

射电望远镜旋转换馈屏蔽装置设计与实验分析^{*}

唐仁凯¹ 李 蓉¹ 刘 奇^{2†} 郑献泽¹ 苏晓明² 李晓峰³ 曾 尧¹ 费宇浩¹

(1 杭州电子科技大学机械工程学院 杭州 310018)

(2 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(3 中国电子科技集团公司第三十三研究所 太原 030006)

摘要 大型射电望远镜具有极高的系统灵敏度, 对焦点附近电子设备的电磁兼容设计要求极高, 因此给射电望远镜接收机房换馈结构的屏蔽防护方案设计带来了较大的挑战. 为解决上述问题, 采用防护结构与屏蔽衬垫相结合, 设计了应用于旋转馈源结构的屏蔽装置; 在此基础上, 为验证旋转换馈屏蔽装置的屏蔽效能与可靠性, 研制了旋转换馈屏蔽实验平台, 测量了旋转换馈屏蔽装置静止状态与工作状态下的屏蔽效能, 基本达到了设计预期. 此外, 依据屏蔽装置的安装与运行特性并考虑其屏蔽衬垫使用寿命, 结合实测数据分析了影响屏蔽装置性能与可靠性的主要因素, 进而给出了旋转换馈屏蔽装置安装要求与衬垫选型要求, 为射电望远镜接收机房屏蔽方案设计提供了技术支撑.

关键词 射电天文学, 射电望远镜: 旋转换馈, 屏蔽效应: 屏蔽装置, 屏蔽效能测量

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

射电天文学是天文学的重要研究领域之一. 射电望远镜作为用于观测和研究天体辐射的核心设备, 其发展对于射电天文学极为重要^[1]. 大型射电望远镜的电磁兼容性研究作为一个多学科交叉的综合性复杂领域, 是射电望远镜运行可靠性与科学产出的重要保障^[2].

大型射电望远镜极高的系统灵敏度和连续覆盖的观测带宽, 导致射电天文观测非常容易受外部电磁环境和系统自身设备电磁辐射的干扰, 电磁兼容性问题突出^[3]. 电子设备距离射电望远镜焦

点越近, 电磁兼容性要求越高, 其焦点位置设备的电磁兼容性要求高于我国最严苛的军用电磁兼容标准GJB151B-2013约80 dB^[4], 局部屏蔽设计指标需达140 dB, 远高于军用、民用领域电磁防护设计要求^[5].

通常射电望远镜配备多套接收机, 通过切换焦点处不同接收机馈源, 进而实现不同科学观测. 射电望远镜的换馈方式有直线导轨换馈、旋转馈源换馈、副反射面旋转换馈等多种形式. 早期望远镜采用直线导轨换馈, 如我国南山25 m望远镜^[6], 该换馈方式换馈时间长、效率低且换馈后对焦精度低. 目前, 主流的换馈方式采用旋转馈源换

2024-11-29收到原稿, 2025-02-11收到修改稿

^{*}国家重点研发计划(2022YFE0204200), 新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划-青年拔尖人才(2023TSYCCX0042), 中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室开放基金项目(ZBKF2024031007), 浙江省高等教育学会2024年度高等教育研究课题(KT2024015), 杭州电子科技大学2024年度高等教育教学改革研究项目(ZDJG202402), 浙江省属高校基本科研业务费专项(GK249909299001-1)资助

[†]liuqi@xao.ac.cn

馈方案,如美国100 m绿岸射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)^[7]、意大利64 m撒丁岛射电望远镜(Sardinia Radio Telescope, SRT)^[8]、德国Effelsberg 100 m射电望远镜^[9]以及上海天文台天马65 m射电望远镜^[10].此换馈方案将多套接收机馈源安装在位于望远镜焦平面的旋转圆盘上,通过控制圆盘旋转实现接收机快速切换,换馈方案可以支持更多的馈源配置,显著提高切换速度,适合大口径单天线射电望远镜.

然而,国内外工程技术人员在接收机旋转换馈方案的设计与工程实施中,主要聚焦于其机械结构设计与力学性能分析.其整体电磁兼容设计主要采用常规电磁屏蔽方法,即多层屏蔽以及接地技术,对位于接收机机房的旋转换馈结构电磁防护设计层面的考虑较少.随着数字技术的发展,接收机房内部的高辐射电子设备越来越多,如旋转换馈使用的伺服控制系统、天线测量系统、高速且高集成度的天文数据处理终端等^[11],为抑制上述设备辐射发射对天文观测的影响,需对接收机房进行电磁防护.国内500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)针对馈源舱的电磁兼容设计,采用不锈钢薄板与双层柔性镀银布相结合,既保证了馈源舱的屏蔽效能,又减轻了整体重量^[12];美国甚大天线阵(Very Large Array, VLA)的接收机房使用厚重的金属屏蔽材料,如镀铜铝板来有效阻挡外部的电磁波干扰;南非平方公里阵列(Square Kilometre Array, SKA)的接收机房外部使用高强度金属外壳,内部加装了多层吸波材料和导电橡胶密封以减少外部电磁波的进入.然而,接收机旋转换馈部位的屏蔽防护设计具有较大的技术挑战,该设计需在确保旋转换馈系统正常稳定运行的同时,具备较高的屏蔽效能以有效抑制电磁泄露,避免干扰天文信号的接收.本文围绕上述技术问题,拟设计应用于旋转换馈系统的屏蔽装置,并研制屏蔽实验平台验证该屏蔽装置的性能,为进一步的接收机房屏蔽防护设计提供技术支撑.

2 旋转换馈平台结构设计

2.1 设计需求分析

依据文献^[5]计算奇台射电望远镜(QiTai radio

Telescope, QTT)接收机房处的电平干扰限值,考虑接收机房内部电子设备电磁兼容要求极高,采用多层屏蔽防护方案对接收机房整体进行电磁屏蔽.整体屏蔽防护方案设计指标为100 MHz–6 GHz屏蔽效能大于50 dB,内部电子设备需进一步采用屏蔽机柜、屏蔽箱进行屏蔽防护,从而满足接收机房处干扰电平限值要求.

图1是QTT接收机房及旋转换馈装置示意图.如图所示QTT接收机房采用旋转换馈方案,将多个不同频段的接收机馈源安装于望远镜焦平面内,通过调整不同接收机馈源至望远镜焦点处实现不同观测频段的切换,进而满足不同科学观测.然而,在圆盘转动过程中,旋转结构处的缝隙不可避免,该结构的有效防护是接收机房实现高性能电磁屏蔽的关键.为支撑奇台射电望远镜接收机房的电磁屏蔽方案,考虑设计一种适用于旋转换馈结构的屏蔽装置,并研制旋转换馈屏蔽实验平台,通过实验与分析解决如下问题:(1)将设计的旋转换馈结构安装于屏蔽实验平台,通过测量确定该屏蔽装置的性能;(2)屏蔽实验平台需具有旋转与控制功能,能够模拟实际的运行场景,分析屏蔽装置在运行状态下的屏蔽效能与薄弱环节;(3)依据望远镜实际的观测运行情况,分析该屏蔽装置中屏蔽衬垫满足屏蔽效能的运行寿命.

2.2 旋转换馈屏蔽装置设计

上述分析可知,旋转换馈结构的电磁屏蔽是接收机房整体屏蔽的关键,面临机械与电磁双重需求的挑战,在转动过程中不仅要保证机械接触的精度,还需有效抑制高频电磁波的泄露,设计难度较高.为实现该滑动部位的高性能屏蔽,进行屏蔽结构与衬垫布置优化,考虑采用一种迷宫环屏蔽结构以增加电磁波的传输损耗;此外,在滑动接触部位安装屏蔽衬垫,进一步抑制电磁泄露,提高屏蔽性能,图2为该屏蔽装置的结构示意图.从图中可以看出,迷宫环屏蔽结构由转动圆盘的齿槽结构与接收机房顶部的齿结构组成,增加了电磁波的传输路径,能够有效抑制电磁波从接收机房内部泄露至外部.该结构中齿高为 h ,齿厚为 d ,齿间隙为 t ,相关参数的设计依据屏蔽要求、工程造价等因素,设计 h 为40 mm, d 为20 mm, t 为1.5 mm.

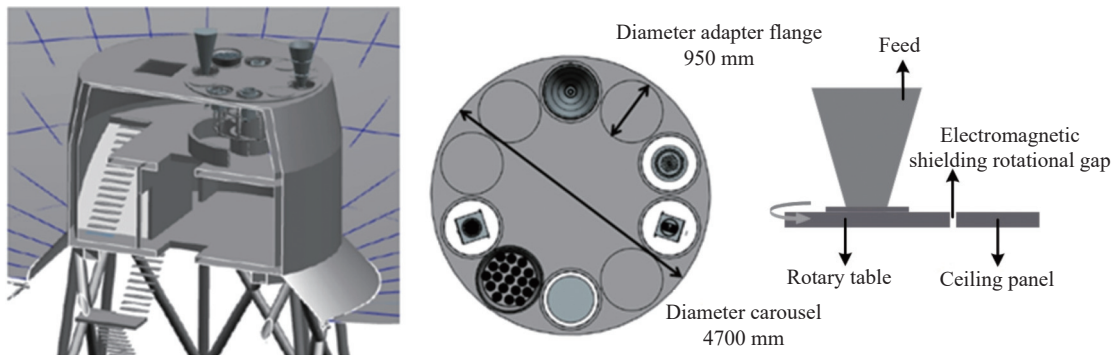
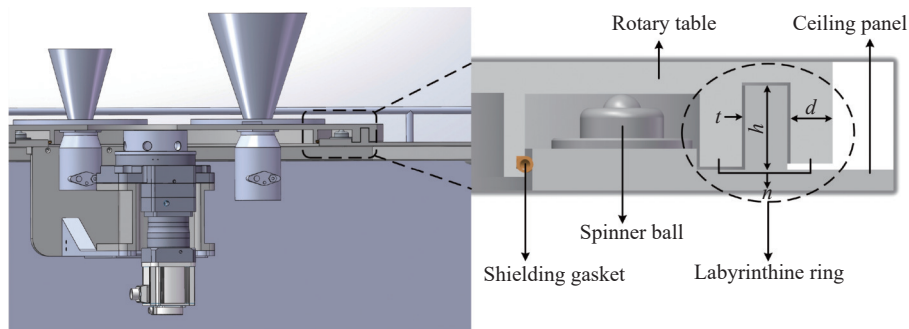
图 1 QTT接收机房及旋转馈装置示意图^[1]Fig. 1 Schematic diagram of QTT receiver room and rotary feeder device^[1]

图 2 屏蔽装置与转动支撑结构

Fig. 2 Shielding device and rotational support structure

依据上述设计的旋转馈屏蔽装置建立仿真模型, 确保仿真模型中旋转馈屏蔽装置的几何尺寸与实际一致, 采用电磁仿真软件在0.1–6 GHz频段内对其屏蔽效能进行仿真分析. 屏蔽装置的屏蔽效能仿真模型如图3所示, 为频率3.05 GHz时屏蔽装置内外电场强度变化.

仿真结果如图4所示, 其中虚线为仿真数据, 实线为拟合后的曲线, 从中可以看出在0.1–6 GHz频段该屏蔽装置的屏蔽效能随频率的升高而降低, 且0.1–4 GHz频段该装置的屏效在50–80 dB, 满足设计要求, 4–6 GHz频段屏效在40–50 dB之间, 可利用上述屏蔽丝网衬垫补偿该频段的屏效.

在上述迷宫环屏蔽结构的基础上, 还需抑制转动圆盘滑动部位缝隙的电磁泄漏. 为此, 选取了带橡胶芯丝网衬垫, 图5为带橡胶芯丝网衬垫示意图, 其中橡胶芯直径为9.53 mm. 如图所示, 该衬垫

由双层金属丝网围绕圆形硅海绵橡胶芯编织而成, 金属编织丝网具有导电性, 可用于电磁屏蔽, 防止电磁泄露, 而内芯提供良好的可压缩性和回弹能力, 在安装过程中将双层金属编织丝网的衬垫压缩到原始高度的75%时, 可得到最佳的电磁屏蔽效果, 屏蔽效能大于50 dB, 满足设计需求. 此外, 金属屏蔽衬垫具有较好的抗摩擦性能, 能够更好地适用于滑动摩擦工程场景, 且方便安装与拆卸, 确保屏蔽材料定期更换方便, 保障接收机房的整体屏蔽性能. 另外, 考虑到转动圆盘运行平稳性, 减少运行过程中产生应力和挤压, 以更好地测量评估该屏蔽装置性能, 沿转盘圆周均匀安装了12个万向球支撑部件(图2).

2.3 屏蔽实验平台设计

完成滑动部位的屏蔽装置的设计, 需进一步

研制旋转换馈屏蔽实验平台,以开展该屏蔽装置的屏蔽效能测量与实验分析.依据屏蔽效能测量

需求,屏蔽实验平台由旋转圆盘、屏蔽装置、屏蔽房、测量辅助装置等组成,如图6所示.

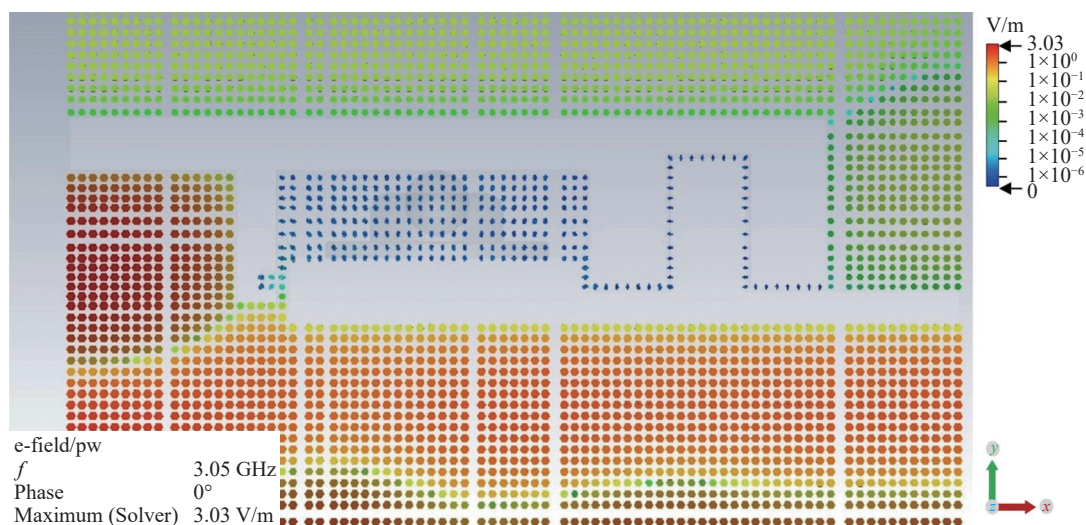


图 3 屏蔽装置屏蔽效能仿真模型. e 代表电场, f 为频率, pw 代表激励源为平面波, V/m 为电场强度单位, x 、 y 、 z 分别表示自由空间坐标系.

Fig. 3 Simulation model for shielding effectiveness of shielding devices. e represents the electric field, f is the frequency, pw denotes that the excitation source is a plane wave, V/m is the unit of electric field strength, and x, y, z represent the coordinates in free space.

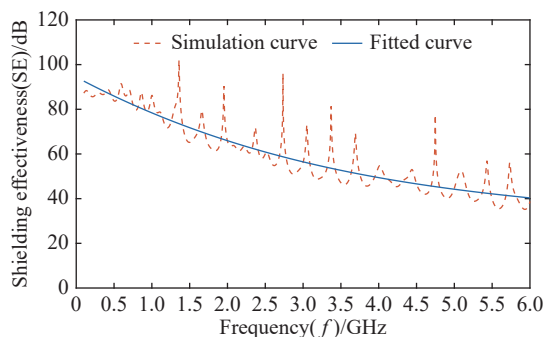


图 4 屏蔽装置的屏蔽效能仿真与拟合结果

Fig. 4 Simulation and fitted results of SE for shielding devices

屏蔽房的长宽高设计为 $3.7\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 保证其内部空间满足测量需求. 屏蔽房由屏蔽壳体、屏蔽门、接口板(安装滤波器和波导管)及接地端构成. 除滑动屏蔽装置外, 实验平台其他部位屏蔽效能设计均大于 100 dB (30 MHz – 6 GHz), 保证屏蔽效能测量结果为屏蔽装置部位的性能. 考虑到后续的屏蔽效能测量, 在接口板上安装波导管以

便通过光纤控制内外屏蔽效能测量设备, 实现屏蔽效能高效测量. 此外, 在转动圆盘顶部设计了天线安装支架, 用于屏蔽装置的屏蔽效能测量.

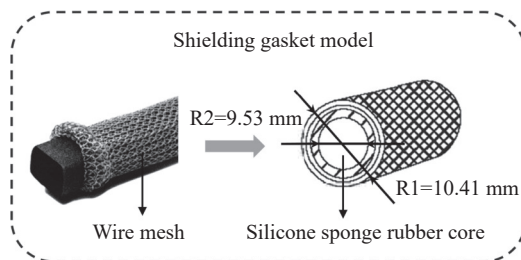


图 5 屏蔽丝网衬垫模型

Fig. 5 Shielding gasket model

另外, 考虑到屏蔽装置需要在旋转状态下进行测量, 屏蔽实验平台需配备转动控制系统, 依据旋转圆盘与屏蔽装置的结构特点, 在旋转换馈圆盘中心位置设计了中空旋转平台、减速机、伺服电机等(图6), 实现了转动圆盘的运行与控制. 其中, 在中空旋转平台后配备了减速机, 确保旋转圆盘在低速下运行, 与射电望远镜换馈场景尽量匹

配, 能够更好开展屏蔽装置的性能与可靠性实验.

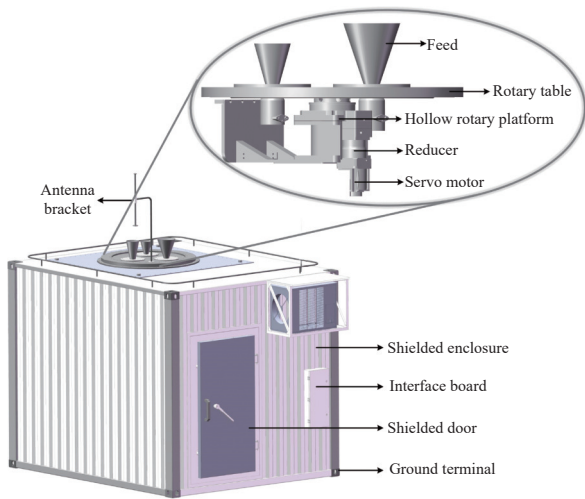


图 6 屏蔽机房与旋转换馈系统

Fig. 6 The shielded equipment room and rotary feed switch system

3 换馈屏蔽装置性能测量与分析

屏蔽实验平台设计、加工与集成后, 安装于奇台射电望远镜台址. 围绕测量需求, 考虑重点从屏蔽装置整体性能、运行过程中性能分析与薄弱环节分析、屏蔽衬垫运行寿命等角度开展测量与分析, 为最终的QTT接收机房屏蔽方案提供支撑.

3.1 系统整体屏蔽效能测量分析

屏蔽效能测量系统的搭建如下. 依据GB/T 12190-2021《电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法》^[13], 结合文献^[14]给出的多场景屏蔽效能测量配置方案, 搭建屏蔽效能测量系统, 如图7所示. 测量系统包括信号源、信号分析仪、发射天线、接收天线、光电转换器、控制电脑、伺服电机以及各种线缆等; 选用双锥天线(100 MHz–1 GHz)与喇叭天线(1–6 GHz)开展实现0.1–6 GHz频段测量. 通过计算机控制信号源与信号分析仪实现自动化屏蔽效能测量.

控制伺服电机旋转实现换馈圆盘转动, 实现屏蔽装置在静止状态与运行状态测量, 测量结果如图8所示. 从图中可以看出, 在100 MHz–1 GHz

频段, 转盘旋转时多数频点的屏蔽效能大于静止时屏蔽效能, 且旋转状态下系统屏蔽效能随电磁波频率的增加而下降, 在750 MHz频点处屏蔽效能最差(45 dB). 转盘静止状态下, 100–800 MHz屏蔽效能约为55 dB, 800 MHz–1 GHz性能低于运行状态; 在1–6 GHz频段, 静止时屏蔽效能约为60 dB, 转盘旋转时屏蔽效能明显大于静止状态. 对于两种状态之间的性能差异, 初步分析认为转盘旋转过程中受中空旋转平台力的作用, 导致屏蔽衬垫与接触面发生挤压, 增强了衬垫与缝隙表面的贴合程度, 以至屏蔽效能高于静止状态.

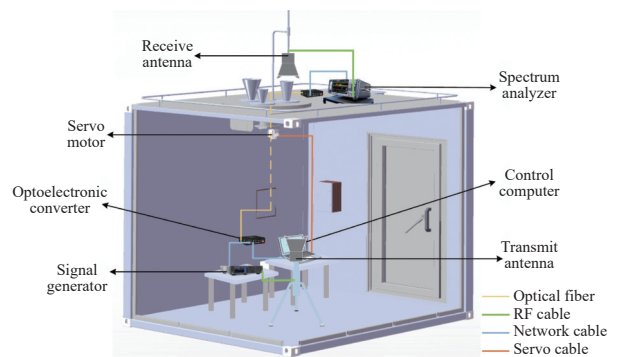


图 7 屏蔽效能测量系统

Fig. 7 SE measurement system

此外, 为了验证屏蔽装置中屏蔽衬垫的作用, 我们在屏蔽衬垫安装和拆除两种状态下开展了屏蔽效能测量, 测量结果如图9所示. 从图9的对比数据可以看出, 是否安装屏蔽衬垫对整体的屏蔽效能影响较大. 其中, 在100 MHz–6 GHz频段, 安装屏蔽衬垫后, 屏蔽效能提高了10–30 dB; 在100 MHz–1 GHz频段内, 屏蔽效能的提升更为明显. 结果表明, 屏蔽衬垫对屏蔽装置的性能提升作用明显, 但是屏蔽衬垫的运行可靠性需要保障, 进而确保屏蔽装置整体屏蔽效能.

3.2 转盘运行过程屏蔽效能分析

为进一步分析屏蔽装置运行过程中的薄弱环节, 需通过电机控制转盘旋转, 测量不同部位的屏蔽效能. 为此, 依据电机的运行参数和测量天线的波束宽度(喇叭天线为45°), 考虑每36°测量一个部位, 一周为360°, 共计需测量10个点位. 测量位置

分布示意图如图10所示, 位置P2屏蔽衬垫轻微磨损, 外层包裹金属丝网完好, 位置P7屏蔽衬垫严重磨损, 外层金属丝网破裂. 依据上述搭建的屏蔽测

量系统, 通过控制伺服电机将接收天线旋转至测量位置, 并调整屏蔽房内发射测量天线位置, 实现不同部位的屏蔽效能测量.

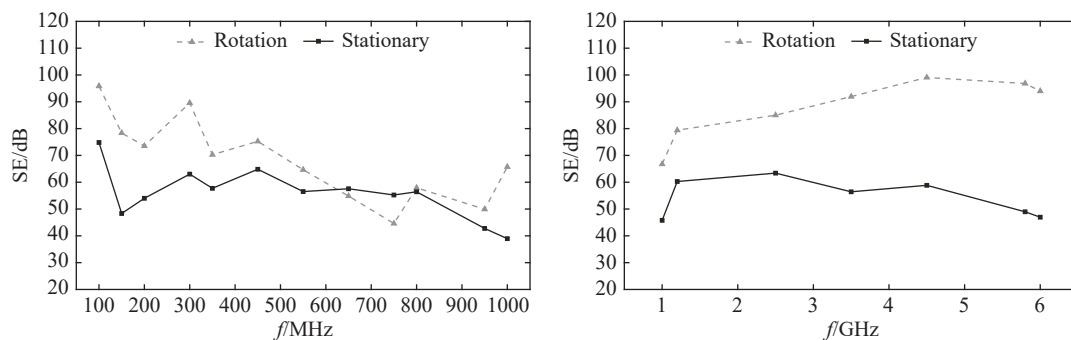


图 8 转盘旋转与静止状态的屏蔽效能

Fig. 8 SE of the system in rotating and stationary states

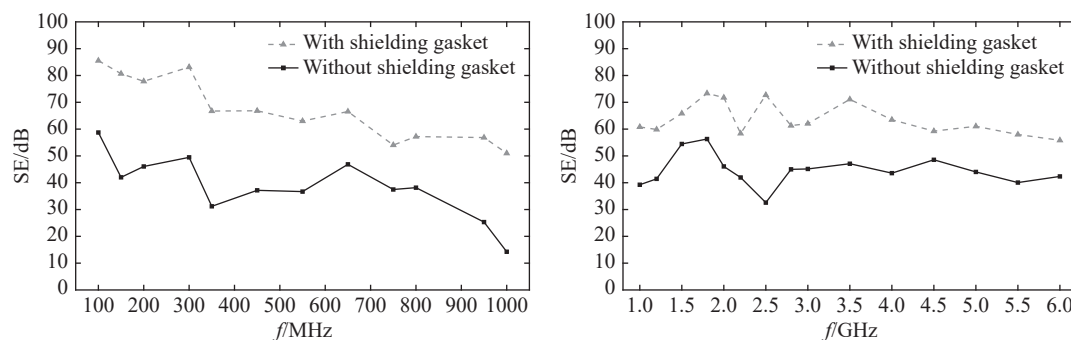


图 9 屏蔽衬垫对屏蔽效能的影响

Fig. 9 The effect of shielding gasket on SE

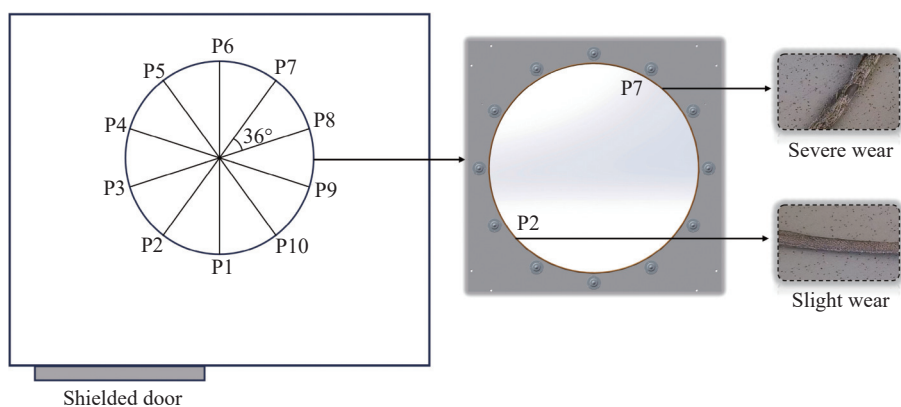


图 10 测量部位与屏蔽衬垫不同程度的磨损

Fig. 10 Measurement sites and shielding gasket with different degrees of wear

图11为不同部位的屏蔽效能测量结果, 黑色曲线为P1-P5部位, 灰色曲线为P6-P10部位, 可以看出, P6-P10部位屏蔽效能高于P1-P5部位, 在200 MHz屏蔽处性能相差约48 dB, 2.8 GHz频点

处相差约30 dB. 分析可能原因如下: 转盘的安装存在误差, 导致屏蔽衬垫挤压与受力不均, 以致P2部位的安装缝隙最大, 因此电磁泄露更为严重, 为屏蔽的薄弱环节.

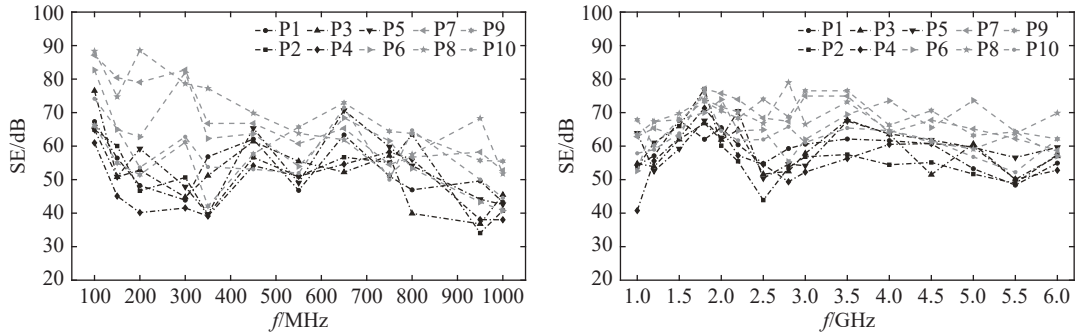


图 11 转盘不同部位的屏蔽效能

Fig. 11 SE at different positions on the rotary table

3.3 屏蔽衬垫可靠性分析

第3.1节的分析表明, 屏蔽衬垫对整体屏蔽作用显著. 为进一步验证所选屏蔽衬垫的使用寿命, 需要开展进一步的实验分析. QTT采用格焦和主焦方案, 预计两个焦点的科学观测使用时间近似, 即格里高利接收机占用观测时间为50%, 则每月的观测时间约为12 d, 若每个接收机使用时间为2 d, 那么每月需更换接收机7次, 假设每次更换接收机转盘旋转为半圈, 则每月需要转动三圈半, 预计每年需转动约42圈. 按照上述计算方法, 通过控制伺服电机, 实现旋转圆盘转动84圈, 折算后, 相当于屏蔽衬垫运行了两年. 在实验前, 我们更换了新的

屏蔽衬垫, 并在实验后拆卸运行后的衬垫进行检查, 从衬垫的磨损程度(图10)可以看出, P7部位比P2部位磨损更为严重, 验证了屏蔽装置的安装误差问题, 导致某些部位的屏蔽效能较差. 进一步分别测量了运行前后实验平台整体屏蔽效能, 测量结果如图12所示. 测量数据表明, 屏蔽衬垫运行两年后, 对整体屏蔽效能的影响并不明显, 但还需要综合考虑衬垫的性能参数、换馈装置的安装工艺、运行工况、实际运行时野外环境的影响、定期维保和测试结果等因素, 建议屏蔽衬垫两年更换一次, 能够满足性能要求.

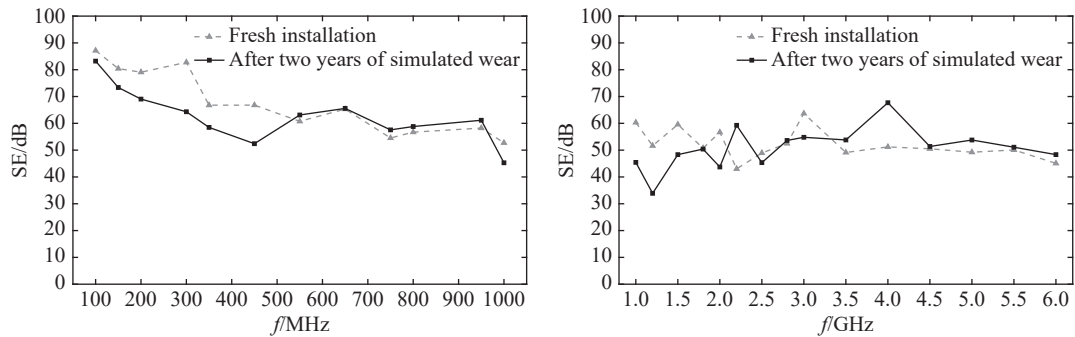


图 12 全新安装与模拟两年运行磨损后的屏蔽效能测量结果对比

Fig. 12 Comparison of SE measurements between the fresh installation and after two years of simulated wear

4 结论

为解决大型射电望远镜旋转换馈系统滑动部位电磁屏蔽防护问题, 本文设计了一种应用于旋转屏蔽结构的屏蔽装置, 并研制旋转换馈屏蔽实验平台, 安装于QTT台址, 测量分析了影响该屏蔽装置性能的主要因素. 测量结果表明, 设计的屏蔽装置屏蔽效能基本达到了50 dB的设计预期; 此外, 屏蔽结构的加工精度和安装误差对整体屏蔽效能和屏蔽衬垫运行可靠性影响较为明显, 需要在最终的接收机房电磁屏蔽方案中着重考虑, 以确保大型射电望远镜电磁兼容方案设计的可靠性.

参考文献

- [1] Wang N, Xu Q, Ma J, et al. SCPMA, 2023, 66: 289512
- [2] GJB 72A-2002电磁干扰和电磁兼容性名词术语. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2003
- [3] 刘奇. 天文学报, 2021, 62: 46
- [4] GJB 151B-2013军用设备和分系统电磁发射与敏感度测量. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013
- [5] 刘奇, 王娜, 刘晔, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49: 95
- [6] 王相锋, 张晋, 艾力, 等. 天文研究与技术, 2005, 2: 162
- [7] Prestage R M, Constantines K T, Hunter T R, et al. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97: 1382
- [8] Prandoni I, Murgia M, Tarchi A, et al. A&A, 2017, 608: A40
- [9] Wielebinski R, Junkes N, Grahl B H. JAHH, 2011, 14: 3
- [10] Liu Q, Shen Z, Hong X, et al. ATI, 2024, 1: 239
- [11] 汪子悦. RFSOC电磁辐射干扰评估与防护研究. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024: 1-75
- [12] Zhang H Y, Yao R, Hu H, et al. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 26: 1091
- [13] GB/T 12190-2021电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法. 中华人民共和国国家标准化管理委员会, 2021
- [14] 唐仁凯, 李蓉, 刘奇, 等. 电波科学学报, 2024, 39: 640

Design and Experimental Analysis of the Shielding Device for Radio Telescope Rotating Feed-switching Structures

TANG Ren-kai¹ LI Rong¹ LIU Qi² ZHENG Xian-ze¹ SU Xiao-ming²
LI Xiao-feng³ ZENG Yao¹ FEI Yu-hao¹

(1 School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

(2 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(3 China Electronics Technology Group 33rd Research Institute, Taiyuan 030006)

ABSTRACT Large radio telescopes have extremely high sensitivity, necessitating stringent electromagnetic compatibility (EMC) design requirements for electronic equipment near the focal point. The shielding and protection scheme for the feed-switching structure in the telescope receiver cabin poses significant challenges. To address these issues, we integrated protective structural design with shielding gaskets, devising a shielding device specifically tailored for the rotating feed structure. On this basis, to validate the shielding effectiveness and reliability of the rotating feed-switching shielding device, we developed an experimental platform for testing the device. Shielding effectiveness was measured under both static and operational conditions, and the results largely met the design expectations. Furthermore, based on the installation and operational characteristics of the shielding device, and considering the service life of the shielding gaskets, we analyzed the key factors affecting the performance and reliability of the device using empirical data. From this analysis, we proposed installation requirements for the shielding device and selection criteria for the gaskets. These findings provide technical support for the shielding scheme design of the telescope receiver cabin.

Key words radio astronomy, radio telescope: rotational feed switching, shielding effect: shielding device, shielding effectiveness measure