



研究与开发

5G/6G 移动通信星地融合频率共享技术分析

胡延伟¹, 弓健², 马占书²

(1. 南充职业技术学院, 四川 南充 637131; 2. 国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

摘要: 近年来移动通信技术飞速发展, 5G网络在全球范围内广泛部署, 6G技术研究也在紧锣密鼓地进行。随着经济高速发展和应用卫星天基设施的投入增加, 我国卫星通信、卫星导航等卫星应用产业将迎来高速发展的提速期, 构建星地融合一体化网络成为未来通信发展的趋势。卫星通信在频率资源上的需求与地面移动通信系统存在重叠, 地面移动通信与卫星通信的同频干扰、强功率压制干扰问题日益突出。从技术研究、政策制定、台(站)布局等方面进行5G/6G移动通信星地融合频率共享技术分析, 为构建星地融合的全球无缝覆盖通信系统提供参考。

关键词: 星地融合; 同频干扰; 强功率压制; 频率共享

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024254

Analysis of satellite-terrestrial frequency sharing technology for 5G and 6G mobile communication

HU Yanwei¹, GONG Jian², MA Zhanshu²

1. Nanchong Vocational and Technical College, Nanchong 637131, China

2. The State Radio Monitoring _center Testing Center, Beijing 100041, China

Abstract: In recent years, mobile communication technology has developed rapidly, with 5G networks being widely deployed globally, and research on 6G technology is also underway. With the rapid economic development and increased investment in satellite-based facilities, China's satellite communication, satellite navigation and other satellite application industries are expected to enter a period of rapid development, and the trend of building a satellite-terrestrial integrated network will become the future direction of communication development. The demand for frequency resources in satellite communication overlaps with that of ground mobile communication systems, and the problems of co-frequency interference and strong power suppression interference between mobile communication and satellite communication are becoming increasingly prominent. The frequency sharing technology for 5G and 6G mobile communication satellite-terrestrial integration was analyzed from the perspectives of technology research, policy formulation, and station layout, providing reference for building a satellite-terrestrial integrated global seamless communication system.

Key words: satellite-terrestrial integrated, co-channel interference, high power pressing, frequency sharing

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-11-26

通信作者: 马占书, 18993080069@163.com



0 引言

地面移动通信和卫星通信是现代通信的两大支柱，地面移动通信具有组网灵活、服务多样、规模经济等优点，可以基本满足人口密集地区的大宽带与低时延的网络接入需求，而卫星通信具有受地理环境影响小、覆盖面广、不受基站约束、灵活的可移动性等优点，适用于地广人稀且不宜建造地面通信基站的地方，在应急通信、远洋航行通信、偏远地区通信等方面发挥着不可替代的作用^[1]。华为Mate60 Pro作为全球首款实现卫星通话的智能手机，突破卫星通信技术的重大难度壁垒，实现超远距离通信射频链路，最终接入天通一号卫星移动通信系统，实现在荒漠无人区、地震救援等无地面网络信号覆盖环境下对外发送文字和位置信息。这一技术的突破标志着卫星通信从小众市场走向大众市场，使手机直连卫星从5G起步、向6G发展，成为6G通信的重要组成部分，同时在政策市场驱动下，低空经济进入快速增长期，构建星地融合全球无缝覆盖的移动通信网络成为

未来通信发展的趋势^[2-3]。星地融合网络应用场景如图1所示。星地融合网络可以通过有效的协同及操作机制克服卫星通信系统独立运行和移动通信覆盖区域不均的缺点，为人口稀少地区提供有效的覆盖和为人口密集地区提供高容量和经济的服^[4]。

合理的频率规划是建设星地融合网络的关键，随着通信技术的不断发展，频谱资源日益紧张，频率共享是提升频谱利用率、缓解局部频谱紧张局面的重要探索^[5]。在星地融合网络中，卫星通信系统和地面移动通信系统共享频率资源是提升稀缺频谱资源利用率的有效方式，星地融合频率共享问题成为当前研究的热点。

1 频率共享现状与存在问题

1.1 移动通信运营商5G、6G频率分配

2019年6月6日，工业和信息化部（以下简称工信部）正式向中国移动、中国联通、中国电信、中国广电发放5G商用牌照，标志着5G移动通信技术开始商用。4家运营商5G频段划分见表1。

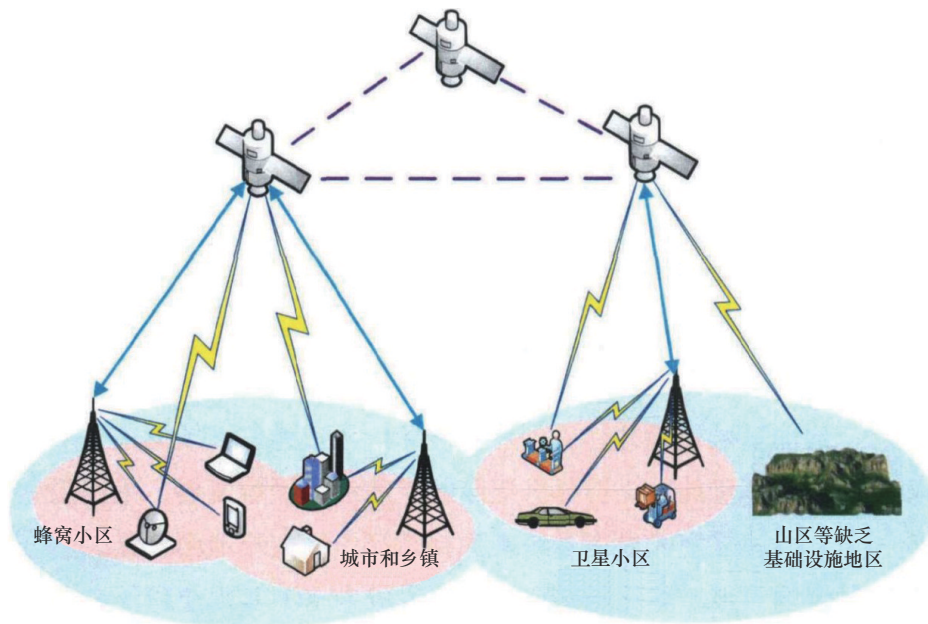


图1 星地融合网络应用场景

表 1 4 家运营商 5G 频段划分

运营商	频率/MHz	带宽/MHz	Band	备注
中国移动	2 515~2 675	160	n41	4G/5G 频谱共享
	4 800~4 900	100	n79	
中国广电	4 900~4 960	60	n79	3 家室内覆盖共享
	703~733/758~788	2×30	n28	
中国电信 中国联通 中国广电	3 300~3 400	100	n78	3 家室内覆盖共享
中国电信	3 400~3 500	100	n78	
中国联通	3 500~3 600	100	n78	2 家共建共享

2023 年 6 月 27 日工信部发布新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》率先在全球将 6 425~7 125 MHz 全部或者部分频段划分用于国际移动通信 (international mobile telecommunications, IMT) 系统, 意味着这些频段将被用于未来的 5G/6G 网络。

1.2 卫星通信频率分配

卫星通信是指无线电通信站间利用人造卫星作为中继站传递信号, 是一种重要的无线通信技术。卫星通信频段划分及应用场景见表 2。

1.3 星地频率共享主要问题

根据地面移动通信系统与卫星通信系统的频

段划分可知, 地面移动通信系统一般使用 6 GHz 以下的频段, 而卫星通信系统 S 波段、C 波段也采用相同的频段。在 4G 移动通信以前, 移动通信应用频段较窄, 且与卫星通信的频段区分清楚, 较少存在星地通信频率复用的情况, 但是随着 5G 频段的划分使得 3 400~4 200 MHz、4 500~5 000 MHz 频段的卫星地面站、卫星广播电视、数据通信卫星等存在频率共享的情况。中国移动、中国联通、中国电信三大运营商 5G 频段和卫星地面站下行频段如图 2 所示。

随着 5G 网络的建设, 由于 3.4 GHz 到 3.6 GHz 频段内中国联通和中国电信 5G 基站数量增多, 与之频率相邻的广电卫星地面站的下行业务受到了干扰。从干扰原因上分析, 主要是中国电信和中国联通 5G 通信频段与 C 波段卫星下行信道重合, 大功率信号进入高频头 (LNB), 对卫星接收机造成了严重的同频干扰, 其次是来自 5G 基站的非线性问题, 非线性产物的频率若恰好落入卫星接收机带内, 会对接收机产生较为严重的邻频干扰。卫星接收机干扰示意图如图 3 所示。

表 2 卫星通信频段划分及应用场景

波段	频率/GHz	主要应用场景
L	1~2	移动通信、卫星电话、导航卫星
S	2~4	气象卫星、无线电测向、通信卫星
C	4~8	卫星电视广播、卫星互联网、数据通信
X	8~12	雷达、科学卫星
Ku	12~18	卫星电视广播、卫星互联网、企业专用网络
Ka	26.5~40	大容量卫星通信系统、宽带互联网、卫星电视服务



图 2 三大运营商 5G 频段和卫星地面站下行频段

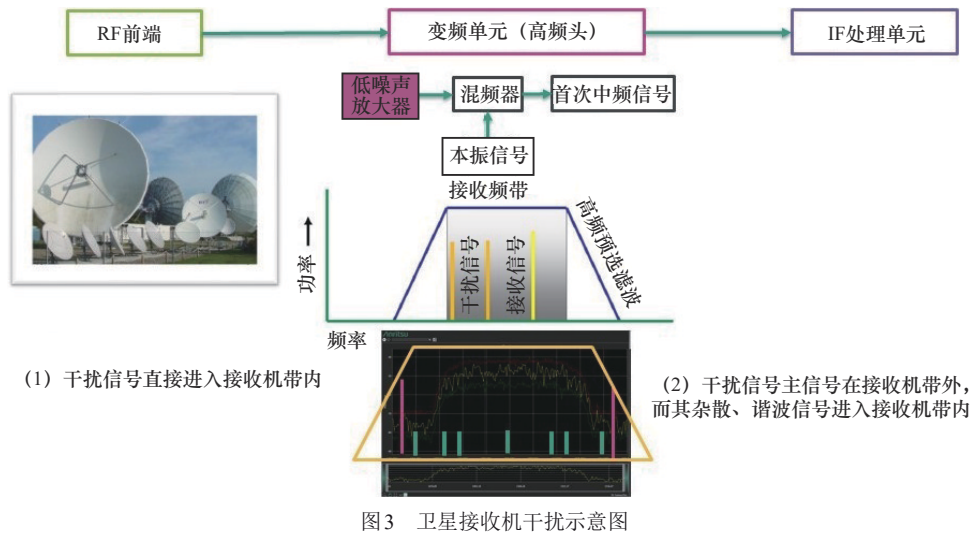


图3 卫星接收机干扰示意图

2024年6月,北京某通信集团卫星地面站3 550~3 700 MHz频段内受到不明无线电信号干扰。经过现场测试,观察和记录信号频谱,计算折合到天线口面处的信号强度,测试点8个方位垂直极化信号功率谱如图4所示。

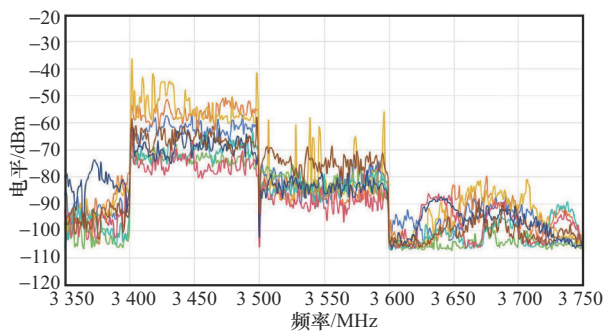


图4 测试点8个方位垂直极化信号功率谱

根据卫星通信系统反馈及测试功率谱图可知,在卫星地面站3 550~3 600 MHz工作频段内存在明显干扰信号,干扰信号来源方位不明确,其中正东方位信号最强,判断为运营商5G信号,通过对发现的信号进行调制解调,找到干扰小区的物理小区标识符(PCI),确定主要干扰源为中国联通5G基站,其他较弱干扰信号为中国联通、中国电信信号,联系运营商临时锁闭基站后,干扰消除。

按照工信部印发的《3 000~5 000 MHz频段

第五代移动通信基站与卫星地面站等无线电台(站)干扰协调管理办法》规定,结合“频带外让频带内、次要业务让主要业务、后用让先用、无规划让有规划”的原则,运营商对通信集团接收机加装高选择性带通滤波器,并对运营商自有设备降低功率以消除干扰。随后通过对比测试,发现干扰已完全消除。

2019年5月,上海某电视台技术运营中心受到不明无线电信号干扰,影响电视节目的正常接收转播,后经排查确定干扰源为中国联通5G基站。2020年扬州市广播电视传媒集团C波段广播电视卫星接收信号受到不明无线电信号的干扰,后经排查确定为中国电信5G基站干扰。由此可知,同频压制干扰、邻频干扰将是星地融合频率共享的主要问题。

1.4 星地融合频率共享研究现状

美国、欧洲等国家和地区较早开展了星地融合网络相关体制和技术的研究,国际电信联盟无线电通信部门(ITU-R)2012年开始征集IMT-Advanced卫星通信的空中接口标准,2022年9月完成了ITM-2020卫星通信愿景与需求制定^[6],2023年12月完成了技术提案,目前进入技术评估阶段。2012年我国提出了基于地面第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project,

3GPP) LTE-Advanced FDD 标准的 LTE-Satellite 卫星空中接口^[7]。2022年5月在3GPP SA1第98e次会议上,我国牵头的首个3GPP星地融合网络标准“R19 Study on satellite access-Phase 3 (SAT-Ph3 卫星接入研究阶段三, R19)”通过立项审议,标志着我国在卫星国际通信标准领域取得重大突破成果^[8]。同时,我国推出了“鸿雁星座”和“虹云星座”计划,对不同场景及天气条件下的卫星通信网络功能和性能开展了测试,有效推进了星地融合网络频率共享技术研究。

2 频率共享问题解决方案研究

目前卫星通信网络与移动通信网络还处于独立组网的状态,而未来的星地融合网络需要两者深度融合,协同为地面用户提供高速无缝通信服务^[9],而频率共享问题是解决星地融合的关键环节。针对星地融合频率共享出现的问题,研究人员从抗干扰技术、天线技术、网络规划与优化等方面展开研究并取得一定效果。功率控制技术是根据被干扰方的干扰功率阈值和发射方的容限,通过调整发射功率来减轻干扰,此技术是目前最常用的频率共享问题解决方案,但不能完全消除干扰。相控阵天线具有波束指向灵活、增益高等特点,通过调整相控阵天线的方向法线,可减少星间干扰。多波束天线是通过产生多个独立可控的波束,实现对不同区域的精确覆盖,减少干扰。多波束天线通过优化卫星资源的分配,提高系统容量和频谱效率,合理设计多波束天线的波束指向和覆盖区域,可以有效避免卫星通信系统与地面移动通信系统的相互干扰。这些技术是目前解决星地融合网络干扰对网络通信性能影响的主要方法,可以有效降低同频及邻频干扰强度,但无法合理规划频谱资源实现完全干扰规避。在未来构建星地融合一体化网络,有限的频谱资源难以满足融合网络的频率分配需求,频率共享问题更加突出,这些干扰规避方法难以满足星地融

合网络的频率需求。Joseph Mitola博士1999年提出的认知无线电技术,能够检测用户的通信需求并提供最符合用户通信需求的无线资源与服务,为充分利用频谱资源和解决频谱稀缺问题提供了最有前景的途径。经过20多年的发展认知无线电技术取得一些新的突破,是未来解决5G/6G移动通信星地融合网络频率共享问题的有效途径。

认知无线电技术通过新技术研究,改变现在的频率静态分配管理机制,实现动态频谱共享,实现频谱资源的灵活利用^[10]。认知无线电技术可以根据环境的变化改变传送端参数,在没有用户使用授权频段的时候使用这个频段,极大地提高频谱利用率,弥补固定频率分配的缺陷。认知无线电技术的认知能力就是空口频谱检测能力,从环境中获取感知信息,通过有效的频谱检测方法,对所处区域的频谱占用情况、功率、干扰值大小进行监测,判断哪些频谱可以使用,调整用户的信道接入,实现频谱资源的高效利用。但是任何频谱检测技术都可能存在漏检或者错判的概率,错判会造成共享系统间的干扰,这种类型的干扰难以排查判断,因此在共享系统间增加联合频谱信息数据库,授权系统将频率占用和调整的信息提供给集中控制的频谱数据库,共享系统实时读取这些信息,从而精确地判断并指导共享系统频率的使用。

随着通信技术的不断进步,地面基站可通过增加专门的信号接收模块从卫星宽波束控制信息中获取未来一段时间内的窄波束工作信息(包括波束发射功率、相对卫星的波束中心朝向、波束工作频点等),随后结合卫星星历、链路预算模型,计算未来各时刻卫星窄波束对小区的干扰程度,从而确定是否使用和卫星波束相同的频谱资源,可以实现频谱资源的灵活运用^[11]。随着无线电频谱资源日益紧张,加强认知无线电技术的创新研究,建立联合频谱信息数据库,融合其他通信技术将有效提升星地融合频率共享利用效率。



3 标准化与法规建设

虽然通过技术手段可以有效识别并规避干扰频段,提高频谱利用率,避免同频干扰、强功率压制干扰,但是动态频谱管理技术会导致无线电管理部门对全频谱的动态管理缺少有效的解决方案。随着移动通信6G频段划分,星地融合频率共享问题将更加突出,制定统一的技术标准和相关法律法规,为不同系统间的频率共享问题提供明确的指导和规范,才能促进星地融合产业健康有序发展。建议从以下5方面开展5G/6G移动通信星地融合频率共享的标准化和法规建设。

(1) 国家相关部门应提前规划,确定各个运营商的6G频率,并对6G基站与卫星地面站等无线电台(站)干扰协调工作的开展提出明确指导意见,确保处理此类问题有法可依。研究表明如果运营商将星地融合共享频段用于室内通信,其无线发射功率传输到室外被卫星地面站接收的概率很小,从而实现室内无线接入系统与卫星地面站共存^[12]。

(2) 各省区市无线电主管部门要对广电、气象、航空航天等重要台(站)制定相关的保护机制,要求各运营商在重要台(站)周边对架设基站降低功率、拉远基站距离、避免使用同频基站设备、调整基站物理扇区方向等措施,避免出现严重干扰事件。

(3) 无线电管理部门出台文件要求各运营商在重要台(站)附近架设基站时做好电磁环境测试,做到新架设基站频率与重要台(站)频率不冲突,有效避免同频、邻频干扰。

(4) 建立相应的沟通协调机制,运营商、卫星地面站建设单位均应在建设新台(站)前向当地无线电管理部门备案,了解建设地点的情况,依据相关法规,做好双方的协调沟通工作,合理利用频谱资源,让频谱资源发挥最大价值。

(5) 国家相关部门牵头,移动通信运营商、

卫星通信运营单位共同参与星地融合网络技术研究,开展星地融合网络联合频谱信息数据库建设研究,实现星地融合网络频谱信息数据库共建、共享、共同维护,结合认知无线电技术等新技术的发展,推进星地融合网络标准化建设。

4 5G/6G移动通信星地融合频率共享技术面临的挑战

面向5G/6G移动通信星地融合频率共享技术研究在实际应用中还面临着星地空口体制不统一、时频不同步等问题,这些问题严重制约着星地融合网络频率共享系统的性能和发展。

目前,移动通信网络和卫星通信网络还处在独立组网的状态,空口体制不统一,两者在多普勒频移、信道衰落、传播时延、时间漂移等方面存在显著差异,两者在信道功率及信号强度变化量上也不相同,这些差异对统一空口设计带来巨大挑战,加快星地融合网络同步、随机接入、波束协同、多星链路协同等关键技术的研究,加快实现星地融合网络统一空口设计。

由于卫星相对地面是高速运动,给地面用户终端带来了极大的传输时延和频偏,大的频偏将使地面用户终端的同步信号检测相关性降低,导致同步失败。现有地面移动通信系统的同步方案无法满足高动态的星地融合网络场景同步需求。因此,在未来的星地融合网络研究中需要考虑在网络侧对多普勒频移变化率及时延变化率进行预估,并进行时延补偿,确保在较大频偏环境下能实现快速、准确的星地时频同步。

5 结束语

根据5G移动通信在快速发展过程中遇到的各种问题,可知5G/6G移动通信星地融合在频率共享方面面临着诸多的挑战和机遇。这些挑战和机遇将对6G的发展起到很好的启示作用,提前布局推动标准化与法规建设,引进先进的认知无

线电技术,建立联合频谱信息数据库,加快星地融合网络频率共享面临的空口标准不统一、时频不同步等技术难题的攻克,加强跨领域合作和交流,从技术研究、政策制定、台站布局3方面入手,推动星地融合网络高质量发展,构建星地一体化全球无缝覆盖的通信系统,满足人民多样化的网络服务需求。

参考文献:

- [1] 王海龙,刘丽峰,黄海明. 卫星通信在军民融合领域的应用概述[J]. 科技风, 2021(20): 62-63.
WANG H L, LIU L F, HUANG H M. Application of satellite communication in the field of civil-military integration[J]. Technology Wind, 2021(20): 62-63.
- [2] 赵妍. 撑起低空经济卫星互联“天空”[N]. 通信产业报, 2024(5).
ZHAO Y. Supporting the "sky" of low-altitude economic satellite interconnection[N]. Communications Industry News, 2024(5).
- [3] 焦凌霄,李文静,童建飞,等. 面向手机直连的星载相控阵: 关键技术与未来展望[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 30-42.
JIAO L X, LI W J, TONG J F, et al. Satellite phased arrays for direct-to-handset satellite: key technologies and future vision[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 30-42.
- [4] 颜晓娟. 星地融合网络中的非正交多址接入技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
YAN X J. Research on non-orthogonal multiple access technology in satellite-terrestrial integrate networks[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2019.
- [5] 吴曼青,吴巍,周彬,等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016(3): 30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. Overall architecture proposal for the integrated information network of heaven and earth[J]. Satellite & Network, 2016(3): 30-36.
- [6] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [7] ITU. Report ITU-R M.2514-0, vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface(s) of IMT-2020[Z]. 2022.
- [8] 张冬晨,孟德香,孙超. 频谱共享应用中的动态频率规划方案探讨[J]. 电信工程技术与标准化, 2012, 25(5): 33-39.
ZHANG D C, MENG D X, SUN C. Discussion on the dynamic frequency planning method for spectrum sharing application[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2012, 25(5): 33-39.
- [9] 瞿重希,毛浩斌,许憧,等. 面向6G的星地融合网络频谱共享技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 50-56.
QU C X, MAO H B, XU C, et al. Spectrum sharing technology for satellite-terrestrial integrated networks towards 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(4): 50-56.
- [10] 陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.
CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.
- [11] 孙耀华,彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [12] 张晓燕,杨夏青,韩锐. 国际海事卫星移动通信系统与下一代IMT系统在扩展C频段的共存[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 76-82.
ZHANG X Y, YANG X Q, HAN R. Frequency sharing of the international maritime satellite mobile communication system and the next generation IMT system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 76-82.

[作者简介]



胡延伟 (1988-), 男, 南充职业技术学院助教, 主要研究方向为电子科学与技术、光通信优化。



弓健 (1983-), 男, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为电磁兼容技术、无线射频测试技术。



马占书 (1989-), 男, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线射频测试技术、无线通信网络优化、干扰排查。