全可动射电天文望远镜的电磁干扰特征研究

邱扬¹, 许清琳^{1*}, 田锦¹, 刘奇²

1. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071;

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: xqinglin@126.com

收稿日期: 2016-06-21; 接受日期: 2016-07-20; 网络出版日期: 2017-03-17

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857103)和国家自然科学基金(编号: 11473061, 11103056)资助项目

摘要 全可动射电望远镜是一个包含主动面促动器机构、天线高功率驱动分系统、高灵敏接收终端、数据传输及控制分系统在内的复杂系统. 系统内强弱电分系统的工作电平差异悬殊, 内部不但存在相互的电磁干扰, 同时系统工作时所产生的电磁发射信号及场站环境的各类电磁信号, 都会对需要接收的微弱射电信号产生干扰, 致使射电望远镜的电磁兼容性已成为研制及使用的关键技术. 本文综述了国内外射电天文望远镜电磁兼容技术的研究进展, 并从系统工程角度, 对射电望远镜系统的电磁干扰特征进行了研究, 确定了关键的控制要素, 建立了干扰耦合矩阵, 提出了基于电磁拓扑理论的射电望远镜系统电磁兼容的建模方法, 为研究射电天文望远镜的电磁兼容技术奠定了基础.

关键词 射电望远镜, 电磁兼容, 干扰特征, 电磁拓扑

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

1 引言

射电望远镜以被动接收宇宙天体电磁辐射的方式来工作. 由于到达射电望远镜的天体辐射信号非常微弱(一般比系统噪声功率低30 dB), 有时信噪比只有-60 dB或更低^[1], 使其非常容易受到外部环境和系统自身的干扰, 导致电磁兼容性问题突出, 严重影响射电观测的正常进行.

为此, 国内外对射电望远镜的电磁干扰开展了深入研究. 电磁干扰的研究一般从干扰源、耦合途径和敏感设备3个要素来进行. 例如, Waterman^[2]论述了

影响射电观测的各种电磁干扰源; 彭涛等人^[3,4]则从敏感设备的角度对射电天文业务的电磁兼容特点和射电望远镜的受干扰类型进行了分析, 探讨了射电天文业务受干扰程度的评价标准. 为了对产生的电磁干扰进行定量分析, 需要对其进行电磁兼容测试. 例如, Ambrosini等人^[5]采用了固定监测手段, 对将要安装在撒丁岛射电望远镜台址内的计算机集群产生的射频干扰电平进行了测量, 并给出了干扰量级; Bolli等人^[6]采用配备了高灵敏度仪器、各种解调和信号分析设备的移动监测站, 对同一台址附近的电磁干扰进行了监测. 国内的李建斌等人^[7,8]对目前国内在建和

引用格式: 邱扬, 许清琳, 田锦, 等. 全可动射电天文望远镜的电磁干扰特征研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059511
Qiu Y, Xu Q L, Tian J, et al. On the interference characteristics of fully steerable radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 059511, doi: 10.1360/SSPMA2016-00306

预研阶段的射电望远镜所处的电磁环境进行了实际测试, 阐述了实测数据的分析和处理方法. 但射电望远镜这类大型系统的电磁兼容测试十分复杂, 不仅需要大量的时间, 有些测试还很难实施, 如果能够对射电望远镜受到的电磁干扰进行预测, 就可以减少不必要的重复测试, 还能为射电望远镜的设计提供电磁兼容方案. 例如, 詹德志等人^[9]结合高压输电线的电磁干扰特征, 建立了高压输电线电晕放电辐射的物理模型, 对辐射功率随距离的衰减规律进行了研究, 分析了在500 m口径球面射电望远镜(Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)架设高压输电线应离开射电望远镜的最小距离. 张锦锋^[10]对主反射面主动调整系统的电磁干扰耦合途径及抑制方法进行了研究, 结合电磁干扰理论预测和电磁兼容测试, 验证了抑制方法的有效性. 但上述研究都是针对射电望远镜系统的某种干扰或某个环节进行分析, 缺乏对整个射电望远镜系统的电磁兼容综合预测研究.

目前, 对复杂系统的干扰耦合已经有了一定程度的研究. 例如, Parmantier^[11]给出了目前复杂系统的耦合建模能力, 介绍了相关的数值耦合模型, 对基于Baum-Liu-Tesche (BLT)方程的系统响应求解方法进行了分析. 李颖^[12]提出了基于转移函数的孔缝耦合和缝线耦合模型, 通过数值方法验证了其有效性. 但是针对射电望远镜的系统级电磁兼容性研究仍较少. 由于射电望远镜以被动接收宇宙天体电磁辐射的方式来工作, 自身并不发射信号, 而转移函数体现了外部干扰耦合进入系统内部的单向关系, 因此, 本文针对射电望远镜的干扰耦合特征, 将系统划分为若干个子问题及模型加以分别研究, 再通过建立干扰的转移函数, 将由子问题及模型所得的结果综合为系统的响应, 从而实现射电望远镜系统电磁兼容性的定量分析.

2 射电望远镜系统的电磁干扰特征及耦合途径

新疆奇台110 m口径射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)为全向可转动射电天文望远镜, 根据科学目标和目前的馈源发展水平, 预计配备100 cm, 30 cm, 5 cm, 1 cm, 6 mm, 3 mm等波段的单波束接收机、15 cm和6 mm波段的多波束接收机, 以及13/3.6和3.6/0.9 cm的双频接收机, 其工作频段覆盖了150 MHz–

115 GHz^[13].

QTT的硬件系统包含主反射器及其支撑机构、天线驱动系统、接收系统、换馈系统、数据终端系统、时频系统、控制及监控系统等. 其中馈源、接收机前端、互连系统为系统的薄弱敏感环节, 易受到外界干扰, 其系统构成与电磁环境如图1所示.

(1) 干扰源: 根据干扰源位置的不同, 可以将其分为系统外部干扰源和系统内部干扰源. 系统外部干扰源(外部环境对射电望远镜系统产生的干扰)包括远距离的卫星传输 D_1 和雷达 D_2 、近距离的移动通信基站 D_3 、广播电视发射塔 D_4 和高压输电线路 D_5 等; 系统内部干扰源(射电望远镜系统自身产生的干扰)包括天线驱动系统 D_6 、控制系统 D_7 、数据终端系统 D_8 、时频系统 D_9 、计算机网络设备 D_{10} 及其他电气设备等. 表1给出了对射电观测产生干扰的电磁干扰源与相应的干扰频段.

(2) 耦合途径与耦合模型: 电磁干扰进入射电望远镜系统的耦合途径分为通过天线进入的前门耦合和通过孔缝、线缆进入的后门耦合. 前门耦合: 系统外部干扰和系统内部辐射干扰, 以辐射形式通过前门耦合进入馈源. 其中外部干扰需用远场耦合模型加以描述, 与接收系统距离较近的天线驱动系统产生的干扰需用近场耦合模型; 后门耦合: 系统内部干扰, 以场-线和线-线形式通过后门耦合进入接收系统, 其耦合模型也与之对应.

3 基于电磁拓扑理论的电磁兼容建模方法

外界电磁干扰对射电望远镜系统的干扰, 实质上

图1 (网络版彩图)射电望远镜系统及所处的电磁环境
Figure 1 (Color online) Radio telescope system and its electromagnetic environment.

表 1 不同频段的电磁干扰源

Table 1 Electromagnetic interference sources in different band

接收机类型	波段 (cm)	频率范围 (GHz)	对应工作频段的干扰源
单波束	100	0.15–0.6	卫星(地-空)、雷达、移动通信基站、中波广播、电视广播、无线电导航、卫星地球探测、无线电定位、卫星广播、空间研究、台址内电子设备
	30	0.6–4	
	5	2–12	
	1	12–36	卫星(地-空)、雷达、卫星地球探测
	0.6	36–50	
	0.3	72–115	
双频	13/3.6	2.2–2.5, 8–9	雷达、移动通信基站、卫星地球探测、空间研究、台址内电子设备
	3.6/0.9	8–9, 30–34	
多波束	15	1–2	卫星(地-空)、雷达、移动通信基站、中波广播、无线电导航、卫星地球探测、空间研究、台址内电子设备
	0.6	36–50	

是对接收系统的敏感、关键器件或设备的干扰. 由于接收机工作在不同波段, 观测时通过换馈系统进行切换, 并不同时进行工作. 因此, 各类干扰源对于接收机系统的干扰也是随接收机工作波段变化的.

为了突出论文所提出的分析方法, 本文以双极化接收机(图2)为例进行具体建模. 双极化接收机的低温单元中放置着耦合器、极化器和敏感的低温放大器, 常温单元中放置着射频模块、本振模块、中频模块和噪声源^[14]. 接收机的第一层屏蔽是机壳, 此外两个单元分别有各自的屏蔽体, 上面开有孔缝, 单元、模块、器件之间采用屏蔽或非屏蔽线缆传输信号.

由于双极化接收机的各种结构因素(机壳、屏蔽体的形状、材料、孔缝等)和电路因素(器件、导线、接地方式、电源、电路的密集度等)种类繁多, 干扰路径和被干扰区域相互交织, 关系复杂, 不利于实现电磁兼容的分析与计算. 而图论是通过点、线(边)所组成的图形以及图所表示出来的点、边关系, 来建立模拟物理系统数学模型的一种方法. 图论中的点、线这两个要素, 决定了任何一个包含了某种二元关系的系统都可用图论进行研究. 显然, 双极化接收机电磁兼容问题中的干扰耦合路径和被干扰区域这两个电磁兼容性要素, 正体现了这种二元关系, 而依据二元关系建立电磁兼容模型中的转移函数, 则大大简化了分析过程与建模难度. 因此本文采用拓扑图论方法建立双极化接收机的电磁兼容模型.

图2所示的双极化接收机, 其抽象的系统构成如图3所示. 图3中, $S_{1.1.2.1}$ 表示接收机的机壳(对应图2中最外层实线), 将外部环境 $V_{1.1}(v_1)$ 与接收机内部 $V_{2.1}(v_2)$ 隔离; $S_{2.1.3.1}$ 表示低温单元 $V_{3.1}(v_3)$ 的屏蔽(对应图2中左侧

虚线), 其子区域分为两个部分, 第1个部分包括 $V_{4.1}(v_5)$ 和 $V_{4.2}(v_6)$ 两个区域, 与区域 $V_{3.1}$ 的分界面分别为 $S_{3.1.4.1}$ 和 $S_{3.1.4.2}$, 第2个部分包括 $V_{4.3}(v_7)$ 和 $V_{4.4}(v_8)$ 两个区域, 与区域 $V_{3.1}$ 的分界面分别为 $S_{3.1.4.3}$ 和 $S_{3.1.4.4}$ (对应图2中左侧实线); $S_{2.1.3.2}$ 表示常温单元 $V_{3.2}(v_4)$ 的屏蔽(对应图2中右侧虚线), 其子区域 $V_{4.5}(v_9)$ 的屏蔽为 $S_{3.2.4.5}$, 子区域 $V_{4.6}(v_{10})$, $V_{4.7}(v_{11})$ 和 $V_{4.8}(v_{12})$ 通过结构或空间予以隔离, 与区域 $V_{3.2}$ 的分界面分别为 $S_{3.2.4.6}$, $S_{3.2.4.7}$ 和 $S_{3.2.4.8}$, 同样, 子区域 $V_{4.9}(v_{13})$ 和 $V_{4.10}(v_{14})$ 与区域 $V_{3.2}$ 的分界面分别为 $S_{3.2.4.9}$ 和 $S_{3.2.4.10}$ (对应图2中右侧实线).

系统外部干扰源在 $V_{1.1}$ 区域内, 在忽略了通过屏蔽体进入的干扰和系统内部的相互干扰后, 系统外部干扰源对双极化接收机的干扰序列图如图4所示. 图4中, $\odot$ 表示域, $\bullet$ 表示屏蔽层, $\ominus$ 表示线的终端, $\odot$ 表示该处存在场到线的耦合, “—”表示干扰从一个域到另一个域的耦合路径.

结合系统构成图和干扰序列图, 可以看出, 电磁干扰通过两条链路耦合进入接收机, 即从左到右的传导链路(黑色实线)和从上到下的辐射链路(黑色虚线). 传导链路为接收机系统正常工作时的信号传输链路, 系统外部干扰通过前门耦合进入馈源, 以传导的方式耦合至敏感、关键器件或模块; 辐射链路为非预期的干扰耦合链路, 系统外部干扰通过后门耦合进入接收机内部, 经由区域之间场到场的耦合, 以场-线耦合的方式进入传导链路, 进而造成干扰.

通过建立转移函数, 对上述干扰耦合过程的不同环节进行描述. 对于前门耦合, 建立外部入射场通过场-天线耦合到射频电路 L_{ij} 输入端的转移函数为 $(U_{ij}, I_{ij}) = T_{k,h;i,j}^{r;a} \cdot (E_{k,h}, H_{k,h})$, (1)

图2 双极化接收机的结构框图

Figure 2 Structure diagram of dual-polarized receiver.

图3 接收机抽象的系统构成图

Figure 3 Abstract structure diagram of receiver system.

式中, $(E_{k,h}, H_{k,h})$ 为外部区域 $V_{k,h}$ 中的电磁场, $(U_{i,j}, I_{i,j})$ 为射频电路 $L_{i,j}$ 输入端的电压和电流。

对于后门耦合, 建立外部入射场与内部耦合场之间的转移函数为

$$(E_{i,j}, H_{i,j}) = T_{k,h:i,j}^r \cdot (E_{k,h}, H_{k,h}), \quad (2)$$

式中, $(E_{k,h}, H_{k,h})$ 为外部区域 $V_{k,h}$ 中的电磁场, $(E_{i,j}, H_{i,j})$ 为屏蔽层内部区域 $V_{i,j}$ 中的耦合场, $T_{k,h:i,j}^r$ 为外部入射的电磁场通过孔缝耦合到屏蔽层内部的转移函数。同理, 可以建立区域 $V_{k,h}$ 通过场-线耦合到导线或电路 $L_{i,j}$ 上的转移函数, 以及导线或电路 $L_{k,h}$ 通过传导耦合到敏感、关键器件或模块 $L_{i,j}$ 上的转移函数为

$$(U_{i,j}, I_{i,j}) = T_{k,h:i,j}^{r,c} \cdot (E_{k,h}, H_{k,h}), \quad (3)$$

$$(U_{i,j}, I_{i,j}) = T_{k,h:i,j}^c \cdot (U_{k,h}, I_{k,h}). \quad (4)$$

考虑到电磁干扰由多条路径耦合至敏感、关键

器件或模块, 每条路径有多个环节, 根据电路的叠加原理, 敏感、关键器件或模块对系统外部干扰的响应可表示为

$$\begin{aligned} (U, I) &= \sum_{p=1}^{P_1} (T_1^{r:a} \cdot T_2^c \cdots T_{L_p-1}^c \cdot T_{L_p}^c) \cdot (E^i, H^i) \\ &+ \sum_{p=P_1+1}^{P_1+P_2} (T_1^r \cdot T_2^r \cdots T_{l-1}^r \cdot T_l^{r:c} \\ &\quad \cdot T_{l+1}^c \cdots T_{L_p-1}^c \cdot T_{L_p}^c) \cdot (E^i, H^i) \\ &= \sum_{p=1}^P \left(\prod_{L_p} T_{k,h:i,j} \right) \cdot (E^i, H^i), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, E^i, H^i 分别为外部入射的电场强度和磁场强度的分量, P 表示系统外部干扰对接收机射频敏感模块内干扰的路径个数, 其中, P_1 为前门耦合的路径个数, P_2 为后门耦合的路径个数, L_p 表示第 p 条路径的环节个数, $T_{k,h:i,j}$ 为各种耦合路径以及不同耦合区域之间的转移函数。

为了求解敏感、关键器件或模块的响应, 需要根据干扰序列图, 确定转移函数的种类及相应的分析、计算方法, 其中, $T_{1,1:2,1}^r(e_1), T_{2,1:3,1}^r(e_5), T_{2,1:3,2}^r(e_6), T_{3,1:4,1}^r(e_7) - T_{3,1:4,4}^r(e_{10})$ 和 $T_{3,2:4,5}^r(e_{11}) - T_{3,2:4,10}^r(e_{16})$ 为场到场的耦合, $T_{1,1:5,1}^{r,a}(e_2)$ 为场到天线的耦合, $T_{1,1:5,9}^{r,c}(e_3), T_{1,1:5,10}^{r,c}(e_4), T_{4,1:5,1}^{r,c}(e_{17}) - T_{4,10:5,10}^{r,c}(e_{26})$ 为场到线的耦合, 这3种耦合均属于辐射干扰, $T_{5,1:5,2}^c(e_{27}), T_{5,2:5,3}^c(e_{28}), T_{5,2:5,4}^c(e_{29}), T_{5,3:5,6}^c(e_{30}), T_{5,4:5,7}^c(e_{31}), T_{5,5:5,1}^c(e_{32}), T_{5,6:5,9}^c(e_{33}), T_{5,7:5,10}^c(e_{34}), T_{5,8:5,9}^c(e_{35}), T_{5,8:5,10}^c(e_{36})$ 为传导干扰, 对于上述耦合环节, 可采用相应模型分别进行研究。

在获取不同环节的转移函数后, 还需对接收机系

统的干扰关联关系进行定量描述, 建立敏感、关键器件或模块的关联矩阵, 进而构造响应函数. 接收机系统的关键器件为低温放大器和混频器, 分别在 $V_{4.3}$ 和 $V_{4.4}$, $V_{4.6}$ 和 $V_{4.7}$ 区域内. 以 $V_{4.3}$ 区域内的低温放大器为例,

考虑到信号传输的有向性, 后级电路不会通过传导耦合干扰前级电路, 对图4中干扰序列图所对应的 24×36 阶关联矩阵进行简化, 获得 $V_{4.3}$ 区域内低温放大器的关联矩阵 A 为

$$A = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{11} & e_{17} & e_{18} & e_{19} & e_{21} & e_{27} & e_{28} & e_{32} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_9 \\ v_{15} \\ v_{16} \\ v_{17} \\ v_{19} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

图4 (网络版彩图)接收机系统的干扰序列图

Figure 4 (Color online) Interference sequence diagram of receiver system.

其中, 关联矩阵的第*i*行对应区域 v_i , 第*j*列对应路径 e_j , 可以看出, 该关联矩阵体现了与 $V_{4.3}$ 区域内低温放大器相关的12个被干扰区域和15条干扰路径之间的关系. 矩阵中每个元素 a_{ij} 的取值为1, -1或0, $a_{ij}=1$ 表示路径 e_j 和区域 v_i 关联, 离开 v_i ; $a_{ij}=-1$ 表示路径 e_j 和区域 v_i 关联, 指向 v_i ; $a_{ij}=0$ 表示路径 e_j 和区域 v_i 无关联. 对于包含了所有区域和路径的24×36阶关联矩阵, 每列元素除了0外, 只有值分别为1和-1的两个元素, 这表明每条路径连接了两个区域, 从一个区域指向另一个区域, 矩阵中每行元素的非零元个数表示了区域的度, 即该区域所关联的路径的数目.

根据关联矩阵, $V_{4.3}$ 区域内低温放大器的响应为

$$\begin{aligned} (U, I) = & T_{1.1:5.1}^{r:a} \cdot T_{5.1:5.2}^c \cdot T_{5.2:5.3}^c \cdot (E^i, H^i) \\ & + T_{1.1:2.1}^r \cdot T_{2.1:3.1}^r \cdot T_{3.1:4.1}^r \cdot T_{4.1:5.1}^{r:c} \\ & \cdot T_{5.1:5.2}^c \cdot T_{5.2:5.3}^c \cdot (E^i, H^i) \\ & + T_{1.1:2.1}^r \cdot T_{2.1:3.1}^r \cdot T_{3.1:4.2}^r \cdot T_{4.2:5.2}^{r:c} \\ & \cdot T_{5.2:5.3}^c \cdot (E^i, H^i) \\ & + T_{1.1:2.1}^r \cdot T_{2.1:3.1}^r \cdot T_{3.1:4.3}^r \cdot T_{4.3:5.3}^{r:c} \cdot (E^i, H^i) \\ & + T_{1.1:2.1}^r \cdot T_{2.1:3.2}^r \cdot T_{3.2:4.5}^r \cdot T_{4.5:5.5}^{r:c} \cdot T_{5.5:5.1}^c \\ & \cdot T_{5.1:5.2}^c \cdot T_{5.2:5.3}^c \cdot (E^i, H^i) \\ = & \sum_{p=1}^5 \left(\prod_{L_p} T_{k,h:i,j} \right) \cdot (E^i, H^i). \end{aligned} \quad (6)$$

可以看出, 电磁干扰通过5条耦合路径进入 $V_{4.3}$ 区域内的低温放大器, 以第3条耦合路径 $T_{1.1:2.1}^r \rightarrow T_{2.1:3.1}^r \rightarrow T_{3.1:4.2}^r \rightarrow T_{4.2:5.2}^{r:c} \rightarrow T_{5.2:5.3}^c$ 为例, 即外部能量通过机壳的孔缝耦合到 $V_{2.1}$, 再通过低温单元的孔缝耦合到 $V_{3.1}$, 再通过低温放大器屏蔽体的孔缝耦合到 $V_{4.2}$, 再通过场-线耦合到 $V_{5.2}$, 最后通过线缆耦合到 $V_{5.3}$. 首先求解 $T_{1.1:2.1}^r$, $T_{2.1:3.1}^r$, $T_{3.1:4.2}^r$, $T_{4.2:5.2}^{r:c}$ 和 $T_{5.2:5.3}^c$ 5个转移函数, $T_{1.1:2.1}^r$, $T_{2.1:3.1}^r$ 和 $T_{3.1:4.2}^r$ 采用孔缝耦合理论, 借助孔缝上的等效激励源作为传输关系的中间量, 计算 $V_{4.2}$ 的响应, $T_{4.2:5.2}^{r:c}$ 采用场线耦合理论, 计算 $V_{5.2}$ 的响应, $T_{5.2:5.3}^c$ 采用基于传输线理论的方法, 将 $V_{5.2}$ 看作二端口网络, $V_{5.3}$ 看作单端口网络, 以实验或数值的方法得到其散射参数, 并作为传输线的两个负载终端, 得到该传输线网络的电磁特征. 然后以 $T_{4.2:5.2}^{r:c}$ 的计算结果为激励源, 加入到 $T_{5.2:5.3}^c$ 中 $V_{5.2}$ 负载一端, 得到 $V_{5.3}$ 的最终响应.

在求得接收系统关键器件或设备的响应后, 通过与ITU-R RA.769中的限值或器件的敏感度相比, 判断

是否满足要求, 如果不满足要求, 需对射电望远镜系统进行调整, 重复上述求解步骤, 直至满足要求.

4 模型验证

为了验证上节所述模型的正确性, 针对各耦合环节的转移函数模型, 构建测试验证方案如下:

(1) 场-天线耦合的转移函数 $T_{k,h:i,j}^{r:a}$

对于转移函数 $T_{k,h:i,j}^{r:a}$, 通过测试场-天线耦合度 $C^{r:a}$ 对其进行验证, 测试配置如图5所示. 计算机控制信号源通过天线发射信号模拟外部干扰, 采用与射电望远镜馈源一致的喇叭天线作为接收天线, 通过波同转换与频谱仪相接, 同时, 采用接收探头监测距天线口面 d 距离处的场强, 接收天线接收的功率与接收探头监测场强的比值, 即为场-天线耦合度 $C^{r:a}$, 其与转移函数 $T_{k,h:i,j}^{r:a}$ 的关系为

$$T_{k,h:i,j}^{r:a} = \begin{cases} \sqrt{\frac{C_H^{r:a}}{H_i Z^a}} = \frac{1}{H_i} \sqrt{\frac{P_r^a}{Z^a}}, \\ \sqrt{\frac{C_E^{r:a} Z^a}{E_i}} = \frac{1}{E_i} \sqrt{P_r^a Z^a}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_r^a 为接收天线接收的功率, H_i 和 E_i 分别为接收探头监测的磁场和电场强度, Z^a 为接收天线的阻抗.

(2) 孔缝耦合的转移函数 $T_{k,h:i,j}^r$

对于转移函数 $T_{k,h:i,j}^r$, 忽略无屏蔽体时入射场到耦合场的传输损耗, 通过测试屏蔽效能 SE 对其进行验证, 测试配置如图6所示. 选取能够反映射电望远镜接收机典型结构特征的屏蔽机箱, 针对不同测试频段采用合适的发射天线发射信号, 将球形探头和环形探头放置于屏蔽体内正对孔缝处, 分别测量无屏蔽体时的场

图5 场-天线耦合测试配置图

Figure 5 Configuration of field to antenna coupling test.

图6 孔缝耦合测试配置图

Figure 6 Configuration of aperture coupling test.

强, 以及有屏蔽体时屏蔽体内的场强, 两场强的比值即为屏蔽效能, 其与转移函数 $T_{k,h;i,j}^r$ 的关系为

$$T_{k,h;i,j}^r = \begin{cases} \frac{1}{SE_H} = \frac{H_s}{H_0}, \\ \frac{1}{SE_E} = \frac{E_s}{E_0}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, H_0 和 E_0 分别为无屏蔽体时的磁场和电场强度, H_s 和 E_s 分别为有屏蔽体时, 屏蔽体内的磁场和电场强度.

(3) 传导耦合的转移函数 $T_{k,h;i,j}^c$

对于转移函数 $T_{k,h;i,j}^c$, 通过测试插入损耗 IL 对其进行验证, 测试配置如图7所示. 选取能够模拟接收机传导链路的导线或电路, 采用合适的测试夹具, 分别测量不接入导线或电路, 直接将信号源和频谱仪相接, 以及接入导线或电路时, 频谱仪的输入功率, 两功率的比值即为插入损耗, 其与转移函数 $T_{k,h;i,j}^c$ 的关系为

$$T_{k,h;i,j}^c = IL = \frac{P_s}{P_0}, \quad (9)$$

式中, P_0 为不接入导线或电路时, 频谱仪的输入功率, P_s 为接入导线或电路时, 频谱仪的输入功率.

(4) 场线耦合的转移函数 $T_{k,h;i,j}^{r:c}$

对于转移函数 $T_{k,h;i,j}^{r:c}$, 通过测试场线耦合度 $C^{r:c}$ 对其进行验证, 测试配置如图8所示. 计算机控制信号源通过发射天线发射信号模拟外部干扰, 同样, 选取能够模拟接收机传导链路的导线或电路, 通过合适的测试夹具接入频谱仪, 同时, 采用接收探头监测距导线或电路 d 距离处的场强, 导线或电路的耦合功率与接收探头监测场强的比值, 即为场线耦合度 $C^{r:c}$, 其与转移函数 $T_{k,h;i,j}^{r:c}$ 的关系为

图7 传导耦合测试配置图

Figure 7 Configuration of conduction coupling test.

图8 场线耦合测试配置图

Figure 8 Configuration of field to wire coupling test.

$$T_{k,h;i,j}^{r:c} = \begin{cases} \sqrt{\frac{C_H^{r:c}}{H_t Z^c}} = \frac{1}{H_t} \sqrt{\frac{P_r^c}{Z^c}}, \\ \sqrt{\frac{C_E^{r:c} Z^c}{E_t}} = \frac{1}{E_t} \sqrt{P_r^c Z^c}, \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_r^c 为导线或电路的耦合功率, H_t 和 E_t 分别为接收探头监测的磁场和电场强度, Z^c 为导线或电路的阻抗.

通过对上述几种模型进行实验, 并与转移函数的计算结果进行比较, 从而验证所建立的电磁兼容模型以及电磁拓扑理论.

5 结论

本文对射电望远镜系统台址内外的电磁干扰源进行了分析, 基于电磁拓扑理论, 对射电望远镜系统进行了电磁兼容建模, 建立了干扰耦合矩阵, 获得了系统关键器件或设备的响应, 为射电望远镜的电磁兼容设计提供了理论依据. 这种方法的基础是建立在对简单的电磁干扰问题、各类干扰源及敏感设备抗扰度的定量描述和试验验证之上.

参考文献

- 1 Xu X. Harmful interference in radioastronomy observations (in Chinese). *Prog Astron*, 1986, 4: 227–233 [徐祥. 影响射电天文观测的有害干扰. *天文学进展*, 1986, 4: 227–233]
- 2 Waterman P. Conducting radio astronomy in the EMC environment. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1984, EMC-26: 29–33
- 3 Peng T, Feng B Q, Wan J, et al. Interference to radio astronomy observatory service and protection of electromagnetic environment (I) (in Chinese). *Chin Radio*, 2007, 3: 40–44 [彭涛, 冯宝强, 万峻, 等. 射电天文业务干扰评价和电磁环境保护探讨(上). *中国无线电*, 2007, 3: 40–44]
- 4 Peng T, Feng B Q, Wan J, et al. Interference to radio astronomy observatory service and protection of electromagnetic environment (II) (in Chinese). *Chin Radio*, 2007, 4: 48–52 [彭涛, 冯宝强, 万峻, 等. 射电天文业务干扰评价和电磁环境保护探讨(下). *中国无线电*, 2007, 4: 48–52]
- 5 Ambrosini R, Bolli P, Bortolotti C, et al. Radio frequency self-interference from a data processing centre at a radio telescope site. *Exp Astron*, 2010, 27: 121–130
- 6 Bolli P, Gaudiomonte F, Ambrosini R, et al. The mobile laboratory for radio-frequency interference monitoring at the sardinia radio telescope. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2013, 55: 19–24
- 7 Li J B, Peng B, Sun J M, et al. Measurement method and analysis of electromagnetic environment in radio astronomic observatories (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2009, 24: 523–528 [李建斌, 彭勃, 孙建民, 等. 射电天文站电磁环境测量方法及分析. *电波科学学报*, 2009, 24: 523–528]
- 8 Li J B, Peng B, Liu D L. Site spectrum monitoring of electromagnetic environment for large radio telescopes (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2015, 30: 378–382 [李建斌, 彭勃, 刘东亮. 大型射电望远镜电磁环境频谱监测. *电波科学学报*, 2015, 30: 378–382]
- 9 Zhan D Z, Jin C J, Wu Z Z. Radio frequency interference to a radio telescope from a high-voltage power line (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2013, 10: 91–98 [詹德志, 金乘进, 吴忠祖. 高压输电线对射电望远镜的电磁干扰. *天文研究与技术*, 2013, 10: 91–98]
- 10 Zhang J F. EMC Design of Radio Telescope Antenna Main Reflector Active Adjustment System (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 [张锦锋. 射电望远镜天线主反射面主动调整系统的电磁兼容设计. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2012]
- 11 Parmantier J P. Numerical coupling models for complex systems and results. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2004, 46: 359–367
- 12 Li Y. Coupling Analysis and Computation of Rectangular Cavity with Apertures Based on Electromagnetic Topology Method (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2012 [李颖. 基于电磁拓扑的矩形腔孔缝耦合分析与计算. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2012]
- 13 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 783–794]
- 14 Casse J L, Woestenburg E E M, Visser J J. Multifrequency cryogenically cooled front-end receivers for the westerbork synthesis radio telescope. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1982, 30: 201–209

On the interference characteristics of fully steerable radio telescope

QIU Yang¹, XU QingLin^{1*}, TIAN Jin¹ & LIU Qi²

¹ *School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;*

² *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*

Fully steerable radio telescope is a complex system including actuators, antenna high power driving subsystem, high sensitive receiving terminal, data transmission and control subsystem. Because of the great difference in electrical level between strong electricity subsystem and weak electricity subsystem, the very weak celestial RF signals which need to be received will be interfered by the interactive electromagnetic interferences which exist in the system, the electromagnetic emission signals generated by devices in operation and the different electromagnetic signals of environment. The electromagnetic compatibility (EMC) of radio telescopes has become the key technology of the development of and the usage of systems. In this paper, the research progresses of EMC technology of the radio telescope are summarized. From the view of system engineering, the electromagnetic interference characteristics of radio telescope system are studied, the critical control factors are determined, and an interference coupling matrix is established. Based on the electromagnetic topology theory, the EMC modeling approach to radio telescope system is presented, which provides the theoretical bases for the EMC technology researches in radio telescopes.

radio telescope, EMC, interference characteristics, electromagnetic topology

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

doi: [10.1360/SSPMA2016-00306](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00306)