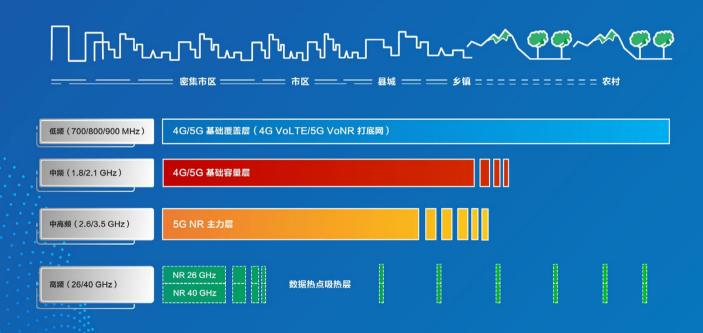


中兴通识技术 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

http://tech.zte.com.cn

2022年8月 • 第4期

专题: 多频段协同通信







《中兴通讯技术》第9届编辑委员会成员名单

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) **陈锡牛**(南京邮电大学教授) **摩正琨**(南京邮电大学教授)

主 任 陆建华(中国科学院院士)

副主任 李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 李建东(西安电子科技大学教授)

编委(按姓名拼音排序)

 陈建平
 上海交通大学教授
 唐宏
 中国电信 IP 领域首席专家

 陈前斌
 重庆邮电大学教授、副校长
 唐雄燕
 中国联通研究院副院长

 段晓东
 中国移动研究院副院长
 陶小峰
 北京邮电大学教授

葛建华 西安电子科技大学教授 王文博 北京邮电大学教授、副校长

管海兵 上海交通大学教授 **王文东** 北京邮电大学教授

郭 庆 哈尔滨工业大学教授王喜瑜 中兴通讯股份有限公司执行副总裁洪 波 中兴发展股份有限公司总裁王 翔 中兴通讯股份有限公司高级副总裁

洪 伟 东南大学教授 王耀南 中国工程院院士

黄宇红 中国移动研究院院长 卫 国 中国科学技术大学教授

纪越峰 北京邮电大学教授
 吴春明
 浙江大学教授

 江 涛
 华中科技大学教授
 邬贺铨
 中国工程院院士

蒋林涛 中国信息通信研究院科技委主任 向际鹰 中兴通讯股份有限公司首席科学家

金 石 东南大学首席教授、副校长 肖 甫 南京邮电大学教授

李尔平 浙江大学教授 解冲锋 中国电信研究院教授级高工

李红滨 北京大学教授 徐安士 北京大学教授

李厚强 中国科学技术大学教授 徐子阳 中兴通讯股份有限公司总裁 李建东 西安电子科技大学教授 续合元 中国信息通信研究院副总工

李乐民 中国工程院院士 薛向阳 复旦大学教授

李融林华南理工大学教授薛一波清华大学教授李少谦电子科技大学教授杨义先北京邮电大学教授

李自学 中兴通讯股份有限公司董事长 叶 茂 电子科技大学教授

林晓东 中兴通讯股份有限公司副总裁 易芝玲 中国移动研究院首席科学家

刘 健 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 张宏科 中国工程院院士

The state of the s

陆建华 中国科学院院士 张 卫 复旦大学教授

马建国 浙江大学教授 张云勇 中国联通云南分公司总经理

 石光明
 鵬城实验室副主任
 周 亮 南京邮电大学教授

 孙知信
 南京邮电大学教授
 朱近康
 中国科学技术大学教授

谈振辉 北京交通大学教授 祝宁华 中国科学院院士

目次

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 十佳皖刊 中国五大文献数据库收录期刊 1995 年创刊

热点专题▶ 多频段协同通信 01 专题导读 李少谦,唐雄燕,向际鹰 03 5G高低频组网协同机制与策略·····李福昌、王伟 14 多频段协同通信的新机遇——太赫兹通信感知一体化 …………… 胡田钰,李玲香,陈智 19 可见光通信星座整形与人工智能解调技术 …………………… 蔡济帆,徐增熠,迟楠 31 面向6G全场景的多频段协同覆盖扩展技术……………………… 韩书君, 董晴, 许晓东 专家论坛▶ 企业视界▶ 技术广角▶ 52 基于智能合约与区块链的算力交易机制 ………………………… 吕航,李佳聪,雷波,解云鹏

2022年第1一6期专题计划及策划人

- 1. 新型网络技术 中国联通研究院副院长 唐雄燕
- 2. 自然语言处理预训练模型 中国工程院院士 郑纬民
- 3. 智能超表面技术 中兴通讯技术预研总工 赵亚军 北京理工大学教授 费泽松
- 4. 多频段协同通信 电子科技大学教授 李少谦 中国联通研究院副院长 唐雄燕 中兴通讯首席科学家 向际鹰
- 5. 通信感知一体化 中国科学技术大学教授 卫国
- 6. **网络内生安全** 北京航空航天大学教授 刘建伟

Special Topic

Multi–Band Collaborative Communication						
01 Editorial LI Shaoqian, TANG Xiongyan, XIANG Jiying						
03 5G High and Low Frequency Networking Cooperative Mechanism and Strategy						
LI Fuchang, WANG We						
07 Design and Application on Collaborative Networking Scheme of 5G and WiFi6 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
LI Feile, YANG Wencong, ZHANG Xuebe						
14 New Opportunities for Multi-Band Collaborative Communication — Integrated Communications						
and Sensing at Terahertz Band · · · · · · HU Tianyu, LI Lingxiang, CHEN Zh						
19 Constellation Shaping and AI-Driven Demodulation Techniques in Visible Light Communication						
CAI Jifan, XU Zengyi, CHI Nar						
25 Multi-Band Merged Smart Networking for 6G · · · · · XIE Feng, WANG Fei, LIU Hanchad						
31 Multiple Frequency Bands Cooperation Based Coverage Extension Technologies for 6G Ful						
Scenarios HAN Shujun, DONG Qing, XU Xiaodong						
36 Conception and Technology of Dual Intelligence Collaborative Network · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
GU Jun, ZHANG Hongtao, GU Jiar						
42 6G:Collaborative Communication Across Multiple Frequencies ······ WANG Haiming, CHEN Yiy						
44 A Solar Energy Efficient Utilization Method for Communication Base Station Based on Prediction						
Technology XIONG Yong, LIU Mingming, HU Xianhong						
52 Computing Power Trading Mechanism Based on Smart Contract and Blockchain						
LYU Hang, LI Jiacong, LEI Bo, XIE Yunpeng						
58 Mechanism and Application of DAW-Based Low Latency 50G-PON						
ZHANG Weiliang, HUANG Xingang, MA Zhuang						

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*62*zh*P*¥20.00*6500*12*2022-08

Expert Forum

Enterprise View

Technology ► **Perspective**

多频段协同通信专题导读



专题策划人 >>> 🛚



李少谦,电子科技大学教授、博士生导师,IEEE Fellow,通信抗干扰技术国家级重点实验室主任,国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组成员,国家"863"计划5G重大项目总体组成员,国家"973"计划咨询专家组成员,国务院政府特殊津贴获得者;

主要研究方向为无线与移动通信技术;主持完成了30余项国家级科研项目,获国家、国防和省部级科技奖8次;获授权专利70余项,发表论文200余篇,出版专著多部。



唐雄燕,中国联通研究院副院长、首席科学家,"新世纪百千万人才工程"国家级人选,北京邮电大学兼职教授、博士生导师,工业和信息化部通信科技委委员兼传送与接入专家咨询组副组长,中国通信学会理事兼信息

通信网络技术委员会副主任,中国光学工程学会常务理事兼 光通信与信息网络专家委员会主任,开放网络基金会 (ONF)董事;长期从事通信新技术研发和管理,主要专业 领域为宽带通信、光纤传输、互联网/物联网、新一代网 络等。



向际鹰,中兴通讯股份有限公司首席科学家;先后从事无线3G、4G、5G、B5G和6G相关研发工作,研究领域包括基带、射频、软件、集成电路等;所提出和推动的SDR、Cloud Radio、局部动态Mesh、Pre-

5G、矢量处理器基带芯片平台等先后创造了数千亿产值; 获国家科技进步奖特等奖1项、二等奖及技术发明奖3项, 获得中国通信产业技术贡献人物、中华杰出工程师等称号; 发表论文多篇,申请专利多项。

信的本质是把各种资源(频谱、时间、空间等)转换为能力(容量、延迟、连接数、可靠性等),因此,为了提升通信能力,我们不仅要利用更多的资源,还要实现这些资源的高效利用。本期专题为"多频段协同通信",旨在探讨频谱资源的挖掘与利用技术。当前单一的频谱资源已经无法满足5G时代的速率需求,因此我们一方面需要寻找新的频谱资源,另一方面应充分挖掘可用频谱的潜力,实现多个频谱的协同通信。国际移动通信(IMT)2020和IMT2030推进组均将多频段接入和协同通信技术列为5G、6G的重要核心技术。

按照频率或波长划分,多频谱不仅包含5G中已使用的

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204001 收稿日期: 2022-07-16 Sub-6 GHz 低频段和毫米波(mmW)频段,还包括 6G 中正在研究的太赫兹(THz)频段,甚至红外、可见光波段;根据授权状态,多频谱可分为授权频谱与非授权频谱;按照双工类型划分,多频谱可分为对称与非对称以及频分双工、时分双工、灵活双工、部分全双工、全双工等;根据带宽性质的不同,多频谱分为连续频谱和离散频谱。

本期专题探讨了多频段协同通信的特性、应用场景、关键技术等,其中重点讨论了以往研究中比较缺失的技术方向,例如新频谱技术(THz、红外、可见光)、非授权频谱利用及其与授权频谱的协同方式、新的双工方式、离散频谱利用技术,以及其他多频段的协同通信——包括但不限于载波聚合(CA)/双连接(DC)/动态频谱共享(DSS)动态频谱共享等。

在频谱资源有限的情况下,多种频段之间的高效协同就

显得尤为重要。《5G高低频组网协同机制与策略》提出了一 种综合考虑业务需求、用户体验、终端能力、空口能力、网 络状态的协同机制。该机制利用智能化手段预测多层目标网 络的用户体验预期,实现用户与网络的最优匹配。

非授权频谱可以免费使用,但IMT长期以来缺失对非授 权频谱利用,而电气和电子工程师协会(IEEE) WiFi 则重 点关注非授权频谱。《5G与WiFi6的协同组网方案设计及应 用》从多视角分析了两者协同组网的必要性和可行性,提出 了优化后的5G与WiFi6协同组网系统架构,设计了关键网 元的软件架构和网络增强功能机制,并通过专网试点完成了 组网方案的应用验证,旨在为产业界的5G与WiFi6协同组 网方案规划和部署建设提供技术参考。

随着低端频谱资源的逐渐耗尽,未来移动通信必然走向 更高的频段,因此毫米波与太赫兹都将得到应用。《多频段 协同通信的新机遇——太赫兹通信感知一体化》提出面向 THz通感一体化的多频段协同技术,可以通过感知协同和通 信协同来提升THz通信性能。此外,文章还通过两个典型实 例给出了面向 THz 通感一体化的多频段协同关键技术和 挑战。

比太赫兹更高的频段是红外和可见光, 它们也被认为是 6G通信中的重要一环, 具有高信道容量、低电磁辐射、高 保密性等优势。然而, 高速发光二极管(LED) 可见光通信 系统受限于调制带宽与高功率下的非线性。对此,《可见光 通信星座整形与人工智能解调技术》提出了一种基于贪婪算 法的几何整形编码方式,并使用一个3层隐藏层的深度神经 网络(DNN)作为接收端的解码器,使系统的传输速率得到 提升,且能够承受更大的信号峰峰电压和偏置电流。该技术 是未来可见光通信中一项很有潜力和前景的技术。

《面向6G的多频段智能融合组网》从网络架构层次探讨 新的网络架构适配多频段融合的方法,并提出了一种新的面 向 6G 的多频段智能融合模型——Meta-cell 元小区+Stackfree 非栈式用户面,以支持高中低任意频段资源的智能编排 组合,从而按需满足组网目标。Meta-cell元小区和Stackfree 非栈式用户面通过在组件化、解耦、池化和虚拟化的基 础上叠加智能化可编排可配置,克服了现有多频段组网技术 不够灵活高效的问题,有助于赋能6G丰富多样的业务和组 网场景。

未来6G业务对覆盖能力提出了全面的需求。《面向6G 全场景的多频段协同覆盖扩展技术》探究了多频段协同使能 的全场景覆盖扩展技术,包括多频段协同组网、多频段协同 感知与多频段智能共享。

《双智协同网络:理念与技术》提出了一种多频多制式 移动网络中基于双层智能化互操作的新型协同方案,以满足 网络发展不同阶段及不同场景下的多目标优化要求。网络不 同阶段用户级智能与网络级智能相结合形成的双智矩阵,可 实现商用网络下差异化业务体验的精准满足,最大化网络总 体收益。

本期专题较为全面地反映了频谱高效组合利用技术创新 的最新成果。在此,对各位作者的大力支持和精心撰稿表示 衷心感谢!希望本专题在多频段协同通信的标准化和技术实 现方面起到重要参考和积极推动作用。

季少谦 唐雄蓮 向际鹰

2022年7月15日

5G 高低频组网协同机制与策略



5G High and Low Frequency Networking Cooperative Mechanism and Strategy

李福昌/LI Fuchang,王伟/WANG Wei

(中国联合网络通信有限公司研究院,中国 北京 100048) (The Research Institute of China Unicom , Beijing 100048, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204002

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1648.012.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-10

摘要:提出一种综合考虑业务需求、用户体验、终端能力、空口能力、网络状态的协同机制。该机制利用智能化手段预测多层目标网络的用户体验预期,实现用户与网络的最优匹配。该机制按照用户体验最优、网络效能最高的策略编排网络,避免了传统的单一协同机制带来的诸多问题。用户体验与网络效能双优的高低频协同机制与策略对于未来高低频多层网络的有机融合有着重要的理论意义。

关键词: 5G; 高低频; 多层网络; 协同机制

Abstract: A collaborative mechanism that comprehensively considers business needs, user experience, terminal capability, air interface capability, and network status is proposed. This mechanism uses intelligent means to predict the user experience expectation of a multi-layer target network, and realize the optimal matching between users and the network. The network is arranged according to the strategy with the optimal user experience and the highest network efficiency, which avoids many problems brought by the traditional single collaboration mechanism. The high and low frequency coordination mechanism and strategy of realizing both user experience and network efficiency are of great theoretical significance for the future organic integration of high and low frequency multi-layer networks.

Keywords: 5G; high and low frequency; multi-layer network; collaborative mechanism

人 2019年6月6日中国5G牌照正式发放至今,中国5G 商用已满3年。中国坚持适度超前的原则,积极稳妥 地推进5G网络建设,持续提升网络覆盖的深度和广度。截 至目前,中国累计建成并开通5G基站161.5万个,已建成全 球规模最大的5G网络。5G网络覆盖全国所有地市、县城城 区和87%的乡镇镇区。5G移动电话用户总数超4.13亿。中 国的5G建设已经进入了初步成熟期,并向着后成熟期或完 善期逐步演进。3.5 GHz和2.6 GHz是中国5G的首发和主力 频段, 承担着覆盖中国乡镇以上区域的职责, 是5G流量的 主要承载者。随着5G建设的不断深化,用户对5G服务泛在 性的需求也越来越强烈。运营商在积极筹建一个5G低频打 底网,为用户提供5G泛在性接入。国家也在积极推动能够 提供大容量、高速率的毫米波频段的规划和使用,组织开展 毫米波设备性能测试,为5G毫米波技术的商用做好准备。 届时,中国的5G网络将建设成为低、中、中高、高"四频 同堂"的成熟网络。如何协同好这四大频段,扬长避短,各 取所长,是未来网络建设和运营的重点和难点[1-3]。

1 频段覆盖特性和设备能力对比

电磁波传播具有一些固有的特征。根据"光速=频率×波长"的原理,频率越高,其波长越短,而波长越短的电磁波更容易被阻挡,那么就越接近直线传播;频率越低,其波长越长,它的绕射能力就会越强,那么传播得会越远。第3代合作伙伴计划(3GPP)为了更好地评估系统设计的性能,统一了0.5~100 GHz的传播模型,定义了城区场景、郊区、街区和室内场景的传播模型。根据传播模型公式,一方面,空间损耗与频率成对数关系,频率越高则空间损耗越大,同时信号随着距离增加衰减得也越快;另一方面,频段越高,可供分配的带宽也越大,提供的峰值速率也会越大。表1是不同频段对应的峰值速率与覆盖距离⁽⁴⁾。

无线基站设备的射频模块和天线设计也会依据频段高低和带宽大小有所区别。由于半波振子的间距大,低频设备在满足一定增益要求的前提下,天线尺寸一般较大,相应的通道数会相对较少。而高频设备由于波长小,半波振子的间距小,尺寸相应较小,可以容纳更多的通道数[5-6]。

▼表1各典型频段对应的峰值速率与覆盖距离

频段	频点	带宽/MHz	下行/上行峰值速率/(Mbit/s)	上行1 Mbit/s速率对应的覆盖距离/m				
低频	900 MHz	10	112/56	760(室内)				
中频	2.1 GHz	40	900/225	470(室内)				
中高频	3.5 GHz	100	1 500/400	400(室内)				
高频	28 GHz	400	2 400/800	440(室外)/ 不足百米(室内)				

表2是不同频段典型设备类型对应的设备硬件性能参数。

2 高低频协同组网与频段定位

根据频段覆盖特性和不同频段的设备空口能力,我们需要建设高低频多层网络,以满足多场景多业务的覆盖需求。理想的网络拓扑是将低频网络建设成一个连续覆盖的底层网络。它可以作为一个"探针",在实现用户泛在连接需求的同时,探知用户服务需求、位置需求和体验需求,再利用中频、中高频和高频来按需满足用户需求。中高频是为5G新分配的频段,也是运营商建设5G新空口(NR)的主力频段,覆盖中国乡镇以上区域:高频是待规划和分配的毫米波频段,未来主要用于分担5G容量和高流量区域的容量吸收;中频段是4G基础容量层,未来将按照业务发展情况适时进行重耕,并用于5G^[7]。图1为高低频协同组网理想拓扑图。

根据以上频段定位,利用公共频点优先级和专用频点优

先级可以实现用户在 Idle 状态和 Inactive 状态的高低频选择。我们可将主力覆盖频段设置为最高优先级。对于在业务连接态的用户,可以基于服务小区和邻小区的接收信号强度或质量来进行用户迁移。当用户所在服务小区的信号变弱或质量变差而相邻小区的信号变强或质量变好时,该用户将被迁移至信号强度高或信道质量好的邻小区,以保证其获得最优网络服务。除此之外,也可以利用载波聚合功能来提升用户的速率体验和覆盖体验。载波聚合的主辅小区间可以更灵活地做负载均衡,以充分利用各载波的空闲资源,实现资源利用率最大化。当开启负载均衡时,终端无须在小区间做切换,只需做多载波调度或跨载波调度,即可减少由切换带来的信令开销,避免用户体验下降。当载波聚合功能用在频段间隔比较大的两个频段时,其价值更多体现在高低频协同上,既可以利用高频段的大带宽为用户提供高速率,又可以利用作为主载波的低频段的较强传播特性以扩大用户覆盖范围^[8-9]。

▼表2各频段典型设备硬件性能参数

- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·									
频段	设备类型	通道数	天线最大增益	功率密度	下行用户峰值速率	上行用户峰值速率			
低频	RRU+天线	4T4R	16 dBi	8 W/MHz	112 Mbit/s /10 MHz	56 Mbit/s /110 MHz			
中频	RRU+天线	4T4R	17.5 dBi	8 W/MHz	900 Mbit/s /40 MHz	225 Mbit/s /40 MHz			
中高频	AAU	64T64R(192振子)	24.5 dBi	2 W/MHz	1.5 Mbit/s /100 MHz	0.4 Gbit/s /100 MHz			
高频	AAU	4T4R(512振子)	EIRP(最大增益-	+功率)=62 dBm/400 MHz	2.4 Gbit/s /400 MHz	0.8 Gbit/s /400 MHz			
AAU:有源天线单元		EIRP:等效全向辐射功率		RRU:射频拉远单元	T:发射 R	:接収			

▲图1高低频协同组网理想拓扑图

3 高低频协同机制与编排策略

传统的基于覆盖的单一协同机制给用户带来了诸多问题,如用户选择了信号好的频段但体验却变差了,小包业务在等待切换过程反而导致时延增大等。协同机制要利用好高低频多层网络中各层网络的优势,在满足不同用户、不同业务的不同需求的同时,实现网络效能的最优。协同机制的总体原则为用户体验最优、网络效能最高。协同机制既要满足用户的体验,也要考虑网络的耗能。

3.1 基于终端能力和业务特征的分层策略

基于终端和业务的协同策略,我们可以基于频段的定位和不同用户属性(如VIP用户、固定无线接入用户)或不同业务属性(如语音业务、面向企业业务)来实现分层配置策略。一些面向企业的业务,其数据包小、持续时间短,可能刚切换小区或还未切换,业务就已经结束了。另外,小区切换过程中带来的用户面中断时延,反而不利于用户体验,因此对这些业务触发小区切换的意义不大。本文提出了按照用户属性和业务属性来制定不同的用户接入和移动性的策略[10-11]。

(1) 基于用户属性的分层策略

根据运营商需要的频率选择优先级(RFSP),为VIP用户迁移一个专用载频,以实现基于RFSP的专用频点优先级和切换参数配置。

(2) 基于终端能力的分层策略

根据终端上报的能力,包括终端支持的频段、收发天线数、上下行流数等参数,配置专用频点优先级和移动性参数,以保证用户在移动过程中体验不下降。

(3) 基于切片类型的分层策略

基于单个网络切片选择辅助信息(S-NSSAI)类型配置专用 频点优先级和切换参数,将业务精准定位到规划的目标频段。

(4) 基于业务类型的分层策略

基于5G服务质量标识(5QI)的精细化切换参数配置, 实现业务的精准分层策略,如可以实现语音与数据业务的分 层策略配置。

(5) 基于业务量的分层策略

基于上行用户设备(UE)缓存状态报告(BSR)和下行分组数据汇聚协议(PDCP)缓存状态来识别大包业务,将大包业务迁移到中高频或高频大带宽的频点,提升用户体验。

(6) 基于移动速度的分层策略

基于频偏测量或者一定时间内的小区切换次数来识别

高/低速用户,将低速用户从专网迁出,实现专网专用,提 升高铁用户感知。

3.2 基于业务需求和网络能力的用户体验保持和提升策略

在明确终端能力和业务特性之后, 我们还需要判断网络 能力,才能实现业务与网络的精准匹配。关于网络能力,我 们不仅要考虑频段空口能力,还要考虑网络负荷状态。网络 负荷可以由无线资源控制 (RRC) 连接用户数以及PRB利用 率来表征。我们也可以根据网络负荷情况,制定协同机制。 例如,对于低负荷状态,如果两个载波的负荷都比较低,应 把用户集中到一个频层,这有利于5G基站设备的节能;对 于中负荷状态,将两个载波的负荷维持在均衡状态,可以避 免因单载波负荷过高而造成的用户体验下降, 提升整体的资 源利用率。但要想在用户体验不下降的前提下实现网络效能 最优,不仅需要综合考虑业务特性和网络能力,还需要根据 无线环境和网络能力来准确预测同一位置下不同频点和小区 的用户体验。基站通过实时监控每个用户的业务体验,并结 合人工智能对目标频网和小区进行体验预测,将用户快速迁 移到最优的目标频网和小区。该策略涉及用户在源小区的触 发机制和目标小区的体验预测两个关键机制。

(1) 用户体验的表征

下行用户体验可以通过下行速率、下行阻塞状态和下行信道质量等参数表征。

用户下行速率=每秒成功调度的下行数据量÷调度这些数据量所使用的时间。 (1)

用户下行阻塞状态有两个指标: 待发送数据量的清缓存时长和待发送数据的首包等待时长。待发送数据量的清缓存时长如公式(2)所示:

清缓存时长=(RLC+PDCP缓存数据量)÷下行速率。 (2)

待发送数据的首包等待时长是指RLC和PDCP各自缓存 队列中第一包数据到达时刻与当前时刻的间隔。

下行信道质量可以通过终端下行频谱效率、信干噪比 (SINR) 和参考信号接收质量 (RSRQ) 来衡量。

上行用户体验可以通过上行速率、上行阻塞状态和上行信道能力等参数表征。

用户上行速率=每秒成功调度的上行数据量÷调度这些数据量所使用的时间。 (3)

用户上行阻塞状态可以用发送数据量的缓存时长来表示,即上行待发送数据量与调度数据量的比值。

相对于下行信道能力的评估,上行信道能力的评估要复杂得多。原因在于每个物理资源块(PRB)的功率都相同,终端上行发射功率可以分配在1个或多个PRB上,这意味着

每个资源块(RB)的功率可以不同。终端可以通过调度更少的PRB来提高每个RB的SINR,那么上行的最佳速率就是选择最合适的调用RB数对应的上行速率。上行信道能力可以通过公式(4)来表示:

上行信道能力 =
$$\max_{1 \le i \le RB_{int}} \left[i \times 频谱效率(SINR_i) \right],$$
 (4)

其中,i为调用RB数, RB_{total} 为信道带宽对应的最大RB数,频谱效率是调用RB数为i时的信噪比所对应的频谱效率。

(2) 基于用户体验的频网选择触发机制

下行判决是指基站通过对终端"下行速率+下行阻塞状态+下行信道质量"的联合判决,来评估用户下行体验。当终端下行速率低、下行数传调度发生阻塞、下行信道质量变差时,用户下行体验就已变差,这时需要触发用户频网选择机制。

上行判决是指基站通过对终端"上行阻塞状态+上行信道能力"的联合判决,来评估用户的上行体验。当终端上行数传调度发生阻塞且上行信道质量变差时,该用户上行体验变差,这时需要触发用户频网选择机制。

(3) 基于体验预测的频网选择

传统目标小区的选择主要依赖于终端对目标频点或小区信号的测量,因此无法准确判断目标小区的负荷状态和空口能力。这样可能会出现信号强度已经满足切换门限但目标小区的空口能力差或网络负荷较重的情况,用户业务体验反而会变差。因此,目标小区的用户体验要结合目标小区的空口能力、负荷信息以及信道状态来做综合判断。

小区空口能力=(小区频谱效率×小区等效带宽)÷小区 RRC用户数, (5)

其中,小区频谱效率为小区频谱效率的平均值,小区等效带宽是根据小区总带宽、子载波间隔、下行时隙配比等因素归一化的结果,小区RRC用户数是处于连接态的各类用户数的总和。

目标小区负荷信息则包括:小区RRC用户数、小区上行PRB利用率、小区下行PRB利用率等。

目标小区信道质量信息包括上下行信号强度和信噪比等。目标小区信道质量信息可以利用无线指纹栅格知识库来获得,它是基站对于其覆盖范围内无线环境的一种记忆,不再以经纬度作为位置特征,而是以终端上报的服务小区信号强度和相邻信号的强度来作为位置特征,从而获取和预测对应位置信息下的信道质量信息。相比于位置信息,信号信息更直接反映了信道质量。我们利用人工智能,结合用户数据缓存状态、目标小区的信道质量、空口

能力及负荷信息来预测用户在多层网络中的业务体验,然后基于用户体验不下降的原则来进行频网选择和用户 迁移。

4 结束语

高低频多层组网是未来 5G 网络建设的趋势。面对日益丰富的终端业务和用户的差异化需求,传统的依靠频点优先级和信号强度来进行频网选择的方案无法发挥高低频多层组网的优势。只有综合考虑空口能力、终端能力、网络状态、业务需求等多方面因素,并利用智能化手段预测多层目标网络的用户体验预期,才能实现用户与网络的最优匹配。

参考文献

- [1] 5G"发牌"三周年! 我国 5G进入规模化应用关键期信息通信业跨越式增长 [EB/OL]. [2022-06-10].http://www.cww.net.cn/article?id=563443
- [2] 3GPP.Technical specification group radio access network; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz:TR 38.901v16.0.0 [S]. 2019
- [3] 3GPP. Technical specification group radio access network; NR; Physical layer procedures for control:TS 38.213v16.6.0 [S]. 2019
- [4] 王伟, 张涛, 李福昌. 5G 高低频协同组网方案研究 [J]. 邮电设计技术, 2021(3): 42-45
- [5] 张忠皓, 李福昌, 延凯悦, 等. 5G毫米波移动通信系统部署场景分析和建议 [J]. 邮电设计技术, 2019(8): 1-6. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.08.001
- [6] 袁满, 刘晓燕, 王科. 5G多频段组网和优化策略研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 16-21. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211784
- [7] 中国联通 . 中国联通 5G 基站设备技术白皮书 [EB/OL]. [2022-06-10] http://www.bomeimedia.com/China-unicom/index-02.1.html
- [8] 王伟, 张涛. 基于人工智能的TDD灵活时隙研究 [J]. 信息通信技术, 2021, 15 (5): 15-20
- [9] 中兴通讯. 中兴通讯无线智能编排网络白皮书 [EB/OL].[2022-06-10]. https://res-www. zte. com. cn/mediares/zte/Files/newsolution/Wireless/RAN/white_paper/orchesration_CH.pdf

作 者 简 介



李福昌,中国联通研究院无线技术研究中心总监,教授级高级工程师,国家知识产权局中国专利审查技术专家,北京邮电大学兼职教授,享受国务院政府特殊津贴;主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作;发表论文100余篇,出版专著1部,授权国家发明专利30余项。



王伟,中国联通研究院无线技术研究中心高级工程师;主要从事移动通信的标准制定、测试验证、课题研究等工作;研究方向包括5G无线设备硬件、5G组网方案、5G-Advanced功能演进等。

5G与WiFi6的协同组网方案 设计及应用



Design and Application on Collaborative Networking Scheme of 5G and WiFi6

李沸乐/LI Feile, 杨文聪/YANG Wencong, 张雪贝/ZHANG Xuebei

(中国联合网络通信有限公司研究院,中国 北京 100048) (The Research Institute of China Unicom, Beijing 100048, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204003

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220727.1906.002.html

网络出版日期: 2022-07-28 收稿日期: 2022-06-05

摘要:提出了一种5G+WiFi6协同组网方案。该方案设计了关键网元的软件架构和网络增强功能机制,并由专网试点完成了应用验证。该协同组网方案可在网络侧对通用WiFi用户和5G用户的统一管理进行调度,并利用WiFi6带宽资源弥补5G上行带宽的不足,大幅提升了上行带宽,提高了流量分担和无线资源使用的灵活性,节省了网络建设和终端改造成本。

关键词: 5G; WiFi6; 协同组网

Abstract: A 5G + WiFi6 collaborative networking scheme is proposed, in which the software architecture and network enhancement function mechanism of the key network elements are designed, and the application verification is completed by the private network pilot. The collaborative networking scheme can schedule the unified management of general WiFi users and 5G users on the network side, and use WiFi6 bandwidth resources to make up for the lack of 5G uplink bandwidth, which greatly improves the uplink bandwidth, and the flexibility of traffic sharing and wireless resource use, and saves the cost of network construction and terminal transformation.

Keywords: 5G; WiFi6; collaborative networking

期以来,蜂窝网络和WiFi是移动设备的两大主流技术。 5G网络有如下特点:传输速率高,理论带宽是4G的 100倍;容量大,可同时容纳100万设备;时延低,网络时延 从4G的20 ms降至1 ms; 可靠性增强, 通过波束赋形技术, 可支持在500 km/h的高速运动场景下的稳定通信。但5G的应 用和完善也面临着巨大挑战: (1) 中国5G主流的3.5 GHz频 段穿透能力较弱,信号在室内折损较大,且基站覆盖半径小。 相比于4G网络, 若要保证业务畅通, 5G网络需要部署大量 的基站,这导致短时间内5G信号覆盖率在社区、楼宇或家庭 的最后百米内有所不足。(2) 5G对终端设备的兼容性有一定 要求,而各行业在用设备大多不具备5G接入能力,因此设备 升级替换成本较高。(3) 5G某些方面的能力离新场景下的新 需求还有一定差距。例如,5G时代的个人业务由单向下载转 为主动分享, 行业业务需要大数据采集、智能监控、增强现 实(AR)/虚拟现实(VR)视频直播等海量高清视频的并发 回传。这导致上行速率大幅增加,对5G小区的上行容量是严 峻的考验。

影响WiFi速率的四大主要因素为空间流、子载波数

量、信号传输时间和编码方式。WiFi6在这些关键技术上取得了突破性进展,因此性能得到极大提升,主要包括最高 9.6 Gbit/s 的传输速率、更高的并发能力、更低的业务延时、更大的覆盖范围和更低的终端功耗等中。相比于 5G技术,WiFi6仍具有一些局限性:(1)平均时延较高。不同于 5G 网络的端到端通信模式,WiFi6中间的传输环节更多一些,因此受设备数、节点的影响较大,远达不到 5G 在超可靠低时延通信(URLLC)场景下的低时延需求。(2)时钟精度、时间精度不足。WiFi6 虽然采用上行正交频分多址(OFDMA)和多用户—多输入多输出(MU—MIMO)等技术,提供了多用户并发的能力,但和 5G 技术相比,它在时钟精度、时间精度上仍有不足。(3)WiFi6 移动性相对较弱,跨区建立连接速度较慢,导致设备跨区网络无缝切换效果不如 5G 技术。

WiFi6和5G在2019年上市,并在2020年基本部署到位。 两种技术将长期共存。5G技术和WiFi6技术协同将组成优势 互补的融合网络。

1 协同组网的必要性和可行性

1.1 必要性分析

当前,WiFi6网络与5G网络的主要应用领域和场景各有 侧重。WiFi6终端的连接范围有限,主要的应用领域是局域 网, 多部署于室内场所, 如小区、家庭等生活场景, 园区、 大厦等办公场景,车站、机场等交通枢纽场景,商场、银行 等商业场景。5G是广域网技术,目前主要以室外覆盖为主, 兼顾部分室内浅层覆盖,同时支持终端大规模的移动以及全 球漫游和设备安全保障。5G与WiFi技术融合后,二者在覆 盖能力上形成互补,将模糊无线和蜂窝连接之间的边界,扩 大网络覆盖范围,减少甚至消除覆盖盲区。同时,建设支持 WiFi接入的移动5G网络的完整方案,是提升公共热点服务 质量的一个关键举措。该方案可通过5G新口空(NR)来保 障关键人员和任务。作为补充,WiFi接入可以协助5G网络 满足热点区域密集的终端设备通信需求。终端在5G和WiFi6 网络中切换时, 无须反复登录认证或中断业务, 通过公共 WiFi 进行身份验证后便可连接到5G服务,从而支持公共 WiFi 热点与5G 网络之间的设备移动性和服务连续性。

5G+WiFi6协同网络还能为覆盖区内包含多种不同场景和应用需求的区域提供多层次的业务覆盖。一方面,利用5G网络的mMTC、URLLC能力,可以为具有海量机器类通信及低延迟高可靠性能要求的应用提供更出色的带宽体验和更好的无线连接,满足个人用户和行业用户的通信需求;另一方面,同时使用5G频段和WiFi频段两部分频率资源,可以提高流量分担和无线资源使用的灵活性,例如可以在5G原有上下行容量基础上,利用WiFi6频段上的带宽容量能力作为上行补充。

5G 网络一直主打面向个人(ToC)宏网和面向企业(ToB)专网业务,缺乏对家庭业务的支持,如交互式网络电视(IPTV)等。WiFi6在网络的业务功能上也有所缺失,如互联网协议(IP)多媒体系统(IMS)电话业务等。而5G+WiFi协同网络则可凭借优势,实现丰富的网络业务功能,从而满足用户的网络需求。

1.2 可行性分析

5G协议框架已经将异构网络的接入作为设计要点,第3代合作伙伴计划(3GPP)R15定义了不授信非3GPP网络融合架构^[2]。无线局域网(WLAN)部署在不受运营商控制和管理的非信任域,例如公共热点、家庭WiFi和企业WiFi等。用户终端(UE)连接到不受信任的非3GPP接入网络后再接入运营商的非3GPP互通功能(N3IWF)安全网关,之后分

别通过 N2 和 N3 接口连接 5G 核心网控制面和用户面功能。 3GPP R16中定义了授信非3GPP 网络融合架构[3]。其中,信 任域中WLAN的部署意味着运营商还负责运营和管理非 3GPP 接入。按终端设备是否具备 5G 接入能力(5GC-Enable)来划分,此架构又分为授信Non-3GPP接入网络 (TNAN) 和授信 Non-3GPP WiFi 接入网络(TWAN)。5GC-Enable 终端连接到信任域的非 3GPP 接入网后,通过 TNAN 模块接入5G核心网。TNAN分为两部分: 授信非3GPP接入 点功能(TNAP)和授信非3GPP网关功能(TNGF)。除了使 用不加密的 IPSec 隧道以降低 UE 的中央处理器 (CPU) 负 载,并强制执行低层的WLAN安全机制以外,TNGF的功能 类似于N3IWF。而信任域的非3GPP接入网内不支持接入常 规 WLAN 终端, TNAP和 TNGF的角色被授信 WLAN 接入点 (TWAP) 和授信WLAN互通功能(TWIF) 所取代。3GPP同 时还定义了一系列标准协议: 3GPP 22.234协议定义了WiFi 与3GPP网络融合的一些功能需求[4],例如,支持网络接入 标识(NAI)和地址分配,支持全球用户身份模块(USIM) 和用户身份模块(SIM)的身份识别,支持漫游、计费、订 阅、紧急呼叫和WiFi和3GPP网络互连等功能。3GPP 33.234 协议为3GPP 23.234协议中的I-WLAN系统定义了安全性要 求[5], 主要包括认证安全、机密性保护、完整性保护等内 容。虽然许多细节和机制流程未定义,但这些标准协议为 5G+WiFi协同产品的研发部署提供了坚实的基础。

4G 网络的核心网和无线接入网络节点(eNB)存在较大的耦合性和依赖性,需要开发UE以支持多种网络方案,因此3GPP中4G 对WiFi接入的集成标准并没有得到大规模商业应用。得益于核心网络业务模块化架构和网络功能虚拟化技术,5G已做到控制面和数据面分离、核心网络和接入网络分离。相比于4G,5G与WiFi协同组网对接入终端的适配难度变低,而且核心网网络单元和无线接入网络节点无须进行复杂的功能扩展,因此更有可能为运营商和设备厂商提供高性价比的5G与WiFi协同网络投资方案。

2 协同组网方案设计

3GPP的TWAN方案尚存在不少需要优化和细化的问题,例如,未充分考虑多WiFi接入网络场景,系统架构中只有接入点(AP)没有接入控制器(AC),无法实现WiFi6接人网络间的无缝漫游;TWAN接入终端必须有客户识别模块(SIM)卡,但现实场景中有绝大多数WiFi终端设备并不支持SIM卡,这导致WiFi设备接入局限性大;TWAN现行标准方案未涉及异构接入的5G LAN组管理、融合网络的服务质量(QoS)管理功能。本文中,我们在遵循3GPP标准的基

础上,针对这些问题进行创新,设计了一种5G与WiFi6协同组网方案,具体包括:引入授信WLAN接入控制器(TWAC)并通过无线接入点的控制和配置协议(CAPWAP)管理下挂的多个AP,以实现大型商用WiFi组网;额外提供无SIM卡终端的接入与鉴权功能;支持WiFi6终端与5G终端进行统一虚拟网络(VN)组的划分及管理,实现异构网络协同;TWIF增加QoS功能,支持5GC统一QoS管理,并实现对WiFi终端的带宽管理。

2.1 系统架构设计

5G和WiFi6协同组网系统架构如图1所示。

相比于5G UE, 无5G接入能力的WLAN(N5CW)为普通的WiFi终端设备,不支持在无线局域网(WLAN)承载5GC NAS信令消息。5G UE 和N5CW分别通过无线接入网(RAN)和TWAN接入5GC控制面和用户面。TWAN包括WiFi6和TWIF两部分。WiFi6部分主要负责WiFi网络的接入,除了标准的TWAP负责提供WiFi接入锚点外,本方案还增加了TWAC模块。TWAC作为无线局域网接入控制设备统一管理接入的多个TWAP,同时还增加了与TWIF交互的功能。通过3GPP标准定义的N1/N2和N3接口,TWIF可与接入和移动性管理功能(AMF)、用户平面功能(UPF)进行交互。TWIF是将N5CW终端接入5GC的网关设备。

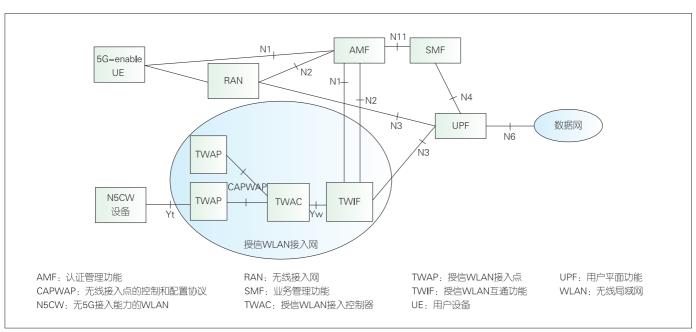
2.2 网元软件架构设计

5G与WiFi6协同组网方案中的融合核心网由TWAC与

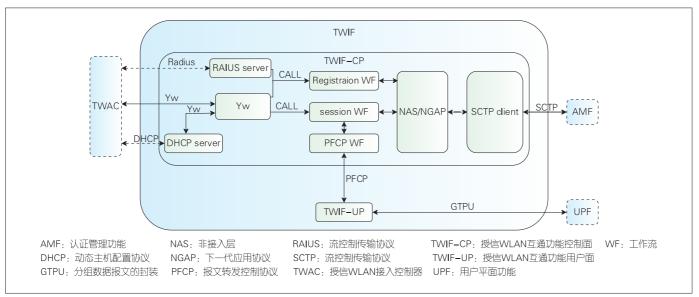
TWIF 网元和标准 5GC 组成。TWIF 和TWAC 网元的软件架构设计如图 2 所示。

(1) TWIF

TWIF 网元分为TWIF 控制面(TWIF-CP)和TWIF 用户 面(TWIF-UP)两部分。TWIF-CP作为TWIF控制面,用于 处理控制面的信令流程和用户信息管理,由8个模块组成: Yw模块用来处理与TWAC的Yw接口消息,不同的Yw消息 可以触发不同的业务流程; Radius server 模块用于收发、处 理和TWAP之间的Radius消息,在接收到鉴权请求消息时, 将 Radius 消息解码后调用 Registration Workflow 模块进行用户 注册流程; 动态主机配置协议 (DHCP) server 模块用于处 理TWAP透传过来的 DHCP消息, 在收到 DHCP请求后调用 Session Workflow 模块进行会话创建流程,核心网创建完会 话后,将分配的IP传给DHCP模块,DHCP模块再使用核心 网分配的 UE IP 回复 DHCP 响应; Registration Workflow 模块 用于处理与注册相关的流程,调用非接入层/下一代应用协 议(NAS/NGAP)模块和流控制传输协议(SCTP) client模 块的发送消息给认证管理功能(AMF)网元; Session Workflow 模块用于处理会话相关的流程,在DHCP server模 块收到 DHCP 请求后被调用,运行会话创建流程,再调用 NAS/NGAP模块和SCTP模块发送消息给AMF; PFCP WF模 块用于处理和TWIF-UP之间的报文转发控制协议(PFCP) 消息,通过PFCP消息为TWIP-CP创建会话;NAS/NGAP模 块用于NAS/NGAP消息的编解码和收发处理; SCTP client 模 块用于处理和 AMF 之间的 SCTP 消息, 创建 SCTP 链接, 保



▲图15G和WiFi6协同组网系统架构

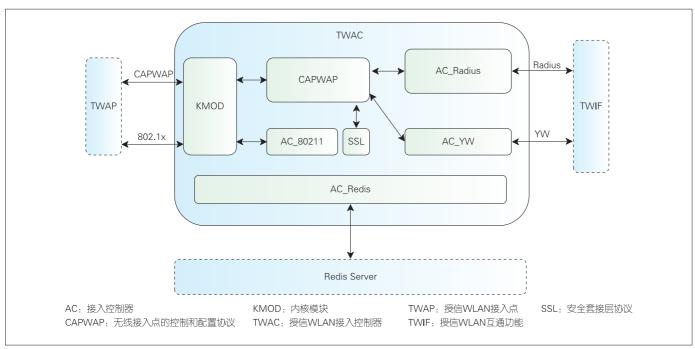


▲图2 授信无线局域网互通功能网元软件架构

持心跳和SCTP消息收发处理。TWIF-UP通过N3接口完成分组数据报文的封装(GTPU)协议与UPF进行用户面数据的转发,与TWIF-CP通过PFCP消息进行交互。TWIF-UP在收到上行业务包后根据UEIP匹配会话,并根据会话信息添加对应的GTPU头,再通过N3口发送给UPF。TWIF-UP收到下行包后根据隧道匹配会话,并根据会话信息去掉GTPU头,配置默认路由到TWAP上,进而完成数据转发。

(2) TWAC

TWAC网元包括7个模块,具体如图3所示。AC_80211模块负责处理802.11相关的无线协议栈。无线接入点的CAPWAP模块负责处理CAPWAP协议,TWAC和TWAP之间使用标准CAPWAP协议。安全套接层协议(SSL)模块负责管理SSL数字证书。AC_Radius模块负责处理Radius消息协议栈。AC_YW模块负责处理TWAC端YW消息。AC_Redis模块负责处理本地数据库配置,实现与redis数据库之间的交互,系统启动时会通过AC_Redis模块在本地redis数据库



▲图3 TWAC网元软件架构

中添加默认配置,并可通过redis客户端命令行或提供的配 置页面增加相应的配置。业务模块在业务处理过程中通过 AC_Redis 模块读取需要的配置信息,同时也会将一些AP信 息、用户信息和过程数据存储在redis数据库中。AC引入 redis数据库主要是为了代替原有本地配置文件的配置方式。 通过redis数据库可以在标准化配置的同时提供远程配置能 力。redis 数据库中存储的数据大多是静态的配置信息,因 此只占用少量内存;对于一些动态用户信息,redis数据库 只存储少量用户标志信息,用于查询和观测使用,动态用户 信息的存储空间有限制,超过存储空间条数限制后,新的数 据将覆盖老的数据。内核模块(KMOD)负责处理内核间通 信。TWAC通过KMOD模块在内核中进行消息接收:业务模 块将要发送的消息放进 KMOD 的发送消息队列中, KMOD将 不同类型消息发送到不同处理模块的消息队列中,将 802.11、CAPWAP、数据包传输层安全性协议(DTL)相关 消息分别发送到AC_80211、CAPWAP、SSL模块的消息队列 中。每个业务模块拥有单独的线程,每次从自己的消息队列 中取出一个消息进行处理。

2.3 增强功能设计

此协同网络除了支持5G UE的鉴权、VN组通信、流量管理等基本5G 网络能力外,同时还可利用TWAN模块作为WLAN的代理节点,模拟5G UE在5GC的注册接入,并模拟基站作为协议接口的端节点来完成N5CW设备的注册、会话建立等。此外,为了提高网络的融合能力,提升用户使用体验,丰富网络使用场景,该融合网络还需实现5G+WiFi融合接入不同类型终端的统一鉴权管理、统一VN组管理和通信、统一流量管理等增强功能。下文中,我们将介绍该方案

下融合核心网增强功能的实现逻辑。

(1) 统一鉴权管理

各种N5CW终端将不再依靠WiFi接入点的认证,而是由融合核心网统一完成安全加密鉴权,如图4所示。

插 SIM 卡的 WiFi 终端采用基于认证和密钥协商机制的可扩展认证协议(EAP-AKA')鉴权,无须输入 TWAP接入的用户认证密码即可直连 5GC;无 SIM 卡终端采用设备标识+5G AKA 鉴权,接入 TWAP后,无须输入认证密码即可接入5GC。而园区访客、访问关键应用域等场景,还可激活二次鉴权功能,并通过会话管理功能(SMF)和认证、授权和计费(AAA)二次鉴权来保障网络安全可控。

(2) 统一VN组管理和通信

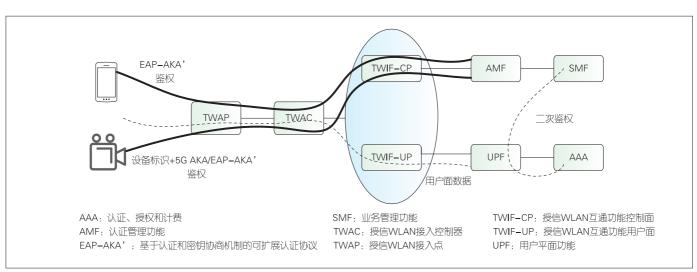
该协同网络支持局域网类型的网络覆盖。融合核心网可管理基于WiFi6终端和5G终端的局域网(LAN)组网和VN组成员互访,实现如图5所示的异构网络协同。

当TWAP接入用户和5G NR接入用户完成LAN区域内的L2/L3点对点通信时,网络管理员可以在统一数据管理功能(UDM)上提前配置这些用户所属的VN组,并可按需创建、更新、删除VN组和组成员。在会话创建过程中,融合核心网将根据用户所属VN组在UPF上创建5G LAN相关的会话。后续,一个VN组中的WiFi6终端和5G终端可进行协同通信,组内支持单播互访和组播,业务数据无须经由数据网络(DN),统一通过UPF以点对点/点对多点方式传输。

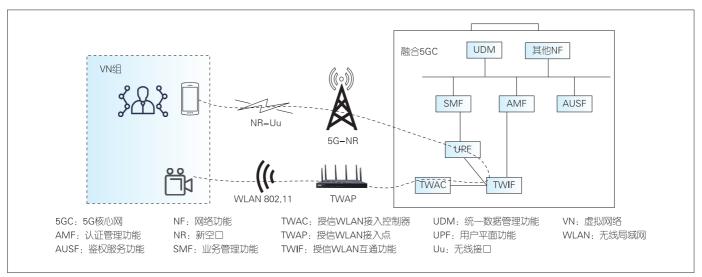
(3) 统一流量管理

该融合核心网可实现对多接入协同网络的带宽控制管理能力,以及5G和WiFi业务的优先级区分管理。

如图6所示,5GC基于Yw接口,通过TWIF和TWAC的 带宽管理机制,实现WiFi终端的流量带宽管理,通过标准



▲图4 统一鉴权管理功能



▲图5 统一VN组管理和通信

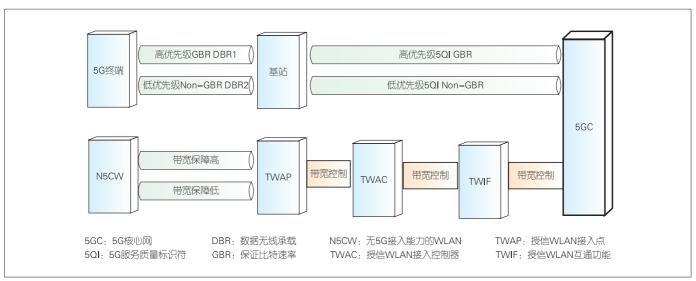
3GPP QoS 机制来实现对 5G 终端的流量带宽控制以及关键任务的特殊保障。

3 协同组网方案应用

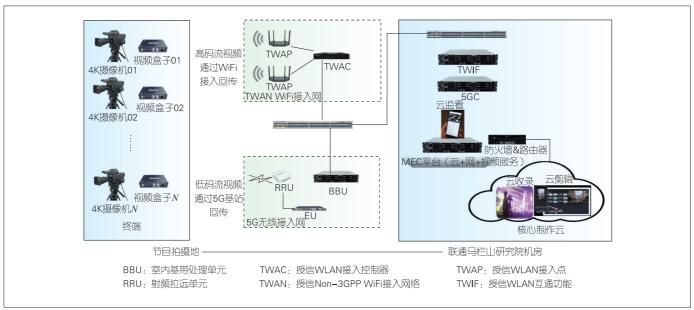
支持WiFi接入的5G移动网络适应于公共服务、智慧家庭、工业互联网、远程医疗、视频制播等多种场景。根据上述设计,基于5G与WiFi6协同网络系统,我们研发并实现了TWAN设备,在长沙马栏山文创产业园部署了节目录制专网,组网架构如图7所示。

融合核心网和多接入边缘计算(MEC)平台部署在联通 马栏山研究院机房,TWAC采用虚机的方式部署在端计算盒 子,TWIF、轻量化5GC采用虚机的方式分别部署在两台通 用X86服务器上,WiFi6和5G无线网直接部署在拍摄地。节目拍摄现场部署两台TWAP以满足WiFi6信号覆盖,同时使用10台移动摄像机,通过接入融合核心网进行传输。每台摄像机接入一个专用视频盒子后,无线实时回传一路100 Mbit/s的超高清高码率视频、一路压缩后的5 Mbit/s 低码率视频。低码流和高码流分别选择5G和WiFi接入网传送,并汇集到融合核心网处。MEC平台上部署了云监看应用,导演、编剧等可随时随地利用边缘云上部署的云监看软件来监看和编排拍摄情况。融合核心网连接了马栏山核心制作云,云上运营了云收录和云剪辑应用,后期制作人员在云上对高码流进行收录、存储、文档管理和视频剪辑等。

节目拍摄前,工作人员对网络进行业务测试:每台



▲图6 统一流量管理



▲图7 节目录制5G与WiFi6协同专网方案

TWAP上行可支持800 Mbit/s 的带宽,视频盒子到MEC平台的平均时延为50 ms,平均丢包率不超过0.01%;基站上行可支持270 Mbit/s 的带宽,平均时延25 ms,平均丢包率不超过0.01%。该系统在实际使用过程中,现场拍摄效果反馈良好,视频画质清晰,时延可控,回传稳定。借助WiFi6技术和非授权频段资源,网络上行带宽明显大于纯5G网络,能满足10路超高清视频同时上传所需的大带宽。5G网络还可满足低码流对端到端网络时延和网络稳定性的高要求。本文提出的5G与WiFi6协同专网项目成功突破技术壁垒,在业内首次实现多路视频编码无线回传,可助力节目视频内容录制生产模式的数字化转型,提升企业经营效率和竞争力。

4 结束语

5G和WiFi6这两种通信技术紧密融合后,其所具备的各种特性能优化整个网络通信能力,更好地满足新型业务需求。本文设计研发了TWAN设备和5G与WiFi6协同网络系统,实现了在5G专网中融合WiFi终端接入,使N5CW用户统一认证、管理、服务需求快速落地。同时,该系统还大幅提升了上行大带宽,节省了网络建设和终端改造成本。但5G移动网络与WiFi6无线网络的协同在无缝漫游、网络安全性保障等方面还需进一步研讨,相关规范也需要进一步完善。未来,期待产业界各方一起,共同推进5G与WiFi6协同组网的成熟完善。

参考文献

[1] 成刚.Wi-Fi标准IEEE 802.11ax关键技术 [J]. 电子技术与软件工程, 2019, (14):

- 15-18
- [2] 3GPP. Technical specification group services and system aspects, system architecture for the 5G system, stage 2: 3GPP TS 23.501 V16.1.0 [S]. 3GPP, 2019
- [3] 3GPP. Study on the wireless and wireline convergence for the 5G system architecture: 3GPP TS 23.716 [S]. 2019
- [4] 3GPP. Requirements on 3GPP system to wireless local area network (WLAN) interworking: 3GPP TS 22.234 V13.1.0 [S]. 2016
- [5] 3GPP. Wireless local area network (WLAN) interworking security: 3GPP TS 33,234 [SI, 2016

作 者 简 介



李沸乐,中国联通研究院工程师;研究方向为5G/6G/WiFi6网络架构和关键技术、5G专网新技术等。



杨文聪,中国联通研究院高级工程师,核心网团队负责人;从事移动通信新技术研究工作。



张雪贝,中国联通研究院工程师;研究方向为5G/6G 网络架构、关键技术,面向行业的5G 专网及边缘UPF关键技术及解决方案等。

多频段协同通信的新机遇—— 太赫兹通信感知一体化



New Opportunities for Multi-Band Collaborative Communication — Integrated Communications and Sensing at Terahertz Band

胡田钰/HU Tianyu, 李玲香/LI Lingxiang, 陈智/CHEN Zhi

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室,中国 成都 611731) (National Key Laboratory of Science and Technology on Communications of UESTC, Chengdu 611731, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204004

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1709.016.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-12

摘要:随着下一代移动通信系统(6G)的不断推进,太赫兹(THz)通信感知—体化技术将成为多频段协同通信技术的新机遇。THz通信技术对多维度、多粒度感知能力的迫切需求将助力多频段协同技术的新发展。提出面向THz通感—体化的多频段协同技术,认为可以通过感知协同和通信协同来提升THz通信性能。通过两个典型实例论述了面向THz通感—体化的多频段协同的关键技术和挑战。

关键词: 多频段协同通信; 太赫兹通信感知一体化; 太赫兹通信; 6G

Abstract: With the advancement of the next-generation mobile communication system (6G), the integrated communication and sensing at the terahertz (THz) band can be a new opportunity for the multi-band collaborative communication technology. It is considered that the urgent need for multi-dimensional, multi-granularity, and wide-area sensing information of THz communication and sensing integration technology can facilitate the new development of multi-band collaborative communication technology. Therefore, the multi-band collaboration technology for THz communication and sensing integration is proposed, which can improve the performance of THz communication through sensing collaboration and communication collaboration. In addition, the key technologies and challenges of the multi-band collaboration for THz communication and sensing integration through two typical examples are also presented.

Keywords: multi-band collaborative communication; integrated communication and sensing at THz band; THz communication; 6G

发解海量流量需求与紧缺频谱资源之间的尖锐矛盾,有必要在下一代移动通信系统(6G)中研究并部署基于Sub-6 GHz、毫米波和太赫兹(THz)频段(0.1~10 THz)的全频谱通信。为此,国际电信联盟(ITU)于2019年世界无线电大会(WRC2019)上为固定和移动业务标识了范围为275~450 GHz的新增频段。然而,单一频段使用往往存在极大的局限性,如Sub-6 GHz 频段虽然技术十分成熟且已大面积部署,但无法支持高速率的数据传输应用;而毫米波和THz 频段则难以承担较大覆盖范围内的通信服务,且其严重的路径损耗和易阻塞性又导致系统复杂性和部署难度大大提高。因此,我们可以通过多频段的协同来实现高速率、广覆盖、高质量的通信服务,以满足未来如图1所示场景的沉浸化、智慧化、全域化的业务应用需求[1]。

自2020年2月ITU在无线电通信部门5D工作组(ITU-

R WP5D)会议上启动面向2030及未来(6G)的研究工作之后,中国的IMT-2030(6G)推进工作如火如荼地开展。其中,随着THz通信和通信感知一体化等6G潜在关键技术的不断推进,THz通信感知一体化(简称通感一体化)技术被提出^[2],以更好地实现智慧城市、全息通信、扩展现实等新兴应用及其相关业务(如人工智能、沉浸式交互和数字孪生等)。THz通感一体化不仅可以基于THz频段的极高频率以Tbit/s速率来实现业务的海量数据传输,也可以基于THz频段的极大带宽来实现高精度和高分辨率感知。另外,所获取的物理环境感知信息还可用来辅助THz通感一体化的通信功能,如THz波束的快速对准和跟踪、智能定向组网等。然而,THz信道所面临的严重的路径传播损耗、较弱的衍射能力(即阻塞敏感性)和不可忽略的分子吸收现象同样使THz通感一体化技术的通信和感知范围受限^[3]。

多频段协同的无线通信往往关注Sub-6 GHz和毫米波频 段/THz 频段之间的协同,如带外信息辅助的毫米波信道估

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2014)



▲图1 沉浸化、智慧化、全域化的业务应用需求场景[1]

计和环境感知¹⁴、控制面用户面分离架构下的控制信令低频 传输和有用数据高频传输¹⁵,以及对应的高低频无线协作组 网¹⁶等。然而,对于面向上述新兴应用和业务的THz通感一 体化技术,现有的多频段协同通信技术却难以提供支持。上 述业务的超高速通信需求可以通过具备THz频段的多频段协 同通信技术来满足,这在一定程度上扩展了其通信覆盖范围 和业务支持范围。THz的多频段协同所要求的物理环境感知 信息却难由现有多频段协同通信技术来提供,以至于感知覆 盖范围和感知信息丰富度受限,且难以对THz通信进行更有 效的辅助。因此,基于THz通感一体化对多频段协同通信技术进行研究将会使该技术得到新的发展。通过多频段的感知 协同和通信协同来增强THz通感一体化,可以助力数字孪生 世界的多维构建和万物智联的发展。

1 多频段协同的无线通信

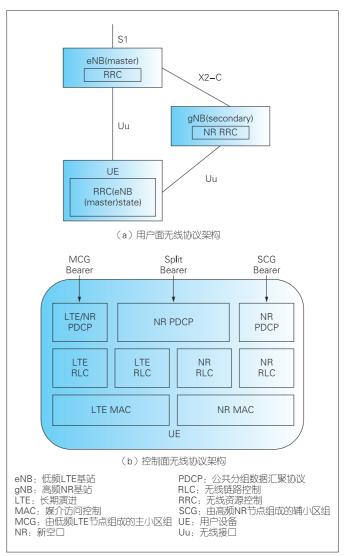
1.1 相关协议及标准

在5G系统中, 多频段协作的无线通信主要是通过互通 来实现的,由此可以提高总体数据速率,并实现控制面与数 据面的分离。具体而言,第3代合作伙伴计划(3GPP)发布 的第一个5G新空口(NR)标准(即3GPP release 15)及其 后续标准提出, 高频 NR 系统可以与低频 NR 或低频长期演 进(LTE)系统进行互通。因此,互通可以在NR内的载波 聚合、具有公共分组数据汇聚协议(PDCP)层的双连接或 多连接以及切换等层级上实现。其中, 双连接或多连接指的 是把一个终端连接到两个或多个小区组的场景[7]。因此,在 5G NR 非独立组网架构下,由低频 LTE 节点(即 ng-eNB) 组成的主小区组 (MCG) 负责处理控制面和 (可能的) 用 户面信令的高可靠传输,而由高频 NR 节点(即 gNB)组成 的辅小区组(SCG)则负责用户面数据的高速率传输^四。 3GPP还针对多连接技术发布了对应的技术规范,即TS 37.340^[8]。在该规范中,3GPP不仅给出了多连接技术在用户 面和控制面的无线协议架构和网络接口,还给出了与媒介访

问控制(MAC)层、无线链路控制(RLC)层、无线资源控制(RRC)功能 等相关的概述。我们给出了多连接技术在用户面和控制面的无线协议架构,如图2所示。

针对非3GPP接入技术的无线局域网(WLAN),

IEEE 802.11 协议组织提出一种名为"快速会话迁移(FST)"的多频段互操作技术。该技术可以实现传统的Sub-6 GHz频段和毫米波频段之间的三频段Wi-Fi切换,即5 GHz、2.4 GHz和60 GHz之间的Wi-Fi通信切换^[9]。具体而言,该技术可以让会话基于IEEE 802.11ad协议在毫米波信



▲图2 多连接技术在用户面和控制面的无线协议架构

号覆盖范围内进行高速数据传输;而当毫米波信号受到阻碍时,会话又可以被无缝切换至基于802.11a/b/g/n/ac协议的Sub-6 GHz 频段数据传输。文献[10]指出,基于FST的多频段协作是通过定义IEEE 802.11 低频 MAC 层与高频MAC 层之上的一种接口来实现的,即定义一个用于多频段协作的公共上层 MAC。以高频切换至低频为例,站点可以将毫米波频段 MAC 帧内容转移至 Sub-6 GHz 频段,进而利用 Sub-6 GHz 信道来传输毫米波信道的控制信令和有用数据。

1.2 基于多频段协同的无线通信技术

全球的研究人员对基于多频段协同的无线通信技术展开了大量研究,更为关注 Sub-6 GHz 和毫米波/THz 频段之间的协同方式及其带来的通信性能增益。对于物理层上的多频段协同通信而言,绝大部分研究者将获得的 Sub-6 GHz 信道信息视为带外信息,用以辅助毫米波通信。基于 Sub-6 GHz 信道和毫米波信道的空间相关性,文献[11]对毫米波信道参数进行粗略估计,进而辅助毫米波通信链路的配置。此外,也有研究者基于深度学习来提高 Sub-6 GHz 的带外信息的利用率。如文献[4]不仅证明了存在一个足够大的神经网络可以实现从 Sub-6 GHz 信道到最佳毫米波波束和阻塞状态的预测,还开发了一个深度学习模型,以极高的成功概率预测毫米波阻塞和最佳波束,无需波束训练开销。

针对无线通信系统 MAC 层的多频段协同通信技术,研究者们提出可以基于 sub-6 GHz 信道来发现邻居节点并交换控制信息,进而可以基于毫米波或 THz 信道来检查信道状况和高速传输数据。因此,文献[12]提出了一种由毫米波或 THz 信道回退至 Sub-6 GHz(或微波)信道来返回确认(ACK)信息的 MAC 协议。得益于多频段信道的空间相关性[11],文献[5]所提出的 MAC 协议不仅可以基于 Sub-6 GHz 全向射频信号来传输控制信令,还能从中提取出发角、到达角等空间信息,进而实现缓解链路阻塞和避免"耳聋效应"的协议效果。

此外,针对异构网络部署中基于双连接技术的高低频无线协作组网性能,部分研究者已展开研究。其中,数据面除了由宏基站负责维护之外,也可以存在于微小基站中。例如,文献[6]提出了一种由毫米波基站和Sub-6 GHz 无人机基站组成的异构网络,并对该垂直异构网络在覆盖概率和频谱效率方面的性能进行分析。文献[13]基于 Sub-6 GHz、毫米波和THz 协作而成的异构网络,提出了一种以用户为中心的动态基站集群设计。而文献[14]提出了一种具有无线回程能力的以THz 网络为主的异构网络。文献[13]、[14]均对THz 网

络的传输速率和覆盖范围进行了权衡考虑。

26G赋能的多频段协同

为进一步加快6G关键技术的研发,IMT-2030 (6G)推进组于2022年4月成立试验任务组,开展THz通信、通感一体化、智能超表面等6G潜在关键技术的验证与测试评估工作。正值6G概念形成及关键技术储备的关键窗口期,我们有必要结合6G潜在关键技术来探讨多频段协同通信技术的新发展。

在上述6G潜在关键技术中,THz通信已与现有多频段协同通信技术进行了浅层次的结合,如文献[5]、[12]—[14]所实现的THz通信覆盖范围和业务连续性的增强。而对于其他6G潜在关键技术,一方面如智能超表面、算力网络等在硬件、计算方面的技术难以与多频段协同通信技术进行结合;另一方面,适用于Sub-6 GHz或毫米波通感一体化技术的业务场景对由THz频段提供的高精度感知信息或Tbit/s速率并无迫切需要(因其一体化后获得的低精度感知信息和Gbit/s速率已足够用于辅助定向性不强的Sub-6 GHz或毫米波通信)。相反,对于THz通感一体化技术而言,其所获得的高精度但小范围感知信息可能无法保证对THz通信的有效辅助及对应信号覆盖范围的增强。这不仅仅是THz信道的分子吸收、阻塞敏感性和高传播损耗等信道特性造成的,还与THz通信过程中的波束分裂现象、近场天线特性等有关^[3]。

因此,在现有6G潜在关键技术中,唯有THz通感一体化技术可以与多频段协同通信进行深层次结合,即通过Sub-6 GHz或毫米波频段提供的低精度、大范围感知信息和通信信令、一体化后THz频段提供的高精度、小范围感知信息等多维度、多粒度广域信息来辅助THz通信,进而更有效地满足未来人工智能、沉浸式交互和数字孪生等业务的6G应用需求。因此,THz通感一体化可以促进多频段协同通信的新发展,这是多频段协同通信技术的新机遇。

2.1 THz通感一体化

本文所关注的THz通感一体化聚焦于以通信为中心的一体化设计,即通过空口及协议联合设计、时频空资源复用、硬件设备共享等手段,实现以THz通信为主、THz感知为辅的统一设计,进而以一体化的高精度物理感知信息辅助高速率数据传输,提升THz通信的整体性能和业务能力[15]。得益于THz频段的超大带宽,THz通感一体化技术的通信能力适合中近距离下的高速率数据传输场景,但THz信道的高传输损耗和分子吸收促使THz通感一体化技术采用超大规模天线来获得极窄波束和对应天线增益。高定向性的THz通感一体

化信号虽然增加了THz通信链路的建立难度,但一体化的实时高精度感知信息则可以对此进行相应辅助。

THz通感一体化技术中的感知能力聚焦于主动且交互式的无线信号感知。具体而言,首先THz通感一体化设备通过对主动发出的THz信号、感知目标(以用户/基站为代表的)反馈的交互信息、经物理环境(以障碍物为代表的)调制后的THz回波信号进行处理;其次,再以THz波束的高方向性分析信号的直射、反射、散射、透射情况;最后,完成对目标对象和物理环境的定位、测距、测速、成像等功能,实现对周围通信环境的感知探索,并由此辅助THz通感一体化的通信功能。需要说明的是,THz信号不仅可以通过对许多介电材料和非极性物质的良好穿透来实现材料探测等感知功能,还可以基于与低频信号完全不同的散射特性来获取更丰富的环境感知信息[16]。

2.2 面向太赫兹通信感知一体化的多频段协同

面向THz通感一体化的多频段协同技术主要分为多频段通信协同和多频段感知协同两部分。一方面,多频段通信协同以通信方式进行协同,进而辅助THz通感一体化设备的通信功能。例如,可以通过Sub-6 GHz或毫米波信号传输控制信令的协同来提升THz通信可靠性,或通过Sub-6 GHz或毫米波信号传输大范围内(潜在)基站/用户信息(如基站位置、用户ID等)的协同来丰富感知信息,便于移动THz通感一体化设备的快速链路建立。另一方面,多频段感知协同则以感知方式的协同来辅助THz通信功能。例如,可以通过周期性的Sub-6 GHz或毫米波信号的低精度、大范围环境感知和突发性THz通信需求下的THz高精度、小范围环境感知来实现感知协同。对此,可基于感知信息来预测障碍物移动轨迹、流量使用情况等,进而实现THz通感一体化设备的有效波束管理、小区切换和网络中继节点部署等决策。

总体来说,面向THz通感一体化的多频段协同旨在通过多频段信号实时获取通信和感知维度上具有粗粒度和细粒度的广域感知信息。其中,粒度的差别在于物理环境感知信息的感知精度和感知分辨率有所不同。需要说明的是,所获取的多维度、多粒度广域感知信息虽然可以直接用于若干有利于THz通信的决策算法,但感知信息的多样性无疑将带来较高的计算复杂度和较低的算法通用性。因此,上述感知信息还可用于构建若干(关于通信设备、障碍物、空气湿度等的)数字孪生体,即实现物理通信环境到虚拟数字环境的深度映射和实时交互^[17]。THz通感一体化设备可基于所构建的数字孪生体来准确估计(潜在)用户/基站和物理环境在下一时隙的状态和属性,进而快速有效地实现Sub-6 GHz、毫

米波和THz频段的频谱资源管理、THz通信链路建立和波束 切换/小区切换、THz定向组网中的干扰管理和中继节点部 署等决策。

3 多频段协同通信的关键技术与挑战

考虑到多频段感知/通信协同为THz通感一体化带来的额外系统增益和对应的系统复杂度,面向THz通感一体化的多频段协同技术存在着诸多关键技术及对应挑战。对此,本文将结合两个典型实例来进行阐述和分析,其中基于毫米波或Sub-6 GHz的射频感知系统和THz通感一体化系统将协同共站部署。

3.1 基于数字孪生的多频段协同

基于数字孪生的多频段协同旨在通过评估若干数字孪生体的变动信息来为THz通感一体化系统进行合理的多频段感知/通信协同。该实例设定低频射频感知系统和THz通感一体化系统可以分别通过现有数字孪生建模技术,事先得到包含固定物理环境信息和(潜在)基站/用户信息的粗粒度和细粒度的若干数字孪生体^[17]。因此,该实例中的多频段协同方法可被设计为:(1)某时隙下由射频感知系统通过回波/交互信号得到粗粒度的若干数字孪生体;(2)如果数字孪生体与之前存在较大差别(例如障碍物移动、潜在用户激活等),则对其进行更新,并将对应信令传递给THz通感一体化系统;(3)THz通感一体化节点在下一时隙对存在数字孪生体变动的方向进行THz感知,并对相应细粒度数字孪生体进行局部更新,以便于该时间块下基于数字孪生辅助的THz通信。

该实例的首要技术挑战在于如何结合THz通信对数字孪生体的变动情况进行准确建模和评估,进而保证多频段协同对THz通信辅助的有效性。例如,如果THz通感一体化节点长时间在某方向上和用户/基站进行通信,则可以适当忽略其余方向上数字孪生体的变动情况,即降低其余方向上的THz感知频次。如何将低频感知系统和THz通感一体化之间的控制信令融入现有5GNR协议架构同样是一大技术挑战,并且需要尽量减少对现有协议的调整,以便于运营商方面的技术部署。

3.2 基于深度强化学习的多频段协同

基于深度强化学习的多频段协同旨在通过离线/在线训练后的深度强化学习模型来逐步优化面向THz通感一体化系统的多频段感知/通信协同策略。该实例设定低频射频感知系统周期性地进行粗粒度感知,而THz通感一体化系统则根

据突发性的通信请求进行细粒度感知。因此,该实例中的多频段协同方法可被设计为:深度强化学习模型在障碍物位置、用户/基站状态、THz通感一体化系统感知状态和通信请求等状态下,对THz感知的开始/结束时刻、用于低频或THz射频感知的带宽等动作进行决策,以实现由障碍物/用户轨迹预测或者波束对准跟踪等行为引出的THz通信性能最优化这一长期回报。

该实例面临的技术挑战在于如何在5G NR协议架构下,对深度强化学习模型中的回报函数、状态空间和动作空间进行合理建模,以及对实现动作决策和长期回报评估的深度神经网络进行合理设计。此外,训练数据集的有效构建同样是该实例需要应对的一大技术挑战:离线训练时,需要获得大量适配于THz通感一体化场景的模拟通信数据;在线训练时,可能会由于模型失配下的THz通信链路中断而获取极少的实际通信数据。

4 结束语

为满足未来人工智能、沉浸式交互和数字孪生等业务的 6G应用需求,THz通感一体化为多频段协同通信技术的发展带来了新的机遇。面向THz通信感知一体化,多频段协同技术所带来的多维度、多粒度广域感知信息将有效支撑THz通信能力的广域拓展,助力6G"万物智联、数字孪生"愿景的实现。

致谢

本文在撰写过程中得到电子科技大学通信抗干扰技术国 家级重点实验室李少谦教授的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] IMT-推进组. IMT-2030(6G)推进组正式发布《6G总体愿景与潜在关键技术》 白皮节 [J]. 互联网天地, 2021(6): 8-9
- [2] 李玲香,谢郁馨,陈智,等. 面向 6G 的太赫兹通信感知一体化 [J]. 无线电通信技术, 2021,47(6): 698-705
- [3] CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications [J]. China communications, 2019, 16(2): 1–35. DOI: 10.12676/j.cc.2019.02. 001
- [4] ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Deep learning for mmWave beam and blockage prediction using sub-6 GHz channels [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(9): 5504-5518. DOI: 10.1109/TCOMM.2020. 3003670
- [5] ZHANG X F, HAN C, WANG X D. Dual-radio-assisted (DRA) MAC protocols for distributed terahertz networks [J]. IEEE open journal of vehicular technology, 2020, 2: 111–124. DOI: 10.1109/OJVT.2021.3049969
- [6] 赵存茁. 毫米波通信若干场景中的关键算法研究与性能分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020
- [7] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 5G NR: the next generation wireless access technology [M]. USA: Academic Press, 2020

- [8] 3GPP. Multi-connectivity, stage 2:3GPP TS 37.340 [S]. 2021
- [9] MOHAMED E M, NASSEF A M. Novel fast session transfer decision—making algorithm using fuzzy logic for Wi-Fi/WiGig wireless local area networks [J]. IET communications, 2020, 14(21): 3917–3926. DOI: 10.1049/iet-com.2020.0470
- [10] 邓莹莹. IEEE 802.11ax MAC协议优化设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018
- [11] GONZALEZ-PRELCIC N, ALI A, VA V, et al. Millimeter-wave communication with out-of-band information [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55(12): 140–146. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700207
- [12] CACCIAPUOTI A S, SANKHE K, CALEFFI M, et al. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(6): 110-115. DOI: 10.1109/MCOM. 2018 1700924
- [13] HUMADI K M, TRIGUI I, ZZHU W P, et al. User-centric cluster design and analysis for hybrid sub-6GHz-mmwave-THz dense networks [EB/OL]. [2022-06-14]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9763439
- [14] RAJA A A, JAMSHED M A, PERVAIZ H, et al. Performance analysis of UAV-assisted backhaul solutions in THz enabled hybrid heterogeneous network [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE, 2020: 628-633. DOI: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9163026
- [15] 胡田钰, 李玲香, 陈智, 等. 感知辅助的太赫兹无线通信技术 [J]. 邮电设计技术, 2021, (12): 23-27. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2021.12.005
- [16] JU S H, SHAH S H A, JAVED M A, et al. Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications [C]//Proceedings of ICC 2019–2019 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2019: 1–7. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761205
- [17] WU Y W, ZHANG K, ZHANG Y. Digital twin networks: a survey [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(18): 13789–13804. DOI: 10.1109/ JIOT.2021.3079510

作 者 简 介



胡田钰, 电子科技大学在读博士研究生; 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化技术。



李玲香,电子科技大学副教授、硕士生导师,国家级科技创新团队核心成员;主要研究方向为太赫兹通信、通信感知一体化、无线通信安全技术;现主持国家自然科学基金青年项目1项;近5年来发表论文10余篇。



陈智,电子科技大学教授、博士生导师;主要研究方向为无线与移动通信、无线通信网络、通信抗干扰技术;2014年入选四川省杰出青年学术带头人,2016年担任公安部通信标准化技术委员会委员,2018年担任太赫兹技术教育部重点实验室副主任,2019年担任中国6G推进组太赫兹通信技术任务组召集人;发表论文100余篇,撰写学术专著3部,获得授权国家发明专利50余项。

可见光通信星座整形与人工智能解调技术



Constellation Shaping and AI-Driven Demodulation Techniques in Visible Light Communication

蔡济帆/CAI Jifan,徐增熠/XU Zengyi,迟楠/CHI Nan

(复旦大学,中国 上海 200433) (Fudan University, Shanghai 200433, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204005

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1518.008.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-05

摘要:可见光通信(VLC)系统被认为是6G通信的重要组成部分,具有高信道容量、低电磁辐射、高保密性等优势。然而高速发光二极管(LED)VLC系统受限于调制带宽与高功率下的非线性。提出了一种基于贪婪算法的几何整形编码方式,并使用了一个具有3层隐藏层的深度神经网络(DNN)作为接收端的解码器。相比于使用传统的无载波幅度相位调制(CAP)解调策略,该技术使系统传输速率得到提升,且能够承受更大的信号峰峰电压和偏置电流,适合用于高速、高功率通信系统。实验证明了DNN能够替代传统的解调策略,并且误码率表现更加优越,是未来可见光通信中一项很有潜力的技术。

关键词:几何整形;深度神经网络;无载波幅度相位调制

Abstract: The visible light communication (VLC) system is predicted to be a vital part of 6G communication. It features high channel capacity, low electromagnetic radiation, high security, and other advantages. However, high-speed light-emitting diode (LED) based VLC system usually suffers from limited modulation bandwidth and nonlinearity that resides in high power signals. In this paper, a greedy algorithm-based encoding of geometric shaping is proposed, and a deep neural network (DNN) with three hidden layers as the decoder at the receiver is introduced. Compared with the traditional carrierless amplitude and phase modulation (CAP) demodulation strategy, the system is improved in data rate and shows a greater ability to withstand high bias current and peak-to-peak voltage, which is desired in high-speed high-power communication system. In this experiment DNN proves that it can successfully replace the traditional communication CAP decoding process with a superior BER performance. It is a promising technology in the future VLC system.

Keywords: geometric shaping; deep neural network; carrierless amplitude and phase modulation

见光通信是一种新兴的无线通信方法,它是在可见光谱段进行数据通信的技术。中国信息通信研究院发布的《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书提到¹¹,可见光通信具有免授权、高保密、绿色无辐射等特点,适用于室内应用场景,可作为室内网络覆盖的有效补充。此外,可见光通信也可应用于水下通信、空间通信等特殊场景,以及医院、加油站、地下矿场等电磁敏感场景。发光二极管(LED)因其具有集照明和通信于一体的独特功能而越来越受到学者们的关注¹²。因此,基于LED的可见光通信技术是当前全球的研究热点。

虽然可见光频段有极其丰富的频谱资源,但是目前LED

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2801804); 国家自然科学基金(61925104、62031011); 鹏城实验室项目(PCL2021A14)

可见光通信系统仍然受限于光电器件的调制带宽、非线性噪声、水下光功率快速衰减等因素。这对高速大功率可见光通信的研究和实现提出挑战。目前可见光通信的研究内容主要有两个方面:从硬件上提高调制带宽,或者利用算法对信号进行非线性补偿。其中,后者因为无须改变硬件设备而广受欢迎。例如,星座点几何整形(GS)技术可通过增加星座点之间的最小欧氏距离来减小解调时被误判的可能性,并在平均功率受限的情况下降低信号的峰均比,进而减小系统整体的非线性。ZHAO J. 等提出 GS-8QAM(QAM 是指正交振幅调制)以改善传统 8QAM 的性能^[3]。由于在星间、星地和水下可见光通信中常常出现信号平均功率受限的情况,GS算法将在未来可见光通信系统中广泛应用。近年来随着深度学习技术的提升和大量运用,不断有研究借鉴相关成果以提升通信系统性能。CHEN H. 等提出一种名为基于深度神经网

络(DNN)的时频联合后均衡器(TFDNet)的非线性弹性学习后均衡器,该均衡器的性能优于传统的后均衡器^[4]。还有学者提出一种基于双支流异构神经网络(TTHNet)的信道仿真器,这种仿真器适用于估计水下可见光通信(UVLC)的单载波和多载波调制信道^[5]。随后,HU F.等证明了使用函数链接人工神经网络(FLANN)进行非线性补偿的优异性能^[6]。以上研究结果表明,神经网络可以替代传统通信系统中依靠公式建模的某些环节,高精度拟合非线性的映射关系。但是目前仅使用神经网络完成高速信号从波形到符号的完整解调过程的研究还相对较少。使用神经网络代替传统解调策略将极大简化系统的处理流程,降低相关硬件设备的复杂度,并且可以实现多种不同信号的解调处理。

本文提出了一种新型的几何整形编码算法,使星座点间的汉明距离达到局部最小值。这种近似于格雷编码的编码方式有很大的格雷增益,即在相同误码率的情况下具有更小的误比特率。此外,本文还使用 DNN 处理接收信号,代替了信号在接收端的匹配滤波、下变换、解调和解码的全过程。该技术使系统性能更加优越,它是未来可见光通信中一项很有潜力的技术。

1 技术原理与实验装置

1.1 星座点几何整形编码算法

几何整形最基本的思路就是增加星座点之间的最小欧氏距离,降低信号功率的峰均比(PAPR),其目的是减小通信系统中的码间串扰和非线性效应。增大欧氏距离可以减少星座点之间的串扰,从而降低解调时被误判的可能性。减小PAPR可以在峰值受限的情况下尽可能提高平均功率,增大星座点间的距离,提升信噪比。PAPR的计算方法如公式(1)所示。

$$PAPR(dB) = 10 \lg \left(\frac{\max_{0 \le n \le N} (\left| s_n \right|^2)}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left| s_n \right|^2} \right)_{\circ}$$
 (1)

图1(a)展示了64QAM和64APSK星座点以及它们对应的编码方式。其中,64QAM采用格雷编码,而64APSK借鉴国际卫星通信标准(DVB)-S.2的排布方式^[7],从内到外一共有4个环,每个环的星座点个数分别为4、12、20、28。由于64QAM可以满足格雷编码,且其编码已经是最优解,而几何整形64APSK无法满足格雷编码,因此我们需要使用一定的算法使其无限接近格雷编码,即汉明距离最小。由于64APSK的编码映射方式有64的阶乘种,我们不可能遍历寻

找全局的最优解,因此我们选择贪婪算法寻找局部最优解,对其编码方式进行改进。首先,我们把最大的迭代次数和待训练的64APSK 送入网络并初始化星座点的编码。为了简化汉明距离的计算过程,考虑到每个星座点被误判成最邻近点的概率最大,我们仅计算每个星座点和欧式距离最近点之间的汉明距离。因此在本文所提算法中,我们首先随机选择i、j两个星座点并将它们各自的邻居求出,即集合 Qi和 Qio 随后使用异或运算分别计算i、j两点此时的汉明距离并求和,记为 Hdbefore; 然后将i、j星座点位置进行交换,计算交换后的汉明距离并求和,记为 Hdbefore; 然后将i、j星座点位置进行交换,计算交换后的汉明距离并求和,记为 Hdafter。如果交换后汉明距离减小,则交换两个星座点; 如果交换后汉明距离不变或增大,则不交换。根据以上算法,在经过大约2000次迭代后,汉明距离不再减小,对应的编码结果也在图1(a)中给出。

1.2 无载波幅度相位调制(CAP)解码技术

CAP是一种多维多阶的调制技术,它在20世纪70年代首先由贝尔实验室提出。采用这种调制技术,可以在有限带宽的条件下实现高频谱效率的传输。CAP在调制过程并没有和载波相乘,而是直接和两个相互正交的成型滤波器进行卷积以形成带通脉冲信号。该技术能够改变同相和正交支路的波形反应所传递的数据流,因此CAP也被称为"无载波"。

如图1所示,在发射端,二进制的数字信号首先进行阶数为m的QAM格式调制以提高频谱效率,接着经过上采样、奈奎斯特滤波后被分成同相/正交(I/Q)两路。此时信号不与正余弦副载波相乘而是分别通过一对正交成型滤波器进行滤波,这是CAP与副载波调制最大的区别。这一对正交成型滤波器(也被称为希尔伯特滤波器对)通过平方根生余弦脉冲和正余弦函数分别相乘构造,是发射模块中最重要的结构。信号经过IQ分路后,与两个滤波器叠加的过程可以由式(2)给出。

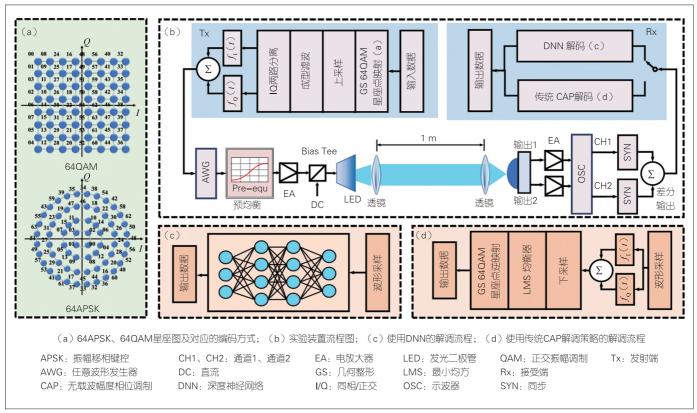
$$S(t) = [s_1(t) \otimes f_1(t) - s_0(t) \otimes f_0(t)], \tag{2}$$

其中, $s_I(t)$ 和 $s_Q(t)$ 分别表示信号经过IQ分路后的两路正交信号。 $f_I(t)$ 和 $f_Q(t)$ 表示一对正交成型滤波器,S(t)表示最终的发射信号,符号 \otimes 为卷积操作。

在接收端,经过信道后的光信号被PIN (P-I-N型二极管)直接探测,电信号被发送到两个和输入端完全相同的匹配滤波器中。IQ两路信号分离的过程如公式(3)—(4)所示。

$$r_{\mathbf{I}}(t) = R(t) \otimes mf_{\mathbf{I}}(t), \tag{3}$$

$$r_0(t) = R(t) \otimes mf_0(t), \tag{4}$$



▲图1 可见光通信系统实验流程图

其中,R(t)为接收到的波形信号, $mf_1(t)$ 和 $mf_0(t)$ 表示一对匹配滤波器, $r_1(t)$ 和 $r_0(t)$ 为输出的两路信号,它们在经过后均衡和QAM解调后便能恢复原始的发送数据。

1.3 DNN解码技术

由于神经网络拥有强大的数据处理能力,因此我们可以在接收端使用一个DNN解码器来代替传统CAP解码的所有步骤,包括IQ分路、下采样、后均衡、解调等,如图1所示。DNN的信号处理过程包括一个输入层、若干个隐藏层和一个输出层。输入波形数据并在输出处得到解调后的符号,即可完成信号的借条过程。隐藏层的结构决定了网络可以在输入和输出参数之间建立复杂的联系:神经元的连接方式决定了上一层神经元向下一层正向传播时的传播方向及加权求和。在传播至下一层后,每一个神经元都会使用特定的非线性函数进行加权和映射,以获得自身的输出。由于参数(神经元层数、每层的神经元数、非线性函数的选择等)过多,没有固定的规则来决定应该使用多少个隐藏层以及每个隐藏层应该有多少个神经元。这通常需要凭借人的调参经验、相关实验或其他先验知识来解决这个问题。

1.4 实验装置

图1展示了我们搭建的实验平台。在实验设置中,我们使用MATLAB产生64QAM和64APSK信号,然后将其加载到任意波形发生器(Tektronix AWG710B, 4.2 GSa/s)中。信号首先通过前向均衡板补偿高频成分的损失,然后进入放大器(ZHL-2-8-S+)放大信号,紧接着通过一个偏置三通(ZFBT-4R2GW-FT+),为蓝光LED提供直流驱动电流。光信号在通过1m的传输距离后由一个PIN接收机接收。接收机产生两路相反的信号,在放大、同步后相减即可得到差分信号,用以消除系统产生的共模噪声。最后我们用示波器(DSO9404A, 20 GSa/s)对信号进行采样。在离线数字信号处理方面,我们采用两种不同的方式(传统的CAP解码和深度神经网络解码)进行解码,同时将原始信息恢复出来并比较两种解码器的优劣。

2 实验与结果分析

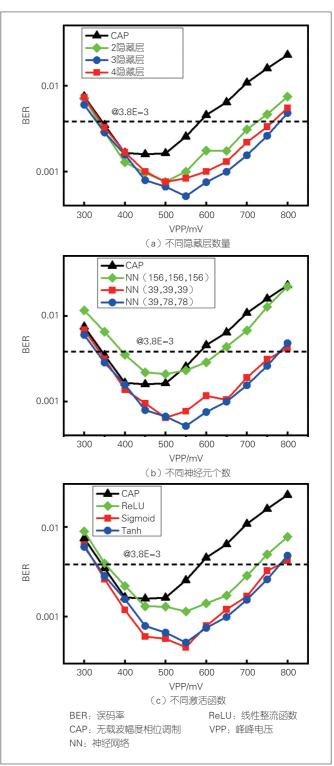
实验的第1项任务是完成神经网络的调参。由于信号的前后码元会互相干扰,根据以往实验的经验,我们将抽头数 taps 设置为 39,即考虑当前码元前后各 19个码元的影响。因为在发射端我们对数据进行了4倍上采样,所以 DNN 的输

入应该为156个神经元。我们使用DNN 拟合星座点的I路和Q路坐标,因此DNN的输出有2个神经元。为了确定网络的隐藏层个数,我们分别测试了2层隐藏层、3层隐藏层、4层隐藏层的效果,其中每个隐藏层神经元的个数均为39,测试结果如图2(a)所示。从图中我们可以看到,3种情况的误码率(BER)都低于CAP解调,且3层隐藏层的效果最好,其次是3层,最后是2层。这是因为当隐藏层数量较少时,网络没有足够的复杂度来学习数据之间的规律;而当隐藏层数量较多时,反向传播过程中网络没有足够的梯度来寻找最优解。因此我们将隐藏层的数量设置为3。

紧接着我们需要确定3个隐藏层中每层神经元的个数。 为此,我们分别测试隐藏层神经元个数在(156,156,156)、(39,39,39)和(39,78,78)下的结果,并且将 其与CAP的结果作比较,如图2(b)所示。可以看出, (156,156,156)排列的BER只在非线性区低于CAP,效 果最差;(39,39,39)和(39,78,78)排列的BER在所 有区域都低于CAP,并且(39,78,78)的效果最好。因 此,39、78、78分别为3个隐藏层的神经元个数。

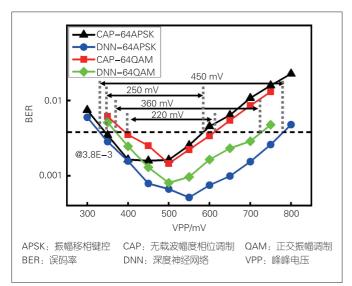
在调参过程的最后,我们比较了不同非线性激活函数下网络对非线性的处理能力。我们分别测试了线性整流函数(ReLU)、Sigmoid和Tanh的效果,并将它们与CAP作比较,结果如图2(c)所示。可以看出,在峰峰电压(VPP)小于400 mV时ReLU的BER高于CAP,效果最差,而Sigmoid和Tanh在所有范围内的BER都低于CAP。因此,根据图2(c)可知,在VPP低于550 mV时,激活函数被设置为Sigmoid;在VPP高于550 mV时,激活函数被设置为Tanh。

实验的第2项内容为测试调参后网络在通信系统中的性 能表现。为了能清楚地看出DNN在线性区和非线性区的处 理效果,在偏置电流为150 mA的条件下,我们从300 mV到 800 mV 遍历驱动电压。在传统 CAP 解调和 DNN 处理下 64APSK和64QAM的BER如图3所示。可以看出,无论是 64QAM还是64APSK, DNN在低电压的线性区效果和CAP相 似,而在高电压的非线性区,DNN的效果明显优于CAP。 这说明 CAP 解调可以处理线性区大部分的码间串扰,而在 非线性区DNN展示出了超过传统CAP解调方式的非线性处 理能力。以7%冗余的前向纠错(FEC)可以工作的最高误 码率作为门限(BER=3.8E-3),在使用DNN的解码后, 64APSK VPP的工作区间从250 mV 提升到450 mV, 64QAM VPP的工作区间从220 mV提升到360 mV。同时,64APSK的 性能要优于64QAM。在使用传统最小均方算法(LMS)后, 64APSK的工作范围比64QAM大30 mV;在使用DNN后, 64APSK的工作范围比64QAM大90 mV。

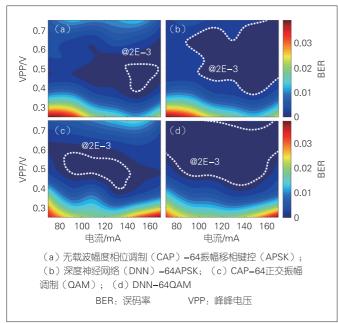


▲图2 不同神经网络参数得到的BER随VPP的变化曲线

为了更进一步地比较 APSK 和 QAM 在水下通信的效果, 我们将 VPP 从 250 mV 遍历到 750 mV, 并将偏置电流从 70 mA 遍历到 170 mA, 同时给出 BER 的热力图,如图 4 所示。图 4 (a)和图 4(c)分别为 CAP 解调后 APSK 和 QAM 的热力图。



▲图3 CAP和DNN解码后64APSK和64QAM的BER曲线

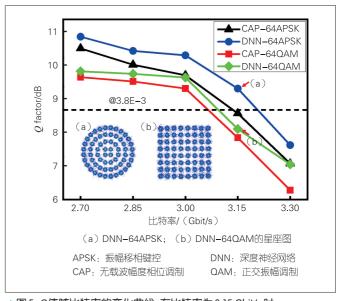


▲图4 不同驱动电压和偏置电流下BER的热力图

其中,白线圈出了BER等于2E-3的范围,并用以指代不同调制格式和不同解码方式下的系统工作范围。从图4可以看出,APSK的工作范围主要集中在高电流区,即高功率的非线性区,因而能承受更高电流带来的非线性效应压力。由于水下可见光功率衰减得很快,因此使用APSK进行高功率传输将会获得比QAM更大的传输距离和更高的传输容量。图4(b)和图4(d)分别是使用DNN解码处理后的BER热力图。可以看出,相比于CAP解调,APSK和QAM的工作范围得到进一步扩大,同时,工作区间向着更大电压和更大电流的方向移动。这说明我们的DNN神经网络对于高功率的非线性区域有

更好的处理效果。

在通信性能测试的最后一项实验中,我们在驱动电压为500 mV、偏置电流为150 mA的条件下提高数据的传输速率,并以7% FEC 作为门限,测试数据可以达到的最高传输速率。为了更好地观察传输效果,我们把BER 转化为 Q值。从图 5 中可以看出,在 64APSK 的调制和 DNN 解码下,数据的传输速率可以达到 3.21 Gbit/s。它比 CAP-64APSK 的传输速率快了 75 Mbit/s,比 DNN-64QAM 的传输速率快了 120 Mbit/s。相比于 CAP解调,DNN处理后信号的 Q值最大可提升 0.7 dB(传输速率为 3.15 Gbit/s 时),且 64APSK 的提升效果比 64QAM 更显著。因此 DNN-64APSK 最适合用于大功率的可见光通信。图 5 还给出了在比特率等于 3.15 Gbit/s 时 64APSK 和 64QAM 的星座图。



▲图5 Q值随比特率的变化曲线;在比特率为3.15 Gbit/s时

3 结束语

在本文中,我们提出了一种基于贪婪算法的几何整形编码方式,并使用了一个3层隐藏层的DNN神经网络作为接收端的解码器。在实验中,我们分别使用了64QAM和64APSK调制并且比较了两者在CAP解码和DNN解码下的传输效果。实验结果表明,在使用了DNN解码后,64APSK电压的工作区间从250 mV提升到450 mV,64QAM电压的工作区间从220 mV提升到360 mV。同时,APSK对偏置电流有更大的承受能力,适用于高功率传输。在传输速率上,使用64APSK调制和DNN的解码后,数据的传输速率可达到3.21 Gbit/s。它比CAP-64APSK的传输速率快75 Mbit/s,比DNN-64QAM的传输速率快120 Mbit/s。可以看出,我们使用DNN神经网

络成功替代了传统通信 CAP解码的下采样、后均衡、解调等全过程,并且系统性能更加优越。它是未来可见光通信中一项很有潜力和前景的技术。

参考文献

- [1] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2020, 15(4): 93–102. DOI: 10.1109/MVT.2020.3017153
- [2] IMT-推进组. IMT-2030(6G)推进组正式发布《6G总体愿景与潜在关键技术》 白皮节 [J]. 互联网天地, 2021, (6): 8-9
- [3] ZHAO J Q, QIN C Y, ZHANG M J, et al. Investigation on performance of special-shaped 8-quadrature amplitude modulation constellations applied in visible light communication [J]. Photonics research, 2016, 4(6): 249. DOI: 10.1364/prj.4.000249
- [4] CHEN H, ZHAO Y H, HU F C, et al. Nonlinear resilient learning method based on joint time-frequency image analysis in underwater visible light communication [J]. IEEE photonics journal, 2020, 12(2): 1–10. DOI: 10.1109/ JPHOT.2020.2981516
- [5] ZHAO Y H, ZOU P, YU W X, et al. Two tributaries heterogeneous neural network based channel emulator for underwater visible light communication systems [J]. Optics express, 2019, 27(16): 22532-22541. DOI: 10.1364/OE.27.022532
- [6] HU F C, ZHAO Y H, ZOU P, et al. Non-linear compensation based on polynomial function linked ANN in multi-band CAP VLC system [C]// Proceedings of 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT). IEEE, 2019: 206–209. DOI: 10.1109/ICT.2019.8798825
- [7] DVB. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications [EB/OL]. [2022-05-25]. https://dvb. org/? standard

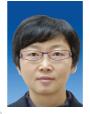
作 者 简 介



蔡济帆,复旦大学在读博士研究生;研究方向为水下可见光通信及可见光通信的人工智能算法;发表论文1篇。



徐增熠,复旦大学在读博士研究生;研究方向为水下可见光通信及可见光通信的人工智能算法;发表论文3篇。



迟楠,复旦大学教授、博士生导师;研究方向为高速光通信和高速可见光通信;曾获国家自然科学奖二等奖、中国产学研合作创新一等奖、国际工业博览会创新奖等;发表论文300余篇,出版专著6部。

面向6G的多频段智能融合组网



Multi-Band Merged Smart Networking for 6G

谢峰/XIE Feng^{1,2},王菲/WANG Fei^{1,2}, 刘汉超/LIU Hanchao^{1,2}

- (1. 中兴通讯股份有限公司,中国 深圳 518057;
- 2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室,中国深圳 518055)
- (1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
- 2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204006

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1512.004.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-08

摘要:提出了一种新的面向6G的多频段智能融合模型——Meta-cell元小区+Stack-free 非栈式用户面。该模型支持高中低任意频段资源的智能编排组合,从而按需实现组网目标,例如在最大化频谱效率和能量效率、减少空口时延和切换时延等目标间取得平衡,从而拥有极高的业务适应能力。Meta-cell元小区和Stack-free 非栈式用户面通过在组件化、解耦、池化和虚拟化的基础上叠加智能化可编排可配置,解决了现有多频段组网技术不够灵活高效的问题,有助于赋能6G丰富多样的业务和组网场景。

关键词: 6G; 多频段智能融合组网; Meta-cell; Stack-free; 解耦; 池化; 虚拟化

Abstract: A new 6G oriented multi-band merged model is proposed, named Meta-cell and Stack-free user plane. It supports flexible and intelligent orchestration and a combination of low-band, mid-band, and high-band spectrum resources to achieve networking objectives ondemand, e.g., to achieve balance among maximization of spectrum efficiency and energy efficiency, reduction of the transmission latency and handover latency. In this way, it achieves amazing service adaptation capability. By componentization, decoupling, poolization, and virtualization, Meta-cell and Stack-free user lane overcome the inflexibility and inefficiency problem of existing multi-band networking technologies and enables the diverse service and networking scenarios of 6G.

Keywords: 6G; multi-band merged networking; Meta-cell; Stack-free; decoupling; poolization; virtualization

1G到5G, 无线通信的频段从Sub-1 GHz逐渐发展到 ·6 GHz以上。工作频段和带宽范围越来越宽,不同频 段的载波物理传播特性差异和带宽差异也越来越大。相应 地, 多频段融合组网逐渐成为无线通信的常态。在5G中, 载波聚合(CA)、补充上行(SUL)和双连接(DC)构成多 频段融合组网的主要特性[1-2]。这些多频段融合组网技术陆 续被引入第3代合作伙伴计划(3GPP)标准中,基本遵循用 例(技术痛点)驱动的原则。载波聚合可提升用户峰值速 率,补充上行能够改善用户设备(UE)上行覆盖。双连接 中的4G/5G双连接有助于实现4G/5G协同组网(特别是在5G 初期,将4G作为基础覆盖层、5G作为容量层的协同组网), 新空口(NR)双连接有助于实现5G中的高低频融合组网 (将低频作为基础覆盖层、高频作为容量层的协同组网),例 如毫米波超密集组网的架构场景[3]。学术界对B5G多频段融 合媒体接入控制 (MAC) 协议的设计也同样遵循用例驱动 的原则[4]。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1806700)

用例驱动的原则使得每一项新增特性都有对应的收益,但是会不可避免地存在打补丁和协议复杂度累积问题。每一项新增的特性都没有充分考虑面向未来潜在用例的前向兼容和可扩展性。5G系统在原生设计阶段也缺乏自上而下的整体设计。这些会带来功能重叠、额外复杂性和非全局优化等问题。

随着 5G-Advanced 和 6G 更多频段和更大带宽的引入,以及更灵活的组网和业务需求的提出,这种用例驱动的弊端就越来越凸显。为满足业务场景下以机器视觉为代表的大上行需求,载波聚合技术需要做进一步增强。同时网络节能也需要载波间的协同。例如,系统消息的协同增强、终端移动性和非地面卫星网络部署的增强,均需要综合考虑载波聚合、双连接等场景下的增强^[5-6]。由于缺乏原生整体设计,这些增强将为网络带来越来越多打补丁式的复杂性。

此外,中低频段碎片化频谱的情况也会给传统的多载 波基础框架带来挑战。从全球移动通信系统(GSM)的 200 kHz 到宽带码分多址(WCDMA)的5 MHz,再到长期演进(LTE)的20 MHz,2G/3G/4G空口技术本身支持的单载 波最大带宽均较小,因此在2G/3G/4G的频谱分配中,分给

各个运营商的连续带宽明显小于5G NR 所支持的单载波最大带宽(低频40 MHz,中频100 MHz)。当这些2G/3G/4G频谱在未来被重耕用于5G NR 时,较小的连续频谱带宽资源极大地限制了NR 的频谱效率和利用率。具体来说,每一个 NR 的载波都需要发送包括同步信号块(SSB)、系统消息和寻呼消息在内的公共消息,也需要配置公共和专用的控制信道。这样,碎片化的频谱导致了过高占比的公共消息开销和控制信道开销,也阻碍了网络的能量效率的提升。不仅如此,碎片化的频谱还会导致设备(无论是基站还是终端)的算力不能被高效利用,会使算力效率降低、设备能耗增加。

因此,面向未来6G越来越丰富的新业务需求场景和组网场景,以及由此带来的大规模差异化定制要求[7-15],多载波融合组网需要从整体设计出发,升级为多载波原生和智能融合的组网,即在6G系统设计之初就将多载波融合和人工智能(AI)的结合作为基本设计要素。这样就可以支持高中低任意频段资源的智能编排组合,从而按需满足不同的组网要求,实现极高的业务适应能力[16]。此外,针对B5G演进的需求,6G中一些适合B5G业务场景和组网需求的方案也可以应用到5G演进技术中,从而提前获得6G收益。

1 面向6G的多频段原生组网设计

6G需要支持多频段多载波原生组网设计。作为衔接载波、物理信道和L2/L3服务的关键,小区必须在6G中重新被定义和建模。

1.1 从"烟囱式"小区模型到池化的Meta-cell 元小区模型

传统的小区模型以"烟囱式"的方式将载波、物理信道、传输信道和L2/L3服

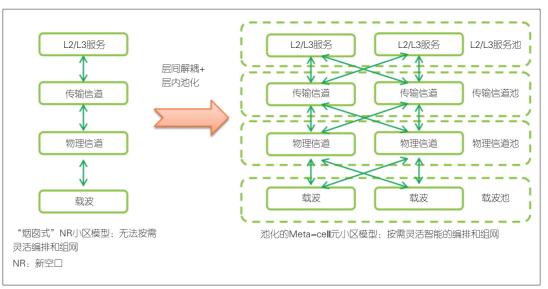
 资源的使用效率、接入网的可扩展性和易演进性,以及与 AI、大数据等智能化技术的内生式的融合。面向未来的新需 求、新技术、新业务和新场景,下一代小区需要满足灵活编 排、按需定制、弹性伸缩等要求。

面向运营、数据、信息、通信技术(ODICT)深度融合的未来,为了更好地满足不同需求,适配不同业务场景和不同服务类型,兼容新技术,下一代接入网的小区模型可采用解耦原则[17]、池化和虚拟化的设计思想,以形成资源可编排、资源与服务关系可编排、上下行链路关系可编排的技术特征,进而形成 Meta-cell 元小区的技术体系。需要说明的是,Meta-cell 暗含"小区之源""小区的本质""小区的抽象"之意,我们也可以将它理解为未来小区形态。

图1为Meta-cell元小区的模型架构和传统小区模型的对比。Meta-cell元小区将空口资源和服务分为不同的层级,自下而上分别为载波层、物理信道层、传输信道层、服务层。其中,每一层级的资源都通过池化形成载波池、物理信道池、传输信道池、L2服务池、L3服务池。不同层级的资源与资源之间、资源与服务之间能够进行灵活映射。系统可通过智能配置和编排这些资源、服务以及映射关系来实现对网络的按需定制。Meta-cell元小区的模型架构能够根据业务场景和组网需求智能编排与配置资源和服务,能够定制高效的网络形态和组网模式,在满足各种业务场景需求的同时兼顾效率和能耗,甚至催生出新的业务模式。

1.2 Meta-cell 元小区对多频段原生组网的支持

Meta-cell 对相同或不同频域范围 (例如低频/中频/高



▲图1"烟囱式"小区模型和池化的Meta-cell元小区模型的对比

频)内的相同或不同频带的频谱资源或载波资源进行按需组合使用。例如,载波级联或虚拟带宽部分(BWP)形成较大带宽的频谱资源可用于满足大吞吐量的需求,根据不同电磁波特征选择的载波资源可用于满足大容量或广覆盖需求,如图2和图3所示。这种全频谱组合的编排方式不仅可以实现不同频谱资源的高效利用,也可以通过频谱资源的灵活编排适配不同业务场景。为此,Meta-cell需要支持基带与射频的解耦和射频载波的池化:将多个零散的射频载波池化为一个连续的基带载波。基于连续的基带载波进行基带处理可以达到如下效果:降低网管的复杂度,减少网管、网规、网优工作量,提升零散频谱(例如重耕的频分双工频谱或时分双工频谱)利用效率,扩大物理下行共享信道(PDSCH)、物理上行共享信道(PUSCH)等的传输带宽,提高流量,减少配置、调度、反馈方面的开销。

载波级联的优势来自射频载波池化和虚拟化。类似地, 虚拟BWP通过将BWP池化和虚拟化,也可以在一定程度上 提升管控效率,降低管控开销和系统复杂度。

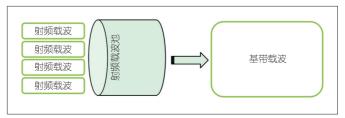
为实现全频段融合组网,Meta-cell还支持上下行链路的解耦和上下行载波链路的独立池化,以实现上下行载波的按需编排和组合,从而优化覆盖,提升系统性能。例如,在面向企业(ToB)大上行的场景中,Meta-cell支持多个上行载波的聚合或者上行载波数大于下行载波数的聚合,如图4所示。

Meta-cell还支持传输信道到物理信道的解耦和传输信道的池化。在现有小区中,扩展现实(XR)的大量数据包被封装成一个包含多个编码块(CB)的传输块(TB)。此时任何一个CB出错都会造成整个TB无法递交,进而导致时延过大。对此,可将原来一个数据流、传输信道、TB拆分成多

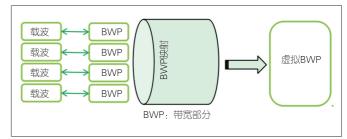
个数据子流、传输信道、TB, 这样在接收端任何一个TB出错都不会有碍于其他TB的递交, 从而可大幅提升XR这类的大带宽低时延业务的性能,如图5 所示。

Meta-cell 还支持系统信息 (SI)的池化,即可以将包括多 个载波链路在内的物理资源池的 系统消息 SI 汇聚在一个载波上 发送。这有利于那些不发送 SI 的载波进行更长时间的休眠,在 降低基站能耗的同时降低 SI 发 布的工作量和开销(配置。调 度), 简化网络运维。

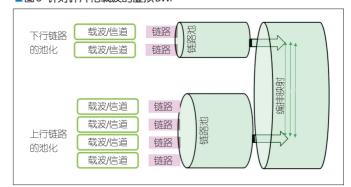
终端通过 Meta-cell 接收物理资源池信息后,可以获得 多个池化的物理随机接入信道(PRACH)资源配置。不同 的接入信道可以对应不同频谱资源和不同波束。终端可以根



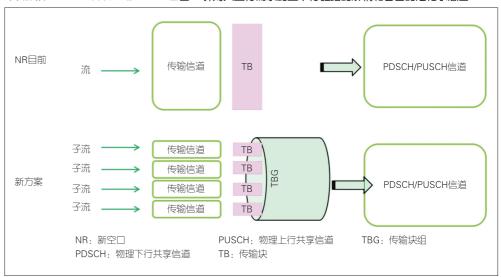
▲图2 针对碎片化载波的载波级联示意图



▲图3 针对碎片化载波的虚拟BWP



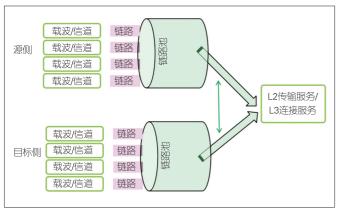
▲图4 针对大上行需求的上下行链路的解耦和各自的池化示意图



布的工作量和开销(配置、调 ▲图5 针对大带宽低时延业务的TB池化示意图

据覆盖、频点、空口质量来选择最优的PRACH资源进行接入。PRACH的最优选择可以提高接入的成功率,有助于系统快速构建覆盖/能效最优频段的连接。

对于移动性场景,通过L1链路和L2/L3服务的解耦以及L1链路的池化,当终端从源侧向目标侧移动时,即使L1链路(载波/信道)发生变化,L2传输服务(以及L3连接服务)可以保持连续服务,在L2的协议功能锚点不变的情况下,不需要重置或者重建立。如图6所示。这样可以最大程度地保证平滑的业务连续性,实现无缝移动性。

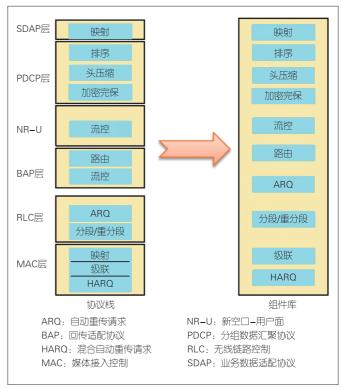


▲图6 针对移动性需求的L1链路和L2/L3服务的解耦

2 Stack-free 非栈式用户面对多频段原生组网的 支持

与Meta-cell元小区的理念和目标类似,为了实现灵活弹性、通用化、智能可定制的6G网络,如图7所示,Stackfree非栈式用户面(或转发面)使用组件化、灵活编排、解耦、池化、矢量化等信息技术(IT)理念以及智能化思想对当前通信架构用户面进行重构[18]。6G非栈式的新用户面设计能够实现网络功能按需定制和灵活编排部署,能够面向服务构建现场自适应柔性智能网络,实现网络灰度迭代升级,对各种复杂多变未知的场景具有极强的适应能力,例如,可灵活适配面对用户业务从巨大数据包到小微数据包的动态传输跨度[19]。

如图 8 所示,面向多频段原生组网,Stack-free 非栈式用户面既支持传统的载波聚合分流方式,也支持传统的双连接分流方式。前者对应非栈式中自动重传请求(ARQ)组件之下、混合自动重传请求(HARQ)组件之上,后者对应非栈式中加密完保之下、ARQ组件之上。非栈式用户面可以通过可编排、可配置的方式支持上下行解耦的分流。例如,在高低频原生组网场景中,下行数据分流到高频,上行数据分流到低频。这样可以充分适配上下行业务负荷和上下行覆

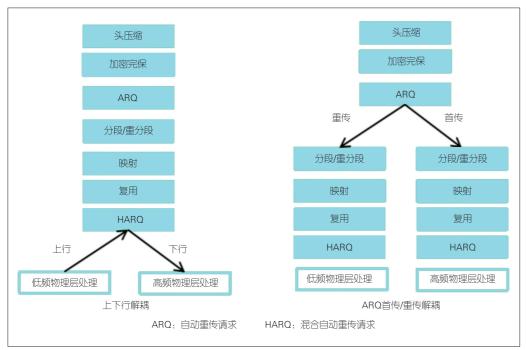


▲图7 从传统的协议栈到非栈式Stack-free组件库

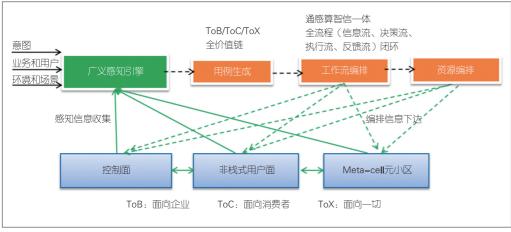
盖/传输能力,使高频分流占比达到最大、用户体验达到最优。此外,非栈式用户面还可以支持新传重传解耦的分流,例如将首传数据分流到高频,并使重传数据分流到低频。这里的首传和重传既可以是ARQ的也可以是HARQ的,以便整体优化传输鲁棒性,提高频谱利用率。

3 面向多频段融合原生组网的智能化编排体系

面向越来越丰富的业务和组网场景,在Meta-cell元小区和Stack-free非栈式用户面的基础上,需要通过智能化的手段对Meta-cell元小区和Stack-free非栈式用户面进行编排配置(智能化编排配置也适用于控制面)。如图9所示,当输入意图、业务和用户、环境和场景信息时,智能化编排体系中的广义感知引擎将为用例生成模块提供输入^[20],从而支撑ToB/面向消费者(ToC)乃至更广义的面向一切(ToX)的用例生成。用例生成模板进一步驱动通感算一体化的工作流编排,形成包括信息流、决策流、执行流、反馈流的全流程闭环。接着,工作流编排进一步驱动资源编排,为相关的工作流和工作流组件提供相应的通信资源、算力资源和逻辑资源。工作流编排模块和资源编排模块产生的编排信息下达到Meta-cell元小区、非栈式用户面以及控制面,从而促使它们完成各自的操作(包括提供感知信息给广义感知引擎)。



▲图8 针对高低频融合组网场景的上下行解耦和首传/重传解耦



▲图9 智能化编排体系

对于多频段融合组网来说,智能化编排体系同智能无线 资源管理和调度相结合。智能化编排体系主要用于制定不同频 段之间的组合和协同策略,而智能无线资源管理和调度主要 针对特定策略下的指标优化。两者的结合可以满足以下需求:

- (1)最大化系统效率和能效,其中系统效率包括系统容量效率和频谱效率;
- (2)提供差异化的用户体验,例如最大化用户速率,或者降低时延;
- (3) 适配特定环境的要求,例如卫星、高铁、室内场景等;
 - (4) 满足垂直行业定制化的要求,例如对部署、切片的

要求等。

4 结束语

从现有多频段协同组网 到6G的多频段原生智能融合 组网的转变,是未来无线通 信系统解决碎片化频谱和应 对多样化场景挑战的必由之 路。相比于现在以载波聚合、 双连接、补充上行为代表的 多频段协同组网, 多频段原 生智能融合组网在灵活自适 应能力、频谱和能量效率、 大带宽低时延支持能力、无 缝切换能力以及简化运维方 面都有大幅提升。在未来6G 时代,这将为运营商和垂直 行业最大化频谱价值和用户 体验、满足节能低碳要求提 供强有力的支撑。此外,多 频段原生智能融合组网除了 需要面对频域上碎片化频谱 挑战和业务需求的多样化挑 战之外,还需要面对空域组 网(例如密集组网、异构组 网)挑战和部署(灵活部署、 多跳部署)挑战。针对这些 挑战,中兴通讯将进行持续 研究和完善。

致谢

参考文献

- [1] 3GPP. Technical specification group radio access network; NR; NR and NG-RAN overall description; stage 2 (release 16): 3GPP TS 38.300 [S]. 2020
- [2] 杨立.5G-NR 蜂窝系统功能演进趋势分析 [J]. 无线电通信技术, 2020, 46(3): 310-314. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2020.03.009
- [3] 杨立, 谢峰, 高波. B5G毫米波通信无线接入网络的架构设计 [J]. 移动通信, 2020, 44(8): 21-27. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.08.005
- [4] CACCIAPUOTI A S, SANKHE K, CALEFFI M, et al. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(6): 110-115. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700924
- [5] 张梦洁, 杨立, 黄河, 等. 面向 5G-Advanced 演进的移动性增强技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(2): 2-8

- [6] 杨立, 窦建武. 未来卫星通信和 5G-NR 深度融合架构设计 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 60-66
- [7] IMT-2030中国6G大会. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 2021
- [8] 方敏, 段向阳, 胡留军. 6G技术挑战、创新与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26 (3): 61-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202003012
- [9] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术 [J]. 中国科学(信息科学), 2019, 49(8): 963-987
- [10] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式 [J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37-48
- [11] 中国移动研究院. 2030+愿景与需求报告 [R]. 2019
- [12] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G愿景与需求: 数字孪生、智能泛在 [J]. 移动通信, 2020, 44(6): 3-9. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.001
- [13] 王丽萍, 杨立, 何哲. 面向未来 6G 网络更低成本灵活覆盖方案之技术探讨 [J]. 长 江 信 息 通 信 , 2021, 34(10): 1-3, 11. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-1131.2021.10.001
- [14] 杨立, 赵亚军, 方琰崴. 从容量和覆盖升级到连接和品质: 论未来无线技术的盈利拓展 [J]. 信息通信技术, 2020, 14(6): 57-62
- [15] 任震, 杨立, 谢峰, 等. 基于 5G-NR 演进浅析和展望未来 6G 系统中去蜂窝化技术的应用 [J]. 信息 通信技术, 2021, 15(2): 65-71. DOI: 10.3969/j. issn.1674-1285.2021.02.010
- [16] LETAIEF K B, CHEN W, SHI Y M, et al. The roadmap to 6G: Al empowered wireless networks [J]. IEEE communications magazine, 2019, 57(8): 84–90. DOI: 10.1109/mcom.2019.1900271
- [17] 杨立, 谢峰, 戚涛. 解耦设计在移动通信系统中的应用和趋势 [C]//5G 网络创新研讨会(2020): TD 产业联盟, 2020: 365-370
- [18] 薛妍, 杨立, 谢峰. 6G 时代新用户面设计和关键技术 [J]. 移动通信, 2022, 46 (6): 2-7
- [19] 杨立, 黄河, 张梦洁, 等. 小微数据包高效无线传输技术的发展和趋势 [J]. 移动 通信. 2021. 45(1): 90-95
- [20] 薛妍, 谢峰, 杨立, 等. 面向 6G 时代新通信系统的内生感知 [J]. 移动通信, 2021, 45(4): 79-84

作 者 简 介



谢峰,中兴通讯股份有限公司6G接入网架构负责人、技术研究首席专家,移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室学术带头人;参与国家项目5项,获第八届广东专利奖银奖;发表论文10余篇,申请专利100余项。



王菲,中兴通讯股份有限公司技术预研工程师;负责4G/5G/6G移动通信技术的标准预研和算法研究与设计,主要研究方向为6G网络架构、4G/5G网络功率控制、VolTE/VoNR算法等;参与国家重点项目1项,输出专题算法方案100余个。



刘汉超,中兴通讯股份有限公司技术预研工程师;负责4G/5G/6G移动通信技术的标准预研和算法研究与设计,主要研究方向包括6G网络架构、4G(Pre5G)物理层算法、5G网络控制算法等;参与国家重点项目1项,输出专题算法方案100余个。

面向6G全场景的多频段协同 覆盖扩展技术



Multiple Frequency Bands Cooperation Based Coverage Extension Technologies for 6G Full Scenarios

韩书君/HAN Shujun,董晴/DONG Qing, 许晓东/XU Xiaodong

(北京邮电大学,中国北京100876) (Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204007

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1708.014.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-10

摘要:未来全场景业务对 6G 提出了全面要求,无线覆盖能力的扩展将成为 6G 主要挑战之一。分析了未来 6G 系统中可能部署频段的无线覆盖特性,探究了多频段协同使能的全场景覆盖扩展技术。认为多频段协同部署是实现未来 6G 全场景覆盖的关键技术之一,需要着重关注降本节能、绿色高效、安全可信的多频段协同部署技术。

关键词: 多频段协同; 覆盖扩展; 全场景

Abstract: In the future, full scenario services will put forward comprehensive requirements for 6G, and the expansion of wireless coverage capability will become one of the major challenges of 6G. The wireless coverage characteristics of different frequency bands to be used in 6G are analyzed. In addition, the empowering technologies of multiple frequency bands collaborative for full scenarios coverage extension technologies are investigated. It is believed that multiple frequency bands cooperation deployment is one of the key technologies to realize the coverage extension of full scenarios. More attention should be paid to the technologies of multiple frequency bands collaborative deployment with cost reduction and energy saving, green and efficiency, safety and reliability.

Keywords: multiple frequency bands cooperation; coverage extension; full scenarios

方 5G 商用及其在社会各个领域的渗透,移动通信已为全球80%的用户提供移动通信服务。受限于覆盖能力和建设成本等因素,目前移动通信网络只覆盖了约20%的陆地面积、小于6%的地表面积¹¹,尚未达到全球覆盖的目标。未来6G业务对覆盖能力提出了全面的需求,包括应用场景从单场景向多场景扩展,基础设施从平面到立体、从局部到全球、从中低频段向更高频段扩展等。无线覆盖能力的扩展成为6G的主要挑战之一。为了满足6G系统的多样化需求,有效地重新利用低、中、高频段频谱资源至关重要。针对如何在6G网络时空尺度跨度大、全场景业务质量差异大、超密集覆盖能耗大等关键挑战下实现容量和能效约束下的覆盖能力扩展,我们从面向全场景的多频段协同覆盖扩展技术角度展开研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1806900); 国家自然科学基金(61871045); 中国博士后基金(2021M690470)

16G 愿景及无线覆盖扩展需求

1.1 6G 愿景及典型应用场景

目前,虽然业界对6G移动通信的相关研究正处于百家争鸣的预研阶段,但已有了大概的愿景,可概括为:物理世界、数字世界、生物世界和泛在智能的融合,即"万物智联、数字孪生"。基于信息、通信与数据融合技术构建的软硬件基础设施,未来6G网络业务将呈现数字化、智能化、精准化、情景化、个性化、沉浸化等全新发展趋势。相比于5G时代典型的三大应用场景,增强型移动宽带(eMBB)、高可靠低时延通信(URLLC)和大规模机器类型通信(mMTC),6G典型应用场景更加多样化(如图1所示),涵盖沉浸式云扩展现实(XR)、全息通信、感官互联、智慧交互、通信感知、普惠智能、数字孪生、全域覆盖八大业务应用场景^[2]。6G应用场景对通信网络的体系架构、覆盖、速率、带宽、时延等提出了新需求^[3]。

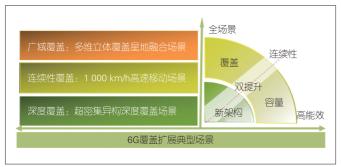


▲图1 网络需支撑的潜在全场景业务[2]

1.2 6G 无线覆盖扩展需求

覆盖是移动通信基础指标,频谱是无线通信的核心资源。覆盖、频谱、容量和能效之间存在着互相约束的复杂关系。我们可以从6G全场景覆盖扩展的角度来提炼这些应用场景的网络覆盖能力需求,具体包括移动宽带在空间、地面的服务能力,在热点区域提供的超高容量,以及针对垂直行业与物联网连接特性等服务能力的拓展中。我们可以将这些需求总结概括为广域覆盖、连续覆盖以及深度覆盖,如图2所示。未来6G在高速率、低时延、高可靠、高密度、广覆盖等方面同步扩展无线覆盖时面临着巨大挑战。因此,我们需要进一步考虑扩展且具有业务针对性的覆盖能力,以有效地支撑新服务新业务所需覆盖,保障通信以及新功能。5G重点关注了流量密度和连接密度等覆盖指标。随着6G的演进,如何在时空尺度跨度大、全场景业务质量差异大、超密集覆盖能耗大等关键挑战下实现容量和能效约束下的覆盖能力扩展成为6G无线覆盖的核心难题。

为了有效地支撑更为宽广的新服务与新场景所需的覆盖,未来6G网络将在极致低时延高可靠、泛在海量连接、



▲图2 6G全场景覆盖扩展需求

感知与定位等关键挑战下,基于无线覆盖扩展新架构,支持全场景业务。这样可以实现广度覆盖能力与深度覆盖能力按需覆盖、全场景与大动态业务质量一致性保障、高容量与高能效组网需求有机融合,以及空天地立体协同、全频段高效利用和通信计算融合基础上的6G网络无缝覆盖。特别地,需要针对6G全场景业务有针对性地扩展6G无线网络的覆盖能力,包括容量与覆盖能力的双提升、服务与业务质量的连续性以及双提升基础上的高能效。

2 多频段协同覆盖特点

传统移动通信主要针对人口密集区域提供网络覆盖,且覆盖半径有限,而6G将支持天地融合全域覆盖,大幅提升小区覆盖,预计将实现Tbit/s的传输速率,这意味着将需要大量的频谱资源。作为"最后一米"的侧行链路,短距通信将利用毫米波、太赫兹等高频段提供极致无线连接,重点满足短距通信超高吞吐、超低时延和超低功耗的系统需求。沉浸式云XR、全息通信、全新的元宇宙接口等业务场景,都可以通过短距通信实现从有线到无线的跃迁,实现自由移动以及真正的沉浸式体验。因此,未来6G无线网络将充分利用低中高全频谱资源。其中,中低频段将提供基础覆盖,毫米波、太赫兹和可见光等高频段按需高效利用,主要应用于高容量、高速率场景中。多频段协同融合覆盖技术可以实现空天地一体化的全球无缝覆盖,随时随地满足安全可靠的"人机物"无限连接需求。

2.1 中低频段:Sub-6 GHz

Sub-6 GHz 频段主要是指工作频率在 450~6 000 MHz 以下的 6 GHz 以下频段,用于提供广域覆盖和深度覆盖。根据第 3 代合作伙伴计划(3 GPP)的划分,5 G新空口(NR)主要包括两大频谱范围: Sub-6 GHz 频段和毫米波频段。2.1 GHz 和 3.5 GHz 频段的协同组网是 5 G 网络覆盖容量双提升的重要手段。然而,随着移动通信赋能数字产业化和产业数字化的发展,面向企业(ToB)业务的大上行、端到端服务保证需求使得其对上行吞吐量的要求越来越高。美国联邦通信委员会建议 6 G 频段应考虑高于 5 G,如 9 5 GHz~3 THz,但是高频段意味着高成本。因此,如何重耕低频段并重新审视低频段的使用方法,利用中低频段与毫米波频段协同组网,实现6 G 网络覆盖和容量的双提升,是一个亟待解决的问题。

2.2 毫米波

 (每千米的路径损耗为数十分贝)等缺点,但是可提供数 百倍的带宽,满足下行高速传输的需求。大规模阵列天线 及数字+模拟方式的波束赋形技术,可降低高频密集组网 的蜂窝系统小区间干扰[5]。为了实现更好的网络性能,我 们可利用毫米波频段进行微小区按需灵活部署。这不仅可 以与低频段混合组网,提供大带宽和高速率的公网服务, 还可以将部分频点单独规划,满足行业专网大带宽、低时 延和安全可靠的网络需求。但利用毫米波频段难以实现连续 覆盖组网。如何利用智能有源中继器或有/无源智能反射面, 扩展毫米波通信的传输距离和覆盖范围,仍待进一步研究。

2.3 太赫兹

太赫兹作为6G技术候选频段之一, 频段在0.1~10 THz 范围内。相比于现有的通信技术手段,太赫兹通信技术除了 具有丰富的频谱资源和高速数据传输能力以外, 在空间组网 通信中具有更强的跟踪捕获能力, 更强的抗干扰、抗截获能 力。另外,其具备的克服临近空间通信黑障能力,可以为临 近空间高速飞行器提供测控通信手段[6]。然而,太赫兹覆盖 范围受限, 更适用于短距离通信, 如地面超高速无线移动场 景、高速无线回传场景、无线数据中心场景、短距离保密无 线通信、空间无线通信等特定应用场景。因此,6G需要从 软硬件角度综合考虑,进一步设计低成本、低功耗、低复杂 度的太赫兹通信系统和高频通信组网策略, 进而提升太赫兹 通信效率和覆盖性能。

2.4 可见光

可见光无线通信的工作频段范围在400~ 800 THz。与目前的移动通信网络相比,可见光 通信具有宽带高速、泛在覆盖、安全兼容、融合 包容、绿色节能五大独特优势, 其在室内环境中 更是先天具有广覆盖的优势。可见光通信技术的 应用横跨空天地海立体网络,这导致其传输信道 异常复杂, 信号在经过传输的过程中会受到线性 与非线性效应的影响。特别是在复杂信道与高功 率的情况下,非线性损伤将成为制约可见光通信 系统性能的主要瓶颈问题。如何在可见光传输收 发芯片与模块等领域实现突破, 已成为实现超高 速率、高可靠可见光通信系统所面临的挑战四。

3 多频段协同使能全场景覆盖扩展

随着移动数据流量呈指数式增长, 无线通信 正面临有限频谱资源和迅速增长的高速业务需求 ▲图3 多频段协同使能全场景覆盖扩展

的矛盾。太赫兹通信与可见光引入移动通信网络后,需统筹 考虑Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹等全频谱的协同融合组网 (如图3所示),实现各个频段的动态互补,进而提升全场景 网络覆盖性能。

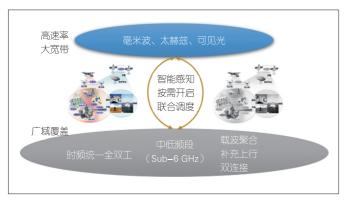
3.1 多频段协同组网

目前, 3GPP在5GNR系统中引入了载波聚合、补充上 行和双连接3种高低频协同技术,在保障基础覆盖的基础 上,可以提高峰值速率,更好地满足大带宽业务需求图。在 6G时代,基于毫米波、太赫兹通信的各类技术,将成为提 升6G网络覆盖性能,促进6G新场景、新业务部署的关键使 能动力。6G需要充分地适配高频毫米波通信的各种特点。 针对其覆盖范围受限的情况, 我们需要研究如何通过多频段 协同组网来高效利用各层资源,满足6G全场景异构用户的 覆盖需求,如图4所示。在动态复杂的无线环境下,针对6G 全场景多频段共存问题,利用人工智能、数字孪牛等技术构 建智能化频谱资源管理架构,研究多频段资源智能感知、信 息交互与联合调度,可实现多频段资源的随需可达、按需分 配等,满足6G多维立体全场景的泛在接入和无缝覆盖。

3.2 多频段协作感知

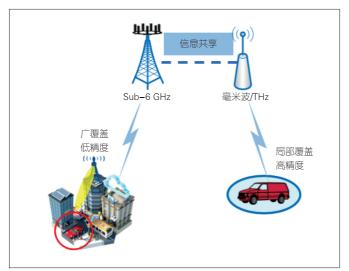
6G将会综合利用不同频段的优势和特点,提供丰富的 感知服务。在相同频段同时提供通信功能与感知功能,可





▲图4 多频段协同组网

以实现频谱利用率的提升。由于天然的物理性质的约束,不同频段电磁波所能提供的感知功能和业务能力是不同的。理论上,频段越高,波长越短,频带越宽,提供的感知精度和时频分辨率就会越高;但是,由于无线信号的衰减或遮挡,感知有效作用的距离会越短,范围会越小。通常,低频通感融合信号可以做大轮廓的粗浅感知应用,而高频通感融合信号可以做更精细的感知应用。例如,在环境监测场景下,如图5所示,可以综合利用Sub-6GHz基



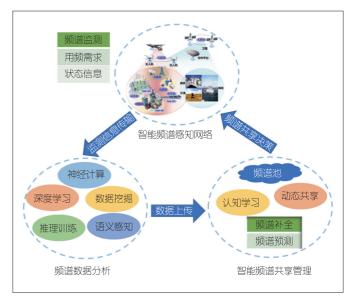
▲图5 高低频协作环境感知

站的穿墙效果好、广覆盖特性做低精度的环境检测,同时,利用毫米波基站或太赫兹基站在重点区域做高精度、小范围的环境检测。工作在不同频段的基站需要相互协作以进行信息共享,通过对特定用户或区域进行联合感知,优化传输或提供丰富的感知服务,降低高频段通信开销。

3.3 多频段智能共享

频谱资源紧缺及利用效率低等问题驱动着智能频谱共享

技术的研究[9]。频谱资源是制约星地融合的主要瓶颈之一。 在星地网络中, 频谱资源的使用存在着卫星网络频谱利用率 较低、地面网络频谱资源稀缺性严重的问题。为了建立星地 统一的频谱资源分配机制,我们需要利用卫星网络和地面网 络在通信覆盖方面互补的特性,针对每个子系统对频谱资源 不断变化的使用需求,将智能引入基站,从而建立一套智能 频谱共享管理体系,如图6所示。该系统可以使各子系统协 调使用受限的频谱资源。智能频谱共享技术就是利用认知智 能理论和技术实现动态频谱管理。具体地,基于神经计算、 深度学习、数据挖掘、推理训练等人工智能(AI)新技术, 设计智能频谱共享机制,提出基于数据驱动型和模型驱动型 空间频谱环境快速感知、基于AI的空闲频谱精准预测与智 能调度,实现动态频谱管理。然而,卫星通信系统与地面通 信系统共享频率时,双方都会受到对方同频干扰的影响。我 们需要针对不同频段、不同场景, 考虑不同的干扰抑制方 案。此外,研究基于区块链的分布式目高效的干扰避免或缓 解技术,能够实现6G应用中的大规模连接与系统性能增强。



▲图6 面向6G的智能频谱共享管理体系架构

4 未来研究展望

4.1 智能反射面辅助的高频段通信技术

智能反射面是解决高频段毫米波和太赫兹传输时路径损耗大、覆盖能力弱的一项有前景的低功耗、低成本技术。在终端和基站之间部署智能反射面,可以对无线信号进行智能调控与波束赋形^[10],实现无线传播环境的重构,进而解决信号强度较弱或视距通信不可达的小区边缘或盲区覆盖问题,

按需动态建立非视距通信链路,提高6G无线网络覆盖深度性能。为了进一步提高6G无线覆盖扩展能力,业界亟待探讨如何将具有波束赋形能力的智能反射面与传统通信系统融合,以及如何实现基站处智能反射面参数与信道环境中的智能反射面参数联合设计。

4.2 绿色高效的高频段通信技术

更高的通信频段使巨量设备接入无线网络,这为移动通信系统实现绿色节能带来了挑战。更高的频段意味着更大的传输损耗,因此如何通过密集部署高频段基站来保证无线覆盖的连续性,成为亟待解决的问题。然而,密集的小区部署使用户面临更频繁的小区切换,这给网络负载和终端能耗带来新的挑战。此外,基于毫米波和太赫兹的基站,其射频、功放等电能消耗巨大。据运营商官方统计,5G基站的最大功耗约是4G的3~4倍,因此急需一种低成本、低能耗、高能效的高频段通信技术来支撑绿色6G无线网络覆盖扩展的连续性。我们还可以从多频段协同组网的终端能力出发,通过多学科融合和系统性设计,提升终端射频模块传输能力,降低射频模块功耗。

4.3 安全可信的动态频谱共享技术

针对集中式的频谱管理模式面临的频谱资源利用效率低、安全性威胁强和维护费用高等问题,全球相关机构开展了动态频谱共享技术研究。然而,未来6G 网络是一个多子系统多业务共存共建的全场景网络系统,不同实体之间存在频谱感知误差。而且,不同实体在信息共享中可能实施虚假欺骗行为,潜在的分布式多频段系统组网方式将会带来更多的管控盲点和更隐蔽的攻击风险点。因此,如何建立一个具有可用性、可信性、安全性、公平性和高效性的"动态频谱共享"和"网络共建共享"体系架构,是实现6G无线网络覆盖扩展的重要保证。

5 结束语

随着新场景、新业务的出现及垂直行业的发展,探索基于多频段协同的覆盖扩展技术变得日益重要。学术界及产业界正考虑如何通过多频段协同覆盖扩展技术,支撑时空尺度跨度大、业务质量差异大的全场景业务,从而实现6G容量与覆盖的双提升、多维立体星地融合场景下的服务与业务质量连续性、1000 km/h 的超高速移动场景,以及绿色超密集异构深度覆盖场景中的关键业务。

参考文献

- [1] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 218-228. DOI: 10.1109/MWC.001.1900333
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [3] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2020, 64(1): 1–74. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6
- [4] 信科移动. 全域覆盖 场景智联—6G 场景、能力与技术引擎白皮书 [R]. 2021
- [5] HAN S F, I C L, XU Z K, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(1): 186–194. DOI: 10.1109/MCOM.2015. 7010533
- [6] 陈智, 张雅鑫, 李少谦. 发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考 [J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(3): 43-47. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.03.008
- [7] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析 [J]. 移动通信, 2020, 44 (6): 17-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.003
- [8] 曹丽芳, 江天明, 邓伟, 等. 5G 频段间协同技术 [J]. 电信科学, 2021, 37(8): 148-154
- [9] QIN Z J, ZHOU X W, ZHANG L, et al. 20 years of evolution from cognitive to intelligent communications [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2020, 6(1): 6–20. DOI: 10.1109/TCCN.2019. 2949279
- [10] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020. 3007211

作 者 简 介



韩书君,北京邮电大学博士后;主要研究方向为面向 B5G/6G的新一代移动通信理论与技术;主持和参加项目10余项,获得1项科研成果奖;发表论文20余篇,申请专利60余项。



董情,北京邮电大学在读硕士研究生;主要研究领域为面向星地融合的覆盖扩展技术;申请专利2项。



许晓东,北京邮电大学教授;主要领域为无线组网及覆盖扩展技术;作为负责人完成多项国家级项目,获北京市科学技术奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖,专著获得"中国出版政府奖";近5年发表重要期刊论文50余篇,申请专利80余项。

双智协同网络:理念与技术



Conception and Technology of Dual Intelligence Collaborative Network

顾军/GU Jun,张宏涛/ZHANG Hongtao,顾健/GU Jian

(中兴通讯股份有限公司,中国 深圳 518057) (ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204008

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1513.006.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-12

摘要:提出一种多频多制式移动网络中基于双层智能化互操作的新型协同方案,以满足网络发展不同阶段及不同场景下的多目标优化要求。一方面,基于业务体验的用户级智能编排与基于网络关键绩效指标(KPI)的小区级参数智能优化相结合,实现4G/5G多制式协同下的用户体验和5G分流能力的联合最优;另一方面,用户级智能编排与小区级智能负载均衡相结合,实现多频5G协同下的用户体验与5G容量联合最优。总体上,在网络不同阶段用户级智能与网络级智能相结合而形成的双智矩阵,可精准满足商用网络下的差异化业务体验需求,最大化网络总体收益。

关键词: 双智协同; 用户编排; 负载均衡; 流量压抑; 体验预测

Abstract: A new collaborative scheme based on dual-layer intelligent inter-operability in multi-frequency and multi-standard mobile networks is introduced, which meets the multi-objective optimization requirements in different stages of network development and in different scenarios. On the one hand, the combination of user-level intelligent orchestration based on service experience and intelligent optimization of cell-level parameters based on network key performance indicators (KPIs) realizes the joint optimization of user experience and 5G offload capability under 4G/5G multi-standard coordination; On the other hand, the combination of intelligent orchestration and cell-level intelligent load balancing realizes the joint optimization of user experience and 5G capacity under multi-frequency 5G collaboration. In general, the dual-intelligence matrix formed by the combination of user-level intelligence and network-level intelligence at different stages of the network realizes the precise satisfaction of differentiated service experience in commercial networks and maximizes the overall network revenue.

Keywords: dual intelligence collaboration; user orchestration; load balance; payload suppression; experience prediction

直着 5G 网络的规模商用和不同速率、时延、可靠性业务的爆发式发展[1],在精准保障差异化用户体验的同时提升 5G 网络资源效率、容量和收益,逐步成为网络优化、演进与发展的核心命题。这是传统基于比特传输量的流量经营向基于实际业务感知满足度的体验经营转型的核心基础,同时也对多频多制式复杂网络下的资源管理策略及性能、用户体验保障机制提出极大挑战。作为蜂窝网络技术的关键组成部分,基于覆盖、质量、负载等网络指标的移动性管理和资源均衡,在保持网络连接连续性、提升资源效率等方面发挥关键作用[2],并在第 3代合作伙伴计划(3GPP)5G-Advanced的标准演进中进一步优化,持续提升网络性能[3]。然而,这在理念和技术上与网络发展的核心价值诉求仍然存在一定差距。

在理念上,传统技术目标与网络收益目标存在差距的局面需要被打破。综合移动网络流量经营的现实要求、向体验经营转型的内在趋势,以及实现网络收益和用户体验协同最优网络(BE-Net)的理念,都将成为网络演进和技术发展的引擎。我们应以用户体验为导向打造适应多样性业务需求

的优质网络,以服务质量的提升带来用户和业务的可持续增长;基于差异化的体验需求及场景化的效能评估,实现有限资源的精准投放与分配,在保障用户感知的基础上获得最佳的投资收益,以促进网络进化的良性循环和可持续发展。

在技术上,传统以网络指标为准则、以平均关键绩效指标(KPI)为目标的网络中心化¹⁴¹一刀切互操作策略,无法适应不同基站和小区的差异化场景,更无法满足高清直播、扩展现实(XR)等不同业务的差异化需求,严重阻碍新业务的发展,不利于网络效率的提升。因此,我们需要通过用户中心化的范式迁移¹⁵⁻⁷¹和基于无线网络内生智能的服务能力^{[8-91},结合网络级的场景优化^[10]、用户级智能感知和服务能力拓展,更加系统性地满足移动网络在网络效率与收益、用户体验方面的提升要求。

本文立足BE-Net的基本思想,面向多频段多制式网络 层间协同场景,提出集用户级智能和网络级智能于一体的双 智协同网络,以实现在不同网络发展阶段用户体验和网络效 率的双优价值目标。

1 网络需求与双智矩阵

在4G和多频段5G共存的多层次复杂网络中,移动性管理除了要保障基本的移动性性能外,还需要满足更加差异化的业务需求,包括更加多元化、场景化的系统要求。传统基于网络一刀切策略的层间互操作面临越来越大的挑战。具体来看,网络在不同发展阶段、不同场景中存在不同的体验和效率双优目标,需要定制化的双智矩阵能力组合来实现不同时空坐标下的网络价值,如图1所示。

1.1 双智体验协同

在5G发展初期,5G网络部署和优化的核心诉求有两个方面:一是在4G/5G双层网下最大化5G终端在5G网络的驻留,实现4G流量向5G网络的迁移,增加5G分流比(5G流量占4G和5G总流量的比值),并通过5G的大带宽能力进一步激发用户的流量消费,进而提升5G的网络效率和投资回报;二是确保不同要求的用户体验(如大上行速率的高清直播、大下行的高速流媒体/XR等)及时得到保障,并在总体上实现用户体验与5G分流比和流量的双优,持续促进5G业务和网络的发展。

如图 2 所示,为满足差异化用户体验与5G分流比和流量的双优需求,小区级互操作参数自优化智能用户编排需要被引入,以形成网络级与用户级一体化的双智体验协同解决方案。其中,小区级参数自优化通过对异频切换/重选门限的智能下探(如 5G 到 4G 的异频切换门限从-110 dBm下调至-120 dBm),在不影响网络基本 KPI 的基础上扩大 5G 网络层的覆盖范围,吸收更多用户,增加 5G业务流量及分流比。同时,更大的覆盖范围会引发更大概率的体验不佳问题,尤其是在边缘区域难以满足高清直播等大速率业务需求。智能用户编排"以用户为单位,基于源侧体验评估、目标侧体验预测以及智能栅格驱动下的免测量将用户快速导引到体验更

优的频层和小区中,精准感知并满足个性化业务体验需求。通过用户体验保障的两级解耦,在完成从以 KPI 为中心的互操作到网络级智能互操作参数优化后,基本连接体验与用户级智能编排下的业务体验进行双智协同优化,可带来用户体验和网络效率的双重收益。

1.2 双智网络均衡

该阶段 5G 网络从单频走向多频协同,不同频点之间互操作以及协同的主要目标逐步转变成在保障业务需求的同时最小化用户消耗的网络资源,并通过层间资源使用的均衡性降低用户的拥塞、冲突以及业务被压抑的概率,总体上实现用户体验以及多频 5G 网络容量的双优;进一步地,当总体资源出现瓶颈时,优先保障高价值用户以及高价值业务需求是持续提升网络价值运营能力的基础,通过体验与效率的最优协同最大化网络的投资回报。

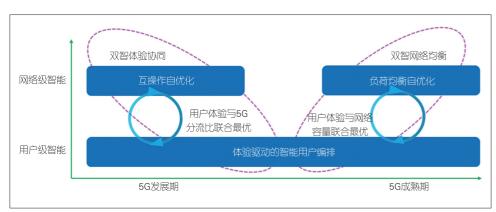
如图 3 所示,在多频 5G 网络中,为了实现用户体验与网络容量的双优,并使网络收益达到最高,传统以网络负荷为中心的负载均衡机制需要进行双智重构:一是引入前文所述的用户级智能编排,在及时感知与保障差异化用户体验的基础上,确保用户被导引到资源消耗最低、拥塞和容量抑制风险最小的频层和小区中,从而在用户层面间接促进多层网之间实现均衡;二是在智能化负荷评估、流量压抑预测以及用户选择、个性化小区偏置等方面对负载均衡的关键环节进行增强,进而提升负载均衡的及时性与准确性。整体上来看,智能用户编排与智能负载均衡协同下的双智网络均衡,能够充分实现用户体验和多层 5G 网络总体频谱效率/容量的共同提升。

2智能用户编排

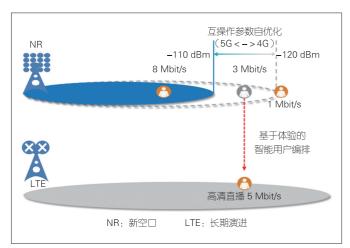
在双智体验协同和双智网络均衡中,双优目标中的用户 级体验需要通过智能用户编排来实现。整体来看,智能用户

编排与传统互操作机制有两点不同:一是从参考信号接收功率(RSRP)、信号与干扰加噪声比(SINR)等网络指标触发到用户体验触发,二是在切换目标上从连续的移动性连接到连续的业务体验及资源效率保障。

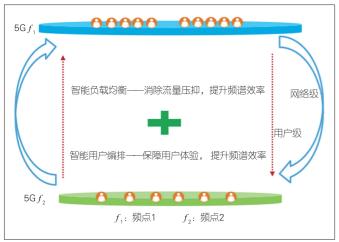
智能用户编排包括源侧体验评估、目标测性能预测(如图4所示)以及基于虚拟栅格的知识学习。



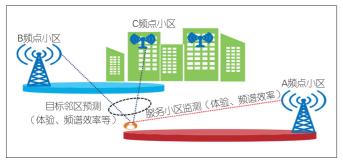
▲图1 网络收益与用户体验协同最优理念下的双智矩阵



▲图2 双智体验协同



▲图3 双智网络均衡



▲图4 源侧/目标测近实时监测

2.1 源侧体验评估

在移动网络中,由于用户位置、网络负载以及无线环境等具有时变性,并且这种时变性会对链路性能产生影响,因此我们需要借助近实时的性能监测及时感知业务体验和网络能力的变化。

(1) 体验状态评估

体验状态评估包括间接评估和直接评估两种。

- (a) 基于调度阻塞率的间接体验评估:调度阻塞率 B=调度缓存数据量/当前调度数据量;
 - (b) 基于业务感知的直接评估(以视频为例):

VMOS = $f(vQuality, vLoading, vStallingfreq, vStallingrec, W_n)$,

(1)

其中,VMOS为视频用户感知得分,vQuality为视频源质量(码率),vLoading为缓冲时长,vStallingfreq为卡顿次数,vStallingrec为卡顿恢复时长占比, W_n 为各个因素的权重占比。

(2) 体验风险评估

服务小区可达速率与速率余量评估:基于小区负载和用户负载两级负载指标以及信道质量,可以计算和预测用户当前能够获取的可达速率上限,如公式(2)所示。

 $R_A=\alpha\times BW\times(1-Load_1+Load_2)\times log_2(1+\beta\times SINR),$ (2) 其中, α 、 β 为效率因子,可通过对速率和各个参数之间的历史数据学习与拟合获得;BW为系统带宽;Load_为小区整体资源负载,Load_为当前用户资源负载。根据可达速率,我们可以预测评估用户在当前小区可达速率 R_A 与业务需求速率 R_T (如1080P高清直播需要 $5\sim10$ Mbit/s 的速率)之间的速率余量:

$$R_{\text{GAP}} = \text{MAX}\{(R_{\text{A}} - R_{\text{T}})/R_{\text{A}}, 0\}_{\circ}$$
(3)

若 R_{GAP} 小于速率安全门限 R_{Margin} ,或者调度阻塞率/业务感知得分低于目标值,则系统触发和启动其他频层/小区的性能预测。

2.2 目标测性能预测

对于达到基本电平要求的异频邻区,我们会对频谱效率、可达速率、压抑距离进行预测,并计算用户导引优 先级。

(1) 频谱效率与可达速率预测

上行频谱效率为:

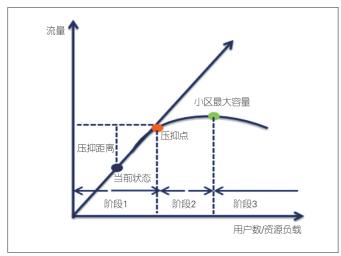
$$SE_{III} = \alpha \times \log_2(1 + \beta \times SINR),$$
 (4)

其中,根据邻区下行接收 RSRP 和发射功率计算获得的路损,并结合基站间接口获取的干扰信息,可以计算出 SINR。下行频谱效率 SE_{DL}通过本文 2.3 节描述的栅格知识库获得。归一化频谱效率 SE_{scale}=SE/SE_{max},其中 SE_{max} 为各个候选目标小区的最大频谱效率。根据频谱效率、带宽以及负载,我们能够获得可达速率 R_A。

(2) 压抑距离预测

随着用户数及资源利用率的增长,由于存在资源挤压、干扰加大等因素,网络流量的升高过程为:首先呈现线性,

随后到达压抑点并达到最大值,最后逐步下降,如图5所示。其中,压抑距离*D=P-P,IP*。



▲图5 流量抑制曲线

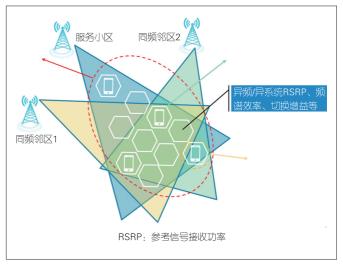
(3) 用户导引优先级计算

根据候选小区的可达速率、频谱效率以及压抑距离,我们计算目标小区选择优先级 $P=\{\text{Max}(R_A,0)\}^{\beta} \times \text{SE}_{\text{scale}}{}^{\theta}D_{s}{}^{\theta}$,其中 β 、 θ 为加权因子。将用户切换至优先级最高的目标小区,有助于实现用户体验与资源效率的平衡。

2.3 基于虚拟栅格的知识学习

基于K-means等非监督机器学习算法,利用服务小区和同频邻区的RSRP,我们可以将覆盖区域划分为若干个虚拟栅格。进一步地,我们也可以通过增加终端类型、最小化路测(MDT)等维度信息来提升栅格的划分精度,如图6所示。对于划分好的空白栅格库,每个栅格的索引信息包括:服务小区身份信息(ID)和RSRP最大/最小值、同频邻区1的ID和RSRP最大/最小值、同频邻区2的ID和RSRP最大/最小值。也就是说,根据UE的同频测量报告(服务小区ID和RSRP值、两个同频邻区的ID和RSRP值)理论上系统就能定位出该UE当前处于哪个栅格位置。

在空白栅格划分之后,根据周期性的UE同频测量报告,系统能够近实时地定位出UE当前所处栅格位置,并将该UE在当前位置发生的信息记录所属栅格中,这就是一次有效样本统计。信息记录主要有两种(都是针对异频和异系统邻区的):一是在当前栅格位置上收到的异频/异系统测量报告信息,包括频点信息、测量报告小区ID以及测量结果RSRP/RSRQ/SINR值;二是在当前栅格位置上向某个邻小区的切



▲图6 基于本邻小区覆盖电平的智能栅格划分

换成功率信息,以及在该邻区上统计获得的频谱效率信息。 当一个栅格内统计的样本数量达到一定门限时,这个栅格就 可以被其他功能查询所使用。

3 互操作参数自优化

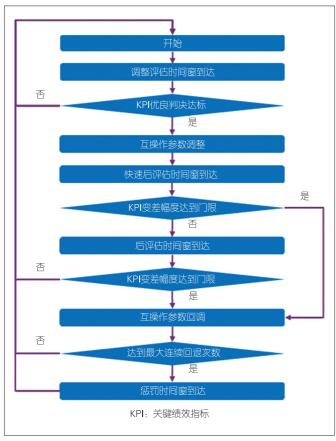
随着5G 网络的逐渐成熟,运营商希望UE能够更多驻留在5G 网络以提升用户体验。现网通常采用下调5G到4G 互操作门限的方法来扩大5G小区的覆盖范围,提升5G驻留比。传统的人工调整难以做到一站一策,而一刀切的调整方式在不同站点和不同网络环境下,其效果可能存在巨大差异,从而难以保障较好的用户感知和网络性能指标。

基于对5G小区各项基础指标和用户感知指标的评估,在不影响网络性能指标前提下,自动调整5G到4G的互操作参数,如连接态A2事件门限和时间触发(TTT)、空闲态非同频小区重选起测门限,可使5G小区的覆盖范围和容量得到尽可能的扩大,网络服务能力上限得到提高,同时5G驻留比和分流比也将得到提升,如图7所示。

4 智能负载均衡

(1) 空分因子学习

在 5G 网络中,由于广泛引入大规模多输入多输出 (MIMO) 技术,在进行资源块(RB)利用率的统计时,我 们需要借助空分因子 β 。空间复用能力的引入能够更加真实 地体现资源的使用情况,有利于精细化计算上下行业务信道 的资源利用率。PDSCH 的物理资源块(PRB)利用率= Σ UE (Σ 流数 × RB) /小区 PDSCH 可用 RB 数 × β ₁; PUSCH 的 PRB 利用率= Σ UE (Σ 流数 × RB 数) /小区 PDSCH 可用 RB 数 ×



▲图7 互操作参数自优化

 β_2 。由于受到业务类型、干扰特性等因素的影响,不同小区 在不同时间的实际空分能力存在差异,因此需要通过自动统 计学习来实现 β 的更新优化。PDSCH的RB复用因子 β_1 = Σ UE(Σ 流数×RB数)/小区PDSCH可用RB数; PUSCH的 RB 复用因子 β_2 = Σ UE(Σ 流数 × RB 数)/小区 PUSCH 可用 RB 数,如图 8 所示。

(2) 智能无线资源控制 (RRC) 容量因子学习

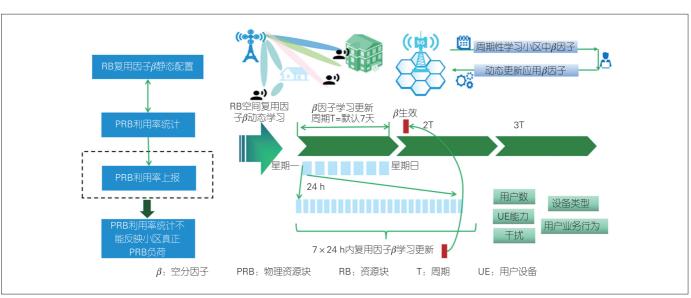
同样地,考虑到业务类型、用户分布、干扰特征、移动性特征等因素的影响,我们需要在计算RRC连接负荷时需要引入e因子,以便更加真实地反应RRC的连接容量,如图 9 所示。RRC连接负荷=在线用户数/(系统最大RRC连接数×e)。其中,e可以根据图5的拐点用户数进行学习更新,且e=拐点用户数/系统最大RRC连接数。

(3) 智能负载优化

根据上述RB利用率、RRC负载以及流量压抑距离的学习和更新,主动式与被动式相结合的方式能够对不同频层间的负载进行智能优化。其中,主动式优化通过学习交叠区域用户分布对小区间的个性化切换偏置(CIO)进行优化(如图10所示),自动实现用户分布在不同频层/小区间的重组;当资源负载和流量压抑距离达到目标阈值时,被动式优化能够识别并优先挑选覆盖中远点资源效率较低的用户(规避由于各种原因刚切人本小区的用户),并根据本文2.2节所述原则将用户导引到能够满足用户体验需求且资源效率最高的目标频点和小区中。

5 结束语

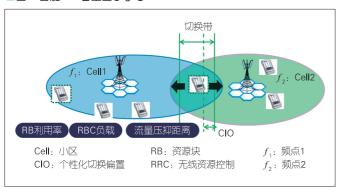
本文提出一种用户级智能与网络级智能相结合的新型双智协同机制,在网络发展不同阶段实现用户体验与网络效率及收益的双优,充分挖掘和释放5G网络价值,为面向6G的服务化网络演进奠定理念和技术基础。



▲图8 智能空分因子学习



▲图9 智能RRC容量因子学习



▲图10 智能个性化小区偏置学习

致谢

本研究得到中兴通讯股份有限公司王新台、詹勇、李群、 张健健、郑玲霞、白炜、孙英、聂国涛、牛康、李建国等的帮助, 谨致谢意!

参考文献

- [1] GSMA. The mobile economy 2022 [EB/OL]. [2022-06-16]. https://www.gsma.com/gsmaeurope/resources/the-mobile-economy-2022/
- [2] KASIM A N. A survey mobility management in 5G networks [EB/OL]. [2022–06–16]. https://arxiv.org/abs/2006.15598
- [3] LIN X Q. An overview of 5G advanced evolution in 3GPP release 18 [EB/OL]. [2022-06-16]. https://arxiv.org/abs/2201.01358
- [4] KUO P H, MOURAD A. User-centric multi-RATs coordination for 5G heterogeneous ultra-dense networks [J]. IEEE wireless communications, 2018, 25(1): 6-8. DOI: 10.1109/MWC.2018.8304382
- [5] MONSERRAT J F, ALEPUZ I, CABREJAS J, et al. Towards user-centric operation in 5G networks [J]. EURASIP journal on wireless communications and networking, 2016: 6. DOI: 10.1186/s13638-015-0506-z
- [6] ABDULZIZ M, MOHAMMED A, AHMAD R. An energy-efficient user-centric approach high-capacity 5G heterogeneous cellular networks [J]. International journal of advanced computer science and applications, 2018, 9 (1). DOI: 10.14569/ijacsa.2018.090155
- [7] SAAD W K, SHAYEA I, HAMZA B J, et al. Handover parameters optimisation techniques in 5G networks [J]. Sensors, 2021, 21(15): 5202. DOI: 10.3390/s21155202
- [8] STRINATI E C, BARBAROSSA S, CHOI T, et al. 6G in the sky: on-demand intelligence at the edge of 3D networks [J]. ETRI journal, 2022, 42(5):

643-657

- [9] 中国移动通信有限公司研究院. 6G无线内生AI 架构与技术白皮节 [R]. 2022 [10] SHAYEA I, ERGEN M, HADRI AZMI M, et al. Key challenges, drivers and solutions for mobility management in 5G networks: a survey [J]. IEEE access, 2020, 8: 172534-172552. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023802
- [11] 张宏涛. 智能用户编排: 干变万化, 随您而变 [EB/OL]. [2022-06-16]. https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2021/9-cn/3/4.html

作 者 简 介



顾军,中兴通讯股份有限公司RAN产品团队研发规划无线总工;主要研究领域为无线资源管理、网络智能化及未来网络演进;发表论文8篇,申请专利20余项。



张宏涛,中兴通讯股份有限公司RAN产品团队研发规划无线总工;主要研究领域包括5G无线网络移动性和多层网协同等;主持和参与创新性功能规划10余项,申请专利4项。



顾健,中兴通讯股份有限公司网络技术研发中心无线网优总工;主要研究领域为5G无线网络优化和组网创新;主持和参与重点5G优化研究和创新项目10余项,多次获得中兴通讯创新竞争超越奖。

6G:跨频段协同通信



6G:Collaborative Communication Across Multiple Frequencies

王海明/WANG Haiming1,2,陈祎祎/CHEN Yiyi2

- (1. 东南大学, 中国 南京 210096;
- 2. 网络通信与安全紫金山实验室, 中国 南京 211111)
- (1. Southeast University, Nanjing 210096, China;
- 2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204009

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1448.002.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-05

摘要:在5G时代,移动通信首次引入毫米波。在频谱资源有限的条件下,跨频段协同无线组网的概念被提出。6G将面临更大的网络容量和更高的传输速率挑战,因此需要高效利用全频谱资源来满足不同的应用需求。以毫米波为代表的高频频率资源丰富,而以6GHz以下的频率容易实现有效覆盖。高低频紧密结合的跨频段协同无线通信(COCAMF)应运而生。这种结合能够充分发挥高低频的优势。但是,高低频之间存在电波传播特性、射频(RF)前端性能等差异性,这使得COCAMF面临诸多挑战。认为需要充分探究COCAMF所面临的信道模型、射频前端、无线传输和无线组网技术方案等方面的难题,以推动6GCOCAMF系统标准化和产品研发进程。

关键词: 6G; 频谱资源; 跨频段; 协同无线通信

Abstract: The millimeter—wave band was firstly introduced into the mobile communication system in the 5G era. And the wireless networking across multiple frequency bands was proposed in the case of limited frequency spectrum resources. A larger network capacity and a higher transmission rate are required for the 6G that demands efficient usage of full spectrum resources to meet diversified application requirements. Taking millimeter—wave as an example, a lot of spectrum resources are available in the high band, while more effective coverage is feasible in the low band, e.g., Sub—6 GHz. The collaborative communication across multiple frequencies (COCAMF) is emerging to exploit their respective merits. But the COCAMF also faces heterogeneities of propagation characteristics and performances of radiofrequency (RF) fronts. Channel models, RF fronts, wireless transmission and networking, and other problems should be intensively investigated to promote standardization and product development of the COCAMF.

Keywords: 6G; spectrum resource; across multiple frequencies; collaborative communication

上近 谱是移动通信发展的基础资源。早在3G时代,中国 各大电信运营商就分别采用了不同的网络制式。由于 当时的硬件能力受限,人们难以将不同的网络制式融合至同 一块芯片中。相较于3G,4G支持更多的网络制式和相应的 多种频段,并催生出用户终端多模多频芯片的需求,使用户 在不同的网络覆盖区域都能享受流畅的网络体验。

随着移动互联网的快速发展和新服务、新业务的不断涌现,此前基于Sub-6 GHz频段的4G 网络将不再满足通信需求,因此5G 向毫米波频段借力,利用毫米波实现高速率、低时延、海量连接的愿景。由于5G 网络包含 Sub-6 GHz频段与毫米波频段,高低频协同通信的理念因此被提出。未来6G时代将迎来新的体系变革中,向更高频段扩展。然而,低频段仍是6G 发展的战略性资源,毫米波等高频资源也将发挥更重要的作用。跨频段协同通信能够高效利用低频和高频资源,实现最佳的全频谱组合效益,具有广阔的应用前景,将在6G时代得到进一步发展。

1 跨频段协同无线通信机制

虽然毫米波频段频谱资源丰富,但是波长较短,在通信中存在严重的路径传播损耗和遮挡损耗问题,实现连续覆盖的代价很高。从实际情况来看,毫米波系统主要依托于Sub-6 GHz中低频段来部署。Sub-6 GHz 和毫米波相结合的跨频段协同组网可满足 5G 网络对容量、覆盖、性能等的要求。其中,Sub-6 GHz 频段仍是核心频段,用于广域覆盖;毫米波频段可作为辅助频段,用于热点区域速率提升。

电信运营商正大力支持跨频段协同组网的规划和建设。那么如何利用高低频相互协同来提升移动通信系统传输性能成为关键。跨频段协同传输引起学术界的重视。不少研究工作对比分析了高频和低频的信道传播特性^[2]。研究结果表明,Sub-6 GHz频段与毫米波频段具有相似的空间特性。利用这一性质可以找到评估跨频段信道相似性的量化指标^[3],建立跨频段信道相似性模型,以更好地为跨频段协同通信方案的设计提供参考。同时,基于高频和低频的关联性,在跨频段协同组网中使用低频信息辅助毫米波波束赋形^[4],可以

极大地减少毫米波训练开销,提升跨频段协同传输性能。

此外,终端也将同时支持Sub-6 GHz和毫米波网络。这对终端天线提出较高要求。毫米波采用多天线波束赋形技术,其天线架构与Sub-6 GHz天线架构不一致。在设计终端天线时,终端设备需要集成多组不同功能的天线,在确保不同信号覆盖需求的同时,还应保证对前几代移动通信技术的后向兼容。

面向5G标准,第3代合作伙伴计划(3GPP)不断扩展无线接入的频谱资源范围,定义了低频FR1(410~7125MHz)和高频FR2(24.25~52.60GHz)两大频率范围,并对载波聚合、双连接技术、动态频谱共享技术等多频段融合技术进行持续演进和增强。当前,产业界主要关注单一频段本身的传播特性^[5]和某一频段范围内多频段融合技术的研究,对高低频相结合的跨频段协同通信研究尚且不足。相比于5G,6G需要更灵活、更高效地挖掘高频和低频的特性与优势,对频谱资源进行合理分配和灵活部署。6G需要规范化的跨频段协同通信标准协议。

2 面临的挑战与建议

虽然学术界和工业界不断推动着跨频段协同通信的发展,但是相关产业尚未完全成熟,跨频段协同通信仍面临诸 多挑战。我们需要进一步探讨如何利用创新技术解决跨频段 协同通信存在的多种难题。

- (1) 加大高低频协同的研究力度。毫米波与Sub-6 GHz 相结合大大提升了网络的复杂性和多样性。跨频段协同组网 策略、跨频段协同传输方案以及终端天线的设计等有待进一 步优化。此外,我们还需要聚焦于高低频协同通信原理,推 动跨频段协同通信的网络部署。
- (2)提升毫米波产业链成熟度,促进高低频之间的高效融合。Sub-6 GHz产业应用已相当成熟,而毫米波产业较为薄弱。因此,我们需要完善毫米波设备功能,统一具体指标,并以此为基础保证跨频段协同组网的功能和性能,促进跨频段协同通信的产业发展。
- (3) 推动跨频段协同通信相关标准的制定与落实。目前,跨频段协同通信的相关标准尚未完善,主要集中于学术界的研究内容。对此,我们应全面推动跨频段协同通信的标准进程,不仅要在理论研究上支撑标准制定,同时还要针对

标准规范确定的关键技术指标和应用场景开展关键技术攻 关,通过制定相应的标准规范,切实推动跨频段通信技术的 发展。

3 结束语

高低频各有优势,各有侧重,都是5G和6G系统不可或缺的组成部分,两者并非对立关系,而是互相补充、互相配合的协同关系。跨频段协同通信能够整合全频段频谱资源,有效应对未来移动通信系统的高标准、差异化需求。技术与应用的发展往往是循序渐进的,一旦技术成熟,跨频段协同通信必将迎来广阔的应用前景,赋能千百行业。

参考文献

- [1] IMT2030 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [2] RAPPAPORT T S, XING Y C, MACCARTNEY G R, et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—with a focus on propagation models [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2017, 65(12): 6213–6230. DOI: 10.1109/TAP. 2017.2734243
- [3] YI C, ZHANG P Z, WANG H M, et al. Multipath similarity index measure across multiple frequency bands [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(8): 1677–1681. DOI: 10.1109/LWC.2021.3077259
- [4] ALI A, GONZÁLEZ-PRELCIC N, HEATH R W. Millimeter wave beam-selection using out-of-band spatial information [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(2): 1038–1052. DOI: 10.1109/TWC.2017.2773532
- [5] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: 3GPP TR 38.901 [S]. 2017

作 者 简 介



王海明,东南大学信息科学与工程学院教授、国家 6G 技术研发总体组专家、《ZTE COMMUNICATIONS》编委;研究方向为移动通信、天线与电波传播、智能微波工程;曾获江苏省科技进步一等奖和IEEE 802.11aj标准杰出贡献奖;发表学术论文90余篇,获授权发明专利40余项。



陈祎祎,网络通信与安全紫金山实验室无线信道 工程师;研究方向为无线信道测量与建模,负责 相关标准化的推进与制定;发表学术论文3篇, 获授权发明专利2项。

基于预测技术的基站太阳能 高效利用



A Solar Energy Efficient Utilization Method for Communication Base Station Based on Prediction Technology

熊勇/XIONG Yong,刘明明/LIU Mingming, 胡先红/HU Xianhong

(中兴通讯股份有限公司,中国 深圳 518057) (ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204010

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1550.010.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-08

摘要:在日照资源充足的地区,大量通信基站配置了太阳能板和光伏充电模块,通过优先利用太阳能来减少市电电费开支。但是太阳能有较大的随机性和不确定性,实际中难以被充分利用。针对这个问题,提出了一种基于神经网络的方法。该方法通过实时采集的光照强度、温度和负载功率,结合天气预报、历史同期数据等,并借助神经网络的暴力计算,实现了太阳能产能和负载用能的预测;以高循环性能锂电池作为储能调用,实现了太阳能的主动、高效利用,减少了太阳能浪费及电费开支。

关键词:太阳能;铁锂电池;神经网络;预测

Abstract: In the areas with abundant sunshine, a large number of communication base stations are equipped with solar panels and photovoltaic charging modules, so as to reduce the electricity cost by giving priority to the use of solar energy. However, solar energy has great randomness and uncertainty, so it is difficult to make full use of it in practice. In order to solve this problem, a method based on a neural network is proposed. Through the real-time collection of light intensity, temperature, and load power, combined with the weather forecast, and historical data of the same period, the prediction of solar energy production capacity and load energy consumption is realized through the violent calculation of a neural network. The high cycle performance lithium battery is used as energy storage to realize the active and efficient utilization of solar energy, reducing the waste of solar energy and electricity expenses.

Keywords: solar energy; lithium-iron battery; neural network; prediction

2018年,中国三大电信运营商的电费支出高达500亿元人民币,占运营开支的15%以上。2019年6月6日,工业和信息化部向运营商颁发5G牌照,这标志着中国进入5G商用元年^[1]。5G万物智联会带来海量数据。海量数据引发的电力消耗必将成倍增长。预计到2025年,通信行业将消耗全球20%的电力。

5G 通信网络的功耗是 4G 网络的 2~3 倍。在 5G 时代,巨额电费支出可能会吞噬掉运营商的所有利润,甚至导致运营商陷入严重亏损的困境。在通信网络中,基站的耗电量是最大的——约 80% 的能耗来自广泛分布的基站。如何降低通信基站的能耗,减少电费开支,保障 5G 网络的顺利部署和应用,是所有的电信运营商、设备供应商都在全力攻克的重大技术难关。一方面,运营商要求各大设备商尽量降低主设备的功耗,实现"节流",如中国移动通过精准建网降低5G能耗^[2];另一方面,运营商也在努力寻找"开源"途径,

比如在日照和风力等自然资源充足的地区优先利用太阳能和 风能,以减少市电的使用,降低电费开支。

目前,在亚洲、非洲、南美等地区,大量通信基站都已 经配置太阳能板和光伏充电模块,但太阳能资源的实际利用 并不理想。由于太阳能有较大的随机性和不确定性,不像常 规能源一样稳定、可调可控,而基站供电系统又有很高的稳 定性、安全性和可靠性要求,因此太阳能的利用比较被动和 低效。对此,目前行业内的做法普遍是在日照充足时,让太 阳能给设备供电,然后用多余能量给电池充电;但实际上会 经常出现电池充满后太阳能白白浪费的情况,这就是普遍存 在的弃光现象。

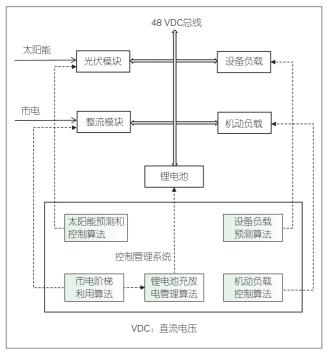
针对以上问题,本文提出一种基于大数据技术和神经网络的方法,通过实时采集光照强度、温度和负载功率,结合天气预报、历史同期数据等,通过神经网络的暴力计算,实现太阳能产能和负载用能的预测,并以高循环性能锂电池作

为储能调用,实现太阳能的主动、高效和最大利用,以减少太阳能浪费及市电消耗,达到保护环境的目的。同时,这种方法能够帮助运营商降低电费开支,助力5G网络的快速部署和应用。

1 总体设计思路

1.1 系统组成

本技术方案是基于当前普通通信电源系统的智能化升级改造而提出的。如图1所示,系统包括光伏模块、整流模块、设备负载、机动负载、锂电池和控制管理系统6个部分。其中,光伏模块实现从太阳能电池方阵60~150 V 直流电压(VDC)到-48 VDC的转换;整流模块则实现从交流市电到-48 VDC的转换;设备负载包括基站内的传输基带单元(BBU)、射频(RF)、功放(PA)等;机动负载包括机房空调、新风系统等辅助用电设备;锂电池为高循环性能锂电池,作为太阳能供给和设备负载需求间的缓冲和平衡;控制管理系统为系统的核心,包括太阳能预测和控制、设备负载预测、机动负载控制、市电阶梯利用和锂电池充放电管理5个算法模块,分别负责前5个部分的控制和管理。



▲图1整体系统设计图

1.2 控制管理系统的实现思想

除了控制管理系统外, 其他组成部分和常规通信电源系

统并无差异。因此,本文重点考虑控制管理系统的实现,实现方法包括以下几种:

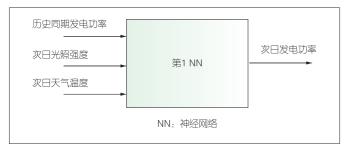
- (1) 控制管理系统中的太阳能预测和控制算法。一方面调节光伏模块的输出电压和电流,以保障电池的稳定供电,另一方面通过神经网络(NN)预测次日太阳能的输出功率。
- (2)设备负载预测算法。通过 NN 预测次日设备负载的消耗功率。业界基于长短时记忆(LSTM)的网络流量预测实现算法是一个很好的参考^[3]。
- (3) 锂电池充放电管理算法。除了完成正常的电池充放电控制外,更实现了供需双方的缓冲和平衡:日照充足时(盈余时段),太阳能给设备供电,多余能量给锂电池充电;夜晚或阴天时(欠缺时段),系统优先调用电池储存的电能,即进行电池放电。按照预先设定的计划,电池放电优先在市电电价高区时段进行;同时,放电量也预先做好计划,由电池允许的放电深度和下次电池可充入的太阳能联合确定。
- (4) 市电阶梯利用算法对市电电价时区阶梯排序。其中,高电价区由电池放电供电,低电价区由市电和整流模块供电。
- (5) 机动负载控制算法进一步实现太阳能的高效利用: 在日照充足时,太阳能除了给设备供电、电池充电外,还可以在能量富足时使系统启动空调、热交换器等机动负载设备,以实现一定程度的蓄冷,减少太阳能的浪费。

2 具体实现步骤

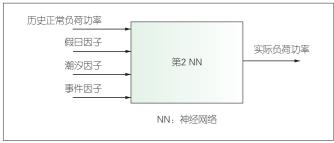
- (1)数据采集。采集或获取历史运行数据中的每日太阳能电池方阵光照强度、室外气温、光伏发电功率、设备负载消耗功率等数据。例如,当数据采集周期为5~10 min时,每天就有144~288组数据。
- (2)数据处理。为建立神经网络所需要的样本数据,系统需要对数据进行预处理。预处理操作包括解析、清洗、规约等。数据解析包括输入特征数据的格式解析和转换,以保证数据能够被系统有效识别。数据清洗主要是去除数据集中的噪声数据,防止对系统和算法的干扰,保证业务特征数据的有效性。数据规约是在特定条件下对数据进行有效精简,以降低系统负荷。然后系统再对这些数据进行归一化处理,比如按照 $X^* = (X_{real} X_{min}) / (X_{max} X_{min})$ 公式进行归一化处理,使得所有数据处于(0,1)之间。其中, X^* 为归一化处理后的数据, X_{real} 为数据样本的原始值, X_{max} 为数据样本的上限值, X_{min} 为数据样本的下限值。
- (3)设立训练集、验证集和测试集。按照常规6:2:2 的样本比例进行设立。
 - (4) 构建并训练太阳能产能预测模型。以历史同期光伏

发电功率、每日光照强度和气温为输入参数,同时以每日光 伏实际发电功率为输出参数,构建并训练如图2所示的第1 NN模型。

(5) 构建并训练设备负荷预测模型。以历史正常同期负荷功率、影响因素(如节假日、潮汐、区域事件等)为输入参数,同时以每日设备实际负荷功率为输出参数,构建并训练如图3所示的第2NN模型。



▲图2 太阳能产能预测模型



▲图3 设备负荷预测模型

- (a) 历史正常同期负荷功率的取值为大数据中历史同期 正常均值。
- (b) 节假日影响因子 F_{holiday} 为 (0, 1) 间的特征参数值, 并根据人工经验约定。例如,对于某居民小区来说,正常工 作日 F_{holiday} 为0,双休日 F_{holiday} 为0.1,春节长假 F_{holiday} 为0.25。
- (c) 潮汐影响因子 F_{tide} 为(0, 1)间的特征参数值,并根据人工经验约定。例如,对于某工业园来说,工作时间段 F_{tide} 为0.7,加班时间段 F_{tide} 为0.5,深夜段 F_{tide} 为0.3等。
- (d) 区域事件影响因子 F_{event} 为(0, 1)间的特征参数值,并根据人工经验约定。例如在某一区域,正常 F_{event} 为 0,有商业营销活动 F_{event} 为 0.1,集会 F_{event} 为 0.2,演唱会 F_{event} 为 0.3。
- (6) 部署模型。两个模型经过训练和优化后,可根据实际环境进行部署: 既可以部署于统一网络管理系统(UME)上,以充分利用云端强大的算力资源,并支持实时或在线的训练,也可以通过增加计算棒等方式,通过uSmartInsight等人工智能平台把模型压缩、剪枝和优化后间部署在边缘侧,

如现场监控单元(FSU)上。

(7) 控制管理系统运行各模型和算法,在运行两个NN模型预测次日发电量和负荷量后,制定太阳能富余区利用计划、太阳能欠缺区的电池放电计划,并按照计划进行电池充放电、市电供电和机动用电等控制动作。下面,我们就针对这个步骤展开说明。

3 充放电计划的制定与实施

3.1 单峰基础场景

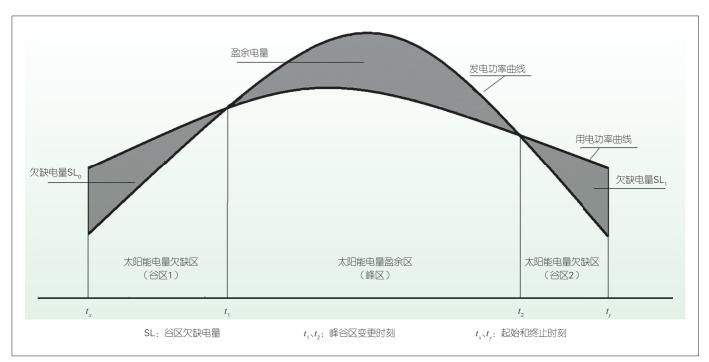
为简化分析,我们首先考虑一个基础场景,并假设某日全天24h天气晴朗,太阳能发电量稳定,全天可以看成一个正态分布曲线(两端低点为早晚时刻,中间高点为午时),某办公场景的负载用电量同样也符合正态分布(休息时段为业务低谷,工作时段为业务高峰)。图4展示了一个发电量和用电量稳定的基本模型,即典型站点光伏发电功率和负载用电功率的单峰模型。

据此,我们对基础模型进行分析和推导,找到最大化利用太阳能的充放电计划和算法。图5为太阳能富余区最大化利用策略图。图6为太阳能一个完整的放电和充电周期策略图。

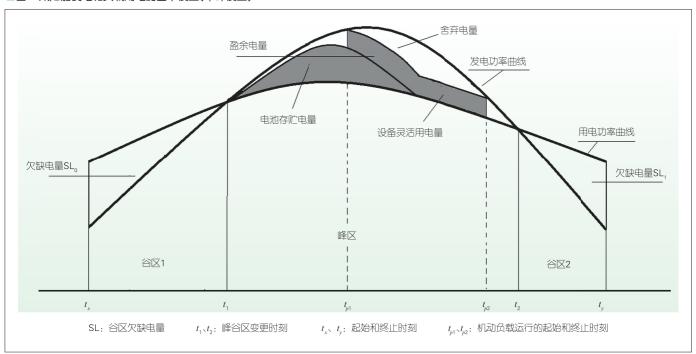
我们可以参照如下步骤进行实施:

- (1) 参照图 4,该模型起始时刻为 t_x ,终止时刻为 t_y ,光 伏发电功率为 f_1 ,负载用电功率为 f_2 。发电功率曲线和用电功率曲线在 t_1 和 t_2 两个时刻点相交。 $t_x\sim t_1$ 和 $t_2\sim t_y$ 两个区间, $f_2>f_1$,太阳能供给不足(夜晚或阴天),称为谷区;而 $t_1\sim t_2$ 区间, $t_2<f_1$,太阳能供给盈余(日照充足),称为峰区。
- (2) $t_x \sim t_1$ 和 $t_2 \sim t_y$ 两个谷区太阳能供给不足,欠缺电量分别为 SL_0 和 SL_1 ;峰区 $t_1 \sim t_2$ 盈余电量为 SH_0 。通过各时段 f_1 和 f_2 差值积分可得 $S = \int_{u_1}^{u_1} (f_1 f_2) dt_0$,其中,S为太阳能欠缺电量或者太阳能盈余电量, t_0 和 t_1 分别表示该区间的起始和终止时刻。如需要计算 SH_1 ,可令 $t_0 = t_1$ 、 $t_1 = t_2$ 。
- (3) 运行第1 NN、第2 NN模型,推理输出次日光伏发电功率预测值 f_1 、次日负载用电功率预测值 f_2 。其中,第1 NN模型中的每日光照强度值为天气预报值和历史同期相近天气状况下采集量的加权值。比如,天气预报显示次日某时刻光照强度 p_1 为5.2 万 lx,而在大数据中历史相近时刻和天气状况下的实际光照采集量 p_2 为4.5 万 lx,则最终该输入参数为 $p_1 \times 0.9 + p_2 \times 0.1 = 5.13$ 万 lx。 f_1 和 f_2 预测值每日共有 144个(预测周期为 10 min)。
 - (4) 参照图4, 在笛卡尔坐标中绘制 f,、f,全天内变化曲

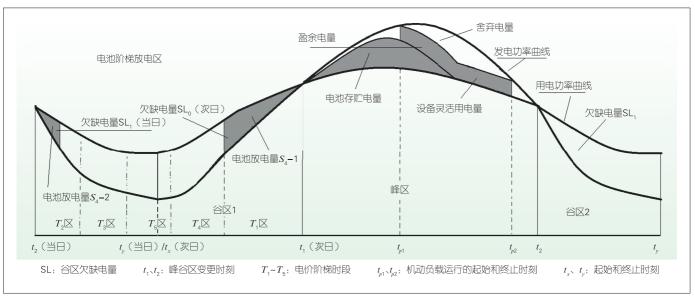
- 线,起始时间 t_x 为00:00,终止时刻 t_y 为24:00。显然,谷区1和谷区2的欠缺电量 SL_0 和 SL_1 需要市电或电池来补充,而峰区的盈余电量SH可待最大化利用。
- (5) 参照图 5, 规划峰区中盈余电量 SH 的利用计划。 定义 3 个电量: 电池存贮电量 S_1 、机动设备灵活用电量 S_2 、 舍弃电量 S_3 ,它们的和等于 SH。显然, S_1 \leq SH。
- (6) 参照图6, 规划谷区中欠缺电量的补足计划。由于当日 t_y 和次日 t_x 时刻重叠, 因此我们对当日 t_2 ~次日 t_1 连续时间统一部署补足计划。该时间内总欠缺电量 $\mathrm{SL}=$ 欠缺电量 SL_1 (当日)+欠缺电量 SL_0 (次日),而电池总放电量为 S_4 。显然, S_4 $<\mathrm{SL}_0$ 。由于电池实现了满充电,同时考虑充电效率 η ,因此有: S_4 $<\mathrm{SL}_0$



▲图4 太阳能发电和负载用电的基本模型(单峰模型)



▲图5 单峰模型下太阳能富余区最大化利用策略



▲图6 单峰模型下的太阳能完整电池放电和充电周期策略

- (7) 规划峰区中盈余电量的利用计划,如图5所示。
- (a) 分析电池存贮电量 S_1 影响因素。这里 S_1 为给电池充电储人的化学能量。最大化储能取决于如下因素:电池额定容量 Crated、电池放电深度(DOD)和电池充电效率 η 。对配置电池进行扩容可以提高 Crated;为 DOD 设置一个相对安全的最大值 Kd,可保障电池循环寿命;使用更快的充电技术(比如提高电池充电电流或电压)尽可能早充入电量,可提高充电效率 η 。
- (b) 计算峰区存贮电量 S_1 、电池充电时刻起始 $SOC(t_1)$ (SOC指荷电状态),以及电池前一谷区的放电量 S_4 。
- 计算电池最大存储电量。设定电池 $SOC(t_1)$ 最小值 SOC_{min} =1-Kd,则光伏发电的盈余电量可在最大程度上被用来给电池充电;
- •由于充电结束后电池处于满容量状态,即SOC (t_2) = 1.0,因此可以得到如下方程组:

$$\begin{cases} SOC(t_1) = 1.0 - S1/V \text{rated/Crated} \\ SOC(t_1) \ge 1.0 - Kd \end{cases}, \tag{1}$$

其中, $S_1 \leq SH$, $S_4 \leq SL$, $S_4 = S_1 \times \eta_\circ$ 求解上述方程组,可得 SOC $(t_1) = \max (1.0 - Kd, 1.0 - SH \times Crated/Vrated, 1.0 - SL \times Crated/Vrated/\eta)_\circ$

这里Vrated是指电池的额定电压。显然,在求解 $SOC(t_1)$ 值后,实际峰区电池存贮电量 S_1 、谷区电池放电量 S_4 也都可以被解出:

$$S_1 = [1 - SOC(t_1)] \times Crated \times Vrated, \tag{2}$$

$$S_4 = S_1 \times \eta_{\circ} \tag{3}$$

通过规划峰区的充电计划进而规划上一个谷区的放电计划,可保证电池的最大充电,以实现对太阳能转换电量的充分利用。

- (c) 遍历机动设备,灵活利用电量 S_2 。盈余电量 SH除了提供电池存贮 S_1 外,还可用于机动负载消费 S_2 ,包括机房或机柜的制冷设备,比如空调、热交换器、新风系统等。在满足功耗要求的情况下,优先启动这些制冷设备,可降低室内温度,减少额外制冷耗能。此外,系统也可以启动某些休眠的传感器或设备,以减少其他时段的运行耗能。
- 遍历机房或机柜中所有机动性用电设施,如空调、热交换器、新风系统等,以及其他辅助设备。
- 计算 $t_1 \sim t_2$ 时间区间内多余功率 Δp =光伏发电功率 f_1 -设备负载的负荷功率 f_2 -电池的充电功率。
- 在如图 5 所示的 $t_{pl} \sim t_{p2}$ 时间内,若 Δp 超过某用电设备 功耗,则系统启动该设备(比如热管设备)。此时,电池充电储能和机动设施用电可同时进行。
- 当功率差 Δp 无法满足该用电设备的功耗时,如图 5 的 t_{p2} 时刻,此时系统会停止该设备的运行。如果继续运行,设备将消耗市电或电池的能量。
- (8) 规划谷区时段欠缺电量补足(电池放电)计划,如图6所示。
- (a) 根据当地电价定义该时间内电价的m个阶梯区间,分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 ……直到 T_m 区。电价最高区为 T_1 ,次高区为 T_2 、 T_3 ,依此类推。各时区内欠缺电量分别为 ST_1 、 ST_2 、 ST_3 ……,直到 ST_m 。
 - (b) 按照从高到低的电价区间顺序, 把 S_a 分配到各个时

区, $S_4=S_4-1+S_4-2+S_4-3+\cdots+S_4-m$ 。 其中 S_4-1 为 T_1 时区内分配到的放电量, S_4-2 为 T_2 时区内分配到的放电量,依次类推,直到分配完为止。

- (c) 显然,电价从高到低排序的时区为 T_1 、 T_2 、 T_3 …… T_m ,并不一定是时间的先后次序。我们最终要按照时间顺序来执行各时区内的电池放电计划。图 6 示例中有 5 个阶梯时区,时间先后次序分别是 T_2 、 T_3 、 T_5 、 T_4 、 T_1 区。实际电池放电的执行过程具体如下。
- T_2 时区:按照分配计划,在 T_2 的起始时刻电池开始放电,当放出的电量达到预定值 S_4 -2后停止放电。本例中 S_4 -2< ST_2 ,表明 T_2 ,消半时段电池放电补足,后半时段需要市电补足。
- T_3 、 T_5 、 T_4 时区:没有电池放电计划,全部时段由市电补足。
- T_1 时区:按照分配计划,在 T_1 的起始时刻电池开始放电,在放出电量达到预定值 S_4 -1后,停止放电。本例中 S_4 -1= ST_1 , T_1 整个时段都放电。

3.2 多峰复杂场景

由于受到天气变化、负载波动等影响,实际场景会更为复杂。光伏发电功率曲线 f₁和负载用电功率曲线 f₂会存在多个相交点,会出现多个谷区、多个峰区的情况。图7展示了一个有6个相交点、3个峰区、4个谷区的多峰模型。图8为相应的充放电策略示意图。

对于多峰模型,我们可以将其抽象成一个单峰模型。单峰区时段为从第一个相交点时刻到最后一个相交点时刻的区间,即图 8 中的 $t_1 \sim t_6$ 时区(只不过在峰区有波动而已)。因此,多峰模型下的所有步骤和算法均得以简化(与单峰模型相似,并可直接借用)。唯一的区别在于多峰模型需要寻找

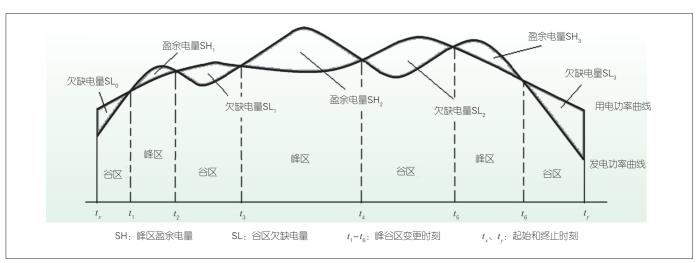
各个相交时刻点最合适的电池荷电状态 SOC,以保障整个波动区中电池存贮的电能达到最大值,即太阳能得到最大化利用。

- (1) 定义电池充电效率为 η , 电池允许的最大DOD和可放出的最大电池容量Sdmax为Kd,则可充入的最大电池容量Scmax=Kd/ η ,而电池SOC最小值SOC_{min}=1-Kd。
 - (2) 对 t_1 和 t_2 的所有相交点(图8中为 t_1 ~ t_6)进行分析:
- (a) 确定各峰谷区充人/放出的电池容量范围。峰区 1、2、3 的盈余电量分别为 SH_1 、 SH_2 和 SH_3 ,因此,电池可充人容量分别是 TC_1 =Min(Scmax, SH_1 /Crated/Vrated, ΔC_1)、 TC_2 =Min(Scmax, SH_2 /Crated/Vrated, ΔC_2)、 TC_3 =Min(Scmax, SH_3 /Crated/Vrated, ΔC_3)。其中, ΔC_1 、 ΔC_2 、 ΔC_3 分别是各峰区时段电池电流积分计算的最大容量增量。谷区 1、2 的欠缺电量分别为 SL_1 和 SL_2 ,电池放出电量分别为 SD_1 =Min(Sdmax, SL_1 /Crated/Vrated)。 SD_2 =Min(Sdmax, SL_2 /Crated/Vrated)。
- (b) 定义各峰谷区充入/放出的电池电量,即图 8 中的阴影部分中的电池充入电量 SC_n (n取值为 1、2、3) 和放出电量 SD_n (n 取值 1、2)。显然, SC_n < TC_n < 1.0, SD_n < TD_n < 1.0。而太阳能的总利用量为:

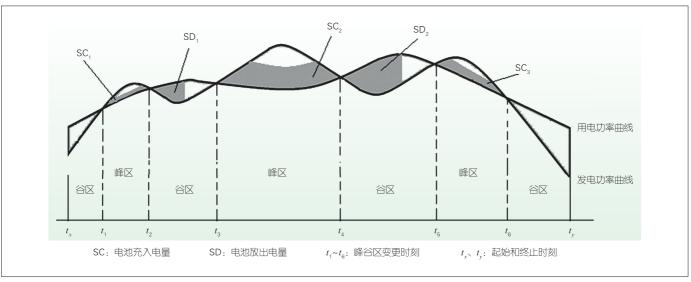
$$SC = \sum_{n=1}^{3} SC_n \tag{4}$$

(c) 根据各区间电量的变化,列出 $t_2 \sim t_6$ 各时刻点电池容量方程组:

$$\begin{cases} SOC(t_1) + SC_1 = SOC(t_2) \\ SOC(t_2) - SD_1 = SOC(t_3) \\ SOC(t_3) + SC_2 = SOC(t_4) \\ SOC(t_4) - SD_2 = SOC(t_5) \\ SOC(t_5) + SC_3 = SOC(t_6), \end{cases}$$
(5)



▲图7 太阳能发电和负载用电的复杂模型(多峰模型)



▲图8 多峰模型下的电池充放电策略

以及约束条件组:

$$\begin{cases} SC_1 \leq TC_1 \\ SC_2 \leq TC_2 \\ SC_3 \leq TC_3 \\ SD_1 \leq TD_1 \\ SD_2 \leq TD_2, \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC(t_1) \leq 1.0 \\ SOC_{\min} \leq SOC(t_2) \leq 1.0 \\ SOC_{\min} \leq SOC(t_3) \leq 1.0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} &|\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(t_4) \leq 1.0 \\ &|\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(t_5) \leq 1.0 \\ &|\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(t_6) \leq 1.0 \\ &|\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(t_6) \leq 1.0 \end{aligned}$$

通过对上述方程组求解,我们可得到SOC (t_1) 、SOC (t_2) 、SOC (t_3) 、SOC (t_4) 、SOC (t_5) 、SOC (t_6) 的值,进而获得各峰谷区的电池充放电策略。

- (d) 根据上述方程组和约束条件组,联合求解所有时刻点的 SOC (t_n) , n取值为 $1\sim6$ 。在众多 SOC (t_n) 求解中,太阳能总利用 SC 最大的那一组求解值可作为最优解。
- •采用离散值求解法,具体思路如下:设定 SOC 精度为 0.01,所有 SOC 取值范围构成一个有限离散值集合。假设 SOC_{min}为 0.20,那么 SOC (t_n) 取值范围为 $\{0.20,0.21,0.22,\cdots,0.98,0.99,1.00\}$,共81个离散值。结合方程组 和约束条件,使用遍历、折半等算法,我们就很容易找到所有 SOC (t_n) 有效值中 SC 最大的那一组值。
- 依次以各充电结束时刻点(图中 t_6 、 t_4 、 t_2 时刻)电池 满容量为前提条件,遍历求解:

如SOC (t_6) =1.0, 遍历求解所有SOC (t_n) 值, 计算对

应SC; 取出SC最大的一组解 K_1 。

如 SOC (t_4) =1.0, 遍历求解所有 SOC (t_n) 值, 计算对应 SC; 取出 SC最大的一组解 K,。

如 SOC (t_2) =1.0, 遍历求解所有 SOC (t_n) 值, 计算对应 SC; 取出 SC 最大的一组解 K_3 。

- 比较 K_1 、 K_2 、 K_3 3组解中的 SC 值,其中最大值的那组解 SOC(t_n)可作为最优解。
- (e) 根据最优解 SOC (t_n) , 完成 $t_1 \sim t_6$ 时间内的电池充放电计划。这里我们以图 8 作为示例来进行说明。
- 按照上一步骤得到 SOC (*t*₁)、SOC (*t*₂)、SOC (*t*₃) 等值;
- 在峰区1起始时刻 t_1 , 对电池进行充电,当容量到达 SOC (t_2) 值后停止;
- 在谷区1起始时刻 t_2 ,对电池进行放电,当容量到达SOC (t_3) 值后停止;
- 在峰区2起始时刻 t_3 , 对电池进行充电,当容量到达 SOC (t_4) 值后停止;
- 在谷区2起始时刻 t_4 ,对电池进行放电,当容量到达 SOC (t_5) 值后停止;
- 在峰区3起始时刻 t_5 ,对电池进行充电,当容量到达SOC (t_6) 值后停止;

另外,可参考单峰模型中的峰区盈余电量利用计划算法,即在3个峰区内启动制冷设备等机动用电设施,以尽量利用多余的太阳能。

4 结束语

先通过神经网络技术来预测次日太阳能发电功率和基

站设备负载功率,规划好下一个太阳能供给盈余时区的能量利用策略(包括电池充电和机动负载用电),再制定前一个太阳能供给不足时区内的供电策略(调用电池储存电能),既保障了电池充放电的平衡和太阳能的最大化利用,也保障了电池储能的调用时机处于市电高电价区间。最终,对太阳能的高效利用以及精确控制的电池充放电策略,实现了降低电费开支的目标。在某运营商的实验站点进行了初步验证,试点站月度利用的太阳能发电量从1036 kW·h提高到1190 kW·h,太阳能利用率提升约15%。由此可见,本文所提方法具备较好的工程应用和参考价值。

参考文献

- [1] 李册,张春明,汪卫国. 5G商用起步,融合应用蓬勃兴起 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 2-7. DOI:10.12142/ZTETJ.201906001
- [2] 陈卓. 面向 toB 应用, 精准建网降低5G 能耗 [J]. 通信世界, 2020, (27): 17-19 [3] 王海宁, 袁祥枫, 杨明川. 基于LSTM 与传统神经网络的网络流量预测及应用 [J]. 移动通信, 2019, 43(8): 37-44
- [4] 韩炳涛. 人工智能平台助力算法研发和应用部署 [EB/OL]. (2019-08-27) [2022-06-10]. https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2018/6-cn/expert-view/Tech-Article.html

作 者 简 介



熊勇,中兴通讯股份有限公司数字能源产品经营部研发总工;主要研究方向电池管理、动环监控、节能降耗、智能运维等;获得国家发明专利20余项。



刘明明,中兴通讯股份有限公司数字能源产品经营部副总经理;主要研究方向通信电源、混合能源、新能源等;获得国家发明专利30余项。



胡先红,中兴通讯股份有限公司数字能源产品经营部技术总工,电源技术专家委员会主任;主要研究方向通信电源、混合能源、新能源等;发表论文10余篇。

基于智能合约与区块链的 算力交易机制



Computing Power Trading Mechanism Based on Smart Contract and Blockchain

吕航/LYU Hang,李佳聪/LI Jiacong, 雷波/LEI Bo,解云鹏/XIE Yunpeng

(中国电信股份有限公司研究院,中国 北京 102209) (Research Institute of China Telecom Corporation, Beijing 102209, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202204011

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1742.018.html

网络出版日期: 2022-07-25 收稿日期: 2022-06-05

摘要:针对算力交易这一关键问题,结合智能合约与区块链技术,提出了一种去中心化、去平台化的的算力资源交易的机制。首先,以区块链技术为基础构建算力交易的框架,并充分考虑对算力交易潜在攻击的防御保护;其次,算力交易过程引入智能合约,实现去平台化后各个节点协调统一的交易流程和一致性机制;最后,算力用户对算力资源的服务评价可通过智能合约生产出服务质量评分区块,完善算力交易的整个过程。

关键词: 算力网络; 区块链; 智能合约; 算力交易; 数字签名

Abstract: Concerning computing power trading and combining with smart contracts and blockchain technology, a decentralized mechanism for computing power resource trading is proposed. First, a framework of computing power transaction based on blockchain technology is built, which fully considers the defense and protection of potential attacks on computing power transactions; second, the smart contract is introduced in the computing power transaction process to realize the unified transaction process and consistency mechanism of distributed nodes; Finally, the service evaluation of computing power resources by computing power users can produce service quality score blocks through smart contracts to improve the whole process of computing power transaction.

Keywords: computing power network; blockchain, smart contract; computing power trading; digital signature

上 5G、智能宽带等为代表的新型网络技术的发展和商用规模化的部署,带动了工业互联网、车联网、智慧医疗、智慧商业等垂直行业应用的蓬勃发展。行业应用需要大量的设备,同时还会产生海量的数据。据统计,到2025年,全球网联设备总数将超过270亿,而全球的数据总量则将达到142.6 ZB,这些都需要巨量的算力资源来支撑。算力资源已不再是单一的云资源池的形式,而是由云资源与广泛部署的边缘节点共同构成。在这种演进的趋势下,算力资源的协同是关键要点,算力网络应时而生。通过无处不在的网络连接,算力网络整合多级算力、存储等,为不同的行业提供最佳的资源分配方案,进而实现整网资源的最优使用[1-2]。

2021年5月,国家发展和改革委员会、工业和信息化部等四部委提出联合布局全国算力网络国家枢纽节点的"东数西算"工程,打通网络传输通道,提升跨区域算力调度能力。这将算力网络的发展和应用提升到了国家发展战略的高度。

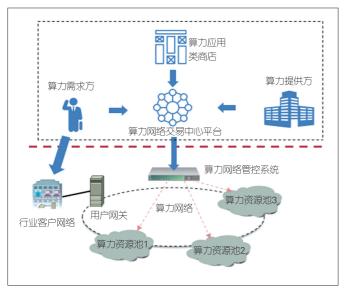
算力通过网络提供给行业应用,这就形成了算力的需求方和供应方。在商用场景中,就形成了算力交易,而交易也同样通过网络完成。结合智能合约及区块链技术,我们提出了一种去中心化、去平台化的可靠算力交易机制和方案,适用于中小行业用户的算力交易场景[3-5]。

1 基于区块链技术构建算力交易框架

区块链技术利用块链式数据结构进行数据验证与存储。 从本质上讲,区块链是一个共享数据库,存储于其中的数据 或信息具有不可伪造、去中心化、透明化、分布式存储等特 征。基于密码技术,区块链允许多个参与者共同维护一组一 致的信息或事实,实现去中心化的共识机制。各个区块主体 在时间维度上形成了区块链,行间链路表示区块主体之间的 互联,增强了信息的可追踪性和安全可靠性。目前区块链技 术在金融、物流、工业制造、医疗、物联网等领域有着广泛 应用。

1.1 算力网络中的算力交易

一般情况下,在线交易系统采用的是中心化交易模式。 售卖方的信息、交易记录等数据由特定的第三方平台存储和 管理,交易双方充分信任此第三方平台。在算力网络场景 中,算力交易也可以采用中心平台的方式来实现,如图1 所示^[6]。

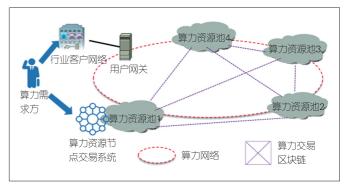


▲图1 算力交易通用交易模型

如图1所示,第三方构建算力网络交易中心平台。算力需求方在平台浏览所有算力提供方的资源信息,并进行选择;随后,根据算力价格进行订购结算,并在算力资源池进行计算业务;算力服务合同到期后,需求方卸载算力业务,释放资源。随着算力业务的不断增加,不同的需求方与不同的算力资源提供方之间的交易量也在不断增加,中心平台运行和维护工作的复杂度和成本也越来越高。如果有攻击方对中心平台发起攻击,包括截获、篡改、伪造交易信息,或对平台发起拒绝服务的攻击,将导致交易停止,造成难以估量的损失。

1.2 基于区块链的算力交易

如前所述,区块链采用分布式账本的方式,以链式数据结构存储交易信息,并将信息保存在所有上链节点中^[8-10]。去中心化的部署特点可以很好地解决集中部署算力交易平台中运维成本高的问题。同时,分布部署以及链式的数据存储模式,也显著增加了攻击方的攻击难度和成本。基于区块链技术的算力交易体系不再建设中心交易平台,算力资源池构建区块链(联盟链或私有链)、交易数据上链存储,参考模型如图2所示。



▲图2 基于区块链的算力交易结构模型

在图2中,算力网络为算力需求方和算力资源方提供了算力服务的基础设施。算力资源方构建了算力区块链,算力需求方则在链上对各个算力资源节点进行资源浏览、交易历史查询、资源价格评价,以及算力交易、结算。所有的交易过程中产生的数据都存储在每个链节点,不再需要中心平台,因此任一节点都存储所有节点的交易数据,且任何数据都是真实不可篡改的。

2 智能合约结合区块链的算力交易方案设计

2.1 区块数据结构设计

区块链链上的数据是公开透明的,所有用户都可以查看。算力交易会引起商业竞争,甚至会引起恶意攻击,这就会产生攻击节点与正常节点对数据区块的生产竞争。为确保交易的安全可信,算力需求方与资源提供方都要首先向第三方的数字证书签发机构(CA)申请数字证书和私钥,用于对交易结果进行签名确认,之后才能进行算力交易。

假设制造某个完整的交易流程需要产生n个区块, α 为 正常节点制造下一个区块的概率, β 为攻击节点制造下个区 块的可能性。作为正常交易, α 值大于 β 。再假设,攻击方 要伪造一条攻击链,需要产生m个区块才能取代诚实链,那 么攻击方成功替换诚实链的概率如公式(1)和(2)。

$$P_{\eta} = \sum_{i=1}^{m} \left[\frac{\left(\frac{n\beta}{\alpha} \right)^{i}}{i! \ e^{\frac{(n\beta)}{\alpha}}} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{n-i} \right] \qquad m > n,$$
 (1)

$$P_{\eta} = \sum_{i=1}^{m} \left[\frac{\left(\frac{n\beta}{\alpha} \right)^{i}}{i! \ e^{\left(\frac{n\beta}{\alpha} \right)}} \right] \ m \leq n_{\circ}$$
 (2)

从公式 (1) 和 (2) 可看出,区块数n越多, P_{η} 就会越小,攻击难度就会越大。因此,我们在设计交易区块时,尽量使用多区块来描述一个算力交易。本文中,我们设计了4

种交易区块,从而构建一个完整的交易过程。

$$T_{\text{pro}} = \sum_{i=1}^{n} \delta \frac{D_i}{W}, \tag{3}$$

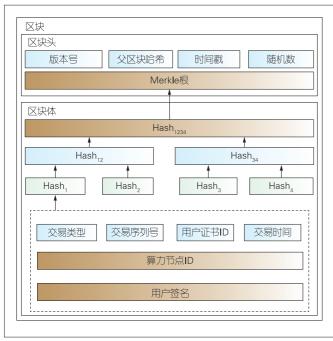
$$T_{\text{val}} = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon t_i, \tag{4}$$

$$T = T_{\text{pro}} + T_{\text{val}} \tag{5}$$

公式(3)一(5)中, T_{pro} 、 T_{val} 分别是区块链生产及验证的时间。其中, δ 、 ϵ 分别是生产和验证的系数,D和 W分别是每个区块的数据容量和传输带宽,而t则为区块的验证时间。在生产区块时,需要用户的私钥生成签名,因此攻击节点需要额外的大量时间来伪造用户签名,从而难以与正常节点争夺区块生产权。

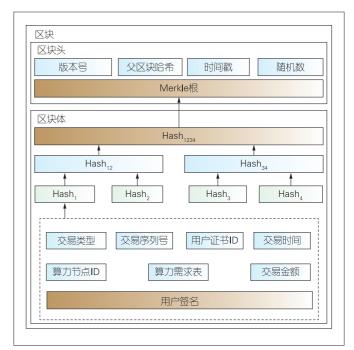
图 3—6 定义了4种区块数据结构。这4种区块构建了完整的算力交易流程。

- (1)需求方浏览记录区块:用户每次登录算力资源节点,对该节点所能提供的资源、历史记录以及用户评分情况进行浏览,而浏览记录形成区块。
- (2)需求方订购算力申请区块:需求方确定使用该节点的算力资源后即可下订单,并根据资源方的架构,形成交易金额,然后向资源方提出申请。
- (3) 算力交易成功记录区块:资源节点收到需求方的订购请求后,对资源需求和价格进行确认,然后签订合约。

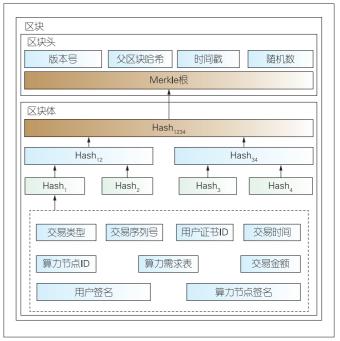


▲图3 算力交易区块数据结构1——需求方浏览记录

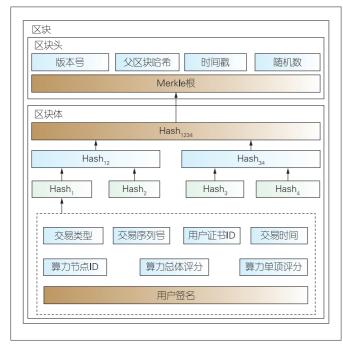
- (4) 需求方对算力资源使用体验进行评分的区块:在完成算力服务后,需求方对资源方提供的服务进行评分,包括总分以及分项评分。这4种区块结构的字段内容是相互关联的。
- 交易类型: 具体包括ConType_1、ConType_2、ConType_3、ConType_4,分别代表上述的4类区块。



▲图4 算力交易区块数据结构2——需求方算力资源订购申请



▲图5 算力交易区块数据结构3——算力交易成功记录



▲图6 算力交易区块数据结构4——算力资源使用体验评分

- 交易序列号:区块的标识号,其中ConType_2、Con Type_3、ConType_4的序列号与最近的ConType_1的区块序列号一致,表明这是一项交易的4个连续动作所产生的记录。
- •用户证书ID:即需求方数字证书的ID号,任何人都可以通过该ID号在CA的轻型目录访问协议(LDAP)站点获取该用户的数字证书,以对该用户的签名进行验证。
- •用户签名:用户用自身的 私钥对记录的哈希值进行加密 签名。
- 算力节点 ID: 算力资源节 点的身份信息,通过该 ID 号可以 检索资源节点的公钥。
- 交易时间:用户在算力资源节点生成记录的时间。
- •算力需求表:在ConType_2、ConType_3两种类型区块中存在。需求方浏览算力资源节点,选择符合自身需求的算力资源以及使用周期,形成需求列表。
- 交易金额: 在 ConType_2、ConType_3 两种类型区块中存在,

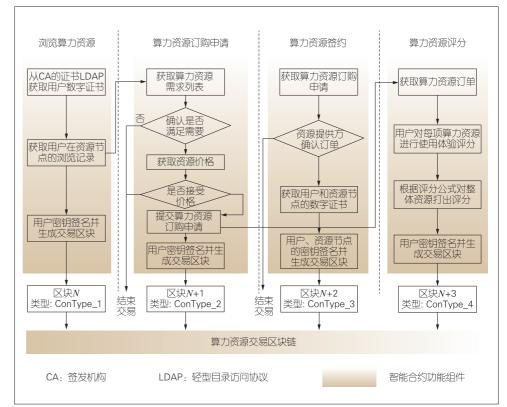
是用户订购算力资源的使用费用。

- 算力单项评分:用户订购并使用算力资源后,进行业务卸载,再对每项资源的使用效果进行打分;
- 算力总体评分:用户对算力分项进行评分后,对所有分项进行加权累计形成一个最终评分值。算力效果评分和单项评分都可被其他用户浏览。该评分为潜在需求方提供决策参考,同时也对资源提供方起到督促作用。
- 算力节点签名:在ConType_2、ConType_3两种类型区块中存在,对提供的算力资源和价格进行确认。

2.2 基于智能合约与区块链的算力交易模型

1996年,SZABO首次提出了智能合约。智能合约被定义为数字合约条款,无须第三方干预,合约的代码经过认证后嵌入区块链中,在一定条件下触发便可自动执行。智能合约可以确保所有节点的算力交易过程具有一致性以及可靠性。上述的4种区块类型,都由智能合约来完成生产。本文提出的区块链结合智能合约的算力交易方案模型如图7所示[11]。

图 7 中,灰色框部分即为智能合约的可执行功能。这些功能与相关用户接口(UI)界面协同,在算力需求方通过界面进行资源浏览、下单、签约及资源使用评价等操作时,即



▲图7 基于区块链智能合约的算力交易模型

可触发智能合约的代码运行。智能合约也分为四大模块,同时分别输出4种区块数据。

(1)需求方(用户)登录算力资源节点,通过UI界面浏览节点的算力资源、使用的历史记录以及评价,从而触发智能合约。合约通过界面获取用户的证书ID,对浏览记录数据进行签名,并输出形成区块数据。区块类型为ConType_1,用户签名(UserSign)方式如下:

$$TX_{\text{UserSign}} = \text{Encrypt} [UK_pri , \text{Hash (ContracNoll ContractTimell ComputingPoolID)}]_{\circ}$$
 (6)

用户签名内容包括交易序列号、交易时间以及资源节点的 ID 号等,而 *UK_pri* 为用户私钥,Hash()为哈希运算,可以是 MD5 或者是 SHA1 等哈希算法。

(2) 用户如接受资源的使用价格,则提出订单申请。订单包括算力资源内容、性能数量要求以及使用时限等,订单申请将触发智能合约自动运行。智能合约在与用户交互完成订单确认后,获取用户私钥,生成订单签名并生产交易区块。区块类型为ConType_2,签名形式如下:

$$TX_{\text{UserSign}} = \text{Encrypt} [UK_pri, \text{Hash}(\text{ContracNoll ContractTimell} \text{ComputingPoolID||RequirementList|| ContractValue})]_{\circ}$$
 (7)

用户签名的内容包括交易序列号、交易时间、资源节点的 ID 号、资源需求列表以及合约金额等,在进行哈希运算后用私钥完成数字签名。

(3) 当资源节点收到用户的资源订单时,如同意接受该订单,则触发智能合约自动执行。智能合约分别获取节点私钥和用户私钥,并做二重签名(用户签名和节点签名),然后生产出类型为ConType_3的区块。用户签名与公式(7)一致,而节点签名则只需对用户的签名再做一次签名即可。

$$TX_{CPSign} = Encrypt(CPK_pri, TX_{UserSign}),$$
 (8)

其中, CPK_pri为资源节点的私钥。

(4) 算力资源订单到期后,用户登录节点,并对此算力服务进行评分。评分包括逐项评分以及总体评分。算力资源列表中包括各项资源,具体如公式(9)。

$$R = \{m_1, m_2, \cdots, m_i, \cdots, m_M\} \ i \in \{1, 2, \cdots, M\} \ . \tag{9}$$

M为算力资源节点提供的资源种类数量,包括中央处理器(CPU)、内存、存储、硬盘输入输出(IO)能力、图形处理器(GPU)以及网络吞吐能力等。用户对每一项资源进行评分,智能合约触发执行后,打出总评分。

$$S_{oa} = \sum_{i=1}^{M} \delta_i S_i, \tag{10}$$

其中, S_i 为某单项算力资源的评分, δ_i 为该资源加权评分系数。评分完毕后,用户私钥进行签名并生产类型为 $Con-Type_4$ 的区块,签名如公式(11)。

$$TX_{U_{SerSign}} = Encrypt[UK_pri, Hash(ContracNoll ContractTimell ComputingPoolID||OverallScorell ScoreList)]_{\circ}$$
 (11)

用户签名包括交易序列号、交易时间、资源节点的 ID号、整体评分以及单项评分列表。在交易过程中,由 智能合约生产的区块经过区块链验证后上链广播至各个 节点。

智能合约是条件触发自动执行的,在交易系统和区块链之间构建了可信赖、安全的连接桥梁。在实现上,智能合约与节点的交易界面可独立开发部署,交易系统的代码不能入链。资源提供方自主提供 UI 界面,向需求方展现可供交易的算力资源及定价,而智能合约可以通过回调、订阅等方式与 UI 界面通信,或者封装成执行库被平台调度。目前比较通用的智能合约开发语言包括 Solidity、Sepent、LLL等。

3 结束语

在算网融合不断发展的大趋势下,算力交易的关键技术与机制是一个很重要的发展方向。本文中,我们首先提出了一种基于智能合约结合区块链的算力交易方法,充分应用了区块链去中心化以及分布式数据同步及存储的技术优势,将算力交易分布在各个算力资源节点。其次,在区块生产过程中,多交易区块的设计及加密数字签名,能显著提升攻击链争夺区块生产权的难度,在降低建设及运行成本的同时,有效提高了交易的可靠性与安全性。然后,利用区块链不可篡改的技术特性,我们还设计了评分机制,帮助潜在需求方获取算力资源节点运营历史情况及服务质量。最终,形成智能合约结合区块链的算力交易的价值与方案。未来,我们将紧跟算力网络技术和算力交易需求的发展脚步,持续关注相关的去中心化的算力交易实现方案。

参考文献

- [1] 雷波, 陈运清. 边缘计算与算力网络: 5G+AI 时代的新型算力平台与网络连接 JJI, 中国信息化, 2020(12): 113
- [2] 赵慧玲. 边缘计算与算力网络专题导读 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 1-2. DOI: 10.12142/ZTETJ.202103001
- [3] 施泉生, 黄晓辉, 胡伟, 等. 基于区块链的改进智能合约电力交易模型 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 11-18. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.01.002
- [4] 胡博明, 陈晓丰, 胡大裟, 等. 基于区块链智能合约的安全投票系统 [J]. 现代电子技术, 2022, 45(6): 180-186. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2022.06.033
- [5] CCSA.面向业务体验的算力需求量化与建模研究 [EB/OL].(2022-05-06)[2022-06-14].https://max.book118.com/html/2022/0505/7152016003004120.shtm
- [6] 雷波, 赵倩颖. CPN: 一种计算/网络资源联合优化方案探讨 [J]. 数据与计算发展

- 前沿, 2020, 2(4): 55-64. DOI: 10.11871/jfdc.issn.2096-742X.2020.04.005
- [7] 雷波, 赵倩颖, 赵慧玲. 边缘计算与算力网络综述 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27 (3):3-6. DOI: 10.12142/ZTETJ.202103002
- [8] 何涛, 曹畅, 唐雄燕, 等. 面向 6G需求的算力网络技术 [J]. 移动通信, 2020, 44 (6): 131-135
- [9] 刘明达, 陈左宁, 拾以娟, 等. 区块链在数据安全领域的研究进展 [J]. 计算机学 报, 2021, 44(1): 1-27. DOI: 10.11897/SP.J.1016.2021.00001
- [10] ETSI. Mobile edge computing (MEC): bandwidth management API: ETSI GS MEC015 [S]. 2017
- [11] 周鑫, 邓莉荣, 王彬, 等. 基于联盟链的去中心化能源交易系统 [J]. 全球能源互联 网 , 2019, 2(6): 556-565. DOI: 10.19705/j. cnki. issn2096-5125.2019.06.005

作 者 简 介



吕航,中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所工程师、CCSA TC610 边缘计算组副组长; 主要研究领域为5G行业专网、边缘计算、算力网络以及5G行业解决方案等;发表论文多篇。

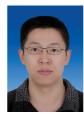


李佳聪,中国电信股份有限公司研究院工程师; 主要研究领域为5G网络、算力网络、未来网络等;发表论文10余篇。



雷波,中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所副所长、正高级工程师,中国科学院计算机网络信息中心客座研究员,北京邮电大学兼职教授,同时兼任 CCSA TC617 边缘计算产业发展及标准推进委员会副主席、边缘计算网络基础设施工作组(ECNI)联执主席、CCSA TC614 网络5.0 联盟管理与运营组组长以及算力网络特别工作

组副组长等;主要研究领域为未来网络技术、新型数据中心网络、边缘计算与算力网络等;出版专著4本,发表论文10余篇。



解云鹏,中国电信股份有限公司研究院正高级工程师、CCSA TC614架构组副组长、网络5.0产业和技术创新联盟架构组副组长;主要研究领域为未来网络、算力网络、IP城域网、数据中心网络等;获发明专利20余项,出版合著专著4本,发表论文10余篇。

基于专用激活波长的低时延 50G-PON原理与实现



Mechanism and Application of DAW-Based Low Latency 50G-PON

张伟良/ZHANG Weiliang^{1,2},黄新刚/HUANG Xingang^{1,2}, 马壮/MA Zhuang^{1,2}

- (1. 中兴通讯股份有限公司,中国深圳 518057;
- 2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室,中国深圳 518055)
- (1. ZTE Corporation, Shenzhen China, 518057;
- 2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen China, 518055)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204012

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20220706.1412.004.html

网络出版日期: 2022-07-07 收稿日期: 2022-05-10

摘要:在50G-无源光网络(PON)承载低时延业务的需求基础上,分析了50G-PON中安静窗口等因素带来的时延困扰。认为可通过增加专用激活波长(DAW)来解决50G-PON中安静窗口带来的时延问题。验证测试结果表明,结合相应的带宽分配方法,基于DAW的方法能够使50G-PON系统满足承载5G前传的时延要求。

关键词: 50G-PON; 低时延; 安静窗口; DAW

Abstract: Based on the low latency requirement for 50G-passive optical network (PON), the latency introduced by quiet window is analyzed. It is considered that the latency caused by quiet window in 50G-PON can be solved by using the dedicated activation wavelength (DAW). The latency testing results show that, combined with the corresponding bandwidth allocation method, the method based on DAW can make the 50G-PON system meet the latency requirements of carrying 5G fronthaul transmission.

Keywords: 50G-PON; low latency; quiet window; DAW

150G-PON承载低时延业务的需求

针对 50G-无源光网络(PON),国际电信联盟电信标准分局(ITU-T)G.9804.1^[1]指出了两种承载低时延业务的场景——5G前传和高级视频传输,并通过引用G.Sup66^[2]对 5G前传业务的时延要求做了相应规定。

ITU-T G.Sup66 标准^[2]讨论了 PON 承载移动前传的需求和应用场景,并给出了时分复用无源光网络(TDM-PON)承载5G前传业务的示例。该标准同时指出了不同5G业务端到端的时延需求,其中超可靠低时延通信(URLLC)业务的端到端时延为1~2.5 ms。表1进一步提供了5G业务基于功能切分选项的时延指标,其中选项4—8 相应的单向传输时延为100 μs 到几百微秒。

250G-PON低时延的技术难题及其解决方案分析

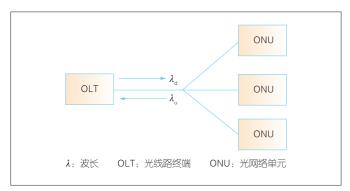
传统 TDM-PON 架构如图 1 所示。光线路终端(OLT)

基金项目: 上海市科技计划项目(20511102400);深圳市战略性发展项目(XMHT20190101034)

通过单点到多点光分配网络(ODN)连接多个光网络单元(ONU)。OLT和ONU之间采用一对上下行波长:下行方向采用TDM机制,此时OLT在不同的下行时隙中的向各ONU发送下行数据,各ONU筛选并接收属于自己的数据;上行方向采用TDMA机制,此时OLT给各ONU分配上行带宽,各ONU在属于自己的上行带宽内向OLT发送上行数据。

▼表1不同功能划分的传输速率和时延范围^[2]

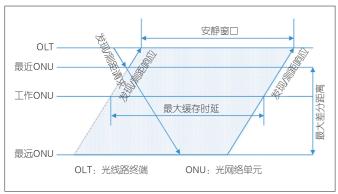
协议分割 选项	下行带宽要求/ (Gbit·s ⁻¹)	上行带宽要求 (Gbit·s ⁻¹)	单向时延
选项1	4	3	
选项2	4.016	3.024	1 ~ 10 ms
选项3	下行、上行都	兆选项2低	
选项4	4	3	
选项5	4	3	
选项6	4.133	5.640	
选项7a	10.1 ~ 22.2	16.6 ~ 21.6	100 μs到几百微秒
选项7b	37.8 ~ 86.1	53.8 ~ 86.1	
选项7c	10.1 ~ 22.2	53.8 ~ 86.1	
选项8	157.3	157.3	



▲图1 传统时分复用无源光网络架构

当ONU初次接入OLT时,一般OLT会对ONU进行发现和测距。为了发现并测距ONU,OLT需要开放安静窗口,如图2所示。在OLT发现和测距ONU的过程中,为了避免可能发生的上行冲突,OLT会停止给正常工作的ONU分配上行带宽,此时正常工作的ONU也不能向OLT发送上行数据。如果用户数据刚好在安静窗口到达正常工作的ONU,则该用户数据将至少缓存安静窗口大小的时间。安静窗口长度与OLT和ONU之间的最大差分距离相关。以OLT和ONU之间的最大差分距离为20km为例,该安静窗口时间至少为200μs。这将给正常工作ONU的上行数据发送带来最大200μs的数据缓存时延。如果考虑各ONU在响应发现/测距请求时的本地处理时间和随机时延之间的差异,安静窗口会更大,这也会给正常工作ONU的上行数据发送带来更大的数据缓存时延。

传统TDM-PON中除了安静窗口带来的时延外,还包括 光纤传输时延、动态带宽分配时延、OLT和ONU内部处理 时延等。



▲图2 发现和测距ONU过程中安静窗口对工作ONU的时延影响

50G-PON若继续采用传统TDM-PON架构,包括安静窗口等因素的总时延将无法满足5G前传的低时延要求。虽然减少OLT和ONU之间的光纤长度可以降低传输时延,也可以减小安静窗口带来的时延,但是安静窗口带来的时延仍然

是重要因素。例如,假设OLT和ONU之间的最大距离差为 10 km,安静窗口仍然会带来至少100 μs的时延;假设OLT和ONU之间的最大距离差为5 km,安静窗口仍然会带来至少50 μs的时延。

ITU-T曾提出多种50G-PON安静窗口消除方案,如表2所示,包括预先获知ODN特性、利用空闲时隙开放安静窗口、利用低幅低频信号传递ONU发现信息等。然而,这些方案都存在很大局限性,而专用激活波长(DAW)方案因为其可以在升级演进过程中采用旧系统的上行波长,简单易实现,逐渐脱颖而出。

▼表2不同安静窗口的消除方案比较

消除安静窗口 的方案	具体解决方法	局限性
预先获知 ODN 特性	开放较小安静窗□发现 ONU、测距ONU	系统不能及时识别 ODN 发生变化,存在冲突风险
利用空闲时隙	利用空闲时隙开放安静 窗口	当没有足够空闲时隙时, 无法与新接入 ONU 建立 通信
利用低幅低频 信号	在低幅低频信号上发现 ONU、测距 ONU	还未完全解决低幅低频 信号的正确识别问题
DAW	在DAW上发现ONU、测距ONU	DAW的获得性受限(但可重用旧系统的上行波长)

DAW: 专用激活波长 ODN: 光分配网络 ONU: 光网络单元

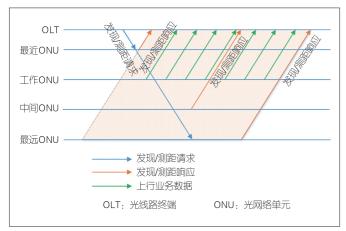
3基于DAW的低时延50G-PON工作原理

基于DAW的低时延50G-PON是指,在50G-PON的工作波长之外引入额外的DAW,以用于发现和测距ONU的安静窗口,并使其在DAW上开放,从而避免在50G-PON工作波长上消除开放安静窗口,以达到在50G-PON工作波长上消除开放安静窗口的目的。低时延50G-PON先通过DAW完成ONU的发现和测距,再将DAW上的ONU发现和测距结果应用到50G-PON工作波长上,从而完成50G-PONONU的激活。如图3所示,上行DAW用于OLT开放安静窗口,待激活ONU在上行DAW的安静窗口内发送发现响应和测距响应。在上行工作波长的对应时隙内,工作ONU可以正常发送上行业务。这里待激活ONU和工作ONU彼此不冲突。

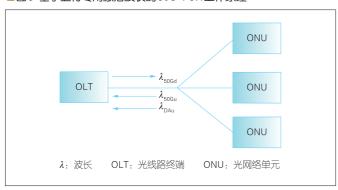
下面我们介绍基于DAW的低时延50G-PON两种实现以及DAW及工作波长的测距结果换算。

3.1 增加一个上行 DAW 的低时延 50G-PON

在50G-PON原有工作波长基础上,我们可以增加一个上行的DAW,如图4所示。



▲图3 基于上行专用激活波长的50G-PON工作原理



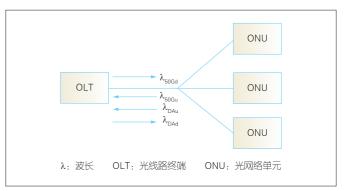
▲图4 基于上行专用激活波长的50G-PON架构

在引入上行 DAW 的 50G-PON 系统中, ONU 激活工作流程更新为:

- (1) 待激活 ONU上电后工作在 λ_{50Gd} 和 λ_{DAu} , 并在 λ_{50Gd} 等 待 OLT 发送的序列号 (SN) 请求;
- (2) OLT 在 λ_{DAu} 上开放安静窗口,并在 λ_{50Cd} 上广播发送 序列号 (SN) 请求;
- (3) 待激活 ONU 收到 SN 请求后, 在 λ_{DAu} 上发送序列号 (SN);
 - (4) OLT 在 λ_{DAu} 上获取待激活 ONU 的 SN;
- (5) OLT 在 λ_{50Gd} 上 给 待 激活 ONU 分配 ONU 身份标识 (ONU–ID),在 λ_{DAu} 上 开 放安静窗口,并在 λ_{50Gd} 上 向该 ONU 发送测距请求;
- (6) 待激活 ONU 在收到测距请求后,在 λ_{DAu} 上发送测距响应;
- (7) OLT 获取测距响应,计算出 λ_{50Gd} 和 λ_{DAu} 上的往返行程时延(RTD)(相关计算过程如公式(1)一(6)所示),并根据波长折射率特性进一步计算出 λ_{50Gd} 和 λ_{50Gu} 上的 RTD 以及均衡时延,然后将均衡时延发送给 ONU;
- (8) ONU 收到并应用 $\lambda_{\text{50Gd}}/\lambda_{\text{50Gu}}$ 上的均衡时延后,开始 在 λ_{50Gu} 上工作。

3.2 增加一对上下行 DAW 的低时延 50G-PON

在原有50G-PON原有工作波长基础上,我们可以增加一个上行DAW和下行DAW,如图5所示。



▲图5 基于上下行专用激活波长的无源光网络架构

在引入上行和下行 DAW 的 50G-PON 系统中,ONU 激活工作流程更新为:

- (1) 待激活 ONU上电后工作在 λ_{DAd} 和 λ_{DAu} ,,在 λ_{DAd} 上等 待 OLT 发送的 SN 请求;
- (2) OLT 在 λ_{DAu} 上开放安静窗口,并在 λ_{DAd} 上广播发送 SN 请求;
 - (3) 待激活 ONU 收到 SN 请求后, 在 λ_{DAL} 上发送 SN;
 - (4) OLT 在 λ_{DAu} 上获取待激活 ONU 的 SN;
- (5) OLT 在 $\lambda_{\rm DAd}$ 上给该 ONU 分配 ONU–ID,并在 $\lambda_{\rm DAd}$ 开放安静窗口,在 $\lambda_{\rm DAd}$ 上向该 ONU 发送测距请求;
 - (6) ONU 在收到测距请求后,在 λ_{DAu} 上发送测距响应;
- (7) OLT 获取测距响应, 计算出 λ_{DAd} 和 λ_{DAu} 上的 RTD (相关计算过程如公式 (7) (13) 所示), 并根据波长折射率特性进一步计算出 λ_{SOGd} 和 λ_{SOGu} 上的 RTD 以及均衡时延,然后将均衡时延发送给 ONU;
- (8) ONU 收到并应用 $\lambda_{50Gd}/\lambda_{50Gu}$ 均衡时延后,开始在 $\lambda_{50Gd}/\lambda_{50Gu}$ 上工作。

3.3 DAW 及工作波长的测距结果换算

在只有一个上行 DAW 的情况下,DAW 测距 RTD_{DA}为工作波长下行传输时间 T_{50Gd} 、ONU DAW 响应时间 T_{DArsp} 和 DAW 上行传输时间 T_{DAu} 之和。在测距结果换算过程中,基于 50G-PON 的系统采用单纤双向传输方式,上下行经过同一根光纤链路。不同波长传输时延之比等于对应波长的光纤折射率之比。 T_{DAu} 可以被换算为工作波长上行传输时间 T_{50Gu} ,如公式(1)一(6)所示。其中, n_{50Gd} 为下行工作波长折射率, n_{DAu} 为 DAW 折射率, n_{50Gu} 为上行工作波长的折射率, n_{TD} ,为上下行工作波长上的往返时间, T_{wrsp} 为上下行工

作波长时的ONU响应时间。

$$RTD_{DA} = T_{50Gd} + T_{DArsp} + T_{DAu}, \tag{1}$$

$$T_{50\text{Gd}} = \left(\text{RTD}_{\text{DA}} - T_{\text{DArsp}}\right) \times \frac{n_{50\text{Gd}}}{n_{50\text{Gd}} + n_{\text{DAu}}},$$
 (2)

$$T_{\mathrm{DAu}} = \left(\mathrm{RTD}_{\mathrm{DA}} - T_{\mathrm{DArsp}}\right) \times \frac{n_{\mathrm{DAu}}}{n_{\mathrm{50Gd}} + n_{\mathrm{DAu}}},\tag{3}$$

$$T_{\rm 50Gu} = T_{\rm DAu} \times \frac{n_{\rm 50Gu}}{n_{\rm DAu}}, \tag{4}$$

$$RTD_{w} = T_{50Gd} + T_{wrsp} + T_{50Gu},$$
 (5)

$$RTD_{w} = \left(RTD_{DA} - T_{DArsp}\right) \times \frac{n_{50Gd} + n_{50Gu}}{n_{50Gd} + n_{DAu}} + T_{wrsp}$$
(6)

在有下行和上行 DAW 的情况下,DAW 测距往返时间 RTD_{DA}为 DAW 下行传输时间 T_{DAd} 、ONU DAW 响应时间 T_{DArsp} 和 DAW 上行传输时间 T_{DAu} 之和。在测距结果换算过程中, T_{DAu} 可以被换算为工作波长上行传输时间 T_{SOGu} , T_{DAd} 被换算为工作波长下行传输时间 T_{SOGd} ,如公式(7)—(13)所示。其中, n_{DAu} 、 n_{SOGu} 分别为上行 DAW 和上行工作波长的折射率, n_{DAd} 、 n_{SOGd} 分别为下行 DAW 和下行工作波长的折射率,RTD_w为上下行工作波长时的往返时间, T_{wrsp} 为上下行工作波长时的响应时间。

$$RTD_{DA} = T_{DAd} + T_{DArsp} + T_{DAu}, \tag{7}$$

$$T_{\text{DAd}} = \left(\text{RTD}_{\text{DA}} - T_{\text{DArsp}}\right) \times \frac{n_{\text{DAd}}}{n_{\text{DAd}} + n_{\text{DAu}}},\tag{8}$$

$$T_{\mathrm{DAu}} = \left(\mathrm{RTD}_{\mathrm{DA}} - T_{\mathrm{DArsp}}\right) \times \frac{n_{\mathrm{DAu}}}{n_{\mathrm{DAd}} + n_{\mathrm{DAu}}},\tag{9}$$

$$T_{50\text{Gu}} = T_{\text{DAu}} \times \frac{n_{50\text{Gu}}}{n_{\text{DAu}}}, \tag{10}$$

$$T_{\text{50Gd}} = T_{\text{DAd}} \times \frac{n_{\text{50Gd}}}{n_{\text{DAd}}},$$
 (11)

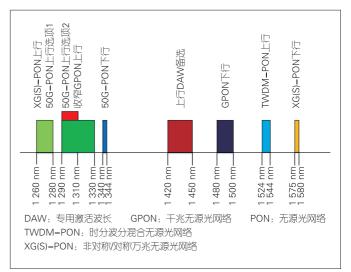
$$RTD_{w} = T_{50Gd} + T_{wrsp} + T_{50Gu},$$
 (12)

$$RTD_{w} = \left(RTD_{DA} - T_{DArsp}\right) \times \frac{n_{50Gd} + n_{50Gu}}{n_{DAd} + n_{DAu}} + T_{wrsp}$$
(13)

G.hsp.ComTC^[4]规定 ONU 响应时间为 35 ± 1 μ s,且 ONU 能够获得该响应时间。因此,按照公式(6)和(13),并根据测试值 RTD_{DA} 和已知值 T_{DArsp} 、 T_{wrsp} 、 n_{50Gd} 、 n_{50Gu} 、 n_{DAd} 、 n_{DAu} ,我们可以换算得到 RTD_w。

4基于DAW的低时延50G-PON实现

50G-PON的下行工作波长为1340~1344 nm。50G-PON的上行工作波长有两个选项:一个选项是1260~1280 nm,与非对称/对称万兆无源光网络(XG(S)-PON)上行波长重叠;另一个选项是1290~1310 nm,与千兆无源光网络(GPON)上行波长重叠^[3]。图6列出了50G-PON的上下行工作波长和其他相关波长。上行DAW可以选择一个新定义的波长,如1420~1450 nm^[5],也可以选择旧系统中的波长,例如采用GPON、XG(S)-PON、时分波分混合无源光网络(TWDM-PON)中的上行波长。



▲图6 50G-PON工作波长及备选DAW

DAW与50G-PON上下行工作波长的间隔至少为10 nm,这可以通过滤波器来实现。另外,当DAW采用旧系统波长时,虽然旧系统波长带宽被占用,但是此时发现和测距ONU的管理信息所占带宽很小,对旧系统的影响可以忽略。

4.1 场景A: 新定义一个波长作为 DAW

在该场景中,低时延50G-PON包含3个波长,如表3 所示。

4.2 场景B: 利用旧系统中的上行波长作为 DAW

我们假设 50G-PON采用与 GPON 重叠的上行波长,旧系统为 XG(S)-PON,50G-PON和旧系统共存,并且包含4个波长,如表4所示。在该场景中,50G-PON和XG(S)-PON需协调开放安静窗口。

4.3 场景 C: 利用旧系统中的上下行波长作为 DAW

该场景中50G-PON采用GPON上行波长,旧系统为XG

(S)-PON,50G-PON和旧系统共存,包含4个波长,旧系统中的上下行波长共同完成DAW功能,如表5所示,在该场景中50G-PON和XG(S)-PON能够共享发现信息和测距信息。

▼表3新定以上行DAW场景

200 MACATING 2111 MANAGE			
系统波长	波长范围/nm		
50G-PON下行波长	1 340~1 344		
50G-PON上行波长	1 260 ~ 1 280 或者 1 290 ~ 1 310		
上行DAW	1 420 ~ 1 450		
DAW: 专用激活波长	PON: 无源光网络		

▼表4重用旧系统上行DAW场景

系统		波长范围/nm
50G-PO	N下行波长	1 340 ~ 1 344
50G-PO	N上行波长	1 290 ~ 1 310
上行	DAW XG(S	S)-PON的上行波长1 260~1 280
协调	周波长 XG	(S)-PON下行波长1 575~1 580

DAW: 专用激活波长 PON: 无源光网络

XG(S)-PON: 非对称/对称万兆无源光网络

▼表5重用旧系统上下行DAW场景

系统波长	波长范围/nm
50G-PON下行波长	1 340 ~ 1 344
50G-PON上行波长	1 290 ~ 1 310
上行DAW	XG(S)-PON的上行波长1 260~1 280
下行DAW	XG(S)-PON的下行波长1575~1580

DAW: 专用激活波长 PON: 无源光网络

XG(S)-PON: 非对称/对称万兆无源光网络

5基于DAW的低时延50G-PON验证

低时延50G-PON除了用于消除安静窗口的DAW外,还可以改进动态带宽分配,例如采用协作动态带宽分配(CO-DBA)、固定带宽分配、多次带宽授权等带宽分配措施以降低时延。

在实际DAW时延效果验证测试中,系统的具体配置为: XGS-PON作为低时延PON,GPON上下行波长用于DAW,GPON ONU完成激活后的发现信息可用于XGS-PON ONU,GPON ONU测距结果经过换算后用于XGS-PON ONU。OLT和ONU之间光纤长度10km,XGS-PON ONU采用固定带宽分配,每125μs分配16次。ONU上行总带宽为1 Gbit/s,发送上行流量为950 Mbit/s,数据包长为1 518 B,并且数据包从ONU(用户网络接口UNI)侧端口发送、从OLT网络节点接口(NNI)侧端口接收。测试结果显示,最大时延不超过

 $90 \, \mu s_{\circ}$

6 结束语

本文通过引入DAW以消除50G-PON工作波长上的安静窗口,解决了50G-PON中安静窗口带来的时延问题。结合相应的带宽分配方法,基于DAW的方法能够使50G-PON系统满足承载5G前传的时延要求。本文所述的DAW方法已经被ITU-T G.Sup66^[2]、G.hsp.ComTC^[4]标准所采纳。

参考文献

- [1] ITU. Higher speed passive optical networks requirements: ITU-TG.9804.1 [S]. 2019
- [2] ITU. 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context: ITU-T G.Sup66 [S]. 2020
- [3] ITU. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification: ITU-T G.hsp.50Gpmd [S]. 2021
- [4] ITU. Higher speed passive optical networks: common transmission convergence layer specification: ITU-T G.hsp.ComTC [S]. 2021
- [5] ZHANG W. Discussion on band plan of dedicated activation wavelength [Z] 2020

作 者 简 介



张伟良,中兴通讯股份有限公司固网团队技术预研资深专家、低时延PON技术负责人;长期从事光接入、家庭网络产品的技术预研、产品规划和标准化工作;主持和参加多项国家"863"项目、省部级重点项目;获中国专利优秀奖、深圳市专利奖;发表论文10余篇,获授权专利100余项。





马壮,中兴通讯股份有限公司固网产品技术预研负责人;长期从事固网宽带和光接入产品技术预研、规划和开发工作;承担多项国家"863"项目和省部级项目;获国家科技进步奖二等奖、深圳市科技进步奖和中国通信学会科学技术奖;发表论文10余篇,申请发明专利20余项。

《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) 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 100 kB)。
 - (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:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

3. 其他事项

- (1)请勿一稿多投。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。
 - (3)编辑部地址:安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室,邮政编码: 230061。
 - (4) 联系电话: 0551-65533356, 联系邮箱: magazine@zte.com.cn。
 - (5) 本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: tech.zte.com.cn/submission。

中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

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

产业顾问(按姓名拼音排序):

段向阳、高 音、胡留军、华新海、 刘新阳、陆 平、史伟强、王会涛、 熊先奎、赵亚军、赵志勇、朱晓光

双月刊 1995 年创刊 总第 165 期 2022 年 8 月 第 28 卷 第 4 期

主管:安徽出版集团有限责任公司 主办:时代出版传媒股份有限公司

深圳航天广宇工业有限公司

编辑、发行:中兴通讯技术杂志社

出版:安徽科学技术出版社

总编辑: 王喜瑜

主编: 蒋贤骏

执行主编: 黄新明 编辑部主任: 卢丹

责任编辑: 徐烨

编辑:杨广西、朱莉、任溪溪

设计排版: 徐莹 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 1201 室

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

发行方式: 自办发行

印刷: 合肥添彩包装有限公司 出版日期: 2022 年 8 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