

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.04.07

中国射电天文频率保护进展

张海燕^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008)

摘要: 由于所观测的宇宙信号非常微弱, 射电天文极易受到有源业务的干扰。有限的频谱资源和中国观测台站无线电环境的日趋恶化, 制约了中国射电天文研究的可持续发展。为保护射电天文观测频率, 广泛调研国际电信联盟的相关规则和建议书; 结合实测, 分析中国现有和规划中的台站无线电环境情况, 开发适用的无线电干扰监测系统。对于中国部分现有和新建的大型射电天文设备, 通过与各级主管部门协商, 在台址周边设立无线电宁静区, 从而为射电天文观测的顺利开展提供了重要的无线电频谱保障。

关键词: 射电天文业务; 无线电干扰; 无线电宁静区

中图分类号: P16 **文献标识码:** A

1 引 言

随着科学技术发展, 无线电技术已广泛应用于军事、经济、文化、社会管理等各个领域, 并深入人们日常生活的方方面面。国际电信联盟(以下简称国际电联)颁布的《无线电规则》^[1]规定的无线电业务, 如移动通信、卫星通信、雷达、导航、遥控、遥测和射电天文等已广泛地应用于中国的通信、广播、航空航天、公共安全、铁路、交通等部门。中国已成为无线电频谱资源开发利用的大国。由于无线电频谱资源的重要性日益突显, 《中华人民共和国物权法》明确规定: “无线电频谱资源属于国家所有。”射电天文业务作为无线电频谱资源的用户之一, 无偿使用频率, 因此更需要合理、有效地利用有限的频谱资源。

与其他无线电业务不同的是, 射电天文业务是被动接收来自宇宙的无线电信号, 并将天文学与无线电科学相结合的一项业务。它具有观测设备灵敏度高、观测频率不能任意选择和没有发射(无源)等特点。射电波段是天体物理研究最重要的窗口之一, 至今, 射电天文学已在天文学研究和国防应用等方面取得了丰硕成果。在国际电信联盟《无线电规则》和《中华人民共和国无线电频率划分规定》^[2]文件里, 射电天文业务作为主要业务和次要业务, 总带

收稿日期: 2016-12-21; 修回日期: 2017-02-02

资助项目: 国家自然科学基金(11473043); 天文专项(2015-2016)

通讯作者: 张海燕, hyzhang@bao.ac.cn

宽约 35 GHz。在 275 GHz 以下占总带宽的 12.5%，其中包括 63 条射电天文谱线，23 个连续谱观测频带。随着射电天文的发展，新检测到的更多谱线不在被分配的射电天文频段内。在河外星系中，谱线红移到已分配的频带之外。由于历史和技术发展，及射电天文研究的要求，中国射电天文台站使用和即将使用的观测频带并不完全符合《无线电规则》的规定，涵盖的频率带宽大部分不是划分给无源业务的频段。在没有出现严重干扰的情况下，观测站仍然可以继续工作，但是在不受保护的频段上观测，随时有遭受干扰的风险。

射电天文学家观测的天体常处在离我们几十亿甚至是百亿光年以外的遥远宇宙空间，来自那些天体的信号非常微弱，具有高灵敏度接收机的射电天文观测与有源业务（有发射的人类无线电业务）的频率分享非常困难。在相同波段，当有源业务发射在射电天文天线的波束中时，频率分享是不可能的。随着宽带数字调制及展谱技术日益发展，在其他波段工作的主动业务也会在射电天文波段产生干扰。地面干扰可通过降低射电天文望远镜旁瓣增益、利用地形、设置保护距离等来消除，而来自空间的干扰则很难屏蔽。

由于射电天文业务的重要性和容易被干扰的特性，建立射电天文业务受干扰程度的评价标准，无论对于射电天文工作者还是无线电管理部门，都十分必要。射电天文业务的工作方式与无线电通信系统有很大不同，对于干扰程度的评价标准也存在差异，需要专门研究。各类有源业务的广泛应用，对射电天文业务造成了许多干扰，因此，对射电天文业务的频率保护成为当天文学家们和无线电管理机构共同关心的重要问题。

对于射电天文业务的保护，目前国内逐渐开展研究工作。各无线电管理部门对射电天文业务不甚了解，一般只在发现干扰时才与相关单位进行协调，主要是根据国际电联和中国的无线电频率划分规则，以及国际电联的建议书进行理论计算，作为协调依据（如国际电联建议书 ITU-R RA.769^[3]，ITU-R RA.1513^[4]等）。这种一事一议的个别分析协调，在个别台站的频率保护中起到一定作用，但随着国内频率需求的不断增加，频率早已成为人们竞相争夺的重要资源。射电天文业务要想在国际电联和各国频谱管理部门争取到更多的频率划分将非常不易。各射电天文台站的无线电环境逐渐恶化，迫切需要进行相关研究，从而切实保护各射电天文台站的无线电环境。

2 国内外研究现状及发展动态分析

随着经济的发展，今天的中国已成为世界无线电技术应用大国。中国有 8 亿移动电话用户，拥有世界第一大移动通信网。中国还拥有几乎是世界最大的无线电广播网络。同时，中国是世界上为数不多的拥有人造地球卫星、飞船等航天器制造、发射技术的国家。由于中国经济的发展，对频率资源的需求越来越多。与此同时，中国近年来射电天文业务也发展迅速。现有射电天文观测站分布在北京、上海、南京、青海、新疆、云南、贵州和内蒙古等地，研究领域涵盖各天文课题^[5]。其中密云 50 m、云南 40 m、上海佘山 25 m 和天马 65 m、乌鲁木齐南山 25 m 望远镜一起组成的中国甚长基线网（简称 VLBI），除进行天文研究外，还为中国的探月工程测轨服务。建在内蒙古的太阳日像仪已通过验收，世界最大的单口径射电望远镜——500 m 口径球面射电望远镜（FAST）已于 2016 年 9 月完成主体工程建设，正在调试。

此外，正在规划的有南极太赫兹望远镜、新疆 110 m、云南 120 m 射电望远镜等。这些已有和规划的射电天文台站观测所涉及的频率从米波到亚毫米波，从事的工作在基础研究、国家重大需求、经济发展和社会进步方面都有重大意义，因此，对各观测站无线电环境的研究和保护将为科研工作的正常开展提供不可或缺的保障。

目前，国内对射电天文的频率保护工作逐步重视起来。随着中国经济的腾飞和无线电技术应用的不断扩大，目前国内无线电频谱需求越来越多，因此对射电天文的频率保护工作也日益紧迫。近年来对射电天文接收机的干扰持续增加，通过积极进行干扰分析和实地测试，频谱保护工作取得了一定成果。如国家天文台与广电总局关于广播多媒体卫星频率的协调，使得广电卫星对所占频段进行了调整，保护了相邻的大部分射电天文频段；又如青海 13.7 m 射电望远镜与新建太阳能发电厂的频谱协调等。但由于国内缺乏射电天文业务的干扰协调标准，在进行干扰协调时出现无法可依，而且没有统一的测试标准，对监测结果产生争议等问题。这些都迫切要求国内尽快研究建立一套行之有效的射电天文频率保护标准，切实保护射电天文业务的正常开展。

国际已有的经验显示，为切实保护射电天文观测站的电波环境，设立无线电宁静区 (RQZ) 是减弱干扰的首要步骤。国际电联完成的《无线电宁静区》^[6] 报告，为各射电天文台站设立宁静区提供了重要参考。无线电宁静区不等同于无线电静默区。它的大小需根据射电天文台的地理环境和传播环境进行研究确定，由国家无线电管理机构会同地方政府给予法律确定和保护。通常包括两个不同的保护区域：(1) 无线电限制区，主要控制来自电气和电子设备的无线电干扰，范围从几到几十千米。在此区域内，限制重工业的发展。此区域通常由地方和国家政府设立。(2) 协调区，主要是与无线电发射设备经营者协调，范围在百千米。此区域由无线电管理部门商议确定。当今国际上已设立超过 25 个无线电宁静区。在欧洲，无线电宁静区的保护半径约为 1~9 km，如英国 Jodrell Bank 天文台无线电宁静区半径约为 2 km。在美国，1958 年为国立射电天文台 Green Bank 观测基地设立了 34 000 km² 的国家无线电宁静区；Arecibo 天文台在周围 200 km 区域内建立和备案了类似的无线电宁静区。对于在研的国际平方公里阵 (SKA) 项目，澳大利亚也在西澳设立了半径 200 km 的无线电宁静区。目前国内的现有台站部分已开展相关研究和协调，设立了相关的无线电保护区，如太阳日像仪、FAST、上海天马望远镜和德令哈 13.7 m 射电望远镜^[7]。

3 射电天文频率保护工作进展

随着国内射电天文研究和设备的发展，国内各台站陆续开展相关研究。依托中国科学院射电天文重点实验室，已组建由国家天文台作为国际电联射电天文工作组对口单位，由各天文台站射电天文频率保护兼职人员组成的工作组。该工作组根据国内现有和规划的射电天文业务情况，充分调研国际电联关于射电天文业务的文件，以及国际大型射电天文台站无线电宁静区的设立、运行情况，结合国内的射电天文业务现状和发展规划，对国内各类射电天文台站的无线电宁静区设置方案进行了探讨，提交了研究报告，为无线电射电天文业务管理提供参考。工作组结合实测结果，发展射电天文台站无线电环境监测方法，逐步在部分台站设

立了无线电宁静区。

3.1 参与国际射电天文业务协调及议题研究

国际无线电管理机构为联合国下属的国际电信联盟 (ITU), 是各国政府电信主管部门之间协调电信事务的国际组织。它发布的《无线电规则》作为国际法之一, 给出了各业务的频率划分。《无线电规则》给出了关于射电天文业务的频段划分和一些相应的协调、保护要求。在国际电联无线电通信局中设 7 个研究组, 第 7 研究组为科学业务组, 主要开展科学探索所使用频谱的研究。第 7 研究组下设 4 个工作组, 其中工作组 7D 负责射电天文业务的研究工作。而国际的射电天文频率协调组织, 主要包括射电天文与空间科学频率划分科学委员会 (IUCAF)、亚太射电天文频率委员会 (RAFCAP)、欧洲射电天文频率委员会 (CRAF) 和美国自然基金会无线电频率委员会 (CORF)。他们就射电天文频率保护开展国际协调。国际电联对射电天文有一系列的规则规定及相关的建议书。工作组通过整理国际电联射电天文业务的相关决议和建议书, 并分发各相关无线电管理部门和射电天文台站, 作为频率协调时参考。

同时, 工作组调研国际上部分大型射电天文台站的无线电宁静区设立和运行管理情况, 完成了调研报告, 并借鉴国际已有的运行管理经验, 为中国的宁静区设置提供参考。同时, 工作组积极参加国际电联无线电通信大会 (WRC), 就射电天文业务相关议题开展研究。如完成 WRC-2007 大会议题中部分射电天文频率与卫星下行频率的兼容性分析^[8], WRC-2012 大会议题关于 275 GHz 以上射电天文业务可使用的频段更新^[9], WRC-2015 大会议题中关于射电天文业务与汽车雷达在 77.5~78 GHz 的兼容性研究^[10], 以及持续的大会议题——射电天文业务与规划的移动通信频率的兼容性分析等工作^[10]。通过国内外研究和协商, 工作组提交大会议题报告, 参与讨论, 促进会议结论有利于射电天文频率的保护。

同时, 工作组积极开展协调, 在《中华人民共和国频率划分规定》的修订过程中, 结合国内射电天文台站的规划, 修订其中的脚注 CHN11 和 CHN12, 通过增加新建射电望远镜的台址和频率, 如 FAST、太阳日像仪、奇台 110 m 望远镜等, 保护国内射电天文频率, 为射电天文业务的发展预留空间。

3.2 开展国内射电天文业务干扰门限研究

目前国内的射电天文业务所受干扰从频率上考虑, 包括同频干扰、带外干扰和杂散干扰; 按业务划分, 主要来自地面业务 (移动通讯、广播、雷达等)、空间业务 (卫星业务和高空平台通信系统等) 以及非传统无线电业务 (电子标签等) 的影响。通过与国家无线电监测中心合作, 根据国内无线电业务发展情况, 结合国际电联的相关建议书, 我们对射电天文业务受干扰评价的标准进行了研究^[11]。

根据国际电联射电天文业务干扰保护限值建议书 ITU-R RA.769 (见图 1), 我们充分调研了国内现有和规划的射电天文台站频率使用和设备性能, 并根据国际电联建议书给出了国内各设备的干扰保护限值, 包括最大允许干扰功率、功率流量密度和谱功率流量密度。同时, 根据相关国际电联建议书, 给出了射电天文业务可接受的干扰时间评价标准, 提出了针对各射电天文台站设备的干扰保护限值。

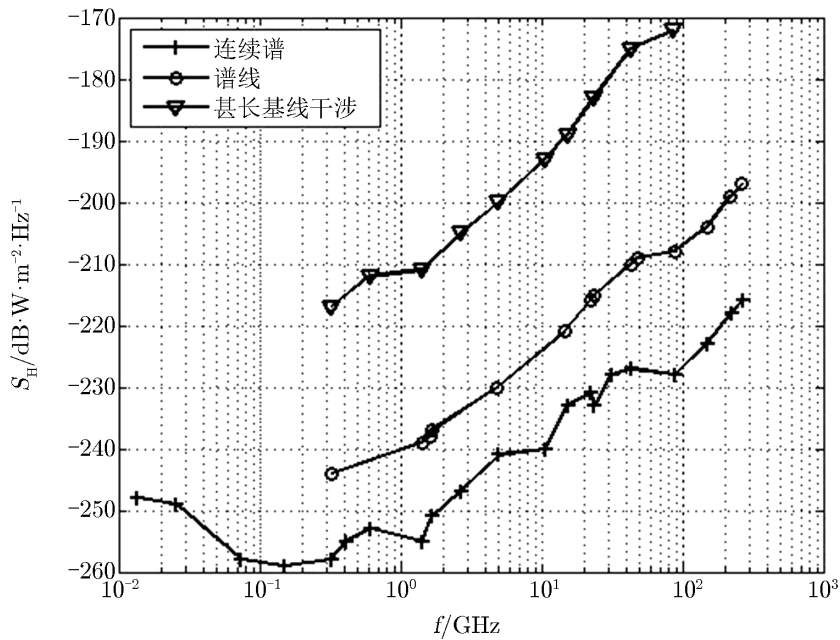


图 1 射电天文业务干扰保护谱功率流量密度限值

3.3 电波环境监测和分析

由于射电天文业务的高灵敏度和宽频段观测等特点，目前国内现有的无线电管理部门的干扰监测方法并不适用于射电天文观测站的无线电环境监测。在参考国外射电天文台站经验的基础上，我们研究了适合国内各台站的无线电干扰监测方法，包括根据科学需求、讨论监测的频率范围、所使用的设备及性能指标，以及数据记录和校准等，同时考虑国内的频谱分配、各观测台站已知发射机的位置和特征、频谱规章、观测站当地频谱使用的动向和人口增长的可能影响等。

通过对目前国内部分现有和规划中台站的无线电环境进行监测，验证了对地面和空间几种典型有源业务的保护距离算法和无线电干扰监测方法的可行性。在 SKA 选址电波环境监测系统的基础上^[12]，对地面业务的干扰协调计算方法进行分析，探讨合适的传播模型，给出了适用台址无线电环境监测的设备和方法。目前国家天文台总部、上海天文台和新疆天文台已具有适合望远镜需求的电波环境监测系统。在对监测结果进行分析和评估的基础上，积极开展干扰消减和协调的各项工作。如太阳日像仪在选址阶段开展的干扰测试工作^[13]、与无线电管理部门联合进行的射电台址的电磁环境测量与分析^[14]、上海 65 m 射电望远镜为应对周边复杂电波环境开展的测试和协调工作^[15]、对台站电子设备的干扰进行评估等^[16]。

3.4 国内无线电宁静区研究进展

无线电宁静区的建立不仅涉及土地使用的管理，也涉及频谱使用的管理。根据国内现有和规划中的射电天文台站现状和规划情况，探讨设立无线电宁静区的方法。

在各台站设立无线电宁静区进展方面，对各射电天文台站一些主要的干扰源进行了研

究,并结合地形和当地的经济的发展,对各台站的无线电环境进行粗略的分析,加强与各当地政府沟通,给出各台站设立无线电宁静区方法的建议。在前期工作的基础上,已完成包括为FAST设立无线电宁静区的研究报告,给出各台站射电天文台设立无线电宁静区的范围建议。目前,已为内蒙古太阳日像仪设立半径为10 km的电磁波宁静区,为贵州FAST设立半径为30 km的电磁波宁静区^[17, 18](见图2),为上海65 m和25 m望远镜分别设立半径为3 km的无线电宁静区,为青海德令哈13.7 m射电望远镜设立半径为26 km的无线电宁静区。另外,正在为规划中的新疆奇台110 m射电望远镜申请设立半径为30 km的无线电宁静区。



图2 FAST电磁波宁静区示意图

关于国内无线电宁静区的管理,与无线电管理部门进行讨论并提出建议,供城市规划和无线电管理部门参考^[19]。包括:

(1) 射电天文业务为无源业务,设置、使用单收射电天文台站可以不办理申请和审批手续,无线电管理机构对其正常工作不提供电磁环境保护。如需取得受保护地位,射电天文台站应申请办理相关设台手续并领取电台执照。

(2) 设置无线电宁静区是射电天文台站保护比较有效的方式。建议对无线电宁静区分等级进行保护。根据不同的使用频段和无线电业务,宁静区内各频段要求的保护半径是不同的。在具体的宁静区半径确定过程中,各台站应参考当地的经济、地形等实际情况,采取选点测试等方式进行修正,从而得到最终的宁静区区域。

(3) 新设置宁静区内的原有无线电业务应得到妥善安置。原则上应由射电天文业务单位采取措施,配合原用户进行退改频,或采用有线等通讯方式替代原有业务,并承担相关费用。如未进行退改频,该区域内原有无线电业务仍可继续使用。

(4) 无线电管理部门在审批射电天文台站时,应对射电天文台站的保护事宜进行研究。

如同意为其办理设台手续，应同时明确宁静区的设置方法等保护措施；如现有电磁环境无法满足射电天文台站的保护要求，或无法保证在城市化过程中对射电天文台站的保护，可不同意为其办理设台手续，但仍应采取一切可能的措施，对射电天文台站的正常工作提供保护。在设置宁静区等保护措施的过程中，如涉及重大的公众利益，应进行听证。

(5) 无线电管理部门应对在宁静区内新设置的无线电发射台站进行严格管理，保证宁静区内良好的电磁环境，建立适合的协调机制，必要时应征求射电天文业务单位的意见。

(6) 如需取得受保护地位，新设的射电天文台站应进行电磁环境测试，并事先就站址和电磁环境保护事宜征求国家和相关省级无线电管理部门的意见。

(7) 射电天文台站灵敏度高，干扰保护要求比较严格，且观测频段不可以任意选择，各类无线电业务与射电天文业务应加强相互间的协调，尽可能保证射电天文台站的正常工作。

4 总结和建议

射电天文观测是通过接收宇宙中天体的无线电辐射来开展研究，由于天体的无线电信号到达地球已经非常微弱，迄今所有射电望远镜收集的能量还翻不动一页书，因此极易受到地面广播、通讯等信号的干扰。所以频率保护对射电天文研究非常重要。我国的射电天文频率保护工作已取得很大进展，通过相关研究和协调工作促使各级无线电管理部门认识到射电天文频率保护工作的重要性；在部分射电天文台址设立无线电宁静区，来保护现有和规划的台址周边的电波环境；开展电波环境监测，为各级无线电管理部门和各天文台站干扰协调提供技术依据，为保护国内日益发展的射电天文事业提供重要保障。

针对国内射电天文业务的保护工作，对于主管部门和射电天文台站有以下建议：(1) 建议有关主管部门积极推动确定射电天文台站的选址规范，包括无线电环境测试方法标准等；(2) 在确定无线电宁静区区域过程中，建议相关主管部门和射电天文台站应参考当地的经济、地形等实际情况，在理论分析的基础上，采取选点测试等方式进行修正，从而得到最终宁静区的确定值；(3) 积极参与国际电联研究组无线电宁静区的课题研究，促进我国相关工作的开展。

致谢

此项工作获得中国科学院射电天文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，在此一并致以诚挚的感谢！

参考文献：

- [1] 国际电信联盟. 无线电规则. 2016 版. 日内瓦: 国际电信联盟, 2016
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014
- [3] 国际电信联盟. ITU-R RECOMMENDATION RA.769-2. 日内瓦: 国际电信联盟, 2003

- [4] 国际电信联盟. ITU-R RECOMMENDATION RA.1513. 日内瓦: 国际电信联盟, 2015
- [5] 杨戟. 中国科学院院刊, 2011, 5: 511
- [6] 国际电信联盟. ITU-R REPORT RA.2259. 日内瓦: 国际电信联盟, 2012
- [7] Zhang H Y, Chen Z J, Li B, et al. Proceedings of the XXXIst URSI General Assembly. US: IEEE, 2014
- [8] ITU. CPM Report on technical, operational and regulatory/procedural matters to be considered by the World Radiocommunication Conference 2007. Switzerland: ITU, 2007
- [9] ITU. CPM Report on technical, operational and regulatory/procedural matters to be considered by the World Radiocommunication Conference 2012. Switzerland: ITU, 2012
- [10] ITU. CPM Report on technical, operational and regulatory/procedural matters to be considered by the World Radiocommunication Conference 2015. Switzerland: ITU, 2015
- [11] 孙建民, 罗滔. 中国无线电, 2008, 4: 51
- [12] Peng B, Sun J M, Zhang H Y, et al. 2004ExA, 2004, 17: 423
- [13] Chen Z J, Yan Y H, Liu Y Y, et al. Astronomical Research and Technology, 2006, 3: 168
- [14] 李建斌, 彭勃, 孙建民, 等. 电波科学学报, 2009, 24(3): 523
- [15] Shen Z Q, Li B, An T, et al. Proceedings of the RFI Mitigation Workshop. the Netherlands: RFI, 2010
- [16] 刘奇, 陈卯蒸, 李颖, 等. 天文研究与技术, 2015, 3: 292
- [17] Zhang H Y, Nan R D, Peng B, et al. APEMC2013. Australia: APEM, 2013
- [18] 贵州省人民政府. 贵州省人民政府令第 143 号. 贵阳: 贵州省人民政府, 2013
- [19] 刘斌, 方正. 中国无线电, 2009, 3: 51

Protection Progress on Radio Astronomy Frequencies in China

ZHANG Hai-yan^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory for Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Due to the weakness of cosmic radio signal measured, radio astronomy is very vulnerable to radio frequency interference (RFI) from active services. According to the limitation of spectrum resource and increasing deterioration of radio environment around the site of radio telescope, the continuous development of domestic radio astronomy has been affected. Based on the study on International Telecommunication Union (ITU) Radio Regulation and RFI measurements at radio astronomical stations, the RFI situation of the local radio environment around the stations has been analyzed. Moreover, the RFI measurement system has also been developed. For several radio telescopes, especially large radio telescope, the radio quiet zones have been established, which enables the protection of the astronomical observation from RFI and assure the scientific output of the telescopes.

Key words: radio astronomy service; radio frequency interference; radio quiet zone