



射电宁静天空保护进展

张海燕

Progress in the protection of radio quiet sky

ZHANG Haiyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AMSR-2性能改进对无线电频率干扰的有效缓解

Effective mitigation of radio frequency interference by AMSR-2 instrument performance improvement

电波科学学报. 2020, 35(6): 935-942

无线电气象学研究进展与展望

Progress and prospect of radio meteorology research

电波科学学报. 2020, 35(6): 801-812

星载微波成像仪无线电频率干扰软件识别算法综述

Review on software identification methods for radio frequency interference of spaceborne microwave radiometer

电波科学学报. 2020, 35(2): 280-291

300 kHz以下频段电波传播研究进展

Progress in radio wave propagation below 300 kHz

电波科学学报. 2023, 38(4): 574-590

用频装备带内双频窄谱电磁辐射阻塞干扰效应预测模型

Prediction model of blocking interference effects for electronic equipment under the condition of the dual-frequency narrow spectrum in-band electromagnetic radiation

电波科学学报. 2020, 35(3): 377-385

对流层电波传播研究与展望

Research and prospect of tropospheric radio wave propagation

电波科学学报. 2023, 38(4): 591-609, 656



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张海燕. 射电宁静天空保护进展[J]. 电波科学学报, 2024, 39(4): 595-601. DOI: 10.12265/j.cjors.2024065

ZHANG H Y. Progress in the protection of radio quiet sky[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(4): 595-601. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024065

射电宁静天空保护进展

张海燕^{1, 2, 3*}

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 2. 射电天文与技术重点实验室, 北京 100101; 3. 河北省射电天文技术重点实验室, 石家庄 050081)

摘 要 射电天文业务 (radio astronomy service, RAS) 通过探测来自宇宙的无线电信号开展天文研究。由于射电望远镜的高灵敏度, 极易受到来自望远镜本身的电磁辐射, 及移动通信业务和卫星业务等主动无线电业务射频干扰 (radio frequency interference, RFI) 的影响, 因此保护射电宁静天空是支撑射电天文观测研究取得科学成果的重要基础。近期, 国内射电天文设施发展迅速, 如 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 已取得众多突出成果, 新疆奇台 110 m 射电望远镜正在建设等。与此同时, 主动无线电业务的快速增加, 导致国内射电望远镜无线电环境逐渐恶化。为保护 RAS 所需的射电宁静天空, 国内开展了相关的技术研究, 并采取了频谱管理措施, 如射电望远镜电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 技术研发、评估 RAS 与主动无线电业务的兼容性、在射电望远镜周边设立电磁波宁静区 (radio quiet zone, RQZ)、参与国际与国内频谱管理协调等, 本文进行了总结陈述。这些工作, 有效地保护了国内射电望远镜周边的电磁环境。

关键词 射电天文业务 (RAS); 射频干扰 (RFI); 干扰消减; 频谱管理; 电磁环境保护

中图分类号 P161.4

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)04-0595-07

DOI 10.12265/j.cjors.2024065

Progress in the protection of radio quiet sky

ZHANG Haiyan^{1,2,3*}

(1. National Astronomical Observatories of CAS, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101, China; 3. Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract Radio astronomy service (RAS) carries out research on astronomy based on the detection of radio signals from the Universe. However, due to its high sensitivity of radio telescope, it is susceptible to radio frequency interference (RFI) from the telescope itself and active radio services like mobile communication and satellite services. Therefore, the protection of radio quiet sky for RAS is fundamental for supporting the achievement of scientific outcome. In China, the radio astronomical facilities have been developed rapidly. For instance, the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) has achieved many outstanding outcomes, and the 110-meter radio telescope is being built in Qitai County, Xinjiang Province. Meanwhile, due to the rapid increase of active radio services, the radio environments around the radio telescopes in China are deteriorated gradually. In order to protect the radio quiet sky of RAS, the technical and spectrum management measures have been studied and developed, for instance, studying the electromagnetic compatibility (EMC) of radio telescopes, assessing the compatibility between RAS and active radio services, establishing Radio Quiet Zones (RQZs), and participating international and domestic activities of spectrum management, which have been summarized in this paper. All of these works support the protection the radio environments around the radio telescopes effectively.

Keywords radio astronomy service(RAS); radio frequency interference(RFI); RFI mitigation; spectrum management; electromagnetic environment protection

收稿日期: 2024-03-29

资助项目: 国家自然科学基金 (12273067, 12041301)

通信作者: 张海燕 E-mail: hyzhang@nao.cas.cn

0 引言

射电天文是基于接收源于宇宙无线电波的天文学,而射电天文业务 (radio astronomy service, RAS) 是涉及射电天文应用的一种无线电业务^[1]。由于宇宙中遥远天体发射的无线电信号非常微弱,要求射电望远镜极其灵敏,因此射电天文观测极易受到主动无线电业务的射频干扰 (radio frequency interference, RFI)^[2]。

中国近年来 RAS 发展迅速。现有的射电天文观测台站分布在北京、上海、江苏、青海、新疆、云南、贵州、内蒙古、西藏等省市地区。观测波段从米波到毫米波,研究领域涵盖各天文课题。被誉为“中国天眼”的世界第一大单口径射电望远镜 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST), 观测频段为 70 MHz~3 GHz, 自 2020 年起正式开始科学观测^[3]。迄今,已经探测到 800 多颗新的脉冲星,在快速射电暴、脉冲星、中性氢研究等领域取得了众多科学成果^[4]。位于青海德令哈的 13.7 m 射电望远镜,则在毫米波段开展观测^[5]。中国甚长基线干涉测量网包括密云 50 m 和 40 m、佘山 25 m、天马 65 m、新疆 26 m、昆明 40 m 等射电望远镜,为中国的月球和火星探测工程提供了重要支撑^[6]。同时,一些新的射电望远镜已经被提出并开始建设,例如位于新疆奇台的 110 m 射电望远镜、云南景东的 120 m 射电望远镜、吉林与西藏的 40 m 射电望远镜等^[7-8]。此外,中国还是国际平方公里阵 (Square Kilometer Array, SKA) 项目的正式成员国,目前 SKA 第一阶段建设已经启动^[9]。

然而,随着无线电业务,如移动通信及卫星等系统的迅猛发展,国内各射电天文台站受到 RFI 的影响持续增加,因此对射电天文宁静天空保护工作的需求也更加迫切^[10]。

为此,各射电天文台站积极开展了电磁环境保护研究。以 FAST 为例,作为国家重大科技基础设施,实现了我国在前沿科学领域的多项重大原创突破。而 FAST 电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 研发、设立并运行 FAST 电磁波宁静区 (radio quiet zone, RQZ), 在保障望远镜正常运行和科学产出方面发挥了不可替代的重要作用^[11]。

1 国内外研究状况

RFI 引起的风险可能会对 RAS 产生多方面的影响。例如,有的 RFI 甚至比天文源强 10^9 倍,这可能会掩盖天文学家感兴趣的宇宙信号;对于瞬变源或地外生命探测,RFI 可能会误导观测结果。由于 RFI,射电天文观测时间或数据可能会损失,增加了

观测成本。强 RFI 还可能会使高灵敏度的接收器饱和,并降低仪器的探测能力。对于观测者来说,由于数据中的 RFI 等原因,导致数据处理分析困难。因此,保护 RAS 的射电宁静天空是支持取得科学成果的重要基础^[12]。

随着无线电通信业务和社会经济的快速发展,射电望远镜周边的电磁环境日趋恶化。近期,一些主动无线电业务的应用可能会给 RAS 带来严重的问题,如卫星业务、移动通信业务、高空平台系统等^[13]。对于星链和一网这样的巨型卫星星座系统,从地球上的任何位置都可以“看到”至少一颗卫星。联合国和平利用外层空间委员会正以“暗夜与宁静天空”为题对此开展讨论。为此,国际天文学联合会 (International Astronomical Union, IAU) 成立保护暗夜与宁静天空免受卫星星座干扰中心 (IAU center for the protection of dark and quiet sky from the satellite constellation interference, CPS), 组织系列黑暗与宁静天空研讨会,提出了减轻卫星 RFI 对 RAS 干扰的建议^[14]。目前,非对地静止卫星轨道 (non-geostationary satellite orbit, non-GSO) 系统给天文学造成的潜在影响已经得到确认,在国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 2023 年世界无线电通信大会 (World Radiocommunication Conferences 2023, WRC-23) 上,各国代表同意设立 WRC-27 大会议题,研究必要的技术和规则,保护在特定无线电宁静区和全球划分给作为主要业务的 RAS,免受 non-GSO 系统引起的集总 RFI^[15]。国际天文学界敦促,在进行任何拟议空间活动环境影响评估时,须考虑空间活动对射电天文学的潜在影响。同时,天文学家们和 ITU 还正在开展月球背面射电天文观测及频谱保护的研究^[16]。

为减少 RFI,保护射电宁静天空,技术研发、频谱管理等部门与天文学家协作,研究 RFI 缓解技术,例如开展望远镜 EMC、RFI 监测系统、滤波器等研发;发展 RFI 识别、标记、切除、有源补偿等软件^[17]。在频谱管理方面,通过参与 ITU 相关研讨,进行 WRC RAS 相关议题研究,修订无线电规则 (Radio Regulation, RR),制订或更新 ITU 射电天文工作组 RAS 建议书、报告、手册等,促进对 RAS 频谱资源的保护。目前,国际上已经建立了数十个 RQZs,来保护射电望远镜周围的电磁环境,并通过修订国家无线电法规和制定标准等方式保护当地的 RAS^[18]。

在中国,射电天文学家也同样面临着 RFI 的挑战。为减轻射电望远镜本身的 RFI,国内已在望远镜的规划、设计、建设和运行各阶段应用了各种 EMC 性措施,如屏蔽和滤波等。同时,为保护射电望

远镜的宁静电磁环境,国内各台站积极开展干扰监测和缓解技术研发,并通过与相关部门和地方政府协商,设立RQZ为我国射电天文学的可持续发展预留了空间。

2 射电宁静天空保护进展

本节将简要概括近期我国保护射电宁静天空相关研究的进展情况。

2.1 射电望远镜 EMC 研发

电磁干扰是指任何能使设备或系统性能降级的电磁现象。要解决系统的 EMC 性问题,须在三个因素即电磁干扰源、耦合途径、敏感设备方面采取措施,而电磁干扰抑制的主要措施包括接地、滤波和屏蔽^[19]。

对于射电望远镜,敏感设备为高灵敏度接收机,而望远镜系统的主要电磁辐射干扰源可以分成两类:一是信息技术设备等弱电设备,如计算机、控制器等;二是电机、变压器等强电设备。强电设备工作频率较低,但由于其功率较大,如果产生电磁辐射,其干扰值将比较大。为抑制来自电子、电气设备的干扰,各射电望远镜利用接地、滤波和屏蔽等措施,开展相应的 EMC 研发。如上海天马望远镜在主动反射面促动器采用 EMC 措施;明安图射电频谱日像仪对观测楼机房采用电磁屏蔽;FAST 采用 EMC 设计的促动器、索驱动机房、馈源舱与观测基地^[20];奇台 110 m 射电望远镜开展综合 EMC 设计等^[21]。

以 FAST 促动器的 EMC 研发为例(见图 1),为实现在观测时形成 300 m 口径的瞬时抛物面,在 FAST 反射面下安装约 2 300 套促动器用来控制反射面节点变形,并且这些促动器必须与望远镜观测同时运行。促动器内部的主要干扰源包括直流电源、电机、电机驱动器、控制器、电磁阀、油温油压传感器和位置传感器等。结合技术特点,在系统构架方面,研发了机电液一体化促动器,实现可达 15×10^3 kg 的大负载,同时开展的 EMC 设计可实现 80 dB 的屏蔽效能,确保促动器的干扰得到有效减少^[22]。

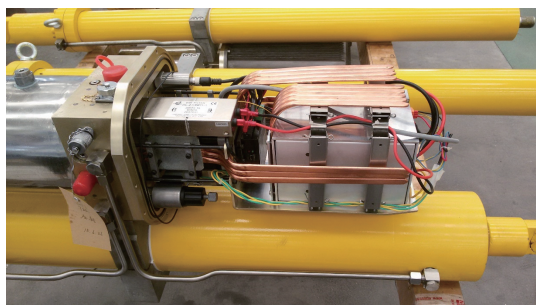


图 1 FAST 促动器内部结构图

Fig. 1 Internal structure of FAST actuator

2.2 RFI 监测与消减研发

射电望远镜对台址的电磁环境要求极为严格,因此,电磁环境监测与干扰消减对望远镜的长期正常运行非常重要。各射电望远镜从选址、建设、调试到运行阶段,大都对 RFI 开展了定期的监测和排查,同时研发了干扰信号识别和消减技术。如 FAST 在选址、建设和运行期间定期开展电磁波环境监测,评估周边电磁环境的变化^[23];西藏阿里天文台研发了电磁环境监测系统等^[24]。图 2 为建设中的阿里天文台电磁环境监测系统,该监测系统包括 3 个天线,覆盖频率为 100 MHz~20 GHz,将工作在海拔 5 200 m 的阿里台址。

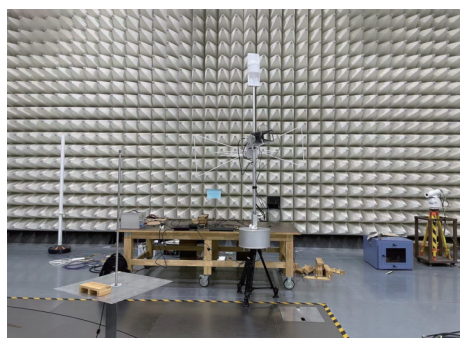


图 2 阿里天文台电磁环境监测系统

Fig. 2 Electromagnetic environment monitoring system at the Ali Observatory

在望远镜接收系统研发中,提升信号传输和接收的动态范围并包含一定余量,可以减少强 RFI 对观测的影响。如设计射频系统的低噪声放大器(low noise amplifier, LNA),实现在宽波段范围内承受较高的输入辐射功率。由于 RFI 通常是脉冲式且窄带的,因此宽波段上的总功率并不大,并且可以将系统设计为线性保持。在邻频干扰比较强的情况下,为避免接收机饱和,可以考虑采用增加滤波器的方式^[25],如上海天马望远镜在 S 波段增加滤波器,减少了移动通信干扰等。

此外,为减少卫星干扰的影响,FAST 已经构建了一个卫星 RFI 预警系统,以避免强卫星 RFI 导致的接收器饱和^[26]。在天文数据处理过程中,天文学家通常对被 RFI 污染的数据,采用标记和去除的方法,来实现干扰消减。如在宇宙中性氢谱线强度成图中,采用基于频谱峰值的阈值法,实现了干扰实时消减^[27];利用脉冲星搜寻软件 PRESTO 中的 riffind 函数,标记时频强度谱中被 RFI 污染的区域,并用均值或其他强度值替代^[28]等。由于 FAST 的 L 波段接收机有 19 个波束,研发了 RFI 空间滤波组合阈值的方法,并应用到数据处理中。同时,研究了基于主成分分析的 RFI 提取和统计方法。所有这些 RFI 监

测、硬件与软件 RFI 缓解措施都为 FAST 的科学成果提供了有力支撑^[29]。

2.3 频谱管理与协调

无线电频谱是人类的共享资源,组织统筹使用无线电频谱资源的过程称为频谱管理。国际负责这项工作的国际组织是 ITU。ITU 的无线电通信部门 (ITU Radiocommunication Sector, ITU-R) 负责制定并维护 RR。RR 具有国际条约的地位,加入 ITU-R 的所有成员国均受 RR 约束。其中,RR 脚注 5.340 要求在所列的频带内禁止一切发射;脚注 5.149 提出对所列频段的其他业务电台进行指配时,敦促主管部门采用一切实际可行措施保护 RAS 免受有害干扰。ITU-R 修改 RR 的唯一机制是通过 3~4 年举行的 WRC,下一届大会是 WRC-27。此外,还有数个地区性机构来监管各个地区内的无线电资源,如亚太、欧洲、非洲相关电信组织等。为了在相同或相邻频带中运行多种无线电业务,需要明确定义每个无线电业务的特性和兼容性要求。在 ITU-R,这是通过国际电联的文献,包括研究组及其工作组专门针对每种无线电业务制定的建议书、报告等研究成果来实现。ITU-R 工作组和研究组开展无线电业务的相关技术研究,并定期开会进行讨论。其中,RAS 是科学业务研究组 SG7 下所设工作组 WP7D 的主要研究内容。

为保护 RAS 的频谱资源,持续参与 WRC 议题研究工作和 WRC 大会至关重要。而 RAS 作为一种具有极高灵敏度接收系统的被动业务,受到大多数 WRC 议题的影响。在 WRC-23 议题的研究周期,我国代表积极参加 ITU-R WP7D 和 SG7 讨论;参与亚太和国际科学业务频谱保护委员会的研究;参与 WRC-23 和未来 RAS 相关议题国内研讨;配合开展《中华人民共和国无线电频率划分规定》等法规文件的讨论,更新完善划分规定的中国脚注,保护规划和新建射电天文站址频谱资源^[30]。此外,还起草了国家推荐性标准《射电望远镜电磁环境保护技术规范》,该规范包括了保护技术要求、频谱共用方法、电磁环境保护测量方法等,为射电天文地面观测台站的选址、建设、运行、维护时的电磁环境测量和保护提供了重要的技术参考。2023 年 12 月,该技术规范正式实施^[31]。

2.4 设立并运行 RQZ

为减少或避免对射电天文望远镜产生干扰,通过设立特定的地理区域作为 RQZ。在 RQZ 范围内,常规频谱管理程序将会根据保护需求进行修改。ITU-R RA.2259 报告给出了 RQZ 的特征。其中,RQZ 区域有三种基本类型。第一类是在某些频段禁止所有无线电发射的区域。此类型区域通常限于望

远镜的相邻区域,如 FAST RQZ 半径为 5 km 的核心区。第二类区域也禁止发射,但地理范围更广,如果在协调后发现符合严格的阈值,则可以发射。该协调过程涉及对各个规划和运行系统的评估,包括与望远镜的距离、局部地形、传输的方向性和功率水平等。第三类区域与第二类区域相似,不同之处在于经过协调达成一致后,可以进行发射。在不需要全时段发射的情况下,射电天文站点和运营商可以进行协商,使用某些特定频率的时间。然而,大多数已建立的 RQZ 仅管理固定的地面发射设备,而不监管机载或星载发射机等移动式的发射,这为 RQZ 的运行管理带来挑战。

在望远镜运行阶段,可通过一定的操作避免在特定时间内可能发生的已知干扰。基于发射设备的动态变化,可以根据射电望远镜进行科学观测的频率,以及所指向的天空方向来进行主动协调。

迄今,国内已在内蒙古明安图观测基地、上海天马观测站、贵州 FAST 观测基地、青海德令哈 13.7 m 毫米波射电望远镜观测站、新疆奇台 110 m 射电望远镜观测基地建立了 RQZs,来有效保护射电望远镜周围的无线电环境,相关信息见表 1^[32]。目前,国内最大 RQZ 的保护区域,为以 FAST 和 QTT 望远镜为中心、半径 30 km 的圆形区域^[33]。2017 年,还协调设立了半径为 30 km 的 FAST 飞行限制区,将已有两条航线整体东移出该区域,助力 FAST 电磁环境保护。此外,对于规划和在建的新射电天文设备和台址,如云南景东 120 m、西藏与吉林 40 m 射电望远镜和阿里天文台等,正在协调设立更多的 RQZs。

表 1 国内 RAS 的 RQZs^[32]

Tab. 1 RQZs of RAS in China^[32]

射电望远镜	位置	海拔/m	设立时间	圆形保护区半径/km
明安图射电频谱日像仪	(115°14'44.7", 42°12'31.3")	1 356	2007年	10
天马射电望远镜	(121°08'10", 31°05'32")	4	2012年	3
FAST	(106°51'20", 25°39'10")	841	2013年	30
德令哈13.7 m射电望远镜	(97°43'46.7", 37°22'42.5")	3 200	2015年	26
奇台110 m射电望远镜	(89°40'57", 43°36'04")	1 759	2018年	30

2.5 保护 RAS 免受卫星星座干扰

近年,non-GSO 卫星数量不断增长,并且未来十年规划了更多此类卫星的发射,同时各国正在考虑将 non-GSO 卫星系统作为未来卫星移动业务地面网络的一部分。

随着 2019 年 5 月首批 60 颗星链卫星的发射,天

文学家们更加关注卫星星座对光学和射电天文观测的影响^[34]。对于灵敏的射电天文望远镜,即使是在RQZ,来自单个和多个 non-GSO 卫星系统的集总发射也可能对RAS造成干扰,而仅靠国家监管很难解决卫星导致的干扰。对于目前大多数中轨卫星或低轨卫星系统,射电望远镜受到的干扰大多是旁瓣接收到的。但对于新的 non-GSO“巨型星座”,如星链项目,该系统近期部署的星座拥有1 000~4 000颗卫星,预计部署的卫星将超过10万颗,意味着成百上千颗卫星将始终处于地平线上,卫星信号有可能进入射电望远镜波束旁瓣,对天文观测造成干扰,同时也增加了通过望远镜主波束耦合接收强干扰的可能性^[35]。

目前结合已知 non-GSO 星座的频谱规划,RAS可能受影响的主要业务频段为10.6~10.7 GHz(包括在RR的脚注5.340中受保护的10.68~10.7 GHz频段)、42.5~43.5 GHz和48.94~49.04 GHz、次要业务频带14.47~14.5 GHz等,以及其他RAS作为主要业务划分但相对靠近卫星的波段,如22.21~22.5 GHz和31.3~31.8 GHz等(部分在RR的5.340脚注)。另外,还须考虑谐波的影响,如11.8~12 GHz频段的谐波落在受RR 5.340保护的23.6~24 GHz频段等。

包括中国在内,来自各国天文、工业、空间政策、环境等领域的专家参与了保护暗夜与宁静天空的研讨,并提出了缓解卫星干扰的初步建议,如要求 non-GSO 卫星避免直接指向射电望远镜和RQZ,特别是雷达和其他可能损伤射电天文接收机的高功率卫星应用系统;要求 non-GSO 卫星的旁瓣电平足够低,当它们没有直接指向射电望远镜时,不会单独或累加对射电望远镜和RQZ造成干扰。同时,鼓励和支持在空间政策、法规、行业指南、天文观测、软件等领域开展合作。

RAS与non-GSO系统之间的兼容性问题,可以通过在卫星发射并运行之前开展分析、评估,并采用相应的技术措施进行干扰缓解。在空对地方向,干扰程度取决于许多因素。为解决这种动态场景下的保护问题,对于non-GSO系统,ITU-R M.1583-1建议书提供了non-GSO卫星移动通信系统或卫星导航系统与射电天文望远镜站址之间干扰的计算方法^[36];ITU-R S.1586-1建议书提供了计算non-GSO卫星固定系统无用发射电平对射电天文台站影响的方法^[37];ITU-R RA.769-2建议书对射电天文望远镜旁瓣接收到的non-GSO卫星干扰给出了门限值^[38];ITU-R RA.1031-3建议书阐述了在共用频段内保护RAS的指导性意见^[39];ITU-R RA.1513-2建议书提供了对于

RAS作为主要业务的频段,由于干扰造成的射电天文观测数据丢失和时间损失比例标准^[40];ITU-R RA.2259报告包含了RQZ的特性和建立RQZ的措施等。基于这些研究基础,RAS与non-GSO星座系统的兼容性研究与评估正在开展。

3 总结与建议

射电望远镜的发展促进了新的重大天文发现。国际SKA、下一代甚大阵与视界望远镜、FAST阵等在建和规划的大型射电天文设备为探测宇宙的第一批恒星和星系的形成、恒星的演化、银河系边缘的行星、黑洞的视界提供了机遇。同时,各类无线电业务的大规模应用,导致射电天文台站周边电磁环境的拥挤和恶化。即使对已划分给RAS的频段,监管也比较困难,并且在RAS划分频段之外的观测频谱保护更加难以实现,但由于科学研究的需求,射电天文学的探测频谱却越来越宽。目前,卫星正以成百上千倍的数量增加,射电天文学因卫星干扰逐渐失去了可观测的频带。因此,RAS需要采取多种技术和管理措施,来保障望远镜的正常运行。

对于RAS的保护,提前预防比后期RFI缓解更为重要。首先,射电望远镜将继续尽可能在偏远地区选址,从而利用地形减少地面主动发射无线电业务的影响;其次,在RAS周边设立RQZ,保护周边电磁环境;同时,开展射电望远镜的EMC研发,使用高动态范围、高时频分辨率的接收系统,开发RFI缓解硬件和软件等,积极利用新的仪器与观测技术、更强大的电子设备和更复杂的软件,实现对RFI的有效缓解。此外,参加科学与工业界涉及频谱管理与协调的研究和讨论,共同努力保护RAS的射电宁静天空,支撑科学研究取得重大科学成果。

致谢:此项工作获得射电天文与技术重点实验室和国内各射电天文台站的大力支持,所取得的相关进展来自各台站从事射电天文频率保护工作同事的不懈努力和与合作,在此致以诚挚的感谢!

参考文献

- [1] Radio regulation[Z]. Geneva: International Telecommunication Union, 2020.
- [2] Handbook on radio astronomy[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2013.
- [3] JIANG P, YUE Y, GAN H, et al. Commissioning progress of the FAST[J]. *Science china physics, mechanics, and astronomy*, 2019, 62: 959502.
- [4] NIU C H, AGGARVAL K, LI D, et al. A repeating fast radio burst associated with a persistent radio source[J].

- Nature, 2022, 611(7936): 10.
- [5] 李振强, 张旭国, 徐烨, 等. 德令哈 13.7 m 望远镜多波束接收机的运行[J]. 天文学报, 2021, 62(3): 24.
LI Z Q, ZHANG X G, XU Y, et al. Operation of multi-beam receiver of Delingha 13.7 m telescope[J]. Acta astronomica sinica, 2021, 62(3): 24. (in Chinese)
- [6] 刘庆会, 黄勇, 舒逢春, 等. 天问一号 VLBI 测定轨技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52(3): 71-81. DOI: 10.1360/SSPMA-2021-0204
LIU Q H, HUANG Y, SHU F C, et al. VLBI technique for the orbit determination of Tianwen-1[J]. Science China physics, mechanics & astronomy, 2022, 52(3): 71-81. (in Chinese)
- [7] WANG N, XU Q, MA J, et al. The Qitai radio telescope[J]. Science China physics, mechanics & astronomy, 2023, 66(8): 289512.
- [8] 汪敏, 徐永华, 王建成, 等. 景东 120 m 口径全可动脉冲星射电望远镜[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52(11): 57-69.
WANG M, XU Y H, WANG J C, et al. Jingdong 120 m pulsar radio telescope[J]. Science China physics, mechanics & astronomy, 2022, 52(11): 57-69. (in Chinese)
- [9] 武向平. 中国 SKA 科学报告[R]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-18.
- [10] 张海燕. 中国射电天文频率保护进展[J]. 天文学进展, 2017, 35(4): 473-480.
ZHANG H Y. Protection progress on radio astronomy frequencies in China[J]. Progress in astronomy, 2017, 35(4): 473-480. (in Chinese)
- [11] 胡浩, 张海燕, 黄仕杰. FAST 电磁环境保护措施[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 152-157.
HU H, ZHANG H Y, HUANG S J. Protection measures of FAST radio environment[J]. Journal of deep space exploration, 2020, 7(2): 152-157. (in Chinese)
- [12] 安涛, 陈骁, Imohan Prashanth, 等. 射电频率干扰的消减[J]. 天文学报, 2017, 58(5): 20-41.
AN T, CHEN X, IMOCHAN P, et al. Radio frequency interference mitigation[J]. Acta astronomica sinica, 2017, 58(5): 20-41. (in Chinese)
- [13] 孙正雄, 王锦清, 虞林峰, 等. 导航卫星信号对天马 65 m 射电望远镜的干扰分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52(3): 120-129.
SUN Z X, WANG J Q, YU L F, et al. Interference analysis of navigation satellite signals using the Tianma 65-m radio telescope[J]. Science China physics, mechanics & astronomy, 2022, 52(3): 120-129. (in Chinese)
- [14] WALKER C. Dark and quiet sky for science and society: report and recommendation[C]// UN COPOUS, IAU, Instituto de Astrofísica de Canarias, NOIRLab, Tucson: 2020: 160-184.
- [15] RESOLUTION COM6/11. Studies of technical and regulatory provisions necessary to protect radio astronomy operating in specific Radio Quiet Zones and, in radio astronomy service primary allocated frequency bands globally, from aggregate radio-frequency interference caused by systems in the non-geostationary satellite orbit[R]. Dubai: International Telecommunication Union, WRC-23, 2023.
- [16] 贾瑛卓, 薛长斌, 邹永廖. 月球背面——低频射电天文观测的圣地[J]. 现代物理知识, 2019, 31(3): 14-17.
JIA Y Z, XUE C B, ZOU Y L. A mecca for low-frequency radio astronomy observations of the far side of the moon[J]. Modern physics knowledge, 2019, 31(3): 14-17. (in Chinese)
- [17] 张海龙, 张亚州, 王杰, 等. RFI 抑制技术在射电天文中的应用[J]. 天文研究与技术, 2022, 19(6): 613-625.
ZHANG H L, ZHANG Y Z, WANG J, et al. Application of RFI mitigation technology in radio astronomy[J]. Astronomical research & technology, 2022, 19(6): 613-625. (in Chinese)
- [18] ITU-R Report RA. 2259-1. Characteristics of radio quiet zones[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2021.
- [19] 何金良. 电磁兼容概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-19.
- [20] ZHANG H Y, WU M C, YUE Y L, et al. RFI measurements and mitigation for FAST[J]. Research in astronomy and astrophysics, 2020, 20(5): 75. DOI: 10.1088/1674-4527/20/5/75
- [21] 刘奇. 大口径射电望远镜电磁兼容评估技术研究[J]. 天文学报, 2021, 62(4): 148-149.
LIU Q. Research on EMC evaluation of large diameter radio telescope[J]. Acta astronomica sinica, 2021, 62(4): 148-149. (in Chinese)
- [22] ZHANG H Y, WU M C, YUE Y L, et al. EMC design for actuators in the FAST reflector[J]. Research in astronomy and astrophysics, 2018, 18(4): 48.
- [23] PENG B, SUN J M, ZHANG H Y, et al. RFI test observations at a candidate SKA site in China[J]. Experimental astronomy, 2004, 17: 423-430.
- [24] ZHANG H Y, WANG Y, HUANG S J, et al. A proposed radio environment monitoring system of Ali Observatory[C]// URSI GASS 2023, Sapporo, 19-26 August, 2023. DOI: 10.23919/URSIGASS57860.2023.10265309
- [25] 刘天康, 刘海文. 高温超导滤波器在电磁抗干扰中的技术和应用[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 131-137.
LIU T K, LIU H W. Technology and application of high-temperature superconducting filter for radio anti-interfer-

- ence[J]. Space electronic technology, 2023, 20(6): 131-137. (in Chinese)
- [26] WANG Y, ZHANG H Y, HU H, et al. Satellite RFI mitigation on FAST[J]. *Research in astronomy and astrophysics*, 2021, 21(1): 18-24. DOI: /10.1088/1674-4527/21/1/18
- [27] TAYLOR J, DENMAN N, BANDURA K, et al. Spectral kurtosis-based RFI mitigation for CHIME[J]. *Journal of astronomical instrumentation*, 2019, 8(1): 9.
- [28] RANSOM S M, EIKENBERRY S S, MIDDLEDITCH J. Fourier techniques for very long astrophysical time-series analysis[J]. *The astronomical journal*, 2002, 124(3): 1788-1809.
- [29] WANG Y, ZHANG Z S, ZHANG H Y, et al. Description of a RFI mitigation pipeline for the FAST 19-beam receiver[J]. *Astronomy and computing*, 2022, 39: 100568. DOI: 10.1016/j.ascom.2022.100568
- [30] 工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定[Z]. 北京: 人民邮电出版社, 2023: 212-213.
- [31] 张海燕, 张翔, 黄嘉, 等. GB/T 42557-2023 射电望远镜电磁环境保护技术规范 [S]. 北京: 中国标准化管理委员会, 2023.
- [32] ZHANG H Y, CHEN Z J, LI B, et al. Radio quiet zones in China[C]//Proceedings of the XXXI URSI General Assembly. Beijing: 16-23 August, 2014.
- [33] 贵州省 500 米口径球面射电望远镜电磁波宁静区保护办法[Z]. 贵阳: 贵州省人民政府令第 143 号, 2013.
- [34] LISZT H. Radio astronomy in a new era of radiocommunication[C]//American Astronomical Society Meeting #235, Bulletin of the American Astronomical Society, 2020.
- [35] CLERY D. Satellite swarm threatens radio array[J]. *Science*, 2020, 370(6514): 274-275.
- [36] ITU-R Recommendation M. 1583-1. Interference calculations between non-geostationary mobile-satellite service or radio navigation-satellite service systems and radio astronomy telescope sites[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2007.
- [37] ITU-R Recommendation S. 1586-1. Calculation of unwanted emission levels produced by a non-geostationary fixed-satellite service system at radio astronomy sites[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2007.
- [38] ITU-R Recommendation RA. 769-2. Protection criteria used for radio astronomical measurements[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2003.
- [39] ITU-R Recommendation RA. 1031-3. Protection of the radio astronomy service in frequency bands shared with active services[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2021.
- [40] ITU-R Recommendation RA. 1513-2. levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy on a primary basis[R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2015.

作者简介



张海燕 (1973—), 女, 山西人, 中国科学院国家天文台研究员, 博士, 研究方向为射电天文学。E-mail: hyzhang@nao.cas.cn