



面向低轨卫星的 频谱认知智能管控

Cognitive Intelligent Spectrum Management and Control for Low Earth Orbit Satellite System

李高/LI Gao¹, 王威/WANG Wei¹, 吴启晖/WU Qihui¹

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 中国 南京 210016)
(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry
and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要:基于天地一体频谱资源共享面临的挑战,提出了面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构。频谱感知得到三维多域频谱数据并形成频谱地理数据库;三维补全技术补全缺失的数据;频谱预测预判频谱占用情况,辅助频谱感知和决策;强化学习、博弈学习可以进行智能频谱决策。这样可以形成集感知、补全、预测和决策的频谱认知闭环系统,为后续低轨卫星频谱资源管控研究提供一些指导和建议。

关键词:低轨卫星系统;频谱认知智能管控;频谱感知;频谱补全和预测;频谱智能决策

Abstract: Based on the challenges of space-air-ground spectrum sharing, a cognitive intelligent spectrum management and control architecture for Low Earth Orbit (LEO) satellites is proposed. Three-dimensional multi-domain spectrum data obtained by spectrum sensing is used to form a spectrum geographic database, followed by three-dimensional completion of the missing data, and then spectrum occupancy with prediction technology is used for assisting sensing and decision-making. Reinforcement learning and game-theoretic learning methods are used for intelligent spectrum decision-making. In this way, a closed-loop of spectrum cognition based on sensing, completion, prediction and decision-making is formed, in order to provide some guidance and suggestions for the subsequent research on LEO satellite spectral resource control.

Keywords: Low Earth Orbit satellite system; cognitive intelligent management and control; spectrum sensing; spectrum completion and prediction; intelligent spectrum decision

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105003

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210930.1547.006.html>

网络出版日期: 2021-10-05

收稿日期: 2021-08-17

1 研究背景

地面移动蜂窝网络在地域覆盖方面具有局限性,而卫星通信网络可以实现无线网络在全球的按需覆盖,满足各个地区和用户的通信需求。这在很大程度上解决了通信容量不足的问题,保证了未来各个领域内无线业务的发展。与同步轨道卫星相比,发射一颗低轨卫星所需能量较少,研发建设成本较低,传输时延

更短,路径损耗更小,且低轨卫星数量大,覆盖范围广,多个卫星组成的星座就可以实现全球覆盖^[1-2]。在“天地一体”通信网络的发展趋势下,低轨卫星系统成为地面通信系统的重要补充,在支持移动通信、边远地区基本通信和高速率用户接入等方面都十分有利。低轨卫星系统不仅可以满足全球未普及互联网区域的接入需求,与5G技术、物联网、云数据、智慧城市等融合发展还可带动各个

领域的产业发展和经济增长。在军事应用上,低轨卫星系统在构建更为高效可靠的军用通信网络、完备天地一体监测体系、强化军事战略层面的太空信息能力等方面也发挥了重要作用^[3]。近几十年来,随着航天和通信技术不断发展,低轨卫星通信领域呈现出越来越激烈的国际竞争态势。

比较有代表性的传统低轨卫星通信系统有铱系统、全球星系统、白羊系统和柯斯卡系统等,近年来又涌

现出成千上万颗以 OneWeb、Starlink 等为代表的低轨卫星星座,使得非静止轨道卫星在国际电信联盟(ITU)的申报数量大大增加^[4-5]。为了提高频谱使用效率,低轨卫星使用的频段不可避免地会和其他卫星发生重叠。低轨卫星星座之间、低轨卫星与对地静止轨道卫星之间、低轨卫星与地面通信系统之间都存在不同程度的频谱兼容性问题。各国发射的卫星在不同业务(包括空间业务)之间共享无线电频谱^[6]。

随着卫星通信的高速发展,以美国为首的航天强国抢夺频谱资源的现象越演越烈,形成独占太空的霸权势力。L、S、C、Ku、Ka 等频段的频谱资源的使用趋于饱和^[3]。为应对频谱资源稀缺问题,近年来中国也开始加快低轨卫星系统的建设步伐,相继建成鸿雁星座、虹云星座、银河航天首发星。但是中国卫星事业起步时间较晚,频谱资源“先占先得”的分配方式使得中国频谱资源的使用处于劣势^[7]。为了保障现有低轨卫星的通信业务,同时实现频谱资源可重复高效利用,除了加快发展航天事业外,还需加快对低轨卫星频谱进行有效监测和管理的技术研究。

2 低轨卫星频谱认知智能管控

2.1 面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构

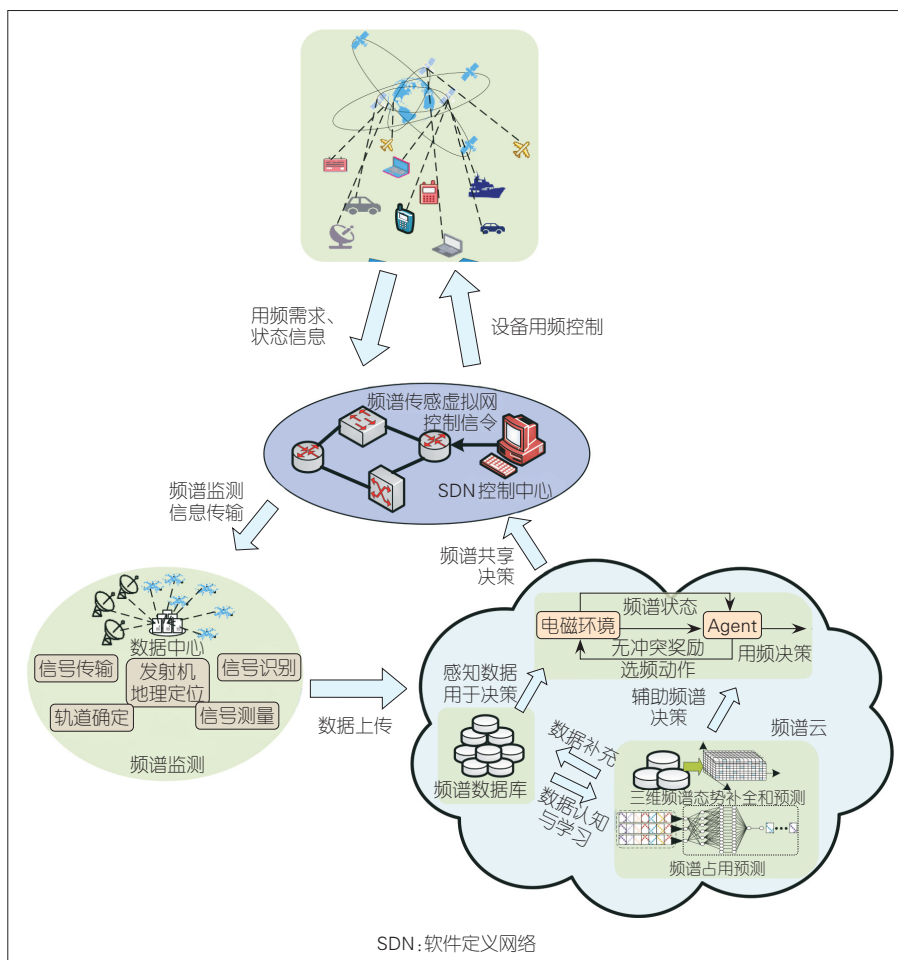
和地面移动通信系统频谱资源共享一样,低轨卫星频谱资源共享正在从静态管理模式向动态管理模式转型。电磁频谱空间认知和智能频谱管理利用数据挖掘和机器学习的方法对海量频谱数据进行认知处理,使频谱资源的动态管理更加智能。面向低轨卫星的频谱认知智能管控包括频谱数据监测、补全、预测和决

策部分,是一个从频谱感知到频谱接入的动态频谱认知闭环系统。面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构及管控流程如图1和图2所示。

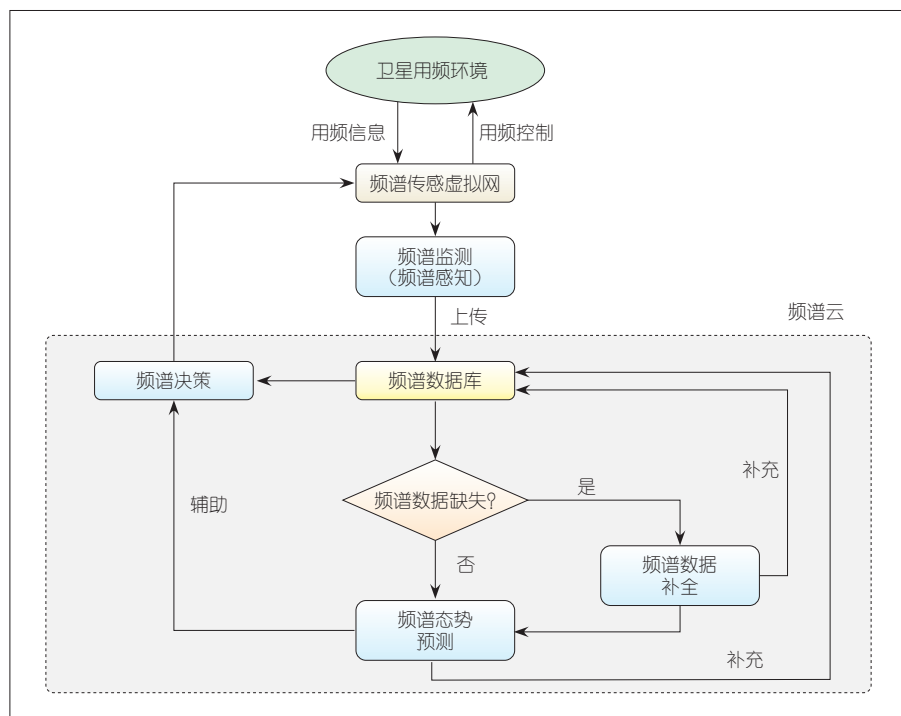
首先,通过感知设备(包括卫星专用频谱监测设备和群智频谱感知模块)感知频谱状态。卫星监测的目标主要有两个:一是监测卫星资源利用情况,包括卫星轨道占用情况、频率占用情况和波束覆盖范围等;二是监测干扰,包括监测是否有干扰及干扰源的位置等。通常监测的非对地静止卫星轨道(GSO)卫星频段是超高频(UHF)、L、S、X、Ku 和 Ka 频段,即低轨卫星对应的业务频段。随着宽带互联网卫星通信使用的日益增多,以及带宽需求的不断扩大,监测频段

将扩展至 Q 频段及以上。

低轨卫星频谱感知支持频谱管控过程,可使用分布式智能频谱感知模块感知空间无线电业务频谱状态。感知数据传至频谱云^[8]即可形成可分析利用的频谱资源库。然而,由于感知设备和感知角度等因素,在频谱信息收集和处理过程中,所得到的频谱数据往往是不完整的。在频谱云上,基于频谱大数据进行频谱认知与学习,利用频谱补全将数据库中不同格式的数据整合、填充得到完整的频谱数据。频谱预测可以利用完整的频谱数据探测可用的频谱空洞,形成可用的频谱资源库,从而辅助频谱决策,指导用频设备的频谱接入。也就是说,这样做可以深耕现有频谱大数



▲图1 面向低轨卫星的频谱认知智能管控架构



▲图2 面向低轨卫星的频谱认知智能管控流程

据,探索共享技术,使低轨卫星空间无线电业务从专用走向共用,从静态共享到动态共享,实现无线电频谱资源的精细化管理。

频谱认知智能管控体系使用软件定义的设备。低轨卫星业务的发展使得频谱监测越来越趋于分布式、分散化、复杂化和多样化,传统的基于硬件的频谱分析仪不再满足当今复杂、密集和不断发展的频谱环境需求,软件定义无线电技术带来了新型的频谱分析平台。同时使用软件定义的用频设备和管控相关设备使得智能管控更灵活和轻便。

频谱认知智能管控架构使用认知-软件定义网络(C-SDN),将低轨卫星业务面和频管控制面分离开来。C-SDN控制面通过南向接口与频谱资源池相连接,通过北向接口与应用层相连接,以及时接收与反馈应用层服务需求。感知得到的频谱状态信息被上传至频谱管控数据链,数据链再通过管链设备将信息传输到频管

中心,最终实现对全局频谱管控信息的监测控制。

2.2 三维多域频谱态势感知技术

频谱感知是实现频谱资源管控的关键前提。传统的频谱感知方法主要是匹配滤波检测、能量检测和循环平稳特性检测。这些技术在本质上是把频谱感知单纯地看作是一个信号检测问题,感知的数据并不全面,应用场景也非常有限。随着认知无线电技术的发展,近年来又相继出现了协作频谱感知、群智频谱感知和压缩频谱感知等频谱感知技术。这些技术主要用来感知各个时间内频谱资源的使用情况,包括时域和频域二维的频谱数据,但并未很好地和感知用户的空间位置实时结合。

面向低轨卫星的频谱感知通过三维空时频谱感知算法来获取低轨卫星电磁频谱的三维多域频谱态势。我们首先根据不同的监测任务选择合适的监测点来部署各种类型的监

测系统,包括固定监测站、可移动监测站和空中监测站等,形成分布式监测结构。将监测设备联网可以全方位地监测低轨卫星频谱的使用情况,并获取海量频谱数据。在获取时频二维频谱数据后,我们可以使用移动监测站来确定授权卫星通信信号的地面发射机或其他未授权干扰源的空间位置信息。常用技术包括使用到达角(AOA)、到达功率(POA)和到达时间差(TDOA)互相关算法等。这些技术源于卫星地理定位测量的结果,可以描述辐射源最可能来自的区域。由此可以获取辐射源的空间位置信息,包括精度、纬度和高度。为了做到频谱的深度共享,还要进行频谱云化,即将采集到的包含时域、频域和地理定位的三维多域频谱态势数据传回频谱云,在云计算中心进行频谱认知分析、处理和决策。

2.3 三维频谱态势补全技术

在频谱数据收集和处理过程中,基于有限监测节点的电磁频谱监测信息所得到的频谱数据往往是不完整的。为了保证后续数据分析处理的准确性,人们需要利用信息融合、相关分析、大数据挖掘等技术,充分挖掘频谱数据在时、空、频三维的相关性,实现区域内电磁环境数据的补全和恢复,从而形成区域内完整的电磁态势。我们建立了基于时、空、频三维相关性的张量形式频谱数据模型,然后针对大规模数据,设计融入矩阵分解的频谱态势张量补全算法。张量补全问题用张量秩最小化问题描述为^[9]:

$$\begin{aligned} \min_{\mathcal{X}} \quad & \text{rank}(\mathcal{X}) \\ \text{subject to} \quad & \mathcal{X}_{\Omega} = \mathcal{M}_{\Omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathcal{X}$ 和 $\mathcal{M}$ 具有相同的维数, $\mathcal{X}, \mathcal{M} \in R^{I_1 \times I_2 \times \cdots \times I_N}$, $\mathcal{M}$ 为观测所得

到的存在数据缺失的张量, Ω 指观测指标集。由此构建出基于频谱数据张量的低秩性质的核范数最小化优化模型, 而矩阵秩最小化问题又可以转化为求矩阵核范数最小化问题:

$$\min_{\mathcal{X}} \sum_{n=1}^N w_n \|\mathcal{X}_{(n)}\|_*$$

$$\text{subject to } \mathcal{X}_{\Omega} = \mathcal{M}_{\Omega}, \quad (2)$$

其中, $\sum_{n=1}^N w_n \|\mathcal{X}_{(n)}\|_*$ 为张量的核范数。利用简单低秩张量补全算法 (SiLRTC)、快速低秩张量补全算法 (FaLRTC) 和高精度低秩张量补全算法 (HaLRTC) 3 种算法^[9]可以得到全局最优解。在传统张量补全算法中融入矩阵分解技术, 可以将大规模矩阵转化为小规模矩阵, 以减小所需奇异值分解的矩阵规模, 从而降低算法所需运算量, 提升数据张量补全效率。

除了以上补全技术, 还有基于生成对抗网络 (GAN) 的三维频谱态势补全技术。该技术利用存储的历史或经验频谱数据, 对三维频谱张量进行切片处理和灰度处理, 得到一定量的完整三维频谱态势或场强训练数据; 每组训练数据为三通道的完整三维频谱态势或场强“灰度图”和对应的三通道的缺损三维频谱态势, 又或场强“彩色图”。利用该训练数据对 GAN 网络进行迭代且对抗式的离线训练, 得到具有三维频谱态势或场强补全机制的 GAN 网络。将训练好的网络在线部署于实际应用中, 传到频谱云中的不完整的频谱数据就可以利用已学好的 GAN 网络实现大缺损率频谱态势补全, 其补全效果远好于传统基于插值的方法。

2.4 三维频谱态势预测和信道占用度预测技术

全球频谱实测数据分析表明: 任何一个频谱数据都不是孤立存在的,

在时间、频率、空间各个维度上具有密切的相关性。因此, 人们可充分地建模、分析、挖掘、利用这些内在的相关性, 并进行频谱预测。通过分析历史频谱数据在时间、频率、空间上存在的高度相关性, 人们可以预测下一时段频谱资源的使用情况。例如, 基于时、空、频三维张量形式的频谱数据模型就可用于频谱态势预测。我们首先对感知到的频谱数据进行处理, 生成多张时频图像, 一张图像即是一天内多个时隙的多个频点 (频带) 数据, 从而建立三维频谱张量模型。然后对未来一天的频谱数据进行预填充, 最后基于过去多张频谱图像, 即可预测出未来一天的完整频谱态势。如图 3 左侧所示, 已知前 $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_{n-1}$ 天的频谱态势, 再基于张量补全理论, 利用三维频谱态势补全预测模型预测出第 T_n 天的频谱态势^[10]。

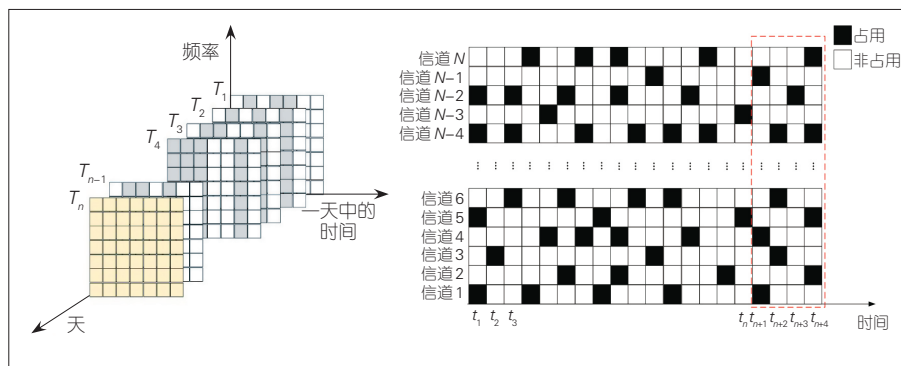
面向信道的频谱态势预测是认知无线电中的一项关键技术。根据统计信道的历史信息, 预判性地做好频谱占用策略, 可以减少频谱感知过程中消耗的大量时间和能量。根据频谱预测的结果, 认知用户可以选择最优的信道或提前撤出主用户可能会占用的信道。所以, 准确的频谱预测能够主动地减少干扰和延迟, 提升频谱利用率, 从而提高网络的吞吐量, 即用认知无线电的方式提前侦测

空闲频谱以实现频谱资源的重复利用。如图 3 右侧所示, 根据各个信道在 t_n 时间的历史占用情况, 可以预测后续多个时隙的信道占用状况。通过统计一段时间内信道忙闲程度, 能够对下一时刻或时段各个信道的忙闲程度进行精确预测, 从而能够动态地瞄准下一时刻或时段可采用的通信频率, 以便将后续通信信号发送到空闲程度高的信道上进行传输, 智能适应动态频谱变化。

深度学习中的循环神经网络 (RNN) 在解决时间序列问题方面具有优势。RNN 网络允许将历史输入的信息存储在网络的内部状态中, 从而利用当前所有可用输入信息进行频谱预测。然而, 由于梯度消失或梯度爆炸, RNN 网络的性能受到限制。长短期记忆 (LSTM) 神经网络引入记忆单元结构, 能够利用门控单元控制输入、遗忘和输出信息的量, 从而具有更强的解决时间序列问题的能力, 可以进行有效的信道占用度预测。

2.5 智能频谱决策技术

面向低轨卫星的频谱决策技术需依据频谱感知结果或预测结果。制定合理的频谱资源使用策略能够为实现低轨卫星频谱共享提供指导和依据, 然而低轨卫星业务的发展使得频谱决策越来越困难。其中的主要原因是电磁环境复杂化、设备多样



▲ 图3 三维频谱态势补全预测和信道占用度预测

化,且不同设备使用的频谱干扰愈发严重,不同用户使用频谱的优先级也不同。如何利用多元化的频谱感知数据并选择最优的用频策略成为智能决策的研究内容。强化学习通过与环境交互获得学习经验,并逐步改进行为策略,从而具有非常强的动态选择能力和自主学习能力。使用强化学习算法进行智能选频决策时,每一决策时刻的各个通信信道的占用状态即为当前环境状态,选择可接入的信道即为当前行为策略,并通过信道碰撞冲突概率和通信质量等评估方式设定奖惩机制,即采用“学习-决策-执行”环路实现频谱的实时决策^[11]。在基于“频谱拍卖”^[12]的频谱决策技术中,每个频谱用户都是“报价人”,中心频谱管理器为“竞拍者”,竞拍者以“赢者决策”策略把当前可用的空闲频谱资源进行决策和分配,从而最大化整个系统的全局吞吐量收益。该方法利用频谱大数据进行频谱智能决策时,博弈学习可以发挥重要作用。此外,还有基于迁移学习的频谱决策技术^[11]。由于频谱感知和预测的大数据具有多样特性,因此具备多域学习能力的迁移学习可以从不同领域、不同任务和不同分布的数据中提取知识,再结合当前新学习的知识,就可以很好地进行频谱智能决策。

3 结束语

未来卫星互联网时代频谱资源共享已成为发展趋势。智能频谱感知从总体上支撑频谱管理的过程,是保证频谱有效管理的必要手段。使用张量补全及预测算法可以补全有限观测条件下的频谱感知数据并预测频谱态势。利用已补全的频谱数据对未来频谱状态进行预测包括对

信道占用度的预测,预测结果可以辅助智能频谱决策。通过频谱决策,认知用户可以选择最优的信道或是提前撤出主用户可能会占用的信道。这些方法可以解决低轨卫星之间、低轨卫星和中高轨卫星之间,以及低轨卫星和地面通信系统之间频率复用问题。总之,本文提出的面向低轨卫星系统的频谱认知智能管控体系架构及相关技术可以智能地统筹、协调低轨卫星各业务无线电的用频需求,支持并鼓励高效利用频谱资源。

参考文献

- [1] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1851-1865. DOI:10.1109/JSAC.2020.3000803
- [2] CHU J H, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(3): 1959-1970. DOI:10.1109/JIOT.2020.3015995
- [3] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Cognitive radio techniques for satellite communication systems [C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2013: 1-5. DOI:10.1109/VTCFall.2013.6692139
- [4] 袁俊, 鲍晓月, 孙茜, 等. 巨型低轨星座频率轨道资源趋势分析及启示建议 [J]. 空间碎片研究, 2021, 21: 48-57
- [5] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(2): 62-69. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800301
- [6] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(2): 55-61. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800299
- [7] LAGUNAS E, SHARMA S K, MALEKI S, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2015, 1(3): 305-317. DOI:10.1109/TCCN.2015.2503286
- [8] WU Q H, DING G R, DU Z Y, et al. A cloud-based architecture for the Internet of spectrum devices over future wireless networks [J]. IEEE access, 2016, 4: 2854-2862. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2576286
- [9] LIU J, MUSIALSKI P, WONKA P, et al. Tensor completion for estimating missing values in visual data [J]. IEEE transactions on pattern

analysis and machine intelligence, 2013, 35 (1): 208-220. DOI:10.1109/TPAMI.2012.39

- [10] DING G R, WU F, WU Q H, et al. Robust on-line spectrum prediction with incomplete and corrupted historical observations [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(9): 8022-8036. DOI: 10.1109/TVT.2017.2693384
- [11] 吴启晖, 邱俊飞, 丁国如. 面向频谱大数据处理的机器学习方法 [J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 703-713. DOI: 10.16337/j. 1004-9037.2015.04.001
- [12] NIYATO D, HOSSAIN E. Spectrum trading in cognitive radio networks: a market-equilibrium-based approach [J]. IEEE wireless communications, 2008, 15(6): 71-80. DOI: 10.1109/MWC.2008.4749750

作者简介



李高, 南京航空航天大学电子信息工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为无线通信、认知无线网络、频谱数据挖掘等。



王威, 南京航空航天大学电子信息工程学院研究员; 主要研究方向为空地一体化网络、电磁频谱安全和区块链。



吴启晖, 南京航空航天大学特聘教授、副校长, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家百千万人才工程入选者, 国家有突出贡献中青年专家, 工业和信息化部通信科学技术委员会委员, IET Fellow, 电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室主任, 中国电子学会理事, 中国通信学会云计算与大数据专业委员会副主任; 主要研究方向为认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络、无人机集群智能通信; 主持无人机频谱认知知识国家自然科学基金重大仪器等国家级重大/重点项目 10 余项; 获日内瓦国际发明展金奖 1 项, 国家科技进步奖二等奖 1 项, 省部级科技进步奖一等奖 3 项、二等奖 2 项、三等奖 7 项; 发表论文 100 余篇。