

FAST电波环境保护措施

胡浩¹, 张海燕^{1,2}, 黄仕杰¹

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院FAST重点实验室, 北京 100101)

摘要: 500 m口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 位于贵州省黔南州偏远山区, 利用喀斯特洼坑作为望远镜台址, 建造世界第一大单口径射电望远镜。FAST观测来自宇宙中遥远天体的微弱电磁信号, 具有极高的灵敏度, 易接收到来自望远镜自身设备及台址周边的电磁干扰。为此, 要求台址电磁干扰水平极低。为实现科学观测目标, 如何保持宁静的电磁环境是FAST科学产出的重要基础条件。开展研究的主要保护措施包括: 为切实保护FAST良好的电磁环境, 设立以FAST台址为中心、半径30 km范围的电磁波宁静区是减弱干扰的首要步骤; 其次, 对望远镜自身及其周边的电子电气设备具有严格的电磁兼容要求, 防止对望远镜产生干扰。通过有效的电磁兼容设计和电波环境保护措施, FAST台址电波环境目前良好稳定。随着贵州省特别是黔南州经济发展, FAST周边建设项目不断增加, 针对与众多无线电通信业务和当地经济发展项目的协调问题, 如何在科学需求和当地发展中实现平衡, 是电磁波宁静区运行的核心课题。

关键词: 射电望远镜; FAST; 电磁波宁静区

中图分类号: P161.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0152-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190618002

引用格式: 胡浩, 张海燕, 黄仕杰. FAST电波环境保护措施[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 152-157.

Reference format: 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.

引言

500 m口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 是国家“十一五”重大科技基础设施建设项目, 已于2020年1月通过国家验收, 开始正式运行。FAST被誉为“中国天眼”, 是具有我国自主知识产权、世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜^[1]。FAST配置了覆盖频率70 MHz~3 GHz的多波段、多波束馈源和接收机系统, 开展包括宇宙中性氢、脉冲星、甚长基线干扰测量、星际分子和搜索可能的星际通讯信号等课题研究^[2]。

FAST观测的是来自宇宙中遥远天体的微弱电磁信号, 为此, 要求台址电磁干扰水平极低。为实现科学观测目标, 必须减少常规强干扰源, 保障接收机安全; 控制小功率干扰源, 防止噪声背景恶化; 预防偶发干扰, 稳定观测数据质量。保持良好的电波环境是FAST科学产出的重要基础条件。

FAST的选址自1994年开始启动, 对候选的台址进行了长期的电波环境监测。测试结果显示FAST台址地

处贵州平塘县大窝凼洼地山区, 人口稀少, 电波环境优良, 是建造射电望远镜的理想台址^[3]。

根据国外射电望远镜已有的经验, 设立电磁波宁静区是减弱干扰的首要步骤。在空间, 如在月球的背面, 具有天然形成的电磁宁静区, 适合开展低频的射电天文观测^[4]; 而对于在地面上的射电望远镜, 为减少人类无线电业务的干扰, 如对于美国绿岸天文台, 在1958年设立3.4万km²电磁波宁静区保护望远镜周边的电磁环境, 在智利毫米波阵ALMA周边, 设立了30 km限制区, 120 km协调区的电磁波宁静区等。其次, 对望远镜自身及其周边的电子电气设备具有严格的电磁兼容要求, 防止对望远镜产生干扰^[5]。

随着贵州省特别是黔南州经济发展, FAST周边建设项目不断增加, 部分设施如机场、电气化铁路、广播电台等, 可能对FAST的正常运行产生干扰。由于拟建项目的电气和电子设备可能对FAST产生影响, 需在立项前期, 进行专项电磁兼容评估。FAST台址周边新建无线电台及具有电磁辐射设施时, 需要进行慎重考虑。

收稿日期: 2019-04-21 修回日期: 2019-04-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) 资助 (XDB23000000); 中国科学院天文大科学研究中心2019年度前瞻课题; 对外合作重点项目 (114A11KYSB20160008); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑[2020]4Y022号)

同时,为充分发挥FAST项目综合效益,促进项目建设及运行对贵州经济社会发展以及科技、教育、旅游、信息、制造等产业发展的重大推动作用,相关配套工作如交通、旅游设施等正在开展。针对与众多无线电通信业务和当地经济发展项目的协调问题,研究如何在科学需求和当地发展中实现平衡具有重要意义^[6]。

本文从研发望远镜设备有效的电磁兼容措施、设立和运行电磁波宁静区等方面,介绍相关的研究成果,以及应用在FAST电波环境保护中所取得的良好成效,相关经验还将对国内射电望远镜等观测设备的建设和运行具有重要参考意义。

1 电磁环境保护要求

为保护FAST的电磁环境,首先要确定望远镜的干扰阈值。FAST计划使用7套接收机^[7],其中包括国际领先的19波束接收机^[8],目前已安装在FAST,正在开展脉冲星和中性氢的巡天。

在FAST建设期间,结合国际技术反正,提升FAST接收机性能,因此按照更新后的接收机参数对保护要求的干扰阈值进行了估算。

基于FAST接收机指标参数,参考国际电信联盟建议书RECOMMENDATION ITU-R RA.769-2^[9]的估算方

法,FAST干扰保护要求计算过程如下

1) 干扰功率阈值

$$P_H = \frac{kT\Delta f}{\sqrt{2t \cdot \Delta f}} - 10 \text{ dB} \quad (1)$$

其中: k 为玻尔兹曼常数: $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为系统噪声温度(单位为K); t 为观测时间(单位为s); Δf 为带宽(单位为Hz)。

2) 干扰功率流量密度阈值

$$S_H \Delta f = \frac{P_H}{A} \quad (2)$$

其中: A 为望远镜接收面积(单位为 m^2),按天线增益 G 为0 dB增益估算, $A = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi}$; λ 为波长(单位为m)。

3) 干扰谱流量密度阈值

$$S_H = \frac{S_H \Delta f}{\Delta f} \quad (3)$$

根据上述式(1)~式(3)计算过程,获得的FAST干扰阈值如表1所示。在干扰评估时,要求在FAST相应频段内的干扰信号,到达望远镜接收机馈源口面的强度不应超过表中的干扰阈值,以实现从天文观测的保护。

表1 FAST干扰保护要求

Table 1 FAST interference protection requirements

接收机 编号	FAST接收机参数					干扰阈值	
	中心频率/ (MHz)	频段/ (MHz)	带宽/ (MHz)	系统噪声 温度/K	输入功率 P_H / (dBW)	功率流量 密度 $S_H \Delta f$ (dB (W·m ²))	谱流量 密度 S_H (dB (W/(m ² ·Hz)))
B01	105	70~140	70	1 000	-187	-186	-264
B02	210	140~280	140	400	-190	-182	-263
B03低频	610	270~950	680	60	-195	-178	-266
B03高频	1 285	950~1 620	670	20	-199	-176	-264
B04	840	560~1 120	560	60	-195	-175	-263
B05	1 500	1 100~1 900	800	20	-199	-174	-263
B06	1 250	1 050~1 450	400	20	-201	-177	-263
B07	2 500	2 000~3 000	1 000	20	-199	-169	-259
B08	5 500	3 000~8 000	5 000	20	-195	-159	-256

2 FAST电磁环境保护措施

2.1 FAST电磁波宁静区的设立

FAST台址地处人口稀少、经济欠发达山区,半径5 km范围内没有镇政府所在地;在5~25 km环带内没有县政府所在地。长期的无线电环境监测显示,FAST台址电波环境优良,是开展射电天文观测的适合地点。

为保护FAST周边良好的电波环境,在电波环境监测、传播效应评估、实际测试分析的基础,设立了以FAST台址为中心,半径为30 km的FAST电磁波宁静区,并分不同要求的3个区域,对FAST台址周边电磁波环境进行保护并给予乡镇最大工作生活方便。其中以台址(北纬25°39'10",东经106°51'20")为圆心,半径5 km范围为保护核心区,5~10 km的环带为中间区,10~30 km的环带为边远区。如图1所示。2013年10月,

以贵州省人民政府令第143号,颁布了《贵州省500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区保护办法》^[10]。



图1 FAST电磁波宁静区范围
Fig. 1 Electromagnetic quiet zone area of FAST

为适应经济社会的发展和FAST电磁环境保护实际需求,新修订的《贵州省500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区保护办法》(以下简称《保护办法》)经省政府常务会议审议通过并以贵州省人民政府第188号令公布,自2019年4月1日起施行。

核心区除保障射电望远镜正常运行的需要外,严禁设置、使用无线电台(站),严禁建设辐射电磁波的设施,严禁擅自携带手机、对讲机、无人机等产生电磁辐射的电子产品。

中间区内严禁设置、使用工作频率在68~3 000 MHz频段且有效辐射功率100 W以上的无线电台(站)。设置、使用其他无线电台(站)或者建设辐射电磁波的设施时,需进行电磁兼容分析和论证。

在边远区内设置、使用工作频率在68~3 000 MHz频段且有效辐射功率100 W以上的无线电台(站),或者建设、运行辐射无线电波的设施时,需进行电磁兼容分析和论证。

为保持FAST台址良好的电磁环境,宁静区内严格执行《保护办法》,可有效减少台址周边干扰源及抑制强干扰信号。而望远镜自身是个庞大的天线系统,必然需要众多电子电气设备运行和支撑。如何防止望远镜受到自身电子电气设备产生的电磁干扰,需在望远镜设备的选型、设计和工程建设过程中采取严格的电磁兼容措施。

2.2 设备选型

在满足功能需求的前提下,通过辐射检测尽可能选择低辐射设备,可有效降低电磁屏蔽设计指标和难

度。由于FAST较高的电磁兼容要求,需最大限度的检测电子电气设备的辐射情况,可执行《GJB151B-2013军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》标准^[11]做其中RE102测试项,科学有效地掌握各设备电磁辐射情况,以便采取有效措施消除干扰。

例如,对于FAST综合楼照明灯具的选型测试,经过电磁辐射检测和分析,对于辐射干扰强度超过望远镜干扰阈值的设备,需进一步采取电磁屏蔽等措施消除干扰,避免对望远镜产生干扰。

金卤灯具有较强的辐射干扰(如图2所示)不选择使用,最终选择辐射低的节能灯或LED灯带(如图3所示)。从图3可见,该节能灯产生较少辐射,主要在80 MHz以下频段,对FAST影响小。经评估,所选择灯具的辐射干扰强度在到达望远镜接收机馈源口面时,已低于干扰阈值,满足FAST的要求,优先选择使用。

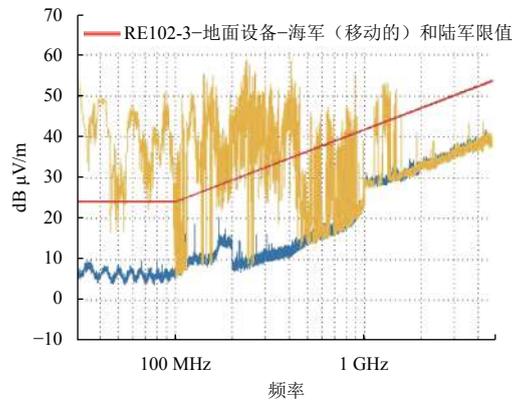


图2 金卤灯电磁辐射值(蓝色曲线为微波暗室背景噪声,黄色为金卤灯辐射测试值,红线为军标辐射限值)

Fig. 2 Electromagnetic radiation value of metal halide lamp (the blue curve is the background noise of microwave anechoic chamber, the yellow is the radiation test value of metal halide lamp, and the red line is the radiation limit value of military mark)

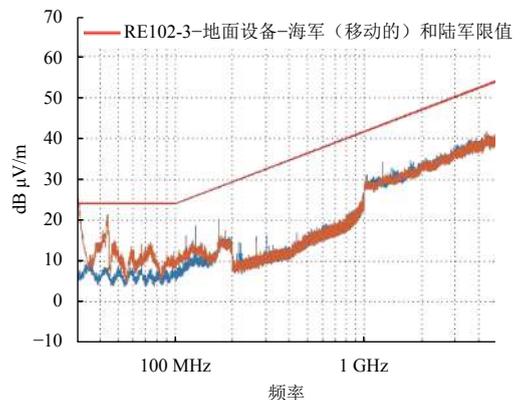


图3 某品牌节能灯电磁辐射测试结果
Fig. 3 The EMI measurement results of one energy saving lamp of a certain brand

2.3 设备电磁屏蔽效能指标计算

对于具有强电磁干扰的设备,其电磁屏蔽效能指标的估算基于设备辐射值、望远镜干扰阈值和望远镜接收机到设备具体安装位置的电波传播损耗。计算公式如下

$$P_i - L - P_h + 20 \text{ dB} = S_e \quad (4)$$

其中: P_i 为设备辐射值; L 为路径电波传播损耗; P_h 为望远镜干扰阈值; S_e 为设备屏蔽指标, +20 dB考虑屏蔽设备的设计冗余及老化,确保有效屏蔽干扰。

对于与望远镜接收机可通视区域的传播损耗,可采用自由空间衰减计算

$$L = 20 \lg(F) + 20 \lg(D) + 32.4 \quad (5)$$

其中: F 为频率,单位MHz; D 为距离,单位km;对于不可通视区域,如FAST综合楼、实验室等,可进行传播损耗实测。

2.4 电磁屏蔽措施实施与验证

面对FAST各种各样的电子电气设备,需针对性的电磁屏蔽处理消减干扰。部分设备屏蔽指标要求高,设计难度大,常规屏蔽机房难以满足技术要求或制造成本较高。为此,需要对屏蔽措施进行系统的规划设计。对强干扰源在布局上尽可能集中在一个区域,采用较高指标要求的屏蔽设计,对低辐射源区域采取较低指标要求的屏蔽设计进行分区域屏蔽^[2]。

FAST电磁屏蔽设备按尺寸大小可分为屏蔽室、屏蔽机柜、屏蔽舱罩,共计约2 000多个。根据屏蔽设备内安装设备辐射强度以及在望远镜台址内的使用位置不同,屏蔽效能在70~3 000 MHz频段有60 dB、80 dB、90 dB、100 dB、120 dB、160 dB等不同指标。需要对这些屏蔽设备进行严格的电磁屏蔽效能检验,以保障台址良好的电磁环境。

下面以FAST索驱动机房的电磁屏蔽设计为例,概括所开展的研究和采取的电磁屏蔽措施。FAST的索驱动机房内安装驱动和控制索的电机,转轮及相应的控制设备。结合电磁兼容设计,索驱动机房的布局如图4所示,包括电机室、电气室和机械室。由于电机传动轴穿过屏蔽体难以实现高屏蔽要求,故采用多层分区域屏蔽。在FAST工作频段内,经检测和评估,电气室到电机室需实现80 dB屏蔽要求,电机室到机械室需实现50 dB屏蔽,电气室到机械室需实现120 dB屏蔽。干扰源设备主要集中在安装了控制和驱动设备的电气室,而安装在电机室的电机辐射较低,通过分区、分级的方式,逐步消减干扰信号避免对FAST接收机产生干扰。

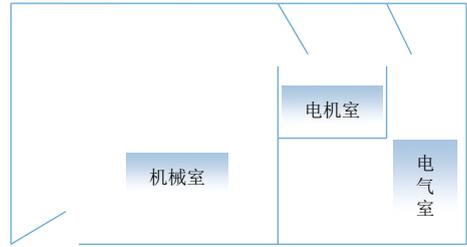


图4 FAST索驱动机房屏蔽布置
Fig. 4 The layout of FAST cable suspension machine room

常规的电磁屏蔽效能测量方法是以单频率点、手动测试为主。测量方法主要参考《GBT 12190-2006电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法》^[13]和《GJB_5185-2003-小屏蔽体屏蔽效能测量方法》^[14]。要完成2 000多个屏蔽设备的检测且增加测试频率点的工作量会非常大。这样的测试难免会遗漏某些频率的电磁泄漏,将会干扰到射电望远镜的正常运行。

为此,FAST使用了自主研发的多频率连续测试的系统进行电磁屏蔽效能自动扫频测试,极大地提高了工作效率^[15]。测试系统包括天线、信号发生器、低噪声放大器、频谱仪和测试系统软件等。系统使用方便、测试高效、系统动态范围大于130 dB、可在70~3 000 MHz频率范围内对屏蔽体屏蔽效能进行自动扫频测试。针对索驱动机房的电磁屏蔽效能检测结果如图5~6所示,测试结果客观准确。解决了传统屏蔽效能手工测试存在的问题。满足射电天文望远镜要求的宽带、高动态范围的电磁屏蔽效能测试需求。

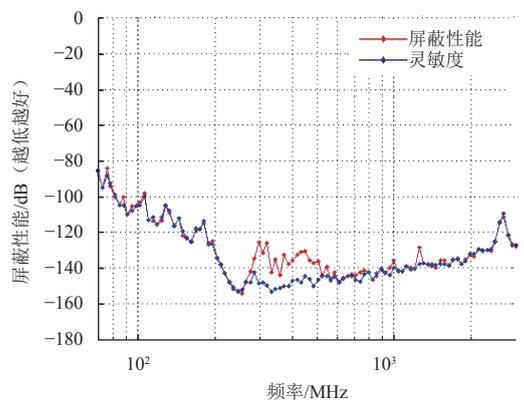


图5 索驱动机房电气室屏蔽效能(在70 MHz~3 GHz频段 > 120 dB)
Fig. 5 Shielding efficiency of the electrical room of cable suspension instrument room (at 70 MHz~3 GHz band > 120 dB)

3 FAST电磁波宁静区运行

FAST的电磁波宁静区的运行包括两方面:一方面是通过FAST自身的电磁干扰采取电磁兼容措施,有效减少了望远镜及其附属设施的干扰;另一方面是保

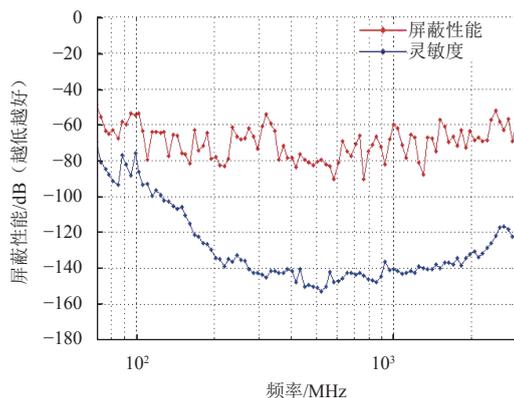


图6 索驱动机房电机室屏蔽效能 (在70 MHz~3 GHz频段 > 50 dB)

Fig. 6 Shielding efficiency of the motor room of cable suspension instrument room (at 70 MHz~3 GHz band > 50 dB)

护望远镜台址周边的电磁环境^[16]。

为保障FAST电磁波宁静区良好的电磁环境,除严格执行《保护办法》和《黔南布依族苗族自治州500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区环境保护条例》^[17]外,对已有的强干扰源需进行消减,如通讯基站信号、广播电视、民航通讯及导航等发射台站。通过干

扰监测和干扰识别,确定干扰信号来源,对干扰发射台站采取调整发射天线方向和降低发射功率等措施,有效减少对射电望远镜的影响。

对于FAST台址及周边新建或拟建的可能产生电磁干扰的项目,需按照《保护办法》要求进行电磁兼容分析论证,如台站周边新建高速公路,拟建机场等项目。经论证会对FAST观测产生干扰的项目,不得建设和规划或采取措施消除干扰。

为减少附近航线对FAST的干扰,相关部门多次积极组织召开了关于FAST空域航线调整协调会,调整FAST电磁波宁静区上空空域现有航线,移出半径为30 km的空域,在FAST上空划设飞行管控区域,管控区域为以FAST为中心,半径为30 km的空域,在该空域内不再规划新的航线。强有力的减少了民航信号对FAST观测的影响,保障望远镜安全运行。

利用安装在FAST台址的电波环境监测设备,开展了系统的干扰监测,2019年的监测结果见图7。从监测结果可以看出,通过以上措施的实施,FAST台址电波环境基本保持稳定。

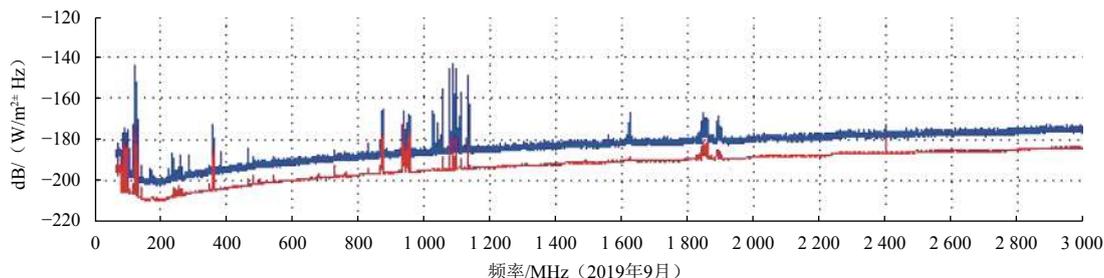


图7 FAST台址2019年电波环境监测结果

Fig. 7 Measurement results of the radio environment of FAST site in 2019

4 结论

通过严格执行《贵州省500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区保护办法》以及望远镜电磁环境保护措施,FAST宁静区的电磁环境基本稳定。通过关停移动通信基站、排查大功率电磁发射设备、调整航线等措施,有效减少了核心区的干扰源,为FAST调试工作的顺利开展提供了良好的电磁环境保障。截至目前,FAST共发现脉冲星优质候选体150多颗,其中得到证实的有100多颗(查询网址:<http://crafts.bao.ac.cn/pulsar/>),为FAST未来获取更多、更好的天文发现积累了宝贵经验。FAST的电磁环境保护措施,为望远镜的科学产出提供了必不可少的重要保障,相关研究成果可为国内射电望远镜开展电磁环境保护工作提供参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] NAN R D, LI D, JIN C J, et al. The Five-hundred Aperture Spherical radio Telescope (FAST) project[J]. International Journal of Modern Physics D, 2011, 44(3): 331-346.
- [2] NAN R D, ZHANG H Y. Super bowl[J]. Nature Astronomy, 2017(1): 12-14.
- [3] 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: 423-425.
- [4] 纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 150-157.
- [5] JI Y C, ZHAO B, FANG G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far-Side[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 150-157.
- [6] ITU-R. ITU-R RA. 2126, Handbook on radio astronomy[S]. Geneva, Switzerland: ITU-R, 2013.
- [6] ZHANG H Y, CHEN Z J, LI B, et al. Radio quiet zones in

- China[C]//General Assembly & Scientific Symposium. [S.l.]: IEEE, 2014.
- [7] NAN R D, ZHANG H Y, ZHANG Y, et al. FAST construction progress[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(6): 623-630.
- [8] SMITH S L, DUNNING A, SMART K W, et al. Performance validation of the 19-element multibeam feed for the Five-hundred-metre Aperture Spherical radio Telescope[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2017, 2137-2138.
- [9] ITU-R. RECOMMENDATION ITU-R RA. 769-2, Protection criteria used for radio astronomical measurements[S]. Geneva, Switzerland: ITU-R, 2003.
- [10] 贵州省人民政府. 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, 2013.
- [11] 中国人民解放军总装备部. GJB151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2013.
- [12] ZHANG H Y, NAN R D, GAN H Q, et al. EMC design for FAST[C]//URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [13] 国家质检总局. 中国国家标准化管理委员会. GBT 12190-2006, 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法[S]. 中国: 国家质检总局, 中国国家标准化管理委员会, 2006.
- [14] 国家科学技术工业委员会. GJB_5185-2003, 小屏蔽体屏蔽效能测量方法[S]. 中国: 国家科学技术工业委员会, 2003.
- [15] 岳友岭, 甘恒谦, 胡浩, 等. 一种射电望远镜宽带电磁屏蔽效能检测系统及检测方法, ZL 2015 10237882.8[P]. 2015-08-19.
- [16] ZHANG H Y, WU M C, YUE Y L, et al. RFI mitigation of FAST: challenge & solution[C]//2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. [S.l.]: URSI AP-RASC, 2019.
- [17] 贵州省人民政府. 黔南布依族苗族自治州500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区环境保护条例[Z]. 贵阳: 贵州省人民政府, 2016.

作者简介:

胡浩(1983-), 男, 工程师, 主要研究方向: 电磁兼容技术。

通讯地址: 贵州省黔南州平塘县克度镇大窝凼FAST台址(558305)

电话: (0854)7233228

E-mail: huhao@nao.cas.cn

Protection Measures of FAST Radio Environment

HU Hao¹, ZHANG Haiyan^{1,2}, HUANG Shijie¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) is located in the remote area of Qiannan prefecture in Guizhou province. The largest single dish radio telescope in the world is build in the karst depression. Since FAST observes very weak electromagnetic signals from distant celestial sources in the Universe with extremely high sensitivity, it is easy for FAST to receive electromagnetic interference from the telescope's own equipments and the surrounding site. The electromagnetic interference level around the site is required to be extremely low. In order to achieve the objective of scientific observation, an important basic condition for FAST is how to keep the quiet electromagnetic environment around the telescope. Several main measures have been studied. At first, in order to protect FAST quiet electromagnetic environment, the first step to reduce the radio interference is to set up a radio quiet zone within a radius of 30 km with FAST site as the center. Secondly, the strict Electromagnetic Compatibility requirements of telescope itself and its surrounding electronic and electrical equipments are required to prevent interferences from the telescope. Based on the effective electromagnetic compatibility design and protection measures, the radio environment of FAST station is quiet and stable. Due to the economic development in Guizhou province, especially in Qiannan prefecture, the number of construction projects around FAST site has increased rapidly. In the face of the coordination with many radio communication services and local economic projects, how to achieve a balance between the scientific needs and local development is the key subject for the maintenance of FAST radio quiet zone.

Keywords: radio telescope; FAST; radio quiet zone

Highlights:

- Scientific and effective planning and management of the radio quiet zone are reviewed.
- Reasonable planning and design of telescope electromagnetic compatibility measures are proposed.
- Efficient and reliable inspection of shielding performance are introduced.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]