化冲突图的构建、基于图的极大团检测的IA组合选择、基于转化冲突图的资源分配。

### 3.2 在网络虚拟化中的应用

受益于持续增长的对高速率业务的需求,无线网络虚拟化技术已被提议为下一代网络的关键技术之一。虚拟化技术可使多种异构服务动态共享底层基础设施,最大化底层网络的使用率;同时也降低了运营商的资本支出和运营支出<sup>[19]</sup>。伴随着虚拟移动网络运营商概念的提出,一种完全虚拟化的异构网络架构应运而生:无线接入网中所有可用资源(例如宏基站、微基站、网关、天线、

频谱、功率)均为基础设施提供者(InP)所有,并由InP统一支配;网络运营商不再拥有任何资源,无需担负起基站的部署任务,也无需维护接入网的正常运行和管理<sup>[19]</sup>。在这种架构下,传统的运营商均演进为虚拟移动网络运营商,需向InP租用一定的接入资源,并将资源分配给所属用户,同时,InP担负起无线接入网的正常维护,并向虚拟移动运营商收取一定的租赁费用。

实现网络虚拟化的资源隔离技术包括时域、频域以及时域频域联合隔离等。然而,IA技术为我们提供了实现网络虚拟化的另一种思路:空域隔离。文献[20]提出一种联合IA的异构蜂窝小区虚拟化机制,在空域上隔离多个虚拟网络。一方面,利用IA技术,多个基站可免于干扰地同时同频传输数据,借此实现多个运营商对同一底层基础设施的共享,同时,基站的异构性为用户提供了更多的备选节点接入方案,增大了虚拟化的灵活性;另一方面,虚拟化技术同样促进了IA机制的设计,例如:网络拓扑可对IA的结果造成深刻影响;IA过程易忽视期望信号的性能,通过实施最优的虚拟组合策略,虚拟化可有效克服这一缺陷,改善IA的性能。

## 4 结束语

IA技术对于异构无线网络中的干扰管理提供了一种新的方法,针对IA技术的研究持续成为热点问题。同时,IA与其他新兴技术相结合已经产生了广泛的影响,将会进一步提升网络的性能。

## 致谢

本研究得到了西安电子科技大学马英红博士、江南大学王侃博士的帮助,谨致谢意。

## 参考文献

- [1] NAZMUS S, EKRAM H, LONG B L, et al. Interference Management in OFDM Femtocell Networks: Issue and Approaches [J]. IEEE Transactions on Wireless

- Communications, 2012, 19(3):1536–1284. DOI: 10.1109/MWC.2012.6231163
- [2] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K User Interference Channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425–3441
- [3] YETIS C M, GOU T, JAFAR S A, et al. On Feasibility of Interference Alignment in MIMO Interference Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(9):4771–4782. DOI: 10.1109/ICC.2008.190
- [4] RAZAVIYAYN M, LYUBEZNIK G, LUO Z Q, et al. On the Degrees of Freedom Achievable Through Interference Alignment in a MIMO Interference Channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2):812–821
- [5] RUAN L, LAU V K N, WIN M Z. The Feasibility Conditions for Interference Alignment in MIMO Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8):2066–2077. DOI: 10.1109/TSP.2013.2241056
- [6] LUI T, YANG C. On the Feasibility of Linear Interference Alignment for MIMO Interference Broadcast Channels With Constant Coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(9):2178–2191. DOI: 10.1109/TSP.2013.2248005
- [7] SUN R, LUO Z Q. Interference Alignment Using Finite and Dependent Channel Extensions: The Single Beam Case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(1):239–255. DOI: 10.1109/TIT.2014.2368984
- [8] LI C T, OZGUR A. Channel Diversity Needed for Vector Interference Alignment [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 62(4):1211–1215
- [9] GUILLAUD M, GESBERT D. Interference Alignment in the Partially Connected K User MIMO Interference Channel[C]//Signal Processing Conference, 2011. USA: IEEE, 2011:1095–1099
- [10] GUILLAUD M, GESBERT D. Interference Alignment in Partially Connected Interfering Multiple-Access and Broadcast Channels [C]// Global Communications Conference, GLOBECOM 2011. USA: IEEE, 2011:1–5. DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133957
- [11] LIU G, SHENG M, WANG X, et al. Interference Alignment for Partially Connected Downlink MIMO Heterogeneous Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2):551–564. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2388450
- [12] LIU W, CAI J, LI J, et al. Interference Alignment with Finite Extension in Partially Connected Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 851–862. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2626369
- [13] MEISAM R, MAZIAR S, LUO Z Q. Linear Transceiver Design for Interference Alignment: Complexity and Computation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(5):2896–2910. DOI: 10.1109/TIT.2012.2184909
- [14] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. A Distributed Numerical Approach to Interference Alignment and Applications to Wireless Interference Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(6):3309–3322. DOI: 10.1109/TIT.2011.2142270
- [15] PAPALIOPOULOS D S, DIMAKIS A G. Interference Alignment as a Rank Constrained Rank Minimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8):4278–4288. DOI: 10.1109/TSP.2012.2197393
- [16] LIU W, SUN J, LI J, et al. Interference Alignment for MIMO Downlink Multicell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8):6159–6167. DOI: 10.1109/TVT.2015.2477358
- [17] MENG Y, LI J, LI H, PAN M. A Transformed Conflict Graph Based Resource Allocation Scheme Combining Interference Alignment in OFDMA Femtocell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4728–4737. DOI: 10.1109/TVT.2014.2366747
- [18] MENG Y, LI J, LI H, LIU P. Graph-Based User Satisfaction Aware Fair Resource Allocation in OFDMA Femtocell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2165–2169. DOI: 10.1109/TVT.2014.2341250
- [19] LIANG C, YU F R. Wireless Virtualization for Next Generation Mobile Cellular Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(1): 61–69. DOI: 10.1109/TVT.2014.2341250
- [20] WANG K, LI H Y, YU F R, et al. Interference Alignment in Virtualized Heterogeneous Cellular Networks with Imperfect Channel State Information (CSI)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(2): 1519–1532. DOI: 10.1109/TVT.2016.2562741

## 作者简介



**刘伟**, 西安电子科技大学教授; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理和MIMO传输技术; 先后主持和参加基金项目10余项, 获得1项科研成果奖; 已发表SCI检索论文10余篇。



**李建东**, 西安电子科技大学教授、教育部长江学者特聘教授、国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组专家; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理、自组织网络和空天信息网络; 获国家技术发明二等奖1项, 省部级科技奖13项; 发表论文147篇, 出版著作和教材4部, 获国家发明专利62项。



**盛敏**, 西安电子科技大学教授、教育部长江学者特聘教授; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理、自组织网络和空天信息网络、超密集网络; 获国家技术发明二等奖1项; 发表文章100余篇, 授权发明专利40余项。

# 基于加权类分数傅立叶变换的变换域通信系统

## Weighted-Type Fractional Fourier Transform-Based Communications System

梅林/ MEI Lin

房宵杰/ FANG Xiaojie

沙学军/ SHA Xuejun

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)  
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

通信过程中存在的系统、信号、干扰等都已由时、空、频、能量等物理关系抽象出的数学工具和模型来表征、分析。在这些通信过程所依赖的资源中,时间与频率这一对物理量最为人们所熟悉,通信中遇到的许多问题最终都可以归结为时频资源受限以至无法同时满足时、频域约束条件的矛盾。传统通信理论中所孤立使用的数学工具,已经无法简单、准确地描述新需求背景下复杂的时频关系。其中最为典型的例子就是高速移动环境下的宽带无线接入问题,即在高运动速率、高数据速率背景下进行可靠传输的问题。在此背景下,信道呈现一种“双弥散”的特性,即由多径造成的时间弥散和由多普勒频移造成的频率弥散。在实际操作中,通常很难同时抑制两种干扰。针对移动系统来说,主要问题就是要设计出有效的对抗时频双选择性衰落的相

收稿日期: 2017-04-12

网络出版日期: 2017-05-04

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)计划(2007CB310606, 2013CB329003); 自然科学基金(61671179)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0038-007

**摘要:** 提出单载波与多载波技术体系的融合将会成为未来通信系统空中接口技术发展的重要趋势,指出对既有系统与技术的兼容性和扩展性是混合单、多载波系统所需重点关注问题。结合扩频、均衡、部分快速傅立叶变换(FFT)解调等技术,论述了干扰平均化思想在混合载波系统抗衰落、抗干扰中的重要作用,并展望了加权类分数傅立叶变换(WFRFT)通信系统相关技术的未来研究重点。

**关键词:** WFRFT; 混合载波体制; 时频双弥散信道; 低截获概率

**Abstract:** This paper indicates that the convergence of single carrier and multi-carrier technological system will be the general trend for the air interface of future communications systems, and the compatibility and expansibility should be the crucially focused features. The idea of averaging interference for the hybrid carrier system over fading and interference channels are discussed along with the combinations of hybrid carrier system and other techniques such as spectrum spreading, equalization and partial fast Fourier transform (FFT) demodulation. Future work for the research of weighted-type fractional Fourier transform (WFRFT) communications system and relative technologies are also addressed.

**Keywords:** WFRFT; hybrid carrier scheme; time-frequency doubly dispersive channel; low probability of interception

关技术。

传统的理论与方法是基于傅立叶分析,在时频域分别处理,一定程度上联合时频处理的结果。文中,我们所介绍的研究将解决方法从传统的傅立叶变换域扩展到了加权分数傅立叶变换(WFRFT)域。一方面,在理论上傅立叶分析将作为WFRFT的一个特例;另外一个方面,在WFRFT域信号的时频分量将融合为一个整体,为解决这一类“时频联合”或“时频协同”问题,提供了新的理论根据。

### 1 加权类分数傅立叶变换

归一化的傅立叶变换是一种西

变换,具有周期为4的特点。Hermite-Gauss函数是傅立叶变换的特征函数,其对应的特征值有4个:  $1, i, -1, -i$  ( $i$ 表示虚数单位),对应单位圆上角度为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$  的点。分数傅立叶变换(FRFT)是对传统傅立叶变换的推广, Hermite-Gauss函数同样也是FRFT的特征函数,而其对应的特征值是在单位圆上按照某种规律采样的结果。以  $\pi/2$  作为一个单位,FRFT特征值对应的角度一般不在  $\pi/2$  整数倍的位置上。因而,FRFT之所以被称作“分数”的原因,也可以从傅立叶变换特征值分数化的角度来解释。



不同的特征值分数化方法,对应了不同类型的FRFT。由线性调频信号(或称chirp信号)构成这种FRFT的基函数,所以这种FRFT也被称为“chirp类FRFT”,简称CFRFT。CFRFT出现最早,因而很多时候CFRFT也被直接称作FRFT。

FRFT有很多性质,其中线性、酉性、分数阶可加性、阶数周期性及特征值的周期性、边界性等性质尤为重要,以致于这些性质足以构成对FRFT的完整描述。1995年,C. C. Shih利用傅立叶变换周期为4的特点,通过将函数自身及其反转、函数的傅立叶变换及其反转作为态函数进行加权组合,得到了一种具有上述FRFT重要性质的新变换,后来这种FRFT即被称作WFRFT。C. C. Shih提出的WFRFT定义,无论从形式上还是具体数值计算上都与之前出现的CFRFT不同。至此之后,更多广义形式的FRFT定义被提出,CFRFT与WFRFT之间的关系也逐渐被人们所揭示<sup>[2-4]</sup>。

由于CFRFT具有形式相对简单的基函数(chirp函数),其物理含义也较明确,故而在光学、信号处理、通信等领域有较多的应用研究。WFRFT提出伊始,由于和CFRFT的显著差异,加之基函数、物理含义不如CFRFT一样易于理解,故而只在图像加密方向上有少许应用研究成果。自2007年起,通过对WFRFT自身特点的研究,以及主流通信系统模型的对比,我们逐渐发现WFRFT在数字通信系统中具有特殊的物理含义,并由此产生了一种新的数字通信系统模型。

## 2 WFRFT通信系统模型及其信号特征

### 2.1 WFRFT在数字通信系统中的物理意义及其结构

C. C. Shih的原始定义是针对连续函数及其傅立叶变换而提出的,事

实上,WFRFT中的加权系数可以用来定义任何一种具有周期特性(或者说“对称特性”)的变换。在提出WFRFT的最初文献中<sup>[1]</sup>,Shih就利用正余弦函数的微分具有周期性的特点,提出了一种针对正余弦的“分数阶微分运算”。由此,利用归一化离散傅立叶变换(DFT)也具有周期为4的特点,可以利用Shih提出的加权系数,直接定义一种“加权DFT”,即序列的WFRFT。

设 $x(n)$ 为任意复数序列,其归一化DFT定义为:

$$\begin{cases} X(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \\ x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \end{cases} \quad (1)$$

它可以进一步表示为一种矩阵的形式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F} \mathbf{x} \quad (2)$$

$$\text{其中: } \mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & e & e^2 & \cdots & e^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{N-1} & e^{2(N-1)} & \cdots & e^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

称作“傅立叶矩阵”或“DFT矩阵”,  
 $q = e^{-j2\pi/N}$ 。

$x(n)$ 的WFRFT定义为:

$$\mathcal{F}_{4W}^\alpha[x(n)] = w_0(\alpha)x(n) + w_1(\alpha)X(n) + w_2(\alpha)x(-n) + w_3(\alpha)X(-n) \quad (4)$$

WFRFT的矩阵定义为:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}^\alpha &= w_0(\alpha)\mathbf{F}^0 + w_1(\alpha)\mathbf{F}^1 + w_2(\alpha)\mathbf{F}^2 + \\ w_3(\alpha)\mathbf{F}^3 &= w_0(\alpha)\mathbf{I} + w_1(\alpha)\mathbf{F} + w_2(\alpha)\mathbf{I}^\Gamma + \\ &w_3(\alpha)\mathbf{I}\mathbf{F} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{I}$ 表示 $N$ 阶单位阵, $N$ 阶反转阵 $\mathbf{I}^\Gamma$ 定义为:

$$\mathbf{I}^\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

加权系数 $w_l$ 的定义有很多种不同的形式,公式(7)给出了其中较为

广义的一种定义:

$$w_l(\alpha, V) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \exp\left\{ \pm \frac{2\pi j}{M} [(Mm_k+1)\alpha(k+Mn_k) - lk] \right\} \quad (7)$$

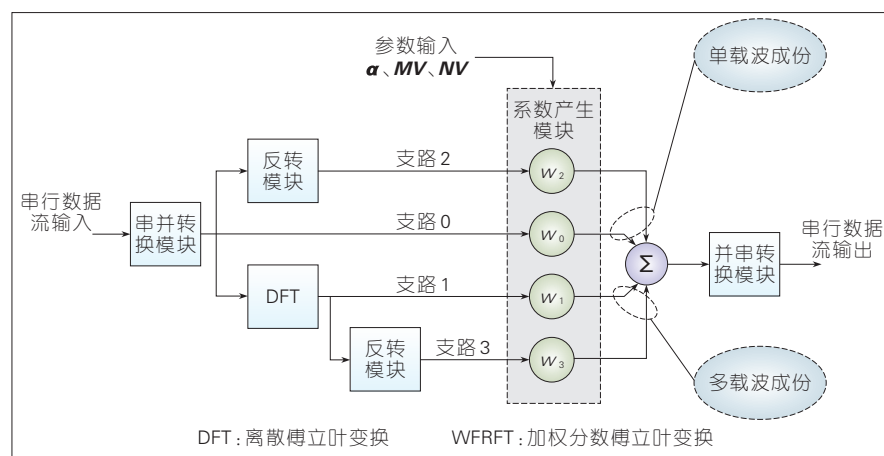
$(l=0, 1, \dots, M-1)$

其中, $M$ 是不小于3的整数(当 $M$ 取1或2时FRFT将退化而缺乏实际意义),  
 $\mathbf{MV} = [m_0, m_1, \dots, m_{M-1}]$ ,  
 $\mathbf{NV} = [n_0, n_1, \dots, n_{M-1}]$ ,  
 $\mathbf{V} = [\mathbf{MV}, \mathbf{NV}]$ 。当 $M=4$ 、 $\mathbf{V}=\mathbf{0}$ 时,公式(7)退化为C. C. Shih所给出的原始加权系数定义。此时WFRFT由4个被加权函数和一个参数 $\alpha$ 所确定,因而也被称作“单参数四项加权分数傅立叶变换”。

需要注意的是:上述定义的对象是无具体物理含义的序列,如利用上述定义计算连续函数的WFRFT则还需满足具有时频对称性的采样条件并采用离散数值算法实现<sup>[5]</sup>。

如果将 $x(n)$ 视作完成相移键控(PSK)、正交振幅调制(QAM)基带映射后的信息符号,则WFRFT的物理实现流程如图1所示<sup>[6]</sup>。对比正交频分复用(OFDM)系统和单载波频域均衡系统的实现结构不难看出:图1中 $w_1$ 和 $w_3$ 支路包含有DFT模块,对应了OFDM信号的并行传输方式;而 $w_0$ 和 $w_2$ 支路没有DFT模块,实际上是简单的单载波串行传输过程。需要说明的是:DFT与离散傅立叶逆变换(IDFT)在OFDM发射机中的作用是相同的,在提出数字OFDM最初实现方式的文献中<sup>[7]</sup>,发射机端正是使用的DFT而非IDFT。后人用IDFT替换DFT作为OFDM的调制实现方式,使得这一过程的物理意义更加清晰,但二者的本质却是相同的,在具体的工程实现上也是近乎一样的。

基于WFRFT在数字通信中具有物理意义,文献[5]、[8]提出了“单载波、多载波融合通信系统”或称“混合载波通信系统”的概念。该通信系统模型可以在基于块传输方式的单载波和OFDM系统之间实现平滑过渡:当参数 $\alpha$ 为偶数时系统对应单载波;当参数 $\alpha$ 为奇数时系统对应多载波;当参数 $\alpha$ 为非整数时系统对应单



▲图1 离散序列WFRFT的物理实现框

载波和多载波的混合形式。这一方面可以作为沟通传统单载波、多载波体制的桥梁；另一方面，在很多复杂、多变的环境或条件约束下，混合载波通信系统具有较传统载波体制更灵活的应对方式和更好的性能表现。

单载波与多载波在技术体系上的竞争由来已久，但长期演进(LTE)系统在上、下行链路分别采用不同的载波体制这一事实，则印证了两种技术体系可以相互融合的可能。未来通信系统将采用哪种技术体系以及在单载波、多载波之外会有新的技术体系出现？从目前正展开的5G技术研发和标准制订中，这些问题的答案可见端倪。在5G备选技术热点中，广义频分复用(GFDM)、通用滤波多载波(UFMC)等新型多载波技术都宣称具有了对单载波技术体系的兼容和过渡方式。随着软件定义的、统一的空中接口成为一种趋势，单载波与多载波技术体系的融合与统一也势必成为未来技术的主流。

作为一种新型的混合载波通信技术或者融合技术方案，首先需要说明的是对既有技术体系的兼容性或适用性，其次则要提出可能的潜在优势或拓展技术方案。图2给出了WFRFT混合载波系统的线性均衡实施方案。均衡作为抵抗信道衰落的有效手段，其作用在时域还是频域依据的是信道的描述方式，而与信息调

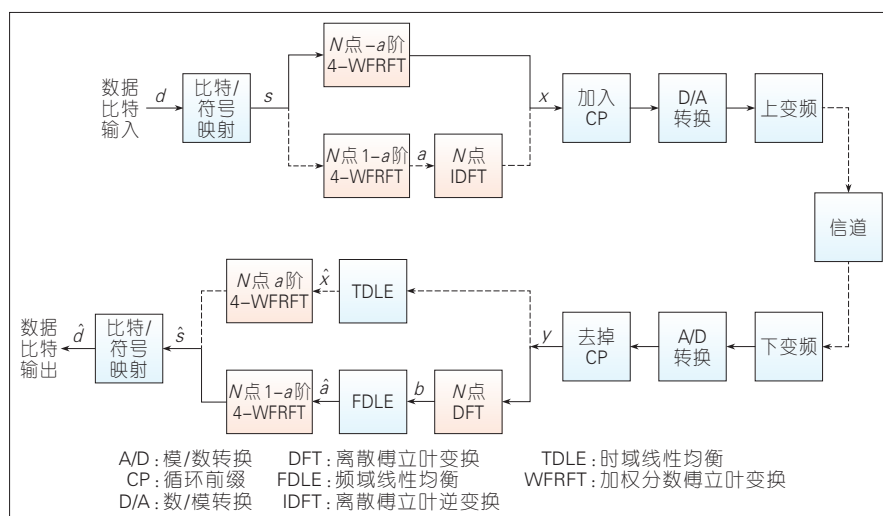
制的作用域没有关系。如同OFDM的信息可视作在频域进行调制，而单载波的信息是在时域进行调制，但OFDM与单载波都可以采用频域均衡技术，因为频率选择性衰落信道可以通过信道的频域矩阵进行描述。利用WFRFT的边界性(参数 $\alpha$ 取整数 $l$ 时等效为做 $l$ 次傅立叶变换)和参数可加性( $W^\alpha W^\beta = W^{\alpha+\beta}$ )可以很容易地得到图2模型。WFRFT混合载波系统对信道估计与均衡、多址、波形等既有技术具有很好的兼容性<sup>[5]、[8]</sup>。

## 2.2 WFRFT的信号特征

作为单载波和多载波的混合形式，WFRFT信号同时包含有单载波信号和多载波信号的特点。随着参

数 $\alpha$ 的改变，WFRFT的信号特征也在单载波信号与多载波信号之间连续变化。文献[6]、[8]从信息能量的时频分布特性入手，指出WFRFT信号比传统单载波和多载波信号具有更均匀的时频能量分布。这一分布特性有利于信号在复杂多变的场景中，以及时频域同时存在干扰的信道下保持性能鲁棒性。

文献[9-10]则通过信号星座图的描绘，展现了WFRFT信号灵活多变的特点。单参数WFRFT信号的星座图会随着 $\alpha$ 的改变而呈现发散、旋转、汇聚等变化，星座点分布呈现类高斯特性；多参数WFRFT信号的星座图甚至会出现星座点分裂的现象，使得正交相移键控(QPSK)信号看起来更像一个经过旋转、叠加噪声的16 QAM信号。WFRFT信号星座图的变化，使其对于非目的接收机而言更难检测，进而有利于提高通信信号的抗截获特性。从信号星座图的特点出发，为了进一步研究WFRFT信号与高斯信号的相似性，文献[9-10]对比了WFRFT信号实部/虚部的统计特性与正态分布的趋近程度和趋近条件。文献[11]最终分析得到了WFRFT信号概率密度函数的解析表达式，信号的概率密度函数可以用来推导信道容量、误码率、峰均功率比(PAPR)等指标的闭合表达式，为客观评价信



▲图2 带有线性均衡的WFRFT混合载波系统

号体制性能,求解最优参数提供理论基础。

此外,文献[12-13]研究了 WFRFT 信号的 PAPR、带外功率抑制以及抗频偏鲁棒性等问题和相关技术,以期在多个不同优化目标的驱动下形成一套 WFRFT 信号设计、处理与参数优化的技术手段和方法。

### 3 WFRFT 系统的抗衰落与抗干扰技术

文献[5]和[10]在简化的选择性衰落信道模型下首先论证了 WFRFT 混合载波信号的优势;但这种信道模型过于抽象和简单,与实际信道和常用信道模型脱离较远。而在更复杂、恶劣的信道环境下过高的误码率会降低系统的实用性,因而后续很多研究试图通过将 WFRFT 与各种抗干扰技术相结合,以在更贴近实际的场景下获得抗干扰性能的优势。相关研究一方面涉及了混合载波系统的抗干扰技术,更重要的是要解决如何选取 WFRFT 参数的问题<sup>[6], [14-15]</sup>。前者可从单载波和多载波系统的相关技术设计方法中得到启发;而后者使得的“干扰平均化”的思想值得借鉴。

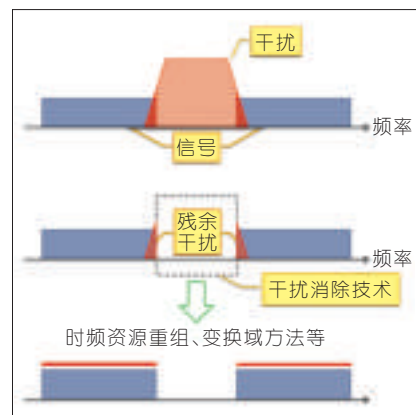
#### 3.1 干扰平均化

所谓“干扰平均化”是指:将系统总体干扰能量尽可能平均地分散到各个子载波或判决位置上,以换取系统整体性能的提升。该方法实施的前提是系统总体干扰水平较低,否则该方法会起到相反的效果。干扰平均化思想的示意如图 3 所示,其中“残余干扰”这里指窄带系统的带外功率辐射。此处考虑的是一个宽窄带系统共存的场景,在其他场景中残余干扰也可以是由信号非正交、时频同步失真、信道估计误差、信道衰落、保护带不足等因素引起的其他信号失真。使得干扰能量平均化的技术手段包括时频资源重组以及各种变换域手段,例如文献[6]在窄带干扰信道下分析了 WFRFT 参数的影响,

文献[16]中采用了与扩频技术相结合的方式,文献[17]则针对时频双选信道研究了 WFRFT 系统与均衡技术的结合。

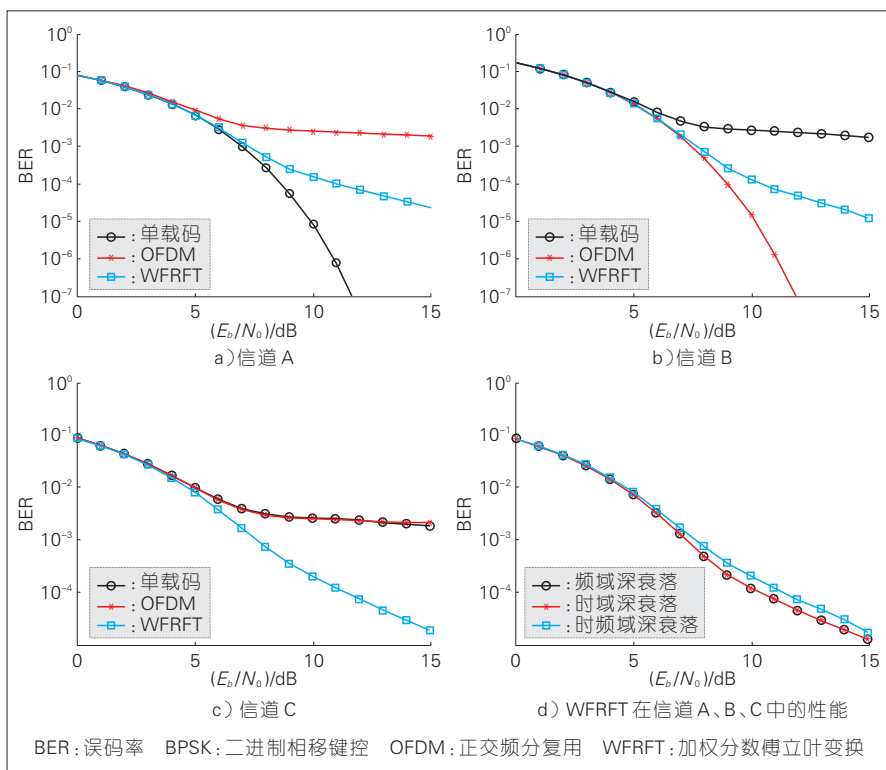
#### 3.2 简化选择性衰落信道模型下不同载波体制误码率性能比较

本节采用文献[5]和[18]中的“加性高斯白噪声(AWGN)+时/频域陷波”的简化选择性衰落信道模型来说明 WFRFT 系统在干扰信道下的鲁棒性。该模型在时频域某些点上存在深衰落,而在其他点上保持不变。由此可以建立基于该假设的 3 个基础模型:有一个时域深衰落点;有一个频域深衰落点;时频域各有一个深衰落点。本节仿真采用二进制相移键控(BPSK)调制,快速傅立叶变换(FFT)点数 128,单参数 4-WFRFT 的参数  $\alpha=0.5$ 。3 种不同选择性衰落的参数如下:信道 A 的频域随机点幅度衰减 10 dB;信道 B 的时域随机点幅度衰减 10 dB;信道 C 的时频域各一个随机点,幅度分别衰减 10 dB。



▲图 3 干扰平均化方法示意

在图 4 a) — c) 中分别给出了单载波、OFDM 和 WFRFT 3 种不同载波体制系统在 3 种典型的简化选择性衰落信道模型下的性能比较。其中,单载波和 OFDM 系统在某一种信道下具备最优的系统性能,而在另外两种信道条件下都出现了误码平台,这一误码平台产生的原因正是深衰落点处噪声的影响。对于 BPSK 调制而言,OFDM 系统位于频率深衰落点处的子载波误码率为 50%;同理,单载



▲图 4 简化选择性衰落信道下不同载波体制 BPSK 调制的误码性能比较



波系统位于时域深衰落点处的符号判决错误概率也为50%,根据仿真参数可计算得到误码率约在 $4 \times 10^{-3}$ 左右。对于不在深衰落点所存在域上进行判决的系统,深衰落点的影响将会被128点“平均化”。当FFT点数足够多,或者深衰落点处影响在被平均化后尚不影响其他位置判决时,进行平均化的系统要比不进行平均化的系统具有更佳的性能;平均化程度越高的系统,系统性能越好。图4 d)将a)~c)中WFRFT系统的曲线绘制在了一起,可以发现WFRFT系统在3种信道条件下的性能保持稳定。即便信道深衰落点数由1个增加到2个,系统性能也仅仅下降1 dB左右。

以上分析说明了WFRFT系统具备更好的信道适应能力。在复杂多变的信道条件下,特别是时间频率双选择性衰落的条件下,这一性能可以使WFRFT系统以较小的代价来换取相同的系统性能。WFRFT系统性能稳定的特点,适用于那些可以牺牲部分通信质量来换取长时间稳定通信的场合。

### 3.3 WFRFT与CDMA/直接序列扩频技术的结合

在WFRFT混合载波系统的想法提出之后,文献[16]、[19~20]首先将其与码分多址(CDMA)/直接序列扩频技术结合在一起,希望通过扩频增益来提升系统整体误码率性能。

混合载波系统与CDMA技术结合可以有两种不同的方案。在混合载波-码分多址(HC-CDMA)传输方法中,在FRFT域进行序列扩展后采用WFRFT将信号变换到时域传输,传输信号均具有混合载波的特征,同时序列扩展进一步起到了符号能量平均化的作用。在这样的条件下,干扰能量被平均分配到更多的码片上,从而起到对多径干扰及单频干扰的抵抗作用。而信道衰落对扩频序列正交性的破坏将导致多用户干扰,为了抑制这种干扰并兼顾混合载波的特

性,又提出在时域进行序列扩展的多载波直接序列码分多址(MC-DS-CDMA)方法。

### 3.4 时频双选择性衰落信道下WFRFT系统的均衡技术

针对双选信道的时频双弥散特性,以及其在单载波(SC)和多载波(MC)系统中造成的不利影响,近年来的研究工作提出了多种双选信道下采样间/载波间干扰(ISI/ICI)的抑制方案,甚至利用多普勒扩展的信号频域分集特性,以提高系统在这种严苛信道条件下的检测性能。双选信道的干扰抑制方案主要可分为ICI抑制技术、信道均衡技术以及新型的信号调制/解调技术3种。ICI抑制技术包括脉冲成形和时域窗滤波两种方法;信道均衡包括线性均衡和非线性均衡两种形式;针对双选信道提出的新型调制解调技术包括能量扩展变换(EST)调制、部分FFT解调技术等。

文献[21~24]将WFRFT混合载波系统与双选信道下的均衡技术相结合,针对不同时变特性的双选信道,提出了结合时域窗滤波和信道均衡的多种干扰抑制方法,更好地实现了ISI和ICI的有效抑制和系统误码性能的提升。

文献[21]针对小多普勒频移的双选信道,提出了基于WFRFT的混合载波线性均衡方法,与传统单载波和多载波体制下线性均衡相比,这种方法利用WFRFT的能量平均化特性,有效地降低了残余干扰幅度在WFRFT域上的概率峰值,进而降低符号判决时大估计误差的出现概率,从而有效改善了系统的误码性能。文献[22~23]针对大多普勒频移的双选信道,结合WFRFT域先验信息的迭代反馈,提出了WFRFT混合载波体制下的时域迭代最小均方误差均衡方法。考虑到干扰抑制方法的实现开销,文献[24]提出了WFRFT混合载波体制下的频域迭代最小均方误差均衡方法,获得了优于传统载波体

制下的误码性能,且与混合载波调制(HCM)下的时域迭代最小均方误差均衡方法相比,实现复杂度有明显的降低。

图5描绘了WFRFT混合载波双选信道下协同分数域均衡方法的设计思路:抗衰落的均衡技术仍旧在传统的时、频域实施,与传统技术不同的是WFRFT混合载波系统在分数域进行信号的判决和解调,并将计算得到的软信息通过域变换再反馈给时域或频域的均衡器进行迭代均衡<sup>[25]</sup>。

### 3.5 WFRFT系统与部分FFT的结合

文献[25~27]将WFRFT混合载波系统与部分FFT解调相结合,利用了混合载波系统能够将信号能量和干扰能量均匀分布在时频平面上的特点,以及部分FFT解调可以将来自信道的载波间的干扰分布到许多无用信号上的特征,从而减少了有用信号上的干扰。

文献[28]将部分FFT解调应用到了OFDM系统中,但是由于OFDM在快速时变的双选信道下,会受到由于多普勒影响引起的载波间的干扰的影响,为此文献[26]提出了将部分FFT解调应用到混合载波系统中,性能有了很大的提高,但是复杂度很高,在实际应用中会受到限制。文献[27]进一步将基于带状最小均方误差的信道补偿技术应用到混合载波在部分FFT解调下的系统中。

图6为对接收到的 $N$ 长时域序列进行4个部分的部分快速傅里叶变换(PFFT)解调过程的原理图。每个 $N/4$ 长序列经过补零后做 $N$ 点的FFT,再对各个部分分别做频域的信道抵消处理(如幅度和相位补偿)后合并,并输出频域估计序列。部分FFT被应用于多普勒影响较为严重的水下声纳信道或存在载波频偏的信道环境下时,可有效提高OFDM系统的性能,且随着时域序列划分区间个数的增加,系统误码性能越好。图7描述了WFRFT混合载波-部分FFT

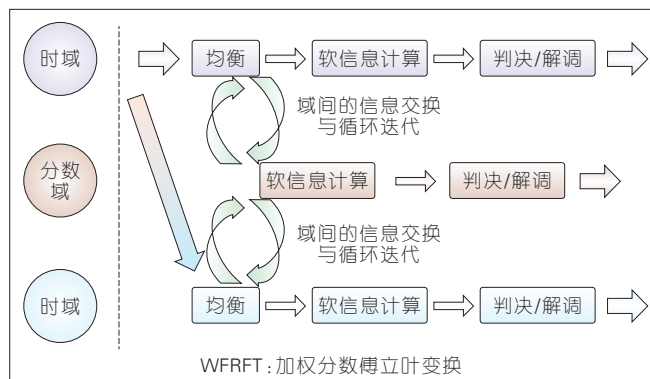


图5 WFRFT混合载波双选信道下协同分数域均衡方法设计思路

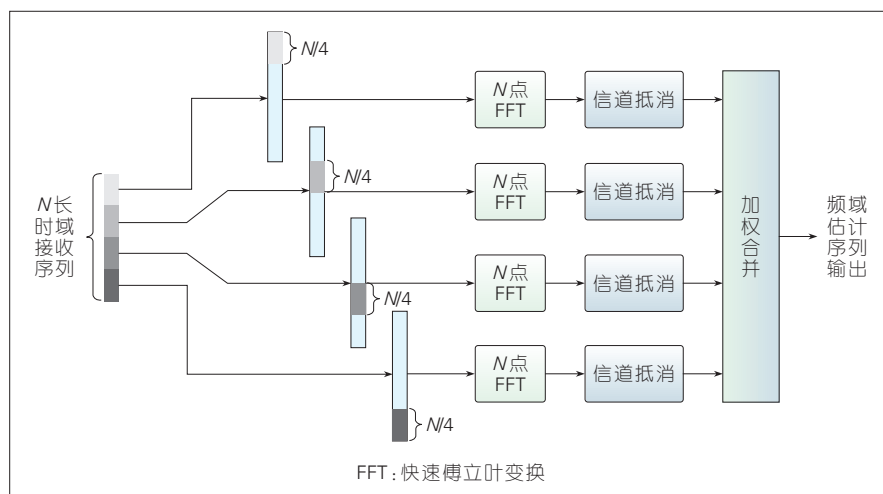


图6 部分FFT解调实现原理

解调系统的设计思路<sup>[25]</sup>。

#### 4 WFRFT抗截获

从信号波形的角度考虑,信号波形越复杂,则分选和识别的难度越大。文献[5]、[9-10]最初利用了WFRFT信号波形复杂、可控的特点,提出WFRFT在低截获、低检测通信中应用的可行性。针对低检测性能的评估,可以从两个层次进行。

(1)假设非目的接收机已知系统采用WFRFT技术的前提下,通过枚举检测识别WFRFT的参数。文献[5]、[9-10]分析了这种情况下WFRFT参数误差对于接收机解调误码率的影响,并简要分析了这种检测方式所需要付出的复杂度代价。

(2)当非目的接收机未知系统采用WFRFT技术而使用一些盲信号检测和调制识别手段时,一些常用技术

手段对于WFRFT信号的识别效果。其中,基于高阶累积量、高阶循环累积量的方法是目前研究较多,理论相对完善,方法相对成熟的一种盲信号检测和调制识别手段。由于高斯信号的高阶累积量和高阶循环累积量恒为零,所以高阶累积量和高阶循环累积量的检测方法对于高斯信号而言是无效的或“盲”的,因此这两种方法即不受高斯噪声的影响又无法适

用于类高斯噪声信号的检测。

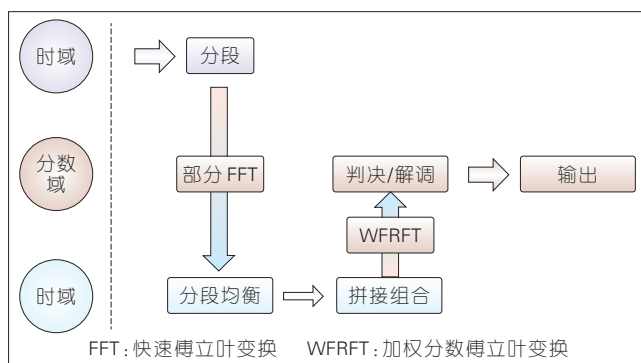
此外,WFRFT对于通信信号的高斯化程度使得通信信号呈现出类高斯的统计特性,所以选取基于高阶累积量或高阶循环累积量或其两种融合的方式作为定量分析的特征,并在采用相同的调制方式识别器或级联分类器或并联分类器的情况下原有的调制识别方法失效。文献[29]对WFRFT信号高阶累积量特性进行了简要分析。此外,利用WFRFT信号的高斯特性,文献[5]中设计了一种利用WFRFT信号进行波形搭载隐蔽通信的技术方案并将WFRFT与变换域通信系统(TDCS)结合用于卫星隐蔽通信中。

为了进一步保护WFRFT参数不被检测,文献[30]提出了WFRFT变参数通信方法,而多层变换<sup>[31]</sup>、并行组合扩<sup>[32]</sup>以及协作通信<sup>[33]</sup>等方案则进一步提升了WFRFT的抗截获性能。

#### 5 结束语

文章中我们简要回顾了WFRFT被引入通信系统的发展历程,以及在混合载波通信、低截获/低检测概率通信等两个应用方面的主要研究成果。目前相关研究工作正继续遵循这两条主线渐次展开。随着5G移动通信网络和相关技术研究逐渐成为热点,包括一些单、多载波混合技术方案在内的许多新想法被提出,这些技术与WFRFT的关系与相关性、兼容性问题都是值得深入研究的。更多样、广泛的信号检测、识别手段,也将应用于对WFRFT的检测与识别

图7 WFRFT混合载波-部分FFT解调系统设计思路



特性的评估方面。此外,随着WFRFT系统向实用化方向的推进,包括同步、信道估计等工程问题也是不可回避的。

## 参考文献

- [1] SHIH C C. Fractionalization of Fourier Transform [J]. Optics Communications, 1995 (5-6):495-498. DOI: 10-1016/0030-4018 (95)00268-D
- [2] LIU S, ZHANG J, ZHANG Y. Properties of the Fractionalization of a Fourier Transform [J]. Optics Communications, 1997(133): 50-54. DOI: 10.1016/S0030-4018(96)00478-6
- [3] YEUNG D S, RAN Q, TSANG E C, et al. Complete Way to Fractionalize Fourier Transform [J]. Optics Communications, 2004, 230: 55-57. DOI: 10.1016/j.optcom.2003.11.054
- [4] RAN Q, YEUNG D S, TSANG E C C, et al. General Multifractional Fourier Transform Method Based on the Generalized Permutation Matrix Group [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53 (1): 83-98. DOI: 10.1109/TSP.2004.837397
- [5] 梅林. 加权类分数傅立叶变换及其在通信系统中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- [6] MEI L, ZHANG Q, SHA X, et al. WFRFT Precoding for Narrowband Interference Suppression in DFT-Based Block Transmission Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10):1916-1919. DOI:10.1007/s11432-008-0073-6
- [7] WEINSTEIN S, EBERT P. Data Transmission by Frequency-division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform [J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1971, 19(5): 628-634
- [8] MEI L, SHA X, ZHANG N. The Approach to Carrier Scheme Convergence Based on 4-Weighted Fractional Fourier Transform [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(6): 503-505. DOI:10.1109/LCOMM.2010.06.092413
- [9] 梅林, 沙学军, 由启文, 等. 四项加权分数 Fourier 变换在通信系统中的应用研究 [J]. 中国科学: 信息科学. 2010, 40(5): 732-741
- [10] MEI L, SHA X, RAN Q, et al. Research on the Application of 4-WFRFT in Communication System [J]. Science of China: Information Sciences. 2010, 53(6): 1251-1260
- [11] WANG X, MEI L, WANG Z, et al. On the Probability Density Function of the Real and Imaginary Parts in WFRFT Signals [J]. China Communications, 2016, 13(9): 44-52. DOI: 10.1109/CC.2016.7582295
- [12] MEI L, SHA X, ZHANG N. PAPR of Hybrid Carrier Scheme based on Weighted-type Fractional Fourier Transform [C]// 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM 2011). USA: IEEE, 2011:237-240
- [13] WANG X, MEI L, ZHANG N, et al. PAPR Approximation of Continuous-Time WFRFT Signals [C]//2014 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). USA: IEEE, 2014: 237-240. DOI: 10.1109/ChinaCom.2011.6158155
- [14] HUI Y, LI B, ZHANG T. 4-Weighted Fractional Fourier Transform over Doubly Selective Channels and Optimal Order selecting Algorithm [J]. Electronics Letters, 2015, 51 (2) : 177-179
- [15] 程晓霞, 陈相宁, 于爽, 等. 基于 WFRFT 的衰落通信系统性能研究 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 143-147
- [16] 邱昕. 基于分数傅立叶变换的混合载波通信系统性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
- [17] 王焜. 基于加权类分数傅立叶变换的双选信道下干扰抑制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014
- [18] MEI L, SHA X, ZHANG Q, et al. The Concepts of Hybrid-Carrier Scheme Communication System [C]// 6th International ICST Conference on Communications and Networking. USA: IEEE, 2011. DOI:10.1109/ChinaCom.2011.6158114
- [19] QIU X, SHA X, MEI L. Performance of Hybrid Carrier DS-CDMA Communication System [C]// Communications and Networking in China (CHINACOM), 2011 6th International ICST Conference on. USA: IEEE, 2011. DOI: 10.1109/ChinaCom.2011.6158143
- [20] QIU X, SHA X, MEI L. Hybrid Carrier Spread Spectrum System Based on 4-Weighted Fractional Fourier Transform [J]. China Communications, 2012, 9(1): 13-19
- [21] WANG K, SHA X, MEI L, et al. Performance Analysis of Hybrid Carrier System with MMSE Equalization over Doubly-Dispersive Channels [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 1048-1051. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.050112.120414
- [22] WANG K, SHA X, MEI L. On Interference Suppression in Doubly-Dispersive Channels with Hybrid Single-Multi Carrier Modulation and an MMSE Iterative Equalizer [J]. IEEE Wireless Communications letters, 2012, 1 (5): 504-507. DOI: 10.1109/WCL.2012.071612.120359
- [23] WANG K, SHA X, LI Y. Hybrid Carrier Modulation with Time-Domain Windows and Iterative Equalization over Underwater Acoustic Channels [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17 (8) : 1489-1492. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.070913.130744
- [24] WANG K, SHA X, LI Y. Iterative frequency-domain equalization for WFRFT and EST Based Modulation Schemes over Doubly Selective Wireless Fading Channels [C]// 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA:IEEE,2013. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666371
- [25] 李勇. 快速时变信道下基于 WFRFT 和部分 FFT 的传输方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
- [26] LI Y, SHA X, WANG K. Hybrid Carrier Communication with Partial FFT Demodulation over Underwater Acoustic Channels [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17 (12) : 2260-2263. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.102613.131651
- [27] LI Y, SHA X, ZHENG F C, et al. Low Complexity Equalization of HCM Systems with DPFFT Demodulation over Doubly-Selective Channels [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21 (7) : 862-865. DOI: 10.1109/LSP.2014.2311128
- [28] YERRAMALLI S, STOJANOVIC M, MITRA U. Partial FFT Demodulation: A Decision Method for Highly Doppler Distorted OFDM Systems [J]. IEEE Transformation Signal Process, 2012, 60(11): 5906-5918. DOI: 10.1109/TSP.2012.2210547
- [29] FENG H, MEI L, SHA X, et al. Modulation Recognition for Hybrid Carrier Scheme Based on Weighted-type Fractional Fourier Transform [C]//6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM 2011). USA: IEEE, 2011
- [30] DING B, MEI L, SHA X. Secure Communication System Based on Alterable-Parameter 4-Weighted Fractional Fourier Transform [J]. Information Technology Journal, 2010, 9(1): 158-163.
- [31] LI T, MEI L, WU X, et al. Anti-Interception Communication System Based on Double Layers Weighted-type Fractional Fourier Transform [C]// 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM 2011). USA:IEEE, 2010. DOI:10.1109/ChinaCom.2011.6158125
- [32] FANG X, SHA X, LI Y. Secret Communication Using Parallel Combinatory Spreading WFRFT [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 (1) : 62-65. DOI: 10.1109/LCOMM.2014.2359200
- [33] FANG X, SHA X, MEI L. Guaranteeing Wireless Communication Secrecy Via a WFRFT-Based Cooperative System [J]. China Communications, 2015, 12(9): 76-82. DOI: 10.1109/CC.2015.7275261

## 作者简介



**梅林**, 哈尔滨工业大学讲师; 主要研究领域为通信网及专用移动通信系统; 先后参与及主持国家自然科学基金项目、国家自然科学基金重点项目、“863”重点项目、“973”子项目以及一批省部级重点项目和多个企业项目等。



**房宵杰**, 哈尔滨工业大学博士研究生; 主要研究领域为变换域通信、无线通信物理层安全研究; 先后参与国家自然科学基金重点项目、“973”子项目等多个项目; 发表论文近 7 篇。



**沙学军**, 哈尔滨工业大学教授、博导; 主要研究领域为通信网及专用移动通信系统、无线自组网及网络协议以及宽带无线接入; 已经完成科研工作 20 余项, 9 项获奖, 其中国家科技进步三等奖 1 项, 国防科工委科技进步一等奖 1 项, 其他奖励 7 项; 发表论文 60 余篇。



## 本期专家论坛 栏目策划人



朱近康

中国科学技术大学教授、博士生导师,曾任国家科技部“863”高技术计划通信主题专家组专家、个人通信专家组组长,信息产业部国家无线频谱规划专家咨询委员会委员,中国科学技术大学学术委员会副主任、信息科学技术学院常务副院长、信息与通信系统研究所所长、个人通信与扩频实验室主任等职;主要从事无线移动通信理论、通信技术和无线移动通信网络的研究,近来特别专注于无线大数据、未来无线通信技术和通信网络的研究,连续组织第1、2、3届无线大数据研讨会,推动无线大数据与未来5G的发展;已出版专著3本,发表论文120余篇。

# 关于移动通信终极形态的部分思考

## Considerations on the Ultimate Form of Mobile Communications

唐友喜/TANG Youxi, 李晨兴/LI Chenxing, 邵士海/SHAO Shihai

(电子科技大学, 四川 成都, 611731)  
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0045-005

**摘要:** 从网络侧及用户侧两个方面,提出了未来移动通信的终极形态表现形式与功能。认为移动通信走向终极未来的过程也是一个不断标准化的进程,结合当前第5代移动通信(5G)的发展,指出信息灯的基础建设标准化是逼近移动通信终极形态的关键技术,需要重点发展及完善。

**关键词:** 移动通信; 收敛; 信息灯

**Abstract:** In this paper, the ultimate form and functions of the future mobile communications are proposed from the perspectives of network side and user side. It is believed that the development of the mobile communications is also a standardisation process. For fifth generation mobile communications(5G), the infrastructure construction standardisation of information lamp is pointed out as the key technology to be developed. In this way, the future mobile communications should be enabled to approach its ultimate form.

**Key words:** mobile communications; convergence; information lamp

经过30余年的发展,移动通信从第1代移动通信(1G)发展到正在使用的第4代移动通信(4G):

(1) 1G解决了人类移动通信的有无问题。采用模拟电路技术,实现电磁信号的发射与接收;采用蜂窝网结构解决频率资源紧缺的矛盾。

(2) 第2代移动通信(2G)解决了

人类移动通信基本业务的稳定性问题。采用信道编译码与数字调制解调等数字电路技术,解决了基本业务的电磁信号发射与接收的稳定性问题;采用时分多址方式,相对于1G进一步提高了频谱的使用效率。

(3) 第3代移动通信(3G)解决了人类移动通信的中速业务稳定性问题。采用Turbo信道编译码及扩频调制解调等技术,解决了中速业务电磁信号发射与接收的稳定性问题;采用

收稿时间: 2017-03-20  
网络出版时间: 2017-05-08

码分多址方式,进一步提高了网络的频谱使用效率。

(4) 4G 解决了人类移动通信高速业务的稳定性问题。采用逼近仙农限的信道编译码技术,信道编译码的性能发展到接近极限;采用分布式多输入多输出(MIMO)天线以及正交频分复用(OFDM)调制解调技术,进一步逼近信道容量极限。

再经过 X 代的进化与完善,移动通信所表现出的外在形态以及功能将趋于收敛,移动通信进入其终极形态阶段。移动通信终极阶段所表现出的形态是什么?具有什么主要功能?现实的第 5 代移动通信(5G)进化过程中,逼近移动通信终极形态,目前应发展及完善的关键技术是什么?本文给出初步的思考结果。

## 1 未来移动通信网络侧的终极表现

移动通信的应用,从地理位置上看包含有三大类:

(1) 低活动概率区域。例如地球

极地、海洋、荒漠、深山等很少有人活动的地理三维位置。

(2) 中活动概率区域。例如农田、牧场、渔场等有人活动的地理三维位置。白天有 13.0% 的全球人口在这些区域活动<sup>[1]</sup>。

(3) 高活动概率区域。例如城镇、居宅、公路等人活动频繁的地理三维位置。白天有 86.9%、夜晚有 99.0% 的全球人口在这些区域活动<sup>[1]</sup>。

目前,低活动概率区域使用卫星移动通信进行覆盖;中活动概率区域和高活动概率区域,使用基站进行移动通信覆盖。

考虑到高活动概率区域的重要性,这里对其进行细分。高活动概率区域包括 5 种场景,如图 1 所示:

(1) 人员密集场景。主要包括电影院、礼堂、教室及购物中心等。

(2) 办公与住宅场景。主要包括住宅与办公室等。

(3) 地下车库与电梯场景。主要包括地下车库、电梯、过街地道等。

(4) 街道与运动场场景。主要包

括街道、运动场等。

(5) 交通工具场景。主要包括小轿车、公交车、地铁、火车及飞机等。

在图 1 所示的这些场景中,移动通信用户一般可以用眼睛直接看到照明灯。显然,目前的移动基站,包括微基站、微微基站,没有充分的利用好这一特征。

未来移动通信的终极形态,对应于高活动概率区域,在网络侧表现为采用信息灯的方式向用户提供移动通信业务服务<sup>[2]</sup>。信息灯的要素及构成如图 2 所示,提供照明及无线通信两种功能,通过标准化的信息灯接头与标准化线缆连接,分别接入移动通信的核心网、无线通信应急电源以及照明用市电<sup>[3-5]</sup>。

图 2 中,根据使用场景的不同,标准化信息灯接头后面的标准化线缆可以采用以下几种方式:

(1) 只有电力线。电力线同时完成信息灯的照明用电、通信电缆、应急供电 3 种功能。

(2) 电力线和通信电缆。其中,

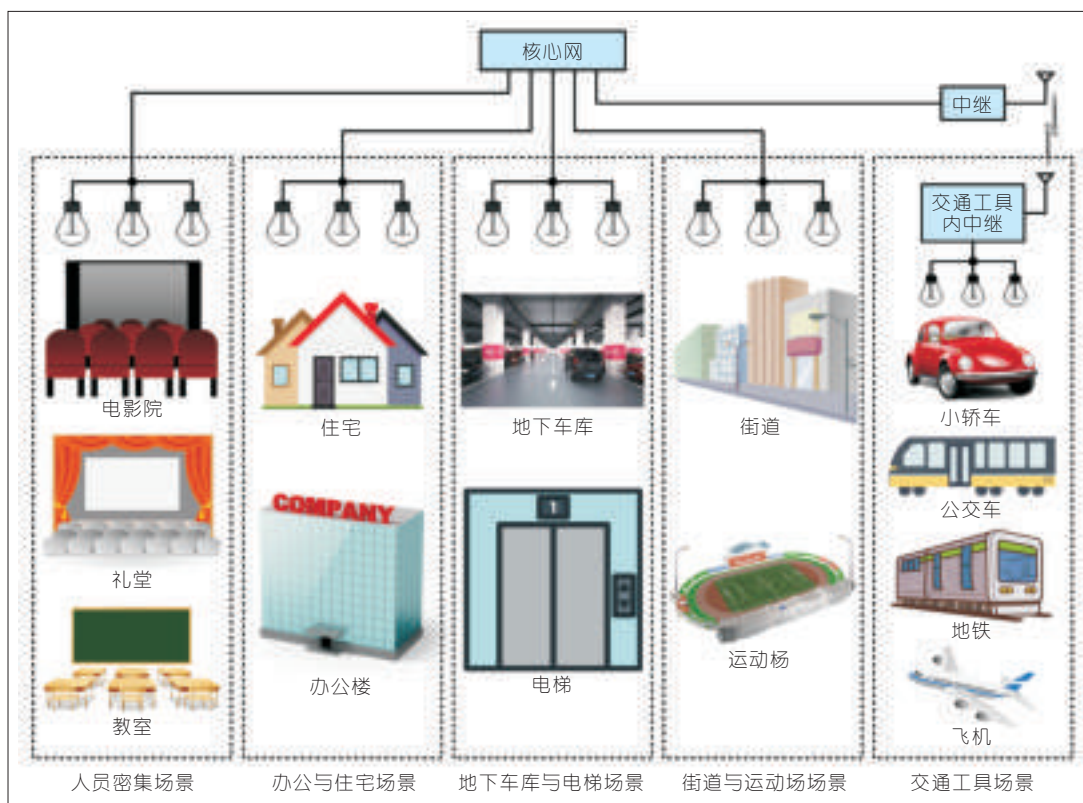
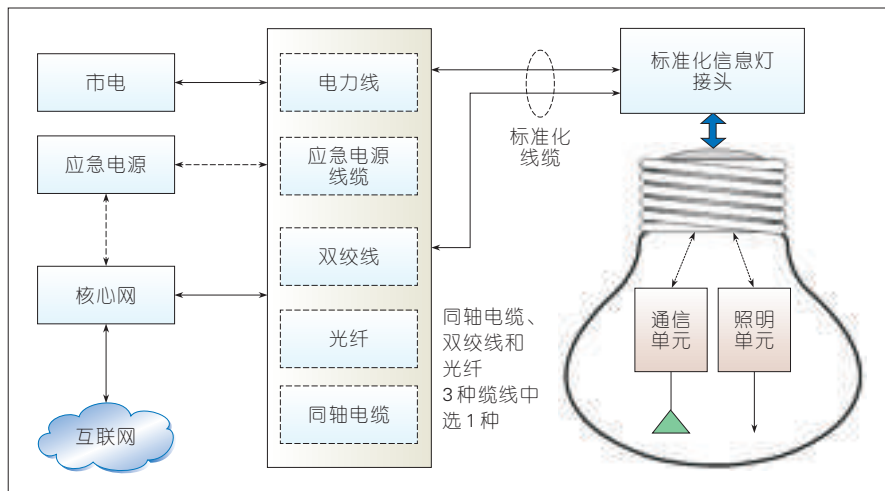


图 1  
高活动概率区域的移动通信典型使用场景



▲ 图2 网络侧信息灯的构成

通信电缆可以是同轴电缆、双绞线、光纤3种缆线中的一种。不需要应急电源的场景,电力线仅提供照明用电。需要应急电源的场景,电力线可同时用作照明用电、通信用电这两种功能。

(3)电力线、应急电源线缆,以及同轴电缆、双绞线、光纤3种缆线中的1种。

图2中所示的信息灯具备的优点包括:

(1)节约能源。信息灯与用户端的通信,大多数时候是直射路径,不需要网络侧及用户侧发射机发射太大的功率。每1个信息灯的最大发射功率只有几十mW,比现有的基站小3个量级。在信息灯的服务下,每1个通信终端的最大发射功率也只有几十mW量级,比现有的手机小2个量级。

(2)用户端待机时间长。信息灯的无线信道,平均的传播损耗比现有的移动通信基站小几个量级,这会让用户端的待机时间获得显著延长。例如,某些频繁使用的移动终端待机时间会提高几个量级,从1天提高到百天。

(3)绿色的电磁辐射。更小的用户端及基站发射功率,所产生的电磁辐射更绿色化。

(4)频谱效率高。在单位空间

内,信息灯的频率复用率更高。1个用户一般可以同时直视多个信息灯,具有更高的空分复用效率。

(5)网络安装快速且简单。不存在基站选址困难的问题,安装简单,如目前的白炽灯泡一样,能安装白炽灯的人就可以安装信息灯基站。

(6)网络使用与维护简单。信息灯是由半导体材料及铜等生产的芯片组成,大批量的生产后,信息灯的单个成本极低,信息灯发生故障,可以直接更换,无需维修。

在移动通信发展逼近信息灯的过程中,目前商用市场已有WiFi灯及灯基站两种产品。

#### (1)WiFi灯。

WiFi灯的工作方式如图3<sup>[6-8]</sup>,手机通过WiFi控制WiFi灯照明功能的开关,以及灯的发光颜色、亮度。

WiFi灯的发展趋势是:用户通过WiFi灯直接连接到互联网上,其工作方式如图4所示,特别适合居家或面积大办公室等场景的WiFi布网,优点是:

- 安全。目前已有的WiFi接入设备,需要市电电源,大多数是24h供电。在某些极端环境中,例如高温、高湿度条件下,且周围有易燃物,WiFi接入设备电源存在失火、触电等供电安全问题。

- 美观。目前已有的WiFi接入设备,需要放置场地,不便于隐藏,不方便设计、集成为美观环境中的一部分。WiFi灯的工作方式,用户看不到专用的WiFi接入设备。

- 无线覆盖建网速度快。不同的房间拧上几个WiFi灯,再连接上电力猫,WiFi无线网就建好了。

- 无线覆盖效果好。可以在不同的房间,例如在客厅、餐厅、卧室、卫生间、厨房、阳台等场所各装上1个WiFi灯,在居家配电箱内装上电力猫与互连网相连,则整个家居环境具有最优的WiFi覆盖效果。

#### (2)灯基站。

目前,全球主要移动通信设备制造商均在提供灯基站产品<sup>[9-10]</sup>。例如华为的灯基站已在上海、武汉、东莞等城市开始部署<sup>[11]</sup>。灯基站的主要特点包括:

- 设备建设速度快。利用路灯杆资源,灯基站体积小、重量轻,可快速安装。

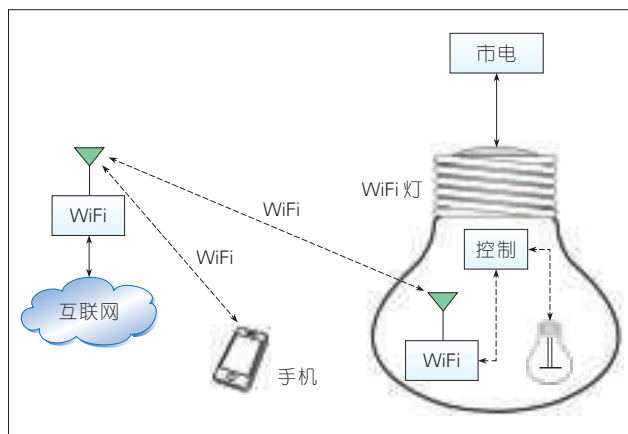


图3 目前WiFi灯的工作方式



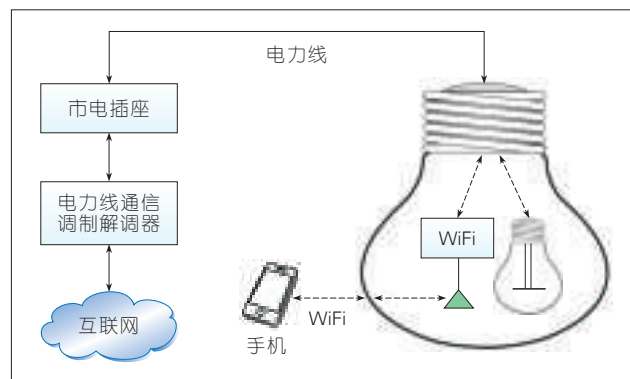


图4  
下一代WiFi灯的工作方式

• 无线通信覆盖性能好。目前的文明城市,找不到没有路灯覆盖的马路,这也意味着与路灯相伴的移动通信基站覆盖性能好。

• 美观。灯基站融入了环境,具有隐蔽性,市政环境美观。

• 基站站址选择方便。基站站址选择只涉及市政路灯部门一家单位,协调方便。解决了目前基站建设选址特别困难的问题。

但是,目前的灯基站产品离信息灯的主要功能要求还有巨大的差距,主要表现在:

- 基站与照明灯还没有融合为一体。
- 安装工程仍显得过于复杂。
- 从市政环境上看仍不美观。
- 操作与维护仍显得过于复杂。

根据《2015年城乡建设统计年鉴》<sup>[12]</sup>,全国城市道路总里程超过35万km,按每20m建设一个路灯计算,那路灯数超过1750万个;换一种算法,考虑每一个家庭有数支市电照明灯,若按全国每个人对应2支信息灯,则总量是26亿支:这说明信息灯具有广阔的应用前景。

## 2 未来移动通信用户侧的终极表现

限于篇幅,这里不讨论机器终端与机器终端间的无线通信,只讨论人直接使用的终端。考虑高活动概率区域,未来移动通信用户侧的终极表现如图5所示:

(1)个人随身移动服务器。未来

移动通信需要超低时延、随身、可信计算的内容,放在个人随身移动服务器中执行。具有无线通信功能,可与网络侧的信息灯、宏基站进行无线通信。一般情况下,任时刻个人随身移动服务器离其主人的最大空间距离不超过100m。

(2)穿戴式终端。携带方便,具有低精度的特定人体生理指标监测功能等。具有无线通信功能,可与网络侧的信息灯进行无线通信。

(3)植入式终端。埋入人体内部,人体外面不可见,根据需要,具有高精度的选定人体生理指标监测功能;具有与神经对接等功能;具有无线通信功能,可与个人穿戴式终端及个人移动服务器进行无线通信;某些特定的植入式终端可与网络侧信息灯进行无线通信。

移动通信用户侧终端的终极形态,涉及的关键技术包括:

(1)无线通信空中接口技术。解决人体内植入电子设备与外界的无线通信问题<sup>[13]</sup>。

(2)人体天线。解决人体作为人体内植入的电子设备收发天线所涉及的关键问题<sup>[14]</sup>。

(3)供电技术。解决人体内植入电子设备的供电问题<sup>[15]</sup>。

(4)安全技术。解决人体内植入电子设备的安全操作维护问题<sup>[16]</sup>。

(5)环境适应性技术。包括两层技术内容:一是植入人体内的电子设备如何适应人体内部

的环境,不影响人体的正常运行<sup>[17]</sup>;二是一个人的植入式终端与距离很近另一个人的植入式终端如何达到相互间的干扰最小化。

(6)操作维护技术。解决人体内植入电子设备运行状态管理问题<sup>[16]</sup>。

(7)传感技术。解决人体内植入电子设备如何有效采集人体生命特征信号的问题<sup>[18]</sup>。

(8)植入技术。解决电子设备安装入人体涉及的问题<sup>[19]</sup>。

## 3 标准化

移动通信走向终极未来的过程,也是一个不断标准化的过程,需要系列化的国家标准及国际标准。

目前正处于5G标准化的过程中,重点发展及完善的关键技术是信息灯的基础建设标准化。1栋楼盖好可以使用70年,但是当前移动通信相邻两代之间平均只有8年,这需要建筑物的建设要有预判性、超前性,并标准化。

(1)信息灯。

如图2所示的信息灯组成要素,需要的国家标准化内容包括:

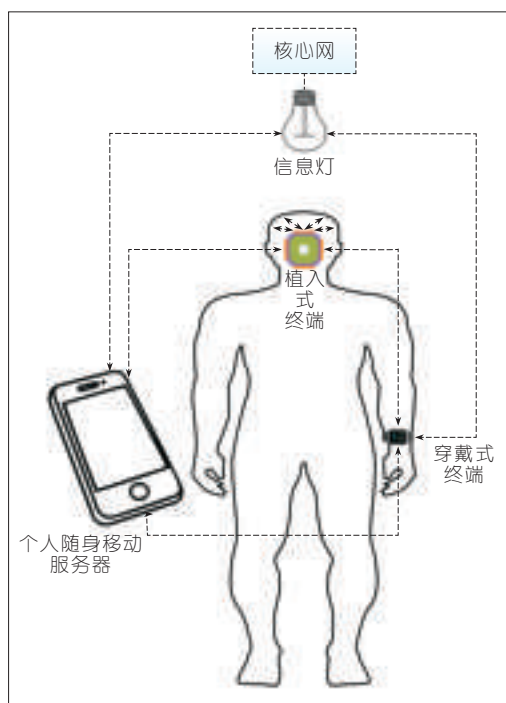


图5 未来移动通信用户侧的终极表现

• 外观。根据不同的应用需要,采用吊灯、吸顶灯、落地灯、壁灯、台灯等形式,满足居家、办公室需求。

• 照明灯功能。根据不同的应用需要,适应白炽灯、荧光灯、LED节能灯、卤素灯等光源的需要。

• 无线通信空中接口标准。适应信息灯的空中无线通信接口需要。

• 信息灯的操作维护标准。适应一座城市上亿个信息灯的高效、及时操作维护需要。

• 信息灯的安全标准。适应回避各种天灾人祸的安全需要。

#### (2) 信息灯线缆。

信息灯可能使用的几种线缆,如图6所示,需要实现标准化的主要内容包括:

• 信息灯使用线缆标准化,根据不同的应用需要,标准化系列线缆的规范。

• 信息灯线缆布线标准。

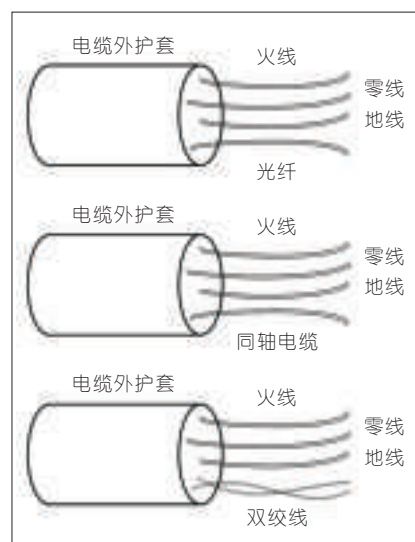
• 信息灯线缆施工标准。

#### (3) 信息灯灯座。

为使信息灯的拆卸与安装与普通灯泡一样方便,需要信息灯灯座标准化。几种信息灯的灯座要素如图7所示。

信息灯灯座的标准化需要:

• 与通信信号线及应急电源线匹配,满足光纤、同轴电缆、双绞线等



▲ 图6 信息灯常用的几种线缆



▲ 图7 信息灯灯座的几种样式与要素

信号线以及应急电源线的不同需要。

• 口径规格。

• 与照明灯具匹配。满足不同信息灯拧入、插入等的使用需要。

#### (4) 信息灯应急电源。

信息灯同时具有照明与无线通信功能,当遇到市电停电时,大多数情况下,无线通信功能是不能停用的,与现有的无线通信系统一样,信息灯系统也需要应急电源,除非使用电源的停电概率等级达到了电信级要求。

一般1栋楼或1个居民小区,设置1个信息灯的应急电源中心,这需要相应的国家标准进行规范。

#### (5) 植入式终端。

在移动通信网的用户侧,植入式终端必须标准化,以保证人体生命的安全:

• 植入式终端外形的标准化。

• 电磁安全,制定植入式终端的电磁辐射剂量国家标准。

• 生物安全,制定植入式终端的生物安全国家标准。

• 植入过程标准化。

• 植入设备标准化。

#### (6) 建筑物。

信息灯依托的住宅、办公楼、街道等建筑物,需要进行标准化的内容包括:

• 已有住宅、办公楼、街道等建筑物,安装信息灯时的改造工程,需要国家强制规范标准。

• 新建住宅、办公楼、街道等建筑物,为适应信息灯使用需要的国家强制规范标准。

• 新建住宅、办公楼、街道等建筑物,为适应信息灯所需应急电源需要的国家强制规范标准。

## 4 结束语

本文给出了移动通信终极未来的部分思考,有些想法还很成熟,欢迎批评指正,并真诚期待联系讨论交流。

#### 参考文献

- [1] KLEPEIS N E, NELSON W C, OTT W R, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants[J]. Journal of Exposure Analysis & Environmental Epidemiology, 2001, 11(3): 231-252
- [2] 唐友喜, 邵士海. 基于照明灯及电力线为载体的新型宽带移动通信系统[J]. 中兴通讯技术, 2007, 13(2): 25-27. DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2007.02.007
- [3] 唐友喜, 刘宇畅. 照明及通信两用电器: 200610021069.8[P]. 2016-06-01
- [4] 赵连鹏, 唐友喜, 符初生. 一种信息灯的连接结构及方法: 200710049021.2[P]. 2007-04-30
- [5] 唐友喜, 郝兵琼. 一种具有信息传输功能的电力开关: 200610021371.3[P]. 2006-07-11
- [6] SHAO S, KHREISHAH A, AYYASH M, et al. Design and Analysis of a Visible-Light-Communication Enhanced WiFi System[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(10): 960-973. DOI:10.1364/JOCN.7.000960
- [7] Cisco Systems. White paper: Cisco VNI Forecast and Methodology, 2015-2020[EB/OL]. (2016-06-01)[2017-03-19]. http://

➡ 下转第 52 页

# 5G 大规模接入技术: 如何应对差异化服务的挑战

## Massive Access in 5G: Challenges and Solutions for Differentiated Service Provisioning

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0050-03

**摘要:** 提出 5G 必须具有面向人、机、物提供大规模差异化接入服务的能力, 因此 5G 大规模接入系统的设计必须综合考虑单点并发用户规模、混合业务支撑能力、接入资源利用效率、端到端接入时延等关键性能指标, 并支持正交与非正交混合接入、确定性与非确定性(随机)混合接入、许可与免许可机会接入等重要技术特征。

**关键词:** 5G; 大规模接入; 差异化接入服务

**Abstract:** 5G is aimed to provide massive and differentiated access services for human, machine and things. In 5G system design, key performance such as the number of users simultaneously served by a single access point, capability of supporting heterogeneous services, radio resource efficiency and end-to-end delay, should be comprehensively considered. In addition, the 5G system also needs to support hybrid orthogonal/non-orthogonal multiple access, hybrid deterministic/non-deterministic (random) access as well as grant-based/grant-free opportunistic access.

**Key words:** 5G; massive access; differentiated access service

张朝阳/ZHANG Zhaoyang

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)  
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

- 通过与新型多载波传输等技术结合, 在来自自适应技术和智能化处理的支持下, 非正交接入技术在实现大规模连接方面具有巨大潜能
- 除人类活动的大量接入需求之外, 未来大量的机、物的接入需求, 都促使随机接入成为实现大规模接入的重要途径
- 5G 大规模接入还有许多值得探索的新方向, 例如非正交协作多接入、MIMO 非正交接入等

### 1 5G 大规模接入的需求和现状

5G 承载着“信息随心至, 万物触手及”的宏伟发展目标, 将为未来人、机、物三元互通、灵活交互乃至有机融合提供重要支撑。当 5G 应用场景由单纯人与人的通信, 以及人与物、物与物之间的通信和控制, 大规模接入成为随之而来的突出需求<sup>[1]</sup>。

典型场景下, 5G 将面对每平方千米约 100 万个连接的大接入规模, 或者高达每平方米 6 个以上的用户密度<sup>[2-3]</sup>。更重要的是, 人、机、物具有高

度复杂、相互关联和显著差异化的接入业务需求和流量特征, 大量突发/偶发、具有准周期性或特定随机性的实时/非实时业务必须实现同时混合接入, 这无疑给 5G 接入系统的设计带来了巨大的挑战。

当前, 5G 在网络架构和无线传输的不同层面分别针对大规模接入的复杂需求提出了一些基本的解决思路。超密集组网(UDN)是网络架构方面的重要途径<sup>[3]</sup>, 物理层切片包括子带滤波和新型多址等是无线传输层的重要手段<sup>[2]</sup>。然而, 尽管当前 5G 大规模接入技术的研发和标准化如火如荼, 但仍然存在规模化用户支撑能力难以体现, 业务特性挖掘不足, 对不同场景的适应能力有待提升等

问题。因此, 有必要重新审视 5G 大规模接入的设计目标, 重新定义其关键性能指标(KPI), 并探讨其必备技术特征和新的可能解决方案。

### 2 5G 大规模接入的 KPI

容量是通信系统的核心指标, 但对 5G 大规模接入系统来说, 仅谈容量是不够的。5G 所针对的人、机、物应用对象的大规模特性, 以及其应用场景和接入业务的多样性和复杂性, 使得 5G 接入系统关键性能指标有更为特殊的约束, 这些约束在当前系统设计中考虑得还不够充分, 特别是:

(1) 单点并发用户规模。未来真正考验接入系统的是对大规模并发用户的支持能力, 这不同于通常的单

收稿时间: 2017-03-20  
网络出版时间: 2017-05-05



点覆盖能力。在典型场景下,单接入点需要覆盖 50 000 以上的用户规模,并且支持其中 5 000 以上的并发连接,这相对于现有蜂窝系统有不止一个数量级的提高。

(2)混合业务支撑能力。未来同一个 5G 接入点将可能面对来自同一区域不同人、机、物的不同业务请求,因此必须能够保持对不同业务的兼容性、差异性和对同一业务的适度弹性。由于资源的有限性,仅仅通过传统资源分配方式下改变资源粒度来支撑混合业务,将难以为继。

(3)接入资源利用效率。频谱和能量等资源的利用率是 5G 的基本性能指标。但在大规模接入条件下,由于场景和业务差异显著,不同场景、业务有不同的接入性能,只有强调资源综合利用效率,才有真正的意义。

(4)端到端接入时延。5G 应用场景中大量实时业务对端到端接入时延提出了苛刻的要求,尤其是对一大类突发/偶发业务,在大规模接入条件下,基于资源预留(注册)的接入机制既难以保证接入效率,又难以满足超低时延约束。

上述 4 项关键性能指标对于 5G 大规模接入系统的设计十分重要,它们在一定程度上反映了 5G 接入系统面向人、机、物提供大规模差异化服务的能力。对正在进行的 5G 接入技术研发而言,必须通过新的技术途径才能更好地满足这些指标要求。

### 3 5G 差异化接入服务的重要途径

5G 要真正实现大规模、差异化接入服务,必须支持如下新的技术特征。

#### 3.1 正交与非正交混合接入

当前,第 3 代合作伙伴计划(3GPP)针对 5G 典型场景初步提出了以非正交接入为基础的新型接入技术和相关体制。非正交接入通过迭代干扰消减或干扰协调等辅助技术的支持,在有限资源下引入适当的用

户间干扰,保障接入可靠性的同时提高了用户容量。同时,非正交接入技术的非正交特性可以根据环境、用户和业务的变化而改变,从而实现多用户资源共享和干扰竞争之间的平衡。非正交接入可应用于时间、频率和空间等任何物理维度或其组合衍生维度(包括多域编码和多元功率控制)。通过与新型多载波传输体制和大规模天线技术相结合,在未来自适应技术和智能化处理的支持下,非正交接入技术在实现大规模连接方面具有巨大潜能。

然而,现有非正交接入技术通常基于单个资源块粒度的干扰处理,而单个资源块往往只能支持少量用户的并发接入;由于干扰处理的复杂性和可靠性问题,面向大规模用户的非正交接入机制在现有接入技术中还很少见,即使存在也难以灵活支持差异化的服务。因此,通过引入适当的用户和业务分簇机制,把密集网络异构覆盖特性、多用户接入技术与子带滤波、波束成形等物理层机制有机结合,从而建立多维多层次跨层自适应优化机制,利用不断增强的计算存储和数据融合技术实现正交/非正交混合接入,将是发挥非正交接入最大潜力的重要研究方向。

#### 3.2 确定性与非确定性(随机)混合接入

以基站为中心的确定性接入机制是长期以来蜂窝系统的主要接入方式,它通过确定性的用户调度和资源指配来选择接入的用户。然而,在 5G 大规模接入场景下,一方面用户规模越来越大,用户的行为和需求差异越来越大,中心协调的开销和时延将越来越难以承受,对相当一部分用户和服务也没有这个必要;另一方面,网络结构的无定形化/去中心化,各种服务群体和行业的极大差异,客观上也使得完全中心协调的方式难以适应未来网络架构的演变。因此,在计算机网络中广泛采用的非确定

性(随机)接入将为未来无线移动网络所借鉴,成为其接入机制的有机组成部分。它不仅可应用于初始化(注册)阶段,还可直接应用于数据接入。

除人类活动的大量接入需求之外,未来极其大量的机、物的接入需求,都促使随机接入成为实现大规模接入的重要途径,既适用于低负荷实时业务或者非实时业务接入,也适合于非均匀,业务密度极高或者差异化极大的行业服务。随机接入在无线资源有限,需要充分利用的情况下,会造成明显的随机干扰,可通过与上述非正交接入相结合形成非正交随机接入,也可通过网络密集化、异构网络融合、边缘协同计算存储,以及分布式流聚合等技术,实现有效的干扰管控,提升接入效率。

#### 3.3 许可与免许可机会接入

现有中心和中心非中心协调的接入机制往往在接入之前需要有资源的协调和许可过程(通过基站中心协调或者通过分布式协调过程完成)。这一许可(或注册)过程对于 5G 应用场景中的一些典型突发/偶发时延敏感业务是十分不利的,对于网络开放和 SDN 开源服务也极为不利,因为现有的注册过程会显著地增加接入时延和信令开销,降低接入效率。免许可接入不需要注册,从而无需资源的协调和分配,可显著提高接入效率,降低时延,满足针对时延的差异化服务要求。因此免许可接入成为当前 5G 的又一个重要研发方向。

在 5G 大规模接入条件下,免许可接入的难点在于如何提高联合用户身份检测、信道估计和信息检测的复杂性和可靠性。其中,免许可接入基于预先注册登记的长有效机制,对相当一批物联网用户接入是可行的方法之一。另外,对不同的用户和业务类型,划分不同层级,通过适当的用户接入模式识别和迭代检测、分层分级,高效地完成上述的联合过程,实现可靠的免许可接入。我们还应

该看到,在未来无线网络开放模式的演进过程中,许可与免许可的灵活接入与网络安全与监测的严格管理并不是完全一致的,会对造就新型网络体系架构带来极大影响,很可能会推出与现阶段极其不同的网络体系和协议体系,值得拭目以待。

#### 4 结束语

除上述技术思路和途径之外,5G 大规模接入还有许多值得探索的新

方向,例如非正交协作多接入、多输入多输出(MIMO)非正交接入等。所有这些技术方向在提升5G接入系统关键性能指标方面均有较大的潜力,有望进一步为5G接入系统提供面向人、机、物的大规模差异化服务。

#### 参考文献

- [1] IMT-2020(5G)推进组: 5G 愿景与需求白皮书[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2014
- [2] IMT-2020(5G)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
- [3] IMT-2020(5G)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



**张朝阳**, 浙江大学教授、信息与通信工程系主任, 浙江省信息处理与通信网络重点实验室主任, 中国电子学会信息论分会副主任委员, 中国通信学会理事; 主要研究方向为新一代无线通信与网络基础理论与关键技术; 已承担和完成国家“973”/“863”计划课题、国家科技重大专项课题和国家自然科学基金项目10余项, 曾获信息产业部、浙江省科技进步奖多项; 已发表论文200余篇, 获授权发明专利40项。

#### ← 上接第 49 页

- [www.cisio.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html](http://www.cisio.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html)
- [8] Philips. Philips Hue Personal Wireless Lighting[EB/OL]. [2017-03-19]. <http://www.usa.philips.com/c-m-li/hue>
  - [9] 华为技术有限公司. 华为室外灯基站 AAU3940 产品培训资料[EB/OL]. [2017-03-19]. <http://www.fuzonghyn.com/ztnews/2rooqoyqsspunuppowp12uyz.html>
  - [10] Patrik Sivermalm. Ericsson's Radio Site Solutions[EB/OL]. (2007-03-10)[2017-03-19]. [https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2007\\_01/files/3\\_radio\\_site.pdf](https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2007_01/files/3_radio_site.pdf)
  - [11] 李莉. 探索微基站覆盖新模式—市政灯杆挂载LTE光纤分布系统[J]. 信息通信, 2015(2): 254-255. DOI:10.3969/j.issn.1673-1131.2015.02.181
  - [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2015 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2016-12-23)[2017-03-19]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/index.html>
  - [13] ZENG X, GAO Y, PAN S, et al. Effects of Muscle Conductivity on Signal Transmission of Intra-body Communications[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2013, 27(1): 21-25. DOI:10.1109/ICCE-China.2016.7849761
  - [14] SCANLON W G. Analysis of Tissue-Coupled Antennas for UHF Intra-body

Communications[C]//Twelfth International Conference on Antennas and Propagation, USA:IEEE, 2003(2):747-750. DOI:10.1049/cp:20030184

- [15] SWAMINATHAN M, SCHIRNER G, CHOWDHURY K R. Optimization of Energy Efficient Relay Position for Galvanic Coupled Intra-body Communication[C]//Wireless Communications & Networking Conference, USA:IEEE, 2015:1725-1730. DOI:10.1109/WCNC.2015.7127728
- [16] TANG X, CHEN X M. Investigation of Residual Ag Amount into Human Body Using Ag/AgCl Electrodes During IBC[C]//2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics—China (ICCE—China), USA:IEEE, 2016:1-4. DOI:10.1109/ICCE-China.2016.7849762
- [17] 李方红. 人体植入式电子设备无线传能系统中的电磁辐射安全性研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2015.
- [18] SANTAGATI G E, MELODIA T. Sonar Inside Your Body: Prototyping Ultrasonic Intra-Body Sensor Networks[C]//IEEE Conference on Computer Communications, USA:IEEE, 2014:2679-2678. DOI:10.1109/INFOCOM.2014.6848216
- [19] ONUKI Y, BHARDWAJ U, PHARM M, et al. A Review of the Biocompatibility of Implantable Devices: Current Challenges to Overcome Foreign Body Response[J]. Journal of Diabetes Science and Technology, 2008, 2(6):1003-1015. DOI:10.1177/193229680800200610

#### 作者简介



**唐友喜**, 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室教授; 现从事无线通信的教学、科研以及产业化工作, 目前侧重于同时同频全双工技术的研究; 已发表论文200余篇, 拥有发明专利80余项, 并于2016年出版了《同时同频全双工原理与应用》。



**邵士海**, 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室教授; 现从事无线通信的教学、科研工作, 重点研究无线通信及其抗干扰技术; 已发表论文50余篇, 拥有发明专利20余项。



**李晨兴**, 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室博士生; 现从事同时同频自干扰抑制技术研究。

# 无线网络与产品演进

## Evolution of Wireless Network and Products

张万春/ZHANG Wanchun<sup>1</sup>  
崔丽/CUI Li<sup>1</sup>  
段晓伟/DUAN Xiaowei<sup>1,2</sup>

(1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;  
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518057)  
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;  
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0053-005

**摘要:** 认为接入速率宽带化、连接对象物联化、网络形态云化、网络运维智能化是无线接入网络的四大发展趋势, 同时相应的无线网络产品也将产生射频宽带化、通道阵列化、软件组件化、基站云化等重要变革。指出了5G的商用进展将比预期更快, 而其商用的关键在于产业链是否完整, 终端将是影响产业链成熟度的关键因素。同提出中兴通讯致力于做5G创新的引领者, 在2017年巴塞罗那通信展上已经发布了一系列面向预商用的5G产品和方案。

**关键词:** 无线; 5G; 产品; 演进; 趋势

**Abstract:** In this paper, broadband access data rate, internet of things, cloud networks, intelligent network operation and maintenance are considered as the development trends for wireless access network. Meanwhile, important changes will be made in wireless products, such as broadband radio frequency (RF), arrayed transceiver channels, component-based software, and cloud base stations. The commercial progress of 5G will be faster than expected, and the integrity of industrial chain is the key factor. Moreover, terminals will become the key factor regarding the maturity of 5G ecosystem. ZTE released series pre-commercial 5G products and solutions in MWC 2017, and is aiming to be the leader of 5G innovation.

**Keywords:** wireless; 5G; product; evolution; trend

## 1 无线网络发展趋势

### 1.1 宽带化

宽带化是无线网络发展的最重要趋势。随着移动应用的蓬勃发展, 以及移动高清视频业务的爆发式增长, 无线网络宽带化将进入新的阶段。图1是2015—2020年移动数据业务增长趋势, 未来几年移动数据吞吐量将飞速发展, 到2020年视频业务将占据75%的流量<sup>[1]</sup>。

为了应对数据流量的高速增长, 可以通过以下几种技术途径提升无线网络的接入宽带。

#### (1) 大规模天线技术。

中兴通讯 Pre5G 方案创新性地把5G关键技术之一——大规模天线阵列(Massive MIMO)提前应用于4G网络, 用户不需要更换4G终端即可享受接近5G的体验。鉴于中兴通讯在Massive MIMO技术商用方面的领先优势, 日本软银于2016年9月率先在

其商用网络热点区域部署 Massive MIMO 技术, 显著提升了系统容量。

此外, 中兴通讯对低频段 Massive MIMO 在5G中的应用也进行了深入的研究和探索, 具体来说主要

表现为如下几个方面:

- 高效的 Massive MIMO 信道信息获取机制。对于时分复用(TDD)系统, 通过优化上行信道质量测量的发射和接收, 天线校准技术, 以及信

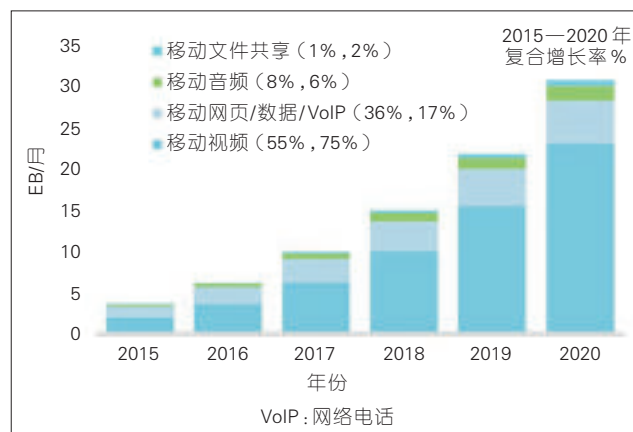


图1 移动数据增长趋势

收稿时间: 2017-04-07  
网络出版时间: 2017-05-05



道的互易性实现 Massive MIMO 信道信息的有效获取;对于频分复用(FDD)系统,采用降维和沿用码本反馈的形式来实现 Massive MIMO 系统信道信息的有效获取。

- 统一的多天线传输方式,化繁为简。中兴通讯所设计的 Massive MIMO 传输方式,使用同一种下行控制信令,根据无线信道状态实现单用户多入多出(SU-MIMO)和多用户多入多出(MU-MIMO)的自适应选择和灵活切换。

- 分离的测量/反馈和传输机制。中兴通讯创造性地提出 Massive MIMO 设计应该遵循测量/反馈和传输分离的原则,即对不同的传输模式,定义一套通用的测量/反馈模式,减少了复杂度,具有更好的适应性。

- 更可靠的码本构造设计。中兴通讯所设计的码本综合考虑了双极化、富散射和贫散射以及不同频段的影响,使得码本具有更好的鲁棒性、适应性。

我们相信,中兴通讯在低频 Massive MIMO 上的研究成果和贡献,必将对 Massive MIMO 的标准化推进起到积极的作用。

#### (2)载波聚合技术。

当前 2 载波、3 载波聚合技术已经商用,未来将逐步发展到 5 载波及以上的大量载波聚合(Massive CA)。同时,由于授权频谱资源有限,将长期演进(LTE)技术扩展到非授权频谱(如 2.4G、5.8G)的授权频谱辅助接入(LAA)技术将逐步成熟,并被用于进一步提升网络容量。

#### (3)高阶调制技术。

下行 64 阶正交振幅调制(64 QAM)和上行 16 QAM 调制技术在 4G 网络中已经成熟商用,后续将逐步演进到下行 256 QAM 和上行 64 QAM。另外,3GPP 已经确定,5G 数据业务的信道编码不管是长码、短码都采用低密度奇偶校验码(LDPC)。中兴通讯在 LDPC 领域有 10 多年的技术积累和储备,所设计的准循环 LDPC 码具

备优秀的译码性能,灵活的码长、码率,强大的译码能力,更低的译码延时,更低的复杂度等特征。

#### (4)高频大带宽。

提升系统容量最直接的方式是增加频谱带宽。4G 受制于有限的频谱资源和单载波 20 MHz 带宽,难以进一步提升系统容量。5G 打破了这个“瓶颈”,支持高频厘米波或毫米波,并支持几百兆甚至 1 GHz 以上的载波带宽,因而可达 10 Gbit/s 以上的速率。高频通信通过高增益波束及自适应波束切换/波束跟踪技术来解决信号的传输距离问题。中兴通讯针对高频通信的特点,设计了完整的技术方案:

- 一套适用于高频通信的物理层参数,包括正交频分多路复用技术(OFDM)的子载波间隔、帧长、循环前缀(CP)长度等;

- 一套完整的高频静态信道,包括下行同步信道,下行广播信道,上行接入信道,上、下行波束测量/训练信道,特殊导频信道(如相位噪声跟踪信道)以及上、下行传输信道等;

- 完整的动态过程,主要包括波束发现、波束切换、波束跟踪、波束维持以及波束删除等;

- 多波束之间的协作和管理,主要包括多波束协作传输、多波束之间的干扰管理等。

中兴通讯高频通信方案是一个完整的设计,基本囊括整个通信过程所必须的信道和过程,同时充分考虑高频信道自身的特点,扬长避短,充分发挥出高频通信容量大,延迟低的优势。

### 1.2 物联化

当前,越来越多的可穿戴设备已进入人们的生活,共享单车、智能抄表、智能家居、智能停车、智能环境监测等物联网应用也在快速发展,万物互联的时代正在加速来临,物联网是继移动互联网之后的下一个风口。

早期的物联网技术包括

Bluetooth、WiFi、ZigBee、LoRa、Sigfox 等,这些技术一般是基于非授权频谱,应用于局部行业和区域,难以满足低功耗广域万物互联的需求。

当前,窄带物联网(NB-IoT)技术已经被 3GPP 确定为低功耗广域(LPWA)物联网市场的蜂窝物联网技术标准,该技术具备广覆盖(相比全球移动通信系统(GSM)有 20 dB 的覆盖增益)、多连接(大于 5 万/小区)、低成本(每个模块约 5 美金)、低能耗(电池寿命 5-10 年)的优越性能,更关键的是它可以在现有的无线网络基础上,通过平滑升级进行快速部署,使得电信运营商可以迅速开展物联网业务。同时,面向物联网接入优化的增强机器类型通信(eMTC)技术也逐步成熟,可有效满足中低速率物联网业务的低成本接入需求。

中兴通讯与中国移动在业界率先完成了 NB-IoT 标准的概念验证,并于 2016 年 11 月在乌镇完成了智能停车、五水共治的试商用。相信随着 NB-IoT、eMTC 技术在主流运营商网络中的大规模部署,辅以物联网商业模式创新,万物互联的时代将很快来临。

此外,中兴通讯在 5G 物联网多址接入这个最具有挑战的领域中,提出了一套完整的多用户共享接入方案(MUSA)<sup>[2]</sup>,具有如下技术特征:

(1)高过载率,支持海量连接。采用非正交多址接入,其过载率在单天线(基站侧)时能达到 300%,如使用多天线(基站侧),则过载率能达到 600%以上。

(2)真正意义上的免调度,显著降低物联网节点的功耗和成本。MUSA 技术从根本上实现免调度功能,在保证高过载率的前提下,实现物联终端想发就发,不想发就深度睡眠的能力。

(3)相对简单的接收算法,终端成本更优。MUSA 采用短码扩展,且充分使用星座图的先验信息,复杂度相对其他算法下降了几个数量级。

基于上述技术特征,在物联网的5G 标准化过程中,MUSA 技术具有较好的标准化前景。

### 1.3 云化

随着移动互联网的快速发展,各种移动业务层出不穷,这些应用快速出现、快速迭代、快速消退,同时不同业务也存在较大的差异性,这就要求无线网络更加灵活、快捷和开放,云化成为了移动网络发展的重大趋势。

对于电信网络来讲,虚拟化是云化的基础。如图2所示,在虚拟化的基础上,云化的演进分为3个阶段:

(1)基础设施即服务(IaaS),此阶段通过资源的池化降低网络成本;

(2)平台即服务(PaaS),这个阶段实现了组件的可编程和网络能力的部分开放;

(3)云服务(XaaS),这个阶段实现了网络能力的全面开放和按需的网络切片。

中兴通讯多年来持续推进云化战略,首先在核心网侧实现了设备的虚拟化,包括虚拟化演进分组核心网(vEPC)、虚拟化IP多媒体系统(vIMS)、虚拟化用户数据中心(vUDC)等,目前基于PaaS的云工厂(Cloud Works)方案正逐步走向商用,

截止2016年全球已部署虚拟化商用/概念验证(POC)项目180多个。同时,虚拟化和云化也在向无线侧推进,云无线接入网络Cloud RAN以虚拟化基带单元(BBU)为主要构成,结合移动边缘计算(MEC)技术,使得无线网络具有灵活弹性的容量、多制式融合接入和协同的能力、开放业务能力,以及向未来5G平滑演进的能力。

### 1.4 智能化

随着移动互联网的蓬勃发展,无线网络越来越复杂,终端种类繁多,用户参差不齐,不同的行业用户或业务有不同的业务体验需求。网络智能化可帮助运营商高效地管理网络、用户和业务。在当前及未来几年,网络智能化主要体现在两个方面:大数据应用及面向5G的网络智能编排。

中兴通讯无线大数据系统VMAX包含网络分析及优化、用户感知评估及优化、日常投诉快捷处理、网络价值挖掘等多个功能,帮助运营商显著提升运维效率,并助力市场营销提升运营收益。当前VMAX系统已在全球近20家运营商网络中部署商用。

## 2 无线产品演进

回顾历史,像砖头一样笨重的

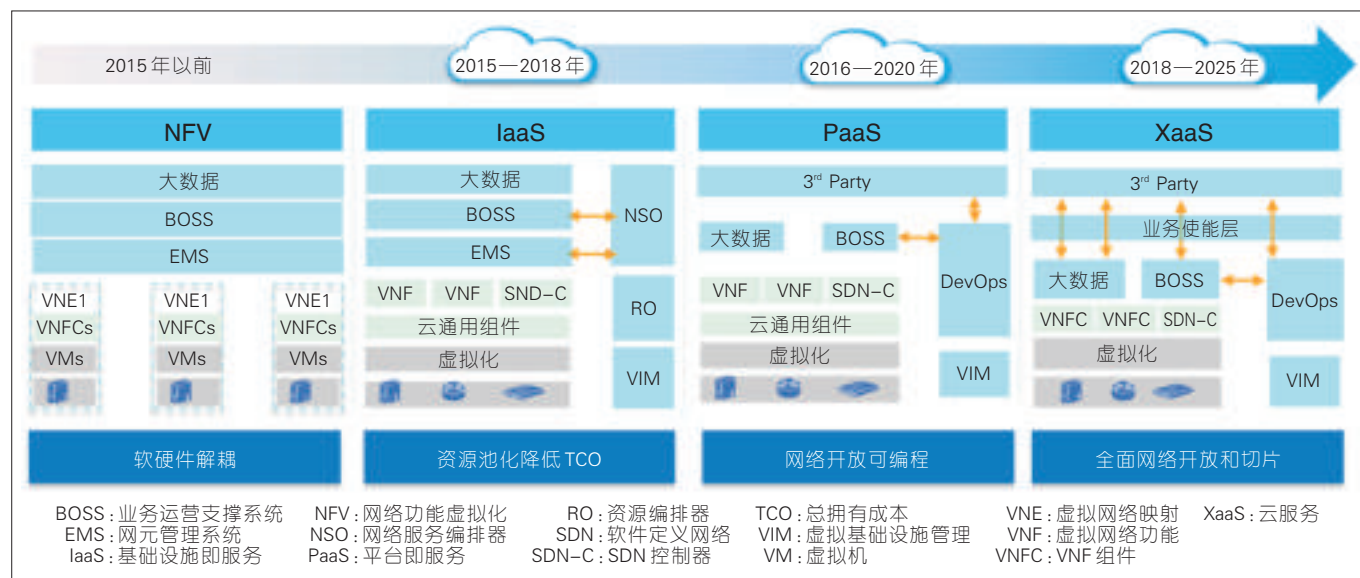
“大哥大”曾经给我们留下了难以磨灭的印象。在过去的30多年里,手机经历了摩托罗拉称霸的模拟电话时代,诺基亚占据半壁江山的功能机时代,HTC/黑莓崛起的互联网手机时代,以及iPhone风靡全球的智能机时代。摩尔定律主导的微电子技术高速发展给移动终端带来了突飞猛进的变化,又给幕后的英雄——无线网络产品带来了怎样的冲击呢?

在过去的30多年里,无线网络产品最明显的两大趋势分别是设备的小型化和多种接入制式的融合化。

(1)设备小型化。

以无线接入网络中的基站产品为例,在过去的30多年时间里,得益于基带信号处理芯片、通信微处理器集成度的提高,基带系统从一个大机框变成一个仅有2U/3U高的基带单元(BBU);高效功放技术的持续改进使基站射频系统从多个分离的笨重射频模块变成一个高度集成、体积只有一二十升的远端射频单元(RRU),整个基站系统重量降低了十几倍,处理能力却提升了几十倍。

基站设备的小型化不仅给运输和安装带来明显的便利,还给移动运营商节约了大量的站点建设费用、铁塔/机房租赁成本和电费开支。



▲图2 网络云化演进步骤



图3  
Pre5G Massive MIMO

### (2)多模融合化。

21 世纪初期,2G、3G 网络仍是移动接入网络的主力军,4G 网络逐步规模商用,免费的 Skype 通话业务和社交软件如 Facebook、微信对移动运营商的语音和短信业务带来巨大的冲击,多网独立建设、共同运营带来的运维成本压力逐渐凸显。

2006 年中兴通讯率先在业界提出软件定义无线电(SDR)理念,并在 2008 年发布基于 SDR 的 UniRAN 软基站平台,可以借助一套硬件设备支持 2G/3G/4G 多种无线制式的融合和共存,最大限度降低了移动运营商的网络改造费用和多模运维成本。

另外,2G、3G 融合的基站控制器平台也同步推出,可以通过软件灵活分配 2G、3G 无线接入制式所使用的硬件资源,不仅提高了硬件资源效率,还减少了设备种类,为移动运营商节约大量的网络运营开支。

展望未来,5G 业务将从人与人之间的链接拓展到万物互联,应用领域从增强的移动宽带 eMBB 拓展到多种垂直行业,所使用的频谱资源也将从低频段拓展到厘米波和毫米波,从而引起无线接入网络产品的形态发生射频宽带化、通道阵列化、软件组件化、基站云化等重要变革。

### (1)射频宽带化。

随着移动接入带宽的逐步提速,多制式、多载波、多频段共同运营造成铁塔上的射频盒子越来越多,天面空间越来越紧张,迫切需要引入新的

技术来减少铁塔上射频盒子的数量。

在 6 GHz 以下蜂窝通信频段,超宽带射频单元(UBR)可以显著降低射频模块的数量。作为无线创新的领军企业,中兴通讯充分利用氮化钾等宽带射频器件的研发成果,用一个超宽带射频单元同时支持两个频段(如 700 MHz 与 900 MHz,1.8 GHz 与 2.1 GHz,2.3 GHz 与 2.6 GHz),高效解决了 4G 时代多制式、多频段共存所面临的关键难题。

6 GHz 以上频段有更为丰富的频谱资源,因而高频通信成为 5G 技术解决超高速接入问题的首选方向。为了支持 20 Gbit/s 的峰值速率,5G 在高频段将采用几百兆甚至上吉赫兹的载波带宽,射频宽带化成为高频通信难以避免的趋势。

### (2)通道阵列化。

当运营商的频谱资源有限时,提高频谱效率是提升网络吞吐量的最优手段,而在提升频谱效率的所有技术中,多输入多输出(MIMO)技术效果最为明显。作为 5G 的关键技术之一,Massive MIMO 可借助大规模天线阵列的波束赋型能力和空分复用技术成倍提升系统的吞吐量。

在 2015 年巴塞罗那展会上,中兴通讯创新性地将 Massive MIMO 技术提前应用于 4G 网络,发布业界第一款可商用的 Pre5G Massive MIMO 基站产品,荣获 GSMA 颁发的“突破性创新奖”和“CTO 选择奖”两项殊荣,并在 2016 年 9 月实现规模商用。如图 3

所示,当采用 128 个天线振子,64 个独立收发通道时,Pre5G Massive MIMO 基站可以将小区吞吐量提升 4~6 倍。

Massive MIMO 将是 Pre5G 和 5G 时代的一个重要发展方向。可以预见,在 2.6 GHz 以上频段,由于振子间距更小,独立射频通道的数量可以进一步扩展到 128 个甚至 256 个,从而支持更为精准的波束控制和更高的并发流数,将小区的吞吐量提升到一个更高的水平。

### (3)软件组件化。

2G 到 4G 时代,移动接入网络服务的主要对象是人,业务类型以语音和宽带数据为主,在实现层面采用软、硬件紧密耦合的设计,此时网元之间的界限及每个网元的功能是确定的。

未来的 5G 网络需要支持增强移动宽带(eMBB),海量机器类型通信(Massive MTC),超可靠及超低延迟通信(uRLLC)3 类典型业务,不同业务对接入速率、连接数量、传输时延、移动速度、电池寿命等网络指标的要求存在较大差异。此外,5G 需要服务于商业模式可能迥然不同的众多垂直行业,且多种不同的商业模式都要在一个 5G 网络架构下和谐共存,这就要求 5G 网络的架构必须要非常灵活。

因此,5G 时代需要结合垂直行业的特点实现灵活的网络切片功能和逻辑切片内部功能模块的按需编排,因而软件功能模块不再是与硬件实体紧密耦合的一个整体,而更像是打散的功能组件“积木”,可以按需组合出适合特定行业的最优端到端“网络切片”。

### (4)基站云化。

基于 SDN/NFV 的虚拟化技术在核心网已经得到了广泛的应用,使网络的性能、弹性与开放性均获得了大幅提升。5G 时代无线接入网络也将引入 NFV 技术,实现最大限度的硬件通用化和资源效率的最大化,从而高



效支持多技术同时接入和跨技术的动态业务带宽聚合和负荷均衡,使得“网络自动配置,网络随需而变”成为现实。

在基站虚拟化/云化的道路上,中兴通讯与 Intel 深度合作,进行了大量的探索和试验。现阶段,考虑到基带媒体访问控制层(MAC)和物理层(PHY)的紧密耦合特性及高实时性的处理要求,通用处理器的性能与成本等因素,我们认为采用高性能通用处理器与硬件加速器融合的方案是实现基站云化的最优途径。

另外,基于无线网络云化和软件组件化的趋势,我们预计未来的 5G 网络硬件设施会以数据中心(DC)的形式出现,5G 网络根据业务类型生成多个逻辑切片,每个切片中的逻辑功能按需组合,并运行在地理位置最合适的数据中心或加速器中。从另外一个角度,基站也变成了一个边缘接入和云计算节点,不仅承载无线接入的基本功能,还可以集成宽带 WiFi 接入、本地网关、移动边缘计算、内容缓存、第 3 方应用等功能。

### 3 中兴通讯 5G 研究进展及 5G 视点

#### 3.1 中兴通讯 5G 研究进展

2017 年 2 月巴塞罗那世界移动通信大会上,5G 成为当仁不让的焦点。中兴通讯在 5G 高频段和低频段都投入了大量研发资源,发布全球首个 Pre5G FDD Massive MIMO 基站,并推出面向预商用的 5G 高、低频系列射频产品,面向 5G 的下一代基带产品 IT BBU,面向 5G 承载的 Flexhaul 等解决方案,为 5G 预商用做好了准备。

#### 3.2 5G 商用是否会提前

2016 年,综合考虑运营商的 4G 网络规划和投资回报、5G 技术研发、频谱分配、产业链成熟度等因素,业界普遍预期 5G 将在 2020 年商用。不过,已经有部分运营商急不可耐,计

划在 2017 年就部署相关设备,在 2018 年商用 5G。对此,中兴通讯认为,5G 商用关键在于产业链是否完整,终端将是影响产业链成熟度的关键因素。

从产业链来看,大规模商用首先要基于统一的标准,比如说第 1 阶段的 eMBB 场景,必须形成从芯片、终端、系统设备到商业模式的完整产业链。总的来看,未来几年 5G 的推进速度比想象的要快。

#### 3.3 5G 商用的核心驱动力是用户需求

运营商对网络的定位,是以用户需求为考量。对运营商而言,如果网络口碑不够好,势必会影响到高价值用户,尤其是随着视频成为移动互联网的基础业务,虚拟现实(VR)/增强现实(AR)等大带宽应用逐渐流行,领先国家的运营商必须及时升级自身网络,迎合用户的网络体验需求。对终端厂商也是如此,想要保持或提升行业地位,必须提前关注、投入 5G 技术,否则很可能被市场淘汰。

#### 3.4 5G 标准之争

从无线通信的标准演进来看,2G、3G、4G 到 5G 标准都要做到开放和兼容。任何一个通信标准在形成过程中都会定义一些关键技术,所以在 5G 标准制定当中,一定会有沟通和博弈,这种沟通和博弈是健康的、有序的。对于 5G 标准的形成,一方面中兴通讯希望体现自有的创新技术在里面,符合业界的价值;同时,在标准统一形成后,中兴通讯会开发满足标准要求的系统。

#### 3.5 关于 5G 频谱

5G 频谱目前还没有确定如何进行分配。5G 频谱是一个按需组合的概念,一定是高频和低频结合使用。我们预计 5G 会有自己干净的频段,就是已有通信制式没有涉及过的频段,但是也可能用现有的频谱进行

重耕。

### 4 结束语

中兴通讯认为在 5G 时代,ICT 技术应用将深入到各个行业,物联网将进入加速发展阶段,并对人类生产、生活方式产生颠覆性改变。在瞬息万变的时代,中兴通讯强调必须改变一切可以改变的,唯有变革才能引领时代,唯有开放方能共赢。中兴通讯将构建开放的商业模式,助力企业数字化转型,带动产业结构调整与升级,打造一个万物互联的数字世界。

#### 致谢

本文得到中兴通讯无线规划部丁光河的鼎力帮助,谨致谢意!

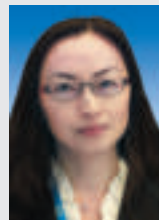
#### 参考文献

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020[EB/OL]. (2017–03–28) [2017–04–10]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] ZTE White Paper on MUSA[R]. 深圳:中兴通讯股份有限公司, 2015

#### 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;主要研究领域为宽带无线通信及自组织网络;2012 年获得深圳市科技进步一等奖,2014 年获得国家科技进步二等奖,2016 年获得中国通信学会科学技术一等奖,2016 年获得国家科技进步奖特等奖。



崔丽,中兴通讯股份有限公司副总裁;负责公司无线产品经营部产品策略、规划及经营,具备丰富的专业知识以及多年的电信行业管理经验。



段晓伟,中兴通讯股份有限公司无线规划部资深方案架构师,移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室成员;负责 4G、Pre5G、5G 创新方案的开发及市场营销工作,积累了丰富的电信行业知识及多年的无线网络技术行销经验。

# 一种可信身份网络架构及在互联网安全中的应用

## A Network Architecture Based on Trusted Identity and Its Applications

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0058-004

**摘要:** 提出了一种基于身份和位置分离思想的网络架构, 确保用户身份标识的真实可信, 并在结构上将用户和核心网络隔离, 屏蔽用户侧攻击, 提升了网络的安全性。认为基于身份标识的网络安全管理应用可以提高网络的攻击源识别能力和溯源效率, 实现主动防御; 同时, 这种虚拟身份和可信身份的绑定, 既能丰富互联网应用, 又有助于实现网络信息的分级保护, 净化网络环境。

**关键词:** 可信身份网络; 身份标识; 位置标识; 网络安全

**Abstract:** A network architecture based on separation of location and identity is proposed in this paper. Under the architecture, user identity is trusted, isolation between user side and core network side is achieved. Thus, network attack from user side is avoided, the security performance is promoted. Additionally, security management applications based on the architecture can both improve the capability of attack source identification and boost the efficiency of source tracing. Meanwhile, it can not only enrich internet applications, but also realize the hierarchical protection of network information to clean network environment.

**Key words:** trusted identity network; access identifier; router identifier; network security

毛玉欣/MAO Yuxin<sup>1</sup>郝振武/HAO Zhenwu<sup>1,3</sup>江家仁/JIANG Jiaren<sup>2</sup>

(1. 中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012;

2. 中国电信股份有限公司上海研究院, 上海 200122;

3. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518057)

(1. ZTE Corporation, Nanjing 210012, China;

2. Shanghai Research Institute of China Telecom Co. Ltd, Shanghai 200122, China;

3. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China)

近年来, 网络技术的不断升级以及智能终端的迅猛发展带动了移动互联网的迅速普及, 越来越多的人通过各种移动终端接入到互联网, 获取网络资源。中国互联网络信息中心(CNNIC)的一项调查显示<sup>[1]</sup>, 截止2014年, 中国网民总体规模达到6.49亿, 其中使用移动终端的网民就达到5.57亿, 占比85.8%。移动互联网已成为社会活动不可缺少的部分。

### 1 互联网安全现状和分析

快速发展的移动互联网给人们的生产和生活带来了便利, 也产生了

很多安全威胁。2014年有46.3%的用户遭遇过网络安全问题, 其中病毒木马入侵、账号密码被盗情况最为严重, 分别达到26.7%和25.9%, 网络欺诈比例为12.6%<sup>[1]</sup>。一方面, 人们的生活正变得越来越离不开网络; 另一方面, 使用人群中认为网络非常不安全或者不太安全的也已接近半数。在网络发展和使用不可逆转的形势下, 改善网络安全, 增强网络可信性是一项具有重大意义且亟待解决的课题。

通过对众多网络安全事件的剖析, 发现虚拟性和匿名性<sup>[2]</sup>是引发网络安全威胁的重要因素。如今的互联网已经构建了一个庞大的虚拟空间, 现实社会中的很多活动都可在其

中进行, 例如, 网络购物、网上支付、网络理财、网络聊天等。这一系列活动都以匿名方式进行, 通信双方和通信设备都无法获知对方的真实身份。匿名给网络攻击提供了广泛空间, 攻击者可通过模拟他人虚拟身份进行信息窃取、诈骗, 虚假言论传播等活动, 给社会经济造成巨大损失, 而网络监管机构对此尚缺乏及时有效的管理和控制手段。

网络信息安全管理存在缺陷主要表现在:

(1) 用户在网络活动中以多个身份存在<sup>[3]</sup>。在网络层通常以IP标识身份, 在应用层通常以不同的用户名标识身份, 各身份标识之间缺乏有效的统一和关联。这种用户身份标识的不唯一、不统一给管理带来了巨大困难。依据网络身份溯源用户真实身份的链条极长, 机制极其复杂。一旦有安全事件发生, 管理者很难及

收稿时间: 2016-03-02  
网络出版时间: 2016-04-26

时、准确地追溯到攻击源。

(2) 用户身份标识可随时改变或被篡改、伪装,对身份标识缺乏有效约束。IP地址作为用户在网络层的身份标识可随时间、地点、接入方式的变化而改变;用户的账号信息也能轻易被攻击者注册或仿冒,这就势必造成管理主体模糊,加大了网络监管难度。对身份标识缺乏约束,降低了标识信息的真实性,从而可能导致对某些安全事件根本无法实施溯源<sup>[4]</sup>。

(3) 网络安全防御措施跟不上安全事件的发展<sup>[5]</sup>,对于网络安全事件的防御始终处于被动状态。一旦有新的攻击方式出现,通常需要投入大量的人力、物力分析查找原因,升级软硬件,防御成本过高。这种攻防成本不对称的状况助长了各种安全事件频出,严重影响到网络的可信性。

应对上述安全缺陷的一种方式就是推行网络实名制管理<sup>[6]</sup>。实践表明现有的一些实名制管理方式仍然面临一些难题。例如:通过用户上传身份登记信息的方式实现身份实名,这种方式获取的身份信息真伪难辨,无法判断用户自身上传的信息是否真实可信<sup>[7]</sup>。又或是在网络内容提供商(ICP)侧推行应用层实名制,这种实现方式通过ICP保存用户真实身份信息,但ICP本身也难以保证安全可靠,容易发生信息泄漏<sup>[8]</sup>。另外由于业务种类和ICP数量众多,且新业务和新ICP层出不穷,这给实名制的管理维护也带来了很大困难。

## 2 基于标识的可信身份网络设计

### 2.1 IP地址语义过载

互联网使用传输控制/网络通信协议(TCP/IP),IP在其中承载了双重语义<sup>[9-10]</sup>:一方面IP地址充当了主机身份标识,用于在通信过程表示会话的端点;另一方面IP地址又作为位置标识,在路由系统中被用于数据包的寻址转发。这种双重语义在互联网

使用之初并没有产生安全问题,因为最初的互联网是面向科学研究,而非商业应用设计的,设计者认为使用互联网的终端是静止的、安全的、可信的<sup>[11]</sup>。但随着互联网被推向商业社会,移动人群成为网络的主流使用者,互联网使用场景发生了变化,而TCP/IP却没有发生本质改变。移动互联网时代,IP地址作为位置标识,在用户位置改变时也要随之改变,否则无法进行数据包的正确路由;作为用户身份属性,又要求无论用户位置怎么改变其IP地址保持不变<sup>[12]</sup>。IP双重语义引发的矛盾随之凸显,用IP标识用户身份属性也变得不再可信。

### 2.2 可信身份网络设计

针对IP集成身份和位置双重属性的缺陷,设计了一种基于身份和位置分离思想<sup>[13-14]</sup>的可信身份网络。可信身份网络将用户的身份标识和位置标识分别用接入标识(AID)和路由标识(RID)表示,网络从功能上抽象为接入服务节点(ASN)和身份位置寄存器(ILR)两部分。AID和RID的作用如下:

(1) AID在用户开户过程中由网络管理者根据用户真实身份分配、管理,作为用户接入网络的身份标识。AID与用户身份信息绑定,作为开户信息保持不变。用户接入网络时,通过基础网络的认证机制实现用户合法性认证后,才能被赋予对应的AID,以保证AID作为身份标识可信。

(2) RID用于标识用户当前接入位置。在用户初始接入网络或者移动过程中,由为用户接入服务的ASN为用户分配和管理RID。当用户从一个ASN移动到新的ASN接入时,需要由新的ASN重新为用户分配新的接入位置标识RID。

可信身份网络架构中,ILR用于记录用户的(AID, RID)映射关系。多个ILR构成映射网络,集中管理网络中所有用户的映射关系。用户初始接入网络时,ASN需要生成映射关

系(AID, RID),并将映射关系上报给ILR。用户移动过程中一旦发生RID更新,需要及时通知ILR更新映射关系,以保证映射网络中每个用户的(AID, RID)映射关系都能表示用户当前的接入位置。

可信身份网络架构下的通信过程如图1所示:

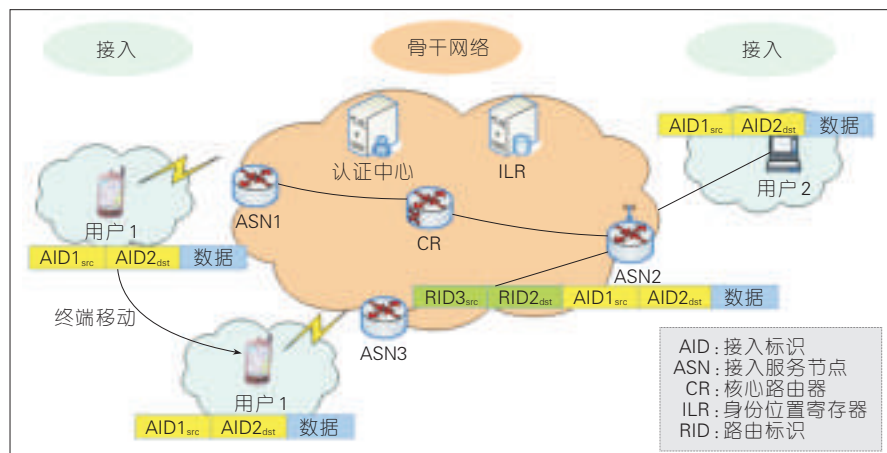
用户在发生跨ASN的移动时,ILR需要及时更新用户的映射关系。例如用户1初始通过ASN1接入网络,ASN1需要将用户1的映射关系(AID1, RID1)上报给ILR。当用户1从ASN1接入移动到ASN3接入,ASN3需要将用户1的最新映射关系(AID1, RID3)上报给ILR,ILR用最新的映射关系替代原有的映射关系,并通知ASN1解除用户1的映射关系。用户1向用户2发起通信,只需知道用户2的身份标识AID2,而不需要知道用户2的当前接入位置,即用户1无论在什么位置,发送的报文始终以源地址AID1,目的地址AID2封装。假设用户1从ASN1移动到ASN3接入,并向用户2发起通信,ASN3接收用户1的报文后,通过向ILR查询获知用户2的映射关系(AID2, RID2)。ASN3在上述报文外层用源地址RID3目的地址RID2进行封装。此后,路由系统根据目的地址RID2将所述报文路由转发至用户2当前接入所使用的ASN2,ASN2将报文作解封装处理后发送给用户2。

上述通信过程中的数据包在核心网络中根据RID进行路由,AID仅标识用户身份,不参与路由过程。用户只有通过合法性认证才被赋予对应AID,保证身份标识的可信。可信身份网络中的身份标识由运营商集中管理维护,可应用于所有互联网业务。在通信实现过程中,AID、RID可以继承基于IP的路由编号机制,使身份信息不易被用户感知。

### 2.3 可信身份网络的安全优势

可信身份网络将身份属性和位





▲ 图1 可信身份网络通信过程示意

置属性作了彻底分离,在基础网络层面建立了统一的身份标识体系,一定程度上解决了传统网络长久面临的安全隐患。如图2所示,可信身份网络安全模式主要体现在:

(1) 身份标识唯一真实可信。网络为用户在全网范围内分配唯一的身份标识,且在开户过程中就将其与用户身份信息进行强关联。用户经过合法性认证后,才可使用身份标识开展业务。身份标识的唯一性、真实性、防冒用、防篡改保证了用户从事网络活动时身份的可信性。

(2) AID和RID的作用域使得用户和核心网络形成逻辑隔离。身份标识作用于用户和ASN之间的接入网络,位置标识作用于各ASN组成的核心网络。AID和RID作用域的区分实现了网络拓扑对用户的隐藏。用户只能使用身份标识发起通信,无法获知位置标识,这就使得用户无法直接访问中间网络设备,避免了网络设备遭受用户侧直接攻击。

(3) 通信过程中每个数据包都携带身份标识AID,便于网络管理。可信身份网络中的每个数据包都封装有AID标识,且实现端到端传递。无论用户的接入时间、地点等接入条件是否改变,数据包携带的AID都不会发生变化,因此一旦网络设备发现恶意用户的攻击,就可根据AID对其实施有效阻止,而不会影响到网内的其

他用户,便于网络实施主动防御。

可信身份网络使用身份标识AID实现网络实名制,如表1所示,与现有网络实名制体系<sup>[15]</sup>比较,这种实现机制存在众多优势。

### 3 基于可信身份网络的安全应用

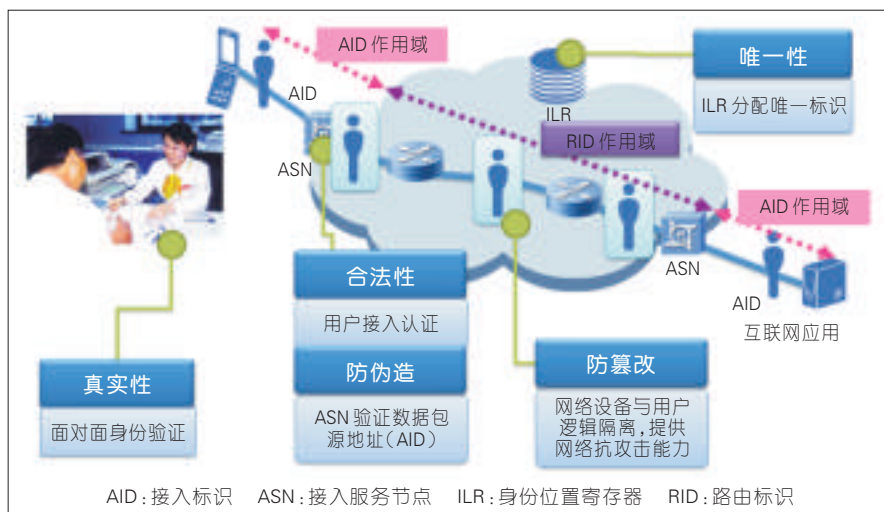
图3给出了基于可信身份标识的安全管理应用。在可信身份网络架构下,用户和ICP在申请接入网络时,都需要进行实名验证。网络运营商根据用户和ICP提交的身份信息,向监管中心提请身份验证。监管中心可根据用户或ICP的诚信档案、身份信息等对其进行合法性验证。验证通过之后,通知网络为用户或ICP

分配身份标识AID,网络将分配给用户或ICP的AID同时报送给监管中心,在监管中心实现用户或ICP的身份信息和AID的关联。由于可信身份网络架构中的每个通信数据包都携带AID,因此可以基于AID对用户和ICP的网络行为进行管控。一旦发现非法或可疑行为,网络可根据AID进行及时阻断,并可进一步根据AID进行跟踪溯源。

基于可信身份标识AID可开展一系列安全管理和应用,以改善网络安全性能:

(1) 数据报文接收方可根据身份标识判断信息来源的可信性。网络管理者也可根据数据流中的身份标识对网络行为、网络内容进行快速溯源,对于非法行为进行及时阻断,快速识别攻击源,改进追溯机制,提高网络安全管理效率,压缩网络攻击的实施空间,扭转攻防成本不对称的局面。另外一旦发现恶意攻击,可直接屏蔽AID标识对应的攻击源,而无需对整个区域网络实施阻断,减少攻击处理所带来的负面影响。

(2) 实现内容分级保护。可信身份标识在网络中是全程全网传递,运营商和ICP可根据身份标识识别用户的身份、年龄等特征,实现基于身份标识的内容分级提供,为不同的社会群体提供不同的网络信息,有利于

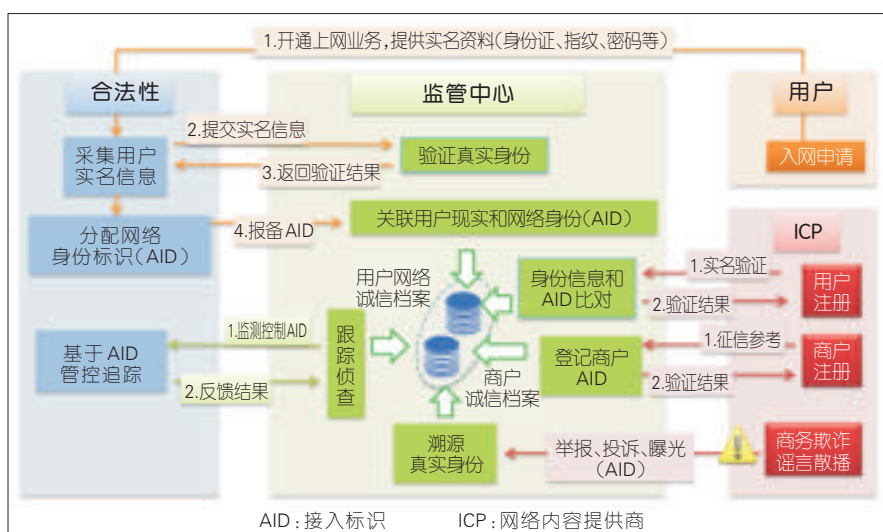


▲ 图2 可信身份网络安全模式

▼表1 可信身份网络与现有网络实名制体系的比较

	现有网络实名制体系	可信身份网络实名制机制
安全性	个人身份信息存放于ICP处, ICP众多, 难以监管, 容易造成信息泄漏	个人信息集中存放于运营商处, 不对第三方开放, 最大程度保护用户隐私
身份可信度	身份信息依赖用户上传, 不可信, 易篡改, 真伪难辨	用户开户过程, 需面对面进行身份验证确认, 身份可信
实施对象数量	ICP数量众多, 且新业务、新ICP不断出现, 身份信息难以管理维护	运营商在网络层一次性实施, 应用于所有业务, 易操作, 易维护
用户使用习惯	用户使用互联网业务时没有登记真实身份的习惯, 实名制易产生疑虑和抵触	用户办理开户业务时要求核实身份, 开展业务时用户不感知身份信息, 实名制易实施

ICP: 网络内容提供商



▲图3 基于可信身份标识的安全管理应用

建立网络社会秩序, 净化网络环境, 避免未成年人遭受不良信息的侵害。

(3) 虚拟身份和可信身份绑定, 丰富互联网应用。可信身份网络架构要求用户开展各种应用都需携带统一的身份标识, 这不利于互联网应用的发展, 用户可能也难以接受。通过虚拟身份和可信身份绑定, 虚拟身份被用户和ICP在应用层使用, 数据传输仍然携带可信身份标识, 这种实现一方面延续了现有互联网应用的虚拟和开放性, 使得用户仍可使用不同的虚拟身份开展不同的应用, 便于应用不断丰富, 另一方面数据携带身份标识也便于网络监管。

## 4 结束语

传统互联网由于IP的名址二义性以及标识用户IP地址不固定的特

点, 造成了难以识别网络访问主体, 使得网络始终处于易攻击、难防控的被动局面。文章通过设计一种可信身份网络架构, 实现了名、址彻底分离, 用户身份固定, 用户和核心网络逻辑隔离, 从结构上屏蔽了用户侧直接攻击, 提升了网络安全性能。基于固定身份标识开展的网安管理应用, 有助于提高攻击源的快速识别能力和溯源效率。可信身份网络架构从技术手段上为网络安全提供保障, 同时也为互联网应用的不断发展丰富提供了安全可靠的网络环境。

### 参考文献

- [1] 中国互联网信息中心. 第35次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL]. <http://cnnic.cn/hlwfzy/hlwxbzg/>
- [2] 张再云, 魏刚. 网络匿名性问题初探[J]. 重庆社会科学, 2003, 32(2): 76-78
- [3] 陈剑勇, 吴桂华. 身份管理技术及其发展趋势[J]. 电信科学, 2009, 25(2): 35-40

- [4] 陈周国, 蒲石, 祝世雄. 匿名网络追踪溯源综述[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(增刊): 111-117
- [5] 伏晓, 蔡圣闻, 谢立. 网络安全管理技术研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 15-19
- [6] 高荣林. 网络实名制可行性探讨[J]. 前沿, 2010, 269(15): 74-76
- [7] 陈兵, 邹翔, 周国勇. 网络身份管理发展趋势研究[J]. 信息安全, 2011, (3): 5-8
- [8] 史亮, 庄毅. 一种定量的网络安全风险评估系统模型[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(18): 146-149
- [9] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593-598
- [10] YAN Z, ZHOU H, ZHANG H. A Novel Mobility Management Mechanism Based on an Efficient Locator/ID Separation Scheme[C]// First International Conference on Future Information Networks. USA: IEEE, 2009: 11-16. DOI: 10.1109/ICFIN.2009.5339610
- [11] 吴强, 江华, 符涛. 移动互联网 Naming 网络技术发展[J]. 电信科学, 2011, 27(4): 73-78
- [12] 许东晓, 蒋铃. 一种新型的位置标识与身份标识分离方法[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(2): 233-236
- [13] MOSKOWITZ R, NIKANDER P, JOKELA P, et al. Host Identity Protocol: IETF RFC 5201 [S]. April, 2008
- [14] KAFLE V P, OTUSUKL H, INOUE M. An ID/Locator Split Architecture for Future Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2): 138-144. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5402677
- [15] 马丁, 李丹. 网络“实名认证, 网名上网”技术研究[J]. 通信技术, 2014, 47(1): 91-96

### 作者简介



毛玉欣, 中兴通讯股份有限公司高级工程师; 主要研究方向为移动互联网、网络安全; 有15项发明专利和26篇国际标准提案。



郝振武, 中兴通讯股份有限公司专家级高工, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室成员; 主要研究方向为移动互联网、网络安全; 有32项发明专利和30篇国际标准提案。



江家仁, 中国电信股份有限公司上海研究院高级工程师, 移动互联网系统与应用安全国家工程实验室成员; 主要研究方向为移动互联网安全技术及安全产品攻防技术。

# 泛在信息化智能制造系统

## Ubiquitously Information-Based Smart Manufacturing System

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0062-005

**摘要:** 认为当前亟需泛在信息制造技术,使生产制造过程在广度上实现互联互通,在深度上实现信息空间和物理空间的融合。为此,提出了一种泛在信息化智能制造系统及相关技术群,实现制造资源的网络化互联,信息资源的语义化表达和制造服务的自组织运行。此外,还指出如何实现多种数据流的混合传输,如何实现异构信息的集成与互操作,以及如何面向复杂时空关系建立抽象模型,是需要解决的挑战性问题的。

**关键词:** 智能制造;网络化制造;工业控制网络;信息物理融合系统;服务化

**Abstract:** In this paper, we consider that ubiquitous information manufacturing technology is needed to realize interconnection in the extent, and achieve integration of cyber space and physical space in the depth. Therefore, a ubiquitously information-based smart manufacturing system and its related enabling technologies are proposed. In this way, manufacturing resources are networked, information resources are semantically described and manufacturing services are self-organized. More challenge problems are also pointed out, such as how to transport mixed data flow, how to integrate and interoperate heterogeneous information, and how to build the abstract model facing the complex space-time relationship.

**Key words:** smart manufacturing; networked manufacturing; industrial control network; cyber-physical systems; service oriented

于海斌/YU Haibin<sup>1</sup>  
王鹏/WANG Peng<sup>1,2</sup>  
曾鹏/ZENG Peng<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

制造业经历多年发展,企业内部业务分工日趋明确,总体上可以划分为两大领域,即纵向生产管理控制和横向产品生命周期管理。根据 ANSI/ISA 65<sup>[1]</sup>和 IEC 62264-3<sup>[2]</sup>的定义,纵向生产管理控制可以概括为3个层次:经营决策、计划调度和生产控制;横向产品生命周期涉及4个领域:产品设计、工程实施、生产运行和产品服务。随着自动化、计算机和网络技术的发展,上述不同领域和层次逐渐形成了相应的计算机系统和网

络,其中计算机系统包括企业资源计划系统(ERP)、制造执行系统(MES)、数据采集与监测控制系统(SCADA)、分布式控制系统(DCS),以及包括计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助工程(CAE)在内的计算机辅助系统(CAX);网络包括互联现场设备、控制器、传感器的现场总线、工业以太网、工业无线网络,以及企业管理所需的以太网和互联网等<sup>[3]</sup>。

然而,种类繁多的系统和网络造成了以下两方面问题:

(1)在广度上,部分网络虽然实现了少数系统的互联互通,但是企业内部仍然存在大量信息孤岛,受时间、空间的限制,人与人、系统与系

统、人与系统之间还无法建立起广泛的互联,信息无法在企业内部高效地流转;

(2)在深度上,数字化制造的发展,虽然初步形成了信息空间的概念,但是信息空间还未能实现与物理制造空间的深度融合,无法根据物理空间的需求,主动提供数据、应用和服务。

综上所述,当前制造业企业亟需广泛、深度互联的基础,纵向上打破系统之间的壁垒,横向上打通信息与物理的隔阂,实现跨层次、跨领域的业务集成,提高制造业企业的运行效率和敏捷性。

与此同时,随着芯片制造、无线宽带、射频识别、信息传感及网络业务等信息通信技术(ICT)的发展,信息网络已更加全面、深入地融合人与人、人与物,乃至物与物之间的现实物理空间与抽象信息空间,并向无所不在的泛在网络方向演进<sup>[4]</sup>。

根据国际电信联盟的定义,泛在网络是指在预订服务的情况下,个人和/或设备无论何时、何地、何种方式以最少的技术限制接入到服务和通

收稿时间: 2016-09-20

网络出版时间: 2016-12-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA06020500); 国家自然科学基金(61533015、61233007)



信的能力<sup>[5]</sup>。泛在网络可以将信息空间与物理空间深度融合,其服务能够以无所不在、无所不包、无所不能的方式,实现在任意时间、地点,任意的人、物都能顺畅地通信,获得个性化的信息服务。

显然,泛在网络的相关理念、技术和方法有助于解决制造业当前面临的问题。正是在这种背景下,有学者提出了泛在信息制造技术的概念:泛在信息制造技术是以泛在网络为基础,以泛在感知为核心,以泛在服务为目的,并以泛在智能拓展和提升为目标的综合性、一体化的信息处理技术<sup>[6]</sup>。

泛在信息制造技术为解决制造业当前面临的问题提供了全新的思路 and 手段:将物理制造空间中跨层次、跨领域的物理制造资源映射到信息空间,从广度上打破信息壁垒,实现人、制造设备、生产过程的泛在互联互通;在深度上实现制造信息空间与物理空间的深度融合,按需提供主动的智能制造服务。因此,泛在信息制造技术的提出符合当前技术发展趋势和产业需求。

## 1 泛在信息化智能制造系统的架构

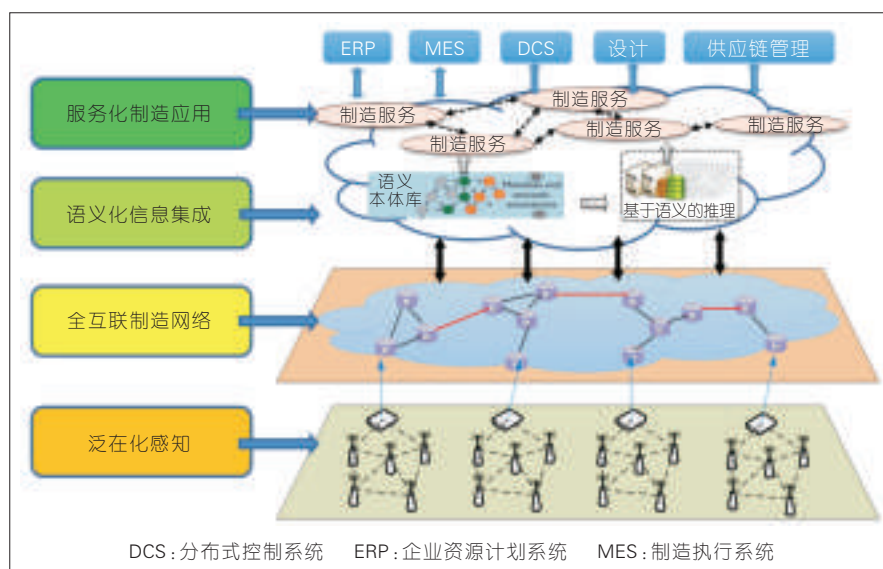
根据泛在信息制造技术的内涵,基于该技术的泛在信息化智能制造系统应当要满足以下3方面的功能需求。

(1) 制造实体网络化:分布式物理资源接入、数据感知和信息传输,要求系统具备网络化能力;

(2) 信息资源模型化、语义化:多尺度、异构虚拟资源的统一组织,要求虚拟资源的形式是模型化的,并且具备丰富的语义;

(3) 制造能力服务化:支持多种应用业务协作式运行,需要系统为不同的业务提供核心服务。

为此提出了如图1所示的泛在信息化智能制造系统的4层架构,包括:泛在化感知层、全互联制造网络



▲ 图1 泛在信息化智能制造系统的架构

层、语义化信息集成层和服务化制造应用层。

首先,网络化是泛在信息化制造系统的本质特征。针对制造系统网络化的特殊需求提出了两层的网络架构,其中泛在化感知层实现与生产过程密切相关的现场物理资源泛在接入、感知,在此之上全互联制造网络层使现场级传感网、控制网与企业级管理网、互联网实现扁平化、对等化互联。

其次,模型化是信息空间的虚拟信息资源统一组织的必要形式,语义化是异构模型能够跨层次、跨领域集成的核心。一方面,模型化是信息资源集中组织的有效手段;另一方面,语义化是模型能够进行跨层次、跨领域异构集成的核心。针对这种需求提出了语义化信息集成层,基于模型化和语义化手段,实现跨层次、跨领域虚拟信息资源的统一组织、集成和管理。

最后,服务化是制造物理空间与虚拟信息空间实现集成的技术手段。制造服务聚集在信息空间根据具体业务特点,按需进行组合,实现制造应用的动态自组织。因此,针对系统服务化的需求提出了服务化制造应用层,为具体的制造应用业务运

行提供核心服务。

## 2 泛在信息化智能制造系统的支撑技术群

图1所示的泛在信息化智能制造系统的架构需要相应技术群才能支撑其系统特征。本节分别总结了各层相应的技术群。

### 2.1 面向泛在化感知的无线传感网技术群

面向泛在化感知的无线传感网技术群是指实现工业现场传感器、控制器、生产设备接入、感知和控制的一系列无线传感技术<sup>[7]</sup>。作为泛在信息化制造系统中虚拟信息空间与物理制造空间的接口,该技术群一方面从物理制造空间获取数据并映射入信息空间;另一方面接收信息空间的指令,完成对物理制造过程的控制。如图2所示,该技术群具体包括两方面:物理资源接入技术<sup>[8]</sup>和物理过程感知技术<sup>[9]</sup>。在资源接入方面,包括面向多种协议的物理资源即插即用技术,即根据协议类型、设备类别、生产流程等信息动态适配多种网络协议,为资源构建逻辑链路,满足其通信关系。在感知方面的主要支撑技术包括智能传感器技术<sup>[10]</sup>和以无线

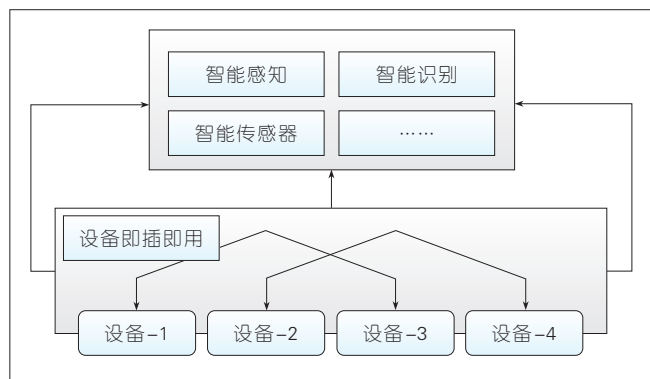


图2  
面向泛在化感知的  
无线传感网技术群

射频识别(RFID)为代表的智能识别技术<sup>[11]</sup>等。

在无线传感网技术的支撑下,工业现场的信息泛在化感知和设备可移动运行促进信息流转,提升系统运行效率和信息-物融合深度。此外,无线传感网模块化、可重构、即插即用等特点,能够最大限度满足底层系统对可组合性的需求,实现协作运行。

## 2.2 面向全互联制造网络的组网与传输技术群

面向全互联制造网络的组网与传输技术群是指实现工厂全覆盖,管理和控制业务混流传输,并提供安全可靠保障的一系列组网与传输技术。作为泛在信息化制造系统中完成网络化互联的核心,该技术群基于互联网的传输控制协议(TCP)/互联网协议(IP)架构实现对工厂管理网络、控制网络、传感网络进行全面互联,并与互联网集成,实现无缝信息传输。如图3所示,该技术群的组成主要体现在两个方面:一是对当前现场传感网、设备网采用的专用传输协议的IP化设计<sup>[12]</sup>,具体包括针对嵌入式设备的IP协议裁剪技术、针对嵌入式设备的低开销IP协议实现技术、面向完整和裁剪后IP的多协议适配和转换技术和轻量级IP设备的管理与维护技术;二是信息流混合传输服务质量(QoS)保障技术<sup>[13]</sup>,具体包括面向扁平网络的实时流交换传输技术、面向异构网络的资源动态认知与管理技术和面向混合业务流的

流量控制技术。

上述技术群通过IP化手段,实现网络扁平化,同时提供混合传输保障机制,实现了不同业务的按需服务。

## 2.3 面向时空动态制造信息资源的语义化集成技术群

面向时空动态制造信息资源的语义化集成技术群是指实现制造业中跨层次、跨领域的海量、异构信息资源语义化描述、存储、集成、组织与管理的一系列技术群<sup>[14]</sup>。如图4所示,该技术群主要包括3个方面。首先,底层网络中信息资源如原始数据等,其质量不高,存在大量错误、不完

整或多余的原始数据。因此,需要采用数据清洗技术、过滤技术、压缩技术和消冗技术等,处理质量较差的原始信息资源,保证其正确性<sup>[15]</sup>。其次,泛在信息化制造系统中大量跨层次、跨领域信息资源不具备统一的格式。因此,采用数据建模等语法转换技术对多种语法格式的信息资源进行规范化处理,保证信息的语法一致性<sup>[16]</sup>。最后,异构信息资源只有具备统一的语义,才能实现语义级互操作性,直接被跨层次、跨领域的应用业务访问和使用<sup>[17]</sup>。因此,采用语义转换技术,对模型化后的信息资源进行语义标注,构建统一的语义模型。

在上述技术群支撑下,跨层次、跨领域的虚拟信息资源实现了模型化、语义化组织与管理,在统一层面上根据上层应用业务的特点,为其提供所需的信息资源。

## 2.4 面向制造业务的服务化技术群

面向制造业务的服务化技术群是指一系列实现物理/虚拟资源服务化封装、注册、查询、组合、部署与管理的技术,以模块化、服务化的模式,

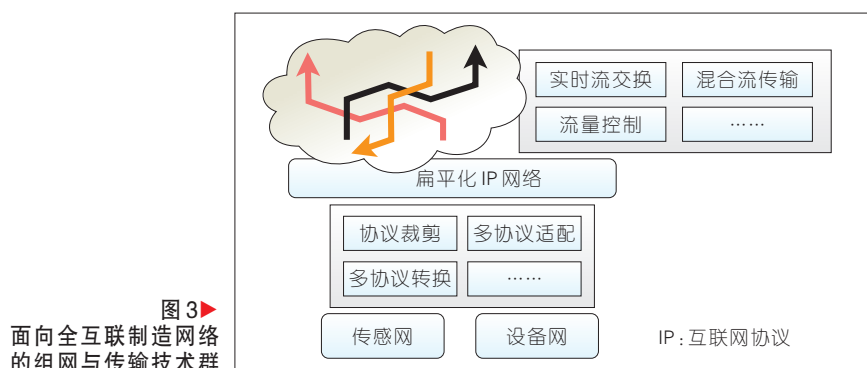


图3  
面向全互联制造网络的  
组网与传输技术群

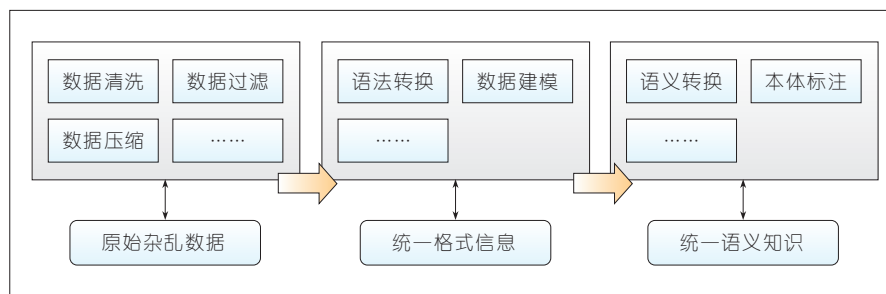


图4 面向时空动态制造信息资源的语义化集成技术群

完成制造应用的动态自组织<sup>[18]</sup>。如图5所示,该技术群主要分为3类:一是服务的封装和注册技术,是指采用服务化和虚拟化手段,将各种资源进行服务化封装,并在服务库中完成注册<sup>[19]</sup>;二是服务的查询与组合技术,是指根据应用业务的需求,在服务库中查找合适的服务,并根据规则进行组合<sup>[20]</sup>;三是服务的部署与管理技术,是指将服务部署到具体的软硬件资源上,并根据具体的业务要求对服务的执行过程进行监测、控制与调度,满足共享资源上不同业务的运行要求。服务化首先将软、硬件资源抽象为简单的计算、存储、传输等基本服务,在此基础上,根据服务的组合规则,将基本服务组合为复杂的诸如加工、控制、监测、诊断、设计等服务,并且在面向具体业务实例化之后,可以满足不同业务的应用需求。

正是在服务化的这种特性支撑下,系统能够以开放的、可扩展的方式集成多种服务。并且能够随着业务的需求变化动态组织相应的服务,使得系统功能具备可演进性。

### 3 实现泛在信息化制造面临的技术挑战

#### 3.1 异构动态网络环境下,多流混合传输的路径规划与流量控制

泛在信息化制造系统的全互联

网络基于IP将传感网、控制网、管理网互联构成扁平化的异构传输网络,实现控制、管理和知识流的混合传输,但控制流传输需要保障实时性、可靠性,管理流和知识流传输需要保障吞吐量和带宽利用率,管理人员的移动性使得网络拓扑和知识流的传播具有很强的动态性。

综上所述,针对控制、管理和知识流不同的应用需求和负载特征,同时考虑工业物理网异构和拓扑结构的动态变化,构建针对时延、可靠性、能耗、带宽利用率等混合关键性指标的网络资源调度策略和控制方法,是泛在信息化制造所面临的技术挑战之一。

#### 3.2 工业多维、异构信息资源的集成与互操作

泛在信息化制造需要构建跨域、跨层的统一信息资源组织与管理体系统,但设计域,实施域,运行域,维护域涉及多维异构的信息资源。一方面信息格式不同,既有结构化的生产数据、控制指令、设计模型等,也有非结构化的声音、图像、文本等信息;另一方面是信息的含义不同,各领域涵盖了多个学科,包括物理、化学等工艺知识,热学、力学等结构知识和电子、电气等自动化知识。因此,如何构建可集成、互操作的统一信息模型是泛在信息化制造面临的又一技术

挑战。

#### 3.3 面向制造物理空间复杂时空

##### 关系的抽象与建模

泛在信息化制造系统的关键是信息空间能够准确对物理空间进行抽象与建模,以实现信息与物理的深度融合。制造物理空间生产过程具有明确的时间和空间特性,并且时空特性耦合性强,如描述流程工业复杂的物理、化学反应过程,通常采用动态偏微分方程来构建相关的机理模型。而传统意义上,信息空间的建模和抽象过程多面向离散事件以及解耦的多变量关系,显然无法实现对制造物理空间连续物理过程的抽象和建模。因此,面对制造物理空间复杂的时空关系,信息空间如何进行描述、抽象和建模,是泛在信息化制造面临的一大技术挑战。

### 4 结束语

当前,在中国相继推出“工业化信息化两化融合”“互联网+”行动计划、“中国制造2025”等一系列顶层设计方案的大背景下,无论是代表传统力量的制造业,还是代表新兴力量的互联网界,都在积极探索中国制造的创新模式,如何寻找到符合中国特色的智能制造模式成为共同关注的焦点。泛在信息化制造正是在制造业内部需求拉动,外部ICT使能技术推动的基础上,提出的一种符合当前技术、政策发展趋势的智能制造创新模式,因此开展泛在信息化制造相关理论研究、技术攻关、工程研发与应用推广等方面的工作,有利于国家宏观政策的落实,能够切实推动中国制造业转型和自主创新等。

#### 参考文献

- [1] International Society of Automation. Enterprise Control Systems ANSI/ISA 65[S]. New York: International Society of Automation, 2010:3
- [2] International Electrotechnical Commission. Enterprise-control System Integration-Part 3: Activity models of operations management IEC 62264[S]. Geneva:

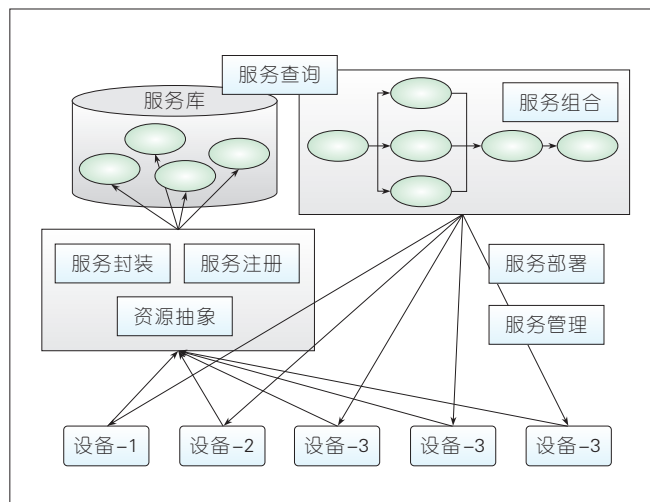


图5 面向制造业务的服务化技术群示意图



- International Electrotechnical Commission, 2013:4
- [3] SAUTER T. The Three Generations of Field-Level Networks—Evolution and Compatibility Issues[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3585–3595. DOI: 10.1109/TIE.2010.2062473
- [4] 张平, 苗杰, 胡铮, 等. 泛在网络研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(5): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5321.2010.05.001
- [5] International Telecommunication Union. Overview of Ubiquitous Networking and of Its Support in NGN ITU-T Y.2002 (10/2009) [S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2009:10
- [6] WANG T R. Advanced Manufacturing Technology in China: a Roadmap to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2010
- [7] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2009, 46(10): 4258–4265. DOI: 10.1109/TIE.2009.2015754
- [8] DEMIRKOL I, ERSOY C, ALAGOZ F. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 115–121. DOI: 10.1109/MCOM.2006.1632658
- [9] STANKOVIC J A, ABDELZAHER T F, CHEN Y L, et al. Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(7): 1002–1022. DOI: 10.1109/JPROC.2003.814620
- [10] CHI Q P, YAN H R, ZHANG C, et al. A Reconfigurable Smart Sensor Interface for Industrial WSN in IoT Environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1417–1425. DOI: 10.1109/TII.2014.2306798
- [11] GADH R, ROUSSOS G, MICHEAL K, et al. RFID—A Unique Radio Innovation for the 21st Century[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(9): 1546–1549. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2053871
- [12] XIAO Y, CUI X Y, LI H, et al. A Protocol Simplifying Mechanism for a WSN Module [C]//Proceedings of 2010 International Conference On Electronics and Information Engineering (ICEIE). USA: IEEE, 2010: 474–477. DOI: 10.1109/ICEIE.2010.5559820
- [13] SUN W, YUAN X J, WANG J P, et al. Quality of Service Networking for Smart Grid Distribution Monitoring [C]//2010 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). USA: IEEE, 2010: 373–378. DOI: 10.1109/SMARTGRID.2010.5622072
- [14] WILLIAMS J W, AGGOUR K S, INTERRANTE J, et al. Bridging High Velocity and High Volume Industrial Big Data Through Distributed In-memory Storage & Analytics[C] //2014 IEEE International Conference on Big Data. USA: IEEE, 2014: 932–941. DOI: 10.1109/BigData.2014.7004325
- [15] WANG K, SHAO Y, SHU L, et al. Mobile Big Data Fault-tolerant Processing For e-health Networks[J]. IEEE Network, 2016, 30(1): 36–42. DOI: 10.1109/MNET.2016.7389829
- [16] O'SULLIVAN P, THOMPSON G, CLIFFORD A. Applying Data Models to Big Data Architectures[J]. IBM Journal of Research and Development, 2014, 58(5/6): 1–11. DOI: 10.1147/JRD.2014.2352474
- [17] NACHABE L, GIROD-GENET M, HASSAN B E. Unified Data Model for Wireless Sensor Network[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3657–3667. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2393951
- [18] KARNOUSKPS S, COLOMBO A W, JAMMES F, et al. Towards an Architecture for Service-oriented Process Monitoring and Control[C] //Proceedings of the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010:1385–1391. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675482
- [19] KARNOUSKPS S, BAECKER O, SOUZA L M S, et al. Integration of SOA-ready Networked Embedded Devices in Enterprise Systems Via a Cross-layered Web Service Infrastructure[C] //Proceedings of 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. USA: IEEE, 2007:293–300. DOI: 10.1109/EFTA.2007.4416781
- [20] KARNOUSKPS S, SAVIO D, SPIESS P, et al. Real World Service Interaction with Enterprise Systems in Dynamic Manufacturing Environments[C]//Artificial Intelligence Techniques for Networked

Manufacturing Enterprises Management. London: Springer, 2010:423–457. DOI: 10.1007/978-1-84996-119-6\_14

## 作者简介



**于海斌**, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师;研究方向为工业控制网络与系统、无线传感器网络、工业无线网络等;主持国家自然科学基金重点项目、国家杰出青年自然科学基金、国家重大基础研究计划(“973”计划)、科技部国家“863”项目等10余项,曾获得国家科技进步二等奖4项、技术发明二等奖1项;已发表SCI/EI收录论文100余篇,著书2部。



**王鹏**, 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生;研究方向为工业信息物理融合系统。



**曾鹏**, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师;主要研究方向为工业通信、无线传感器网络、智能制造;主持和参加科技部国家科技重大专项、中国科学院战略先导专项、科技部国家“863”项目、国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金重点项目10余项,曾获得辽宁省“百千万人才工程”百人层次人选、中国自动化产业世纪行年度人物、“中国标准创新贡献奖”一等奖、辽宁省科学技术科技进步一等奖等;已发表论文80余篇,其中SCI/EI检索50余篇。

# 《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:tech.zte.com.cn/submission,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,以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
  - 论文集中析出文献[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].学位授予单位所在城市名:学位授予单位,授予年份.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

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台:tech.zte.com.cn/submission

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。

---

双月刊 1995 年创刊 总第 134 期  
2017 年 6 月 第 23 卷 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:tech.zte.com.cn  
投稿平台:tech.zte.com.cn/submission  
电子信箱: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:2017 年 6 月 10 日  
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
定价:每册 20.00 元,全年 120.00 元