



台址内部设备瞬态干扰引起的110 m射电望远镜近场耦合计算方法

彭涣欢¹, 邹棋¹, 肖培¹, 刘萌瑶¹, 蔡明辉², 刘奇², 李高升^{1*}

1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082;

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: gaosheng7070@vip.163.com

收稿日期: 2023-07-05; 接受日期: 2023-12-14; 网络出版日期: 2023-12-26

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203503)和新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号: 2021D01E07)资助项目

摘要 射电望远镜具有高灵敏度和高分辨率的特性, 台址内部微弱的电磁干扰会影响其工作状态, 增加天文观测难度. 本文针对110 m射电望远镜台址内部瞬态辐射干扰引起的近场耦合问题, 提出了一种基于偶极子近似和时域物理光学的混合计算方法. 首先对台址内部设备瞬态干扰源进行分析, 利用偶极子天线理论对近场辐射源进行分析与建模, 结合时域物理光学法分析并计算了台址内部干扰源对射电望远镜天线口径面近场的电磁耦合特性, 最后结合Feko全波算法验证本文方法的有效性. 本文方法为110 m射电望远镜台址内部辐射干扰对天文观测的影响分析提供了理论支撑.

关键词 射电望远镜, 瞬态干扰, 近场耦合, 物理光学法

PACS: 95.55.Jz, 95.75.Wx, 41.20.Jb, 84.40.Ba

1 引言

射电望远镜作为一种全新的天文观测方式, 具有不受气象条件影响的特点且全天候工作的能力被广泛运用于天文探测领域. 射电望远镜主要由天线系统、主动面促动器机构、信号控制系统、高灵敏度接收机以及数据采集系统组成, 其中天线系统一般采用大口径抛物面. 在宇宙中, 无线电波信号是微弱的, 例如, 当“旅行者1号”向地球回传探测到的信息数据时, 其发射的功率为21.3 W, 而地球上所接收到的信号功率仅

为 3.2×10^{-16} W^[1], 因此, 对射电望远镜的灵敏度提出了较高的要求. 另一方面, 天文观测不仅需要接收天体辐射信号, 还要能够清晰地分辨天体的细节. 因此, 射电望远镜还需具备高分辨率. 考虑到射电望远镜接收到的信号强度与口径的平方成正比, 为了最大限度地捕捉微弱的天体辐射信号并准确地确定天体的位置, 射电望远镜的口径应尽可能地增大.

由于射电望远镜是一个由多个子系统组成的复杂系统, 涵盖了天线、驱动和数据处理等多个子系统. 这些子系统在工作电平上存在显著的差异, 不仅彼此之

引用格式: 彭涣欢, 邹棋, 肖培, 等. 台址内部设备瞬态干扰引起的110 m射电望远镜近场耦合计算方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219510
Peng H H, Zou Q, Xiao P, et al. Calculation method of near-field coupling of a 110-m radio telescope caused by transient radiation interference of equipment within the observatory site (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219510, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0224](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0224)

间存在电磁干扰, 而且各个子系统在运行时产生的电磁辐射信号以及场站环境中的其他电磁信号都可能对微弱射电天文信号的接收产生干扰^[2]. 这些瞬态干扰通过近场耦合到射电望远镜系统中, 将显著降低其射电观测性能, 使后续的数据处理和射电天文研究变得异常困难. 因此, 为确保系统正常运行, 对射电望远镜系统的瞬态电磁干扰进行计算分析显得至关重要.

早在19世纪, 国外学者已经探究出无线电干扰的存在. Waterman^[3]探讨了影响射电观测的各种干扰源; 基于Waterman的研究, Wilson等人^[4]进一步分析了影响射电望远镜观测能力的主要干扰源是包括移动通讯基站在内的无线电通信系统. 随后, Ambrosini等人^[5]针对台址内的计算机集群产生的射频干扰进行了测量, 通过固定检测的方式, 给出了干扰量级; 此外, Bolli等人^[6]通过配备了专业设备的移动监测站, 对台址附近的电磁干扰进行检测与分析. 在射电天文台建设的过程中, 国外采用设立电磁波宁静区来减弱电磁干扰. 例如, 在美国绿岸天文台, 设立了3.4万km²电磁波宁静区用于保护射电望远镜周边的电磁环境.

国内, 关于无线电对射电望远镜的干扰也展开了相应的研究. 李建斌等人^[7]研究了国内在建和预研阶段射电望远镜的测试过程, 并且对我国射电望远镜的候选台址进行了电磁环境测试, 结合数据分析与信息处理方法, 优选出适合建立大型射电望远镜的台址. 然而, 射电望远镜系统结构复杂, 体积庞大, 其电磁兼容测试难度大, 通常需要消耗大量的资源进行测试. 若能够直接通过计算电磁学的方式, 预测和分析台址内部射电望远镜所受到的电磁干扰量级和分布区域, 将有助于发现已经存在和潜在的电磁干扰并及时采取措施来消除和避免这些干扰^[8].

为了预测在射电望远镜台址内外可能存在的电磁信号干扰, 刘奇等人^[9]针对自由空间衰减和天线方向图特性等因素对台址干扰的影响, 通过理论分析与数值计算, 分析了口径面馈源的干扰电平限值, 评估了电子设备电磁辐射对射电望远镜的潜在影响. Xu等人^[10]通过分析基站通讯设备电磁辐射影响, 提出了一种基于动态故障树的电磁兼容故障诊断分析方法. 张锦锋等人^[11]深入研究了主反射面调控子系统的电磁干扰耦合途径以及抑制方法, 并结合电磁干扰理论进行了预测和防护, 实现了系统的电磁兼容. 王振坤等人^[12]利用物理光学法计算了高功率微波在建筑物内

的耦合场分布, 通过对计算的透射场和反射场进行矢量相加, 得到建筑物内部耦合场. 詹德志等人^[13]通过建立高压输电线的物理模型, 分析其电晕放电的辐射机理, 揭示了辐射功率随距离变化的衰减规律. 上述工作大多从频域、功率或者从系统级的角度对射电望远镜进行电磁兼容分析, 都未对大口径抛物面的反射结构进行精确分析. 大口径抛物面反射结构作为接收信号的重要部件, 其工作状态直接影响整个系统的工作性能. 因此, 对抛物面进行近场耦合分析具有重要意义.

对于射电望远镜近场耦合分析和计算, 通常有两类电磁数值计算方法, 分别是全波算法和高频近似算法. 采用全波算法分析抛物面的电磁瞬态干扰, 虽然具有较高的准确度, 但是需要消耗大量的计算资源, 计算时间长. 如果采用高频近似算法来分析计算射电望远镜口径面的电磁干扰问题, 可以显著缩短计算时间, 大大提高工作效率^[1,14]. 本文提出了一种基于时域物理光学法的射电望远镜系统反射面近场电磁干扰分析方法, 为口径面处的瞬态电磁干扰分析提出了一种新思路.

2 近场耦合计算原理

2.1 台址内部干扰源分析

对于射电望远镜系统的电磁干扰来说, 根据位置不同, 可以将干扰分为三类: 台址内部干扰、台址外近距离干扰和台址外远距离干扰. 如图1所示, 奇台观测站位于奇台县半截沟镇石河子村, 地势开阔. 本文主要针对台址内部设备的瞬态干扰展开讨论与研究. 如图2所示, 位于台址周围的电源子系统、计算机子系统、时频子系统和终端子系统等在工作时将会对射电望远镜系统造成电磁干扰, 产生的干扰可能由于子系统位置的不同, 具有不同的干扰入射角, 图2仅展示其中一个子系统对射电望远镜系统产生的电磁干扰.

对于不同的子系统, 产生的电磁干扰情况也不一样. 计算机系统通过数字脉冲信号来处理、传送信息. 其主要由脉冲数字电路和开关电路构成, 主要包含了数字脉冲电路带来的宽带高斯噪声和开关电路产生的窄带干扰. 此外, 在计算机电路中, 分布电容和分布电感在特定条件下也可能发生谐振, 产生寄生振荡. 这些高斯噪声、基波、谐波和寄生谐振都会对射电望远镜

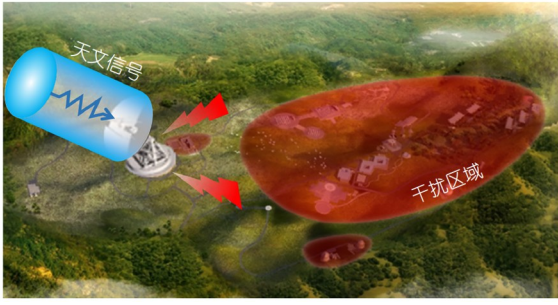


图 1 奇台观测站周边环境图

Figure 1 Qitai observation station surrounding environment map.

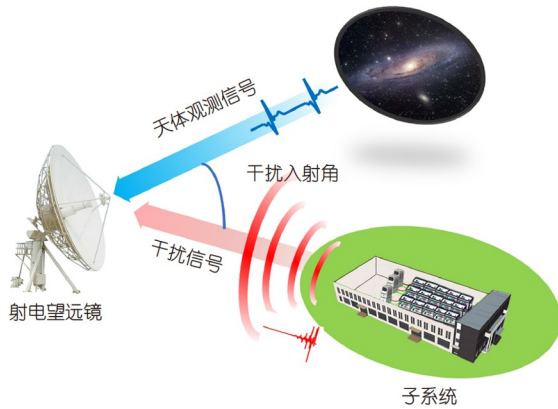


图 2 电磁干扰模型

Figure 2 Electromagnetic interference model.

产生不同程度的电磁干扰。

在电源子系统中, 开关电源主要由高频变压器和开关管组成。当开关管导通时, 子系统中的电流(电压)发生突变, 产生瞬态高频干扰, 在频域中表现为宽带特性; 相反, 当开关管关断时, 由于电流突变, 变压器漏感所产生的反电势将会叠加在关断电压上, 形成关断电压尖峰, 产生电磁干扰^[13]。

时频子系统主要是为各分系统提供稳定、高频高精度的时间频率基准。一般来说, 时钟电路产生的信号都是周期脉冲信号, 主要由基频和各次谐波频率组成, 通常能量集中分布在有限频段内, 因此也会产生谐波干扰。

2.2 基于偶极子天线理论的近场辐射源建模

由于各个子系统主要以电缆连接, 故子系统产生的辐射干扰由连接电缆辐射出去, 进而对射电望远镜

系统产生电磁干扰。

本节基于偶极子天线理论的偶极子近似法将连接线缆等效为辐射源, 分析其产生的辐射干扰^[15-18]。首先, 将线缆分割成许多无限小的单元, 每个单元都可以看作为一个偶极子, 如图3所示。沿着 z 轴方向的微小长度 dz 上的电流元可看作为一个偶极子, 其每段的长度 dz 都远小于波长 λ , 它的中点位于直角坐标系的原点^[19]。在电磁场理论中, 一段长度为 $l \leq \lambda$ (波长), 导线直径 $d \leq \lambda$, 并有高频电流流过的导线, 由于其长度 l 远小于 λ , 可以认为导线上的电流大小和相位均相同, 电流分布为 $Ie^{j\omega t}$ ^[4, 19]。位于坐标轴上原点处的电偶极子 $I dz$ 在空间产生的辐射场在直角坐标系下的3个分量为

$$\begin{cases} dE_x = -j \frac{I(z) dz}{4\pi\omega\epsilon} \frac{e^{-jkr}}{r^2} \sin\theta \cos\theta \cos\varphi \left[3jk - rk^2 + \frac{3}{r} \right] e_x, \\ dE_y = -j \frac{I(z) dz}{4\pi\omega\epsilon} \frac{e^{-jkr}}{r^2} \sin\theta \cos\theta \cos\varphi \left[3jk - rk^2 + \frac{3}{r} \right] e_y, \\ dE_z = j \frac{I(z) dz}{4\pi\omega\epsilon} \frac{e^{-jkr}}{r^2} e_z \cdot \left[\left(jk - rk^2 + \frac{1}{r} \right) \sin^2\theta - e_z \cos^2\theta \cdot \left(2jk + \frac{2}{r} \right) \right], \end{cases} \quad (1)$$

式中, $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 为相位常数, ω 为角频率; $\epsilon = 1/(36\pi) \times 10^9$ F/m为自由空间的介电常数; $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ A/m为自由空间的磁导率; r 为电偶极子到观察点P的距离; θ 为AP连线与 z 轴的夹角; φ 为AP所在平面与 x 轴的夹角, 其中:

$$r = \sqrt{(x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2 + (z_p - z_a)^2}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sin\theta = \frac{\sqrt{r^2 - z_p^2}}{r}; \cos\theta = \frac{z_p - z_a}{r}, \\ \sin\varphi = \frac{y_p - y_a}{\sqrt{r^2 - z_p^2}}; \cos\varphi = \frac{x_p - x_a}{\sqrt{r^2 - z_p^2}}. \end{cases} \quad (3)$$

位于 z 轴的电流元在观察点P产生的场强为

$$E_{\text{total}} = e_x \int_0^1 dE_x + e_y \int_0^1 dE_y + e_z \int_0^1 dE_z. \quad (4)$$

式(4)为 $I dz$ 的电缆产生的电场强度计算公式, 但是在实际工作中, 如图4所示, 连接线缆通常不止一根, 并且随着距离的增加, 会出现一定程度的弯曲。

对于多线缆模型, 可以通过电流方向的不同将线缆划分为不同的段。把每段上的电流元分解为 x, y, z 三

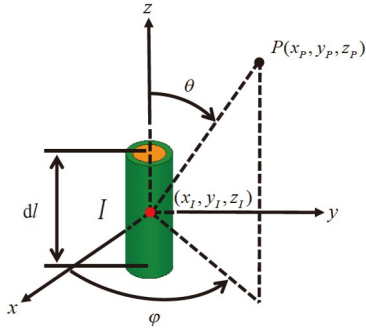


图 3 偶极子模型

Figure 3 The dipole model.

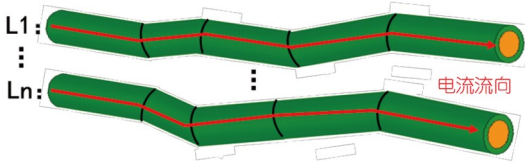


图 4 多线缆模型

Figure 4 Multi-cable model.

个方向的场分量, 分别计算三个方向上的电流元产生的辐射场. 每一根线缆的辐射场由划分的各个分量偶极子叠加而成, 观测点处产生的辐射场为每根线缆的矢量叠加^[19-26], 其具体的计算公式如下所示:

$$E_i = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^N E_{xk}\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N E_{yk}\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N E_{zk}\right)^2}, \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_k. \quad (6)$$

在时域高频近似算法研究领域内, 常采用调制高斯脉冲信号作为信号源, 因为时域计算需要分析宽带信号, 而高斯脉冲信号具有明显的宽带特征, 采用调制高斯脉冲可以使得信号源的频带范围在中心频率 f_0 左右. 调制高斯脉冲信号可以很好地模拟宽带信号源, 在中心频点上信号强度最大, 信号强度从中心频率往两侧逐渐下降, 直至到带宽外为0, 本文中所加载的脉冲信号为高斯脉冲信号, 如图5所示.

2.3 线缆辐射分析

基于上一小节的理论分析, 对线缆辐射情况进行算法建模以及仿真建模. 本文拟定子系统的空间大小

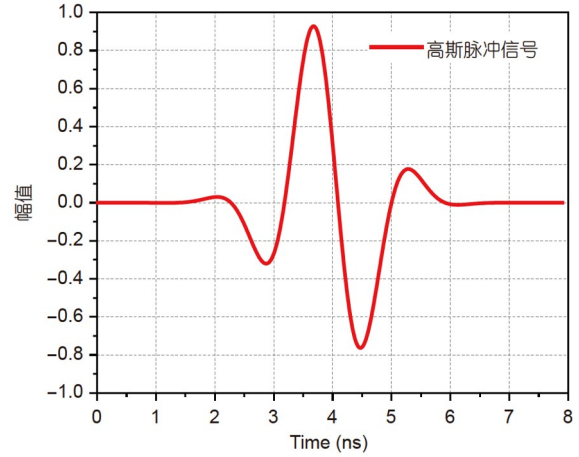


图 5 高斯脉冲信号

Figure 5 Gaussian pulse signal.

为 $25 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 在Feko软件中若要求解该空间下的电磁兼容问题, 需要求解的网格数目为76万个, 所耗费的计算资源较大, 计算时间较长.

因此, 为了验证本文采用的偶极子理论模型的有效性, 对拟定的子系统空间尺寸大小进行了等比例缩小, 缩小比例为1:10, 即空间大小设置为 $2.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$. 对于单线缆模型, 将线缆放置在 $(1.25 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 处, 观测点位于空间中心. 电场分量的计算对比图如图6所示, 本文选取了400–600 MHz的频率范围进行对比. 从图中可以看到, 本文提出的解析计算方法, 能够有效计算出频段内的谐振情况, 并且能够计算出不同谐振频率下的电场分量, 通过与Feko软件计算的结果进行对比, 除了在谐振频率峰值, 以及部分频点电场值略有差异外, 其余频点均保持良好的一致性.

对于多线缆的情况, 本小节计算了两根线缆平行放置时产生的辐射干扰情况, 将两根线缆平行放置在 $(1.25 \text{ m}, 0.25 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 和 $(1.25 \text{ m}, 0.35 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 处, 房间和观测点设置同上, 线缆垂直于 xoy 面, 线缆中心距离地面 0.1 m , 线缆间距为 0.1 m . 图7为观测点处接收到的辐射干扰情况对比图. 从图中可以看到, 使用传输线模型和使用Feko模型得到的计算结果差别很小, 两种方法得到的计算结果在400–600 MHz的范围内吻合良好. 表1为缩比模型计算资源与计算时间对比, 相比于Feko全波算法, 本文的算法在计算配置低于Feko全波算法计算配置时, 仍可以有效缩短计算时间.

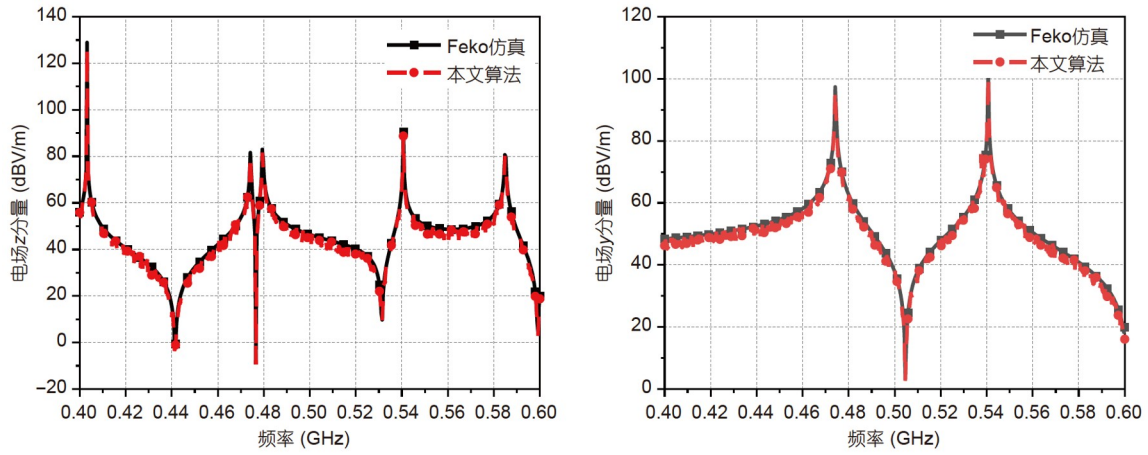


图 6 缩比模型下观测点电场y, z分量结果对比图

Figure 6 Comparison of y and z components of the electric field at the observation point under the scaled model.

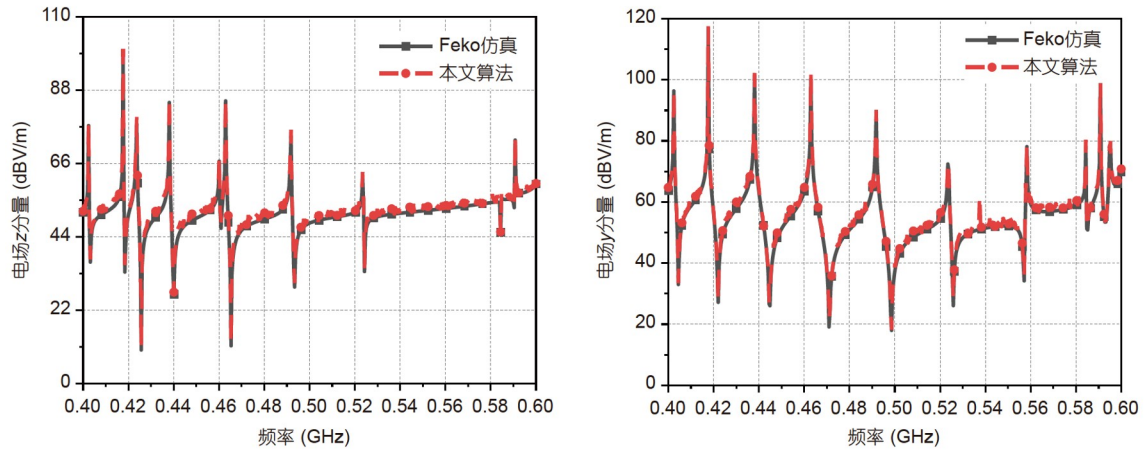


图 7 多线缆辐射观测点电场y, z分量结果对比图

Figure 7 Comparison of y and z components of electric field at multiple cable radiation observation points.

2.4 基于时域物理光学的近场耦合计算

前一节探究了台址周边干扰源对于周边环境产生的辐射干扰情况. 本节采用时域物理光学法对射电望远镜系统中的近场耦合进行算法建模并通过全波算法软件进行验证对比.

首先, 通过建立偶极子理论分析模型, 等效各个子系统之间的线缆产生的辐射干扰, 通过设定固定的参考点, 计算得到位于参考点处在x, y, z轴方向上的电场幅值. 由于各子系统距离射电望远镜口径面的距离已经满足辐射远区条件, 因此到达口径面处的电磁波可以等效为一个平面波, 而平面波的相位幅值处处相等,

因此仅需要计算参考点处的电场幅值, 即可作为输入口径面的激励源幅值大小. 在各个子系统中, 可能会产生不同的干扰信号, 干扰信号不同, 频段也不一样, 对射电望远镜口径面产生的干扰情况也不一样. 为了能够与Feko软件进行有效对比, 我们在计算口径面处的散射场时, 做了归一化处理, 归一化处理的示意图如图8所示.

$$E_{sn}(\omega) = \frac{E_s(\omega)}{E_f(\omega)}. \quad (7)$$

时域物理光学法具有计算速度快、所需内存小、实现简单的特点, 被广泛应用于分析目标的瞬态散射

表 1 缩比模型计算资源与计算时间对比

Table 1 Comparison of computing resources and computing time in scaled model

模型	算法	计算配置	计算时间 (s)
单线缆模型	Feko	RAM: 128 GBe CPU: W-2145@3.7 GHz	2110
	本文	RAM: 12 GB CPU: i5-8500@3 GHz	10
多线缆模型	Feko	RAM: 128 GBe CPU: W-2145@3.7 GHz	4320
	本文	RAM: 12 GB CPU: i5-8500@3 GHz	15

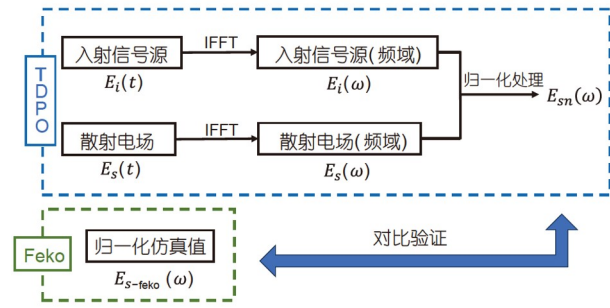


图 8 归一化处理原理图

Figure 8 Normalized processing schematic diagram.

问题. 该方法是通过目标表面场分布的特殊形式近似假设来确定目标散射场的近似方法^[27-33].

假设几何照亮的一侧上每一点的表面散射近似为其无限大切平面情形下该点的散射, 而在目标的阴影部分表面场为零. 入射电场和磁场分别为 $\mathbf{E}_i$ 和 $\mathbf{H}_i$, 照明区的电场和磁场的切向分量可以写为如下形式:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E} = & (1 - R_{\text{TM}})(\mathbf{E}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\text{TM}})(\hat{k}_i \cdot \hat{\mathbf{n}})\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \\ & + (1 + R_{\text{TE}})(\mathbf{E}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}})(\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \cdot \hat{\mathbf{n}}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H} = & (1 - R_{\text{TE}})(\mathbf{H}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\text{TM}})(\hat{k}_i \cdot \hat{\mathbf{n}})\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \\ & + (1 + R_{\text{TM}})(\mathbf{H}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}})(\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \cdot \hat{\mathbf{n}}), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, R_{TM} 和 $\hat{\mathbf{e}}_{\text{TM}}$ 分别为TM波的反射系数和归一化方向, R_{TE} 和 $\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}}$ 分别为TE波的反射系数和归一化方向. 对于理想导体目标, 上式可以简化为

$$\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H} = 2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}_i, \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E} = 0. \quad (11)$$

令 $\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}$, $\mathbf{M} = \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E}$, 则 $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别可以看成是

积分面上的等效电流和磁流, 积分区域外的电磁场为等效电磁流的辐射场. 对于导体目标有, $\mathbf{M} = \mathbf{0}$, 目标散射近场的时域电磁场面积分方程可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s(\mathbf{r}, t) = & \frac{1}{4\pi} \int_s \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left[\frac{R}{c} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{R}\mathbf{R} - \mathbf{I}) + \left(\mathbf{J}^{(-1)} + \frac{c}{R} \mathbf{J}^{(-2)} \right) \cdot (3\mathbf{R}\mathbf{R} - \mathbf{I}) \right] \\ & \cdot \frac{\delta'(t - R/c)}{R^2} dS', \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_s(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left[\left(\frac{R}{c} \mathbf{J} + \mathbf{J}^{(-1)} \right) \cdot \hat{\mathbf{R}} \right] \cdot \frac{\delta'(t - R/c)}{R^2} dS', \quad (13)$$

其中, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, $c = 1 / \sqrt{\mu\epsilon}$, $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R} / R$. $\mathbf{J}^{(-1)}$ 和 $\mathbf{J}^{(-2)}$ 为 $\mathbf{J}$ 的一阶和二阶积分, δ 为冲击函数.

算法流程图如图9所示, 首先, 利用加载高斯脉冲信号计算得到的多线缆辐射干扰源数据初始化干扰源, 并且确定干扰源的来波方向. 通过计算入射波到面元的最小时间作为开始时间, 设置时间终点, 计算总时间步. 其次, 进行判断选择, 判断每一个面元是否被照亮同时计算其散射场. 将当前时间步内计算的所有散射场进行叠加后, 进入下一时间步, 直至循环结束, 最后叠加所有散射场, 输出计算结果.

3 数值计算验证与对比

3.1 110 m射电望远镜模型数值验证

第二节分析了台址内部干扰情况, 并且基于偶极子天线理论推导了系统连接线缆的辐射干扰情况, 在此基础上, 结合台址实际的物理尺寸, 分析射电望远镜口径面与电磁干扰源之间的耦合效应, 并且结合Feko软件进行全波仿真, 对比数值计算与仿真结果.

(1) Feko软件的全波仿真

图10为理论模型示意图, 反射面的口径大小为110 m, 观测点位于焦点处, 干扰源由子系统1产生, 其相对口径面的干扰入射角度为 0° , 干扰源的初始化设置由前文提到的多线缆模型辐射干扰源计算得到, 导入Feko软件, 进行电磁散射特性仿真.

(2) 基于时域物理光学法的近场耦合计算

随着频率的变换, 会周期性出现辐射干扰峰值. 本文选取的观测频段为450~550 MHz. 基于时域物理光学法的算法求解的近场电场值如图11所示, 从图可以看出, 干扰源从 0° 入射时, 焦点处的电场值会随着频

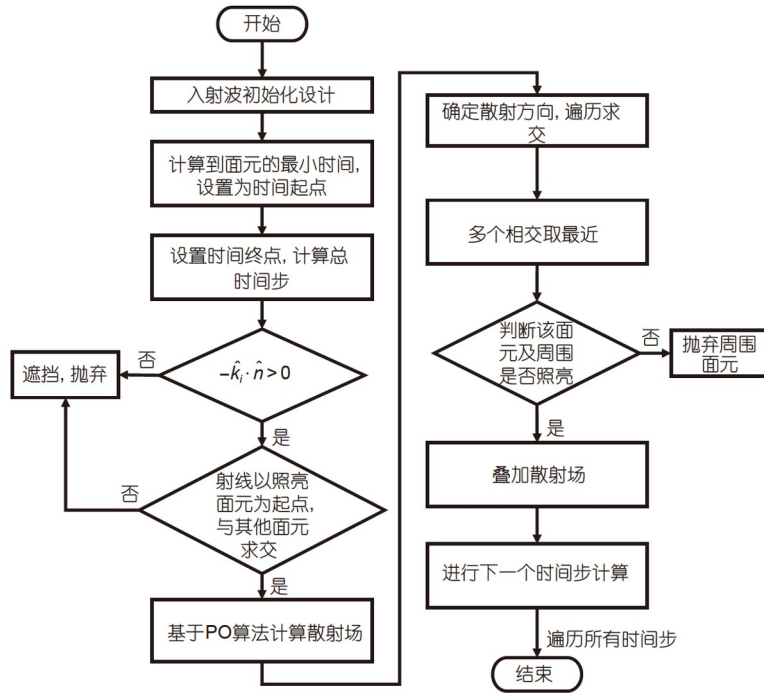


图 9 算法流程图

Figure 9 Algorithm flow chart.

率上升而升高, 两者呈线性分布. 这是由于当干扰源辐射垂直口径面入射时, 经过口径面反射的电磁波汇聚在焦点处, 电场能量值相对其他入射角度最大. 本文计算的结果图和Feko全波仿真结果图基本吻合, 验证了本文算法的有效性. 在计算资源维度上, 本文采用和Feko全波仿真相同的网格数量, 本文计算时间为2034 s, Feko软件计算时间为5032 s, 计算时间减少59.58%, 具体时间对比及网格数量情况可见表2.

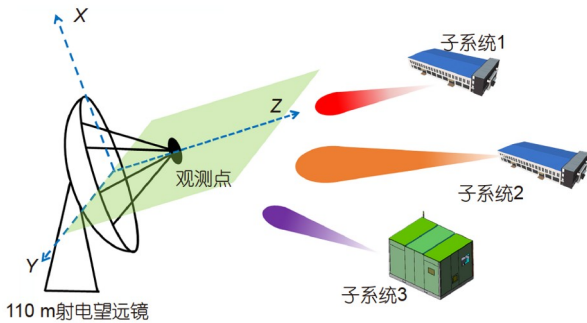


图 10 理论模型示意图

Figure 10 Theoretical model diagram.

3.2 近场干扰源特性影响分析

3.2.1 入射角度

考虑到台址周围的地理位置情况, 各个子系统可能会分布在射电望远镜系统的周围. 这就会导致在各子系统工作的情况下, 对射电望远镜系统产生不同方向的干扰, 本节主要探究干扰源随着口面的旋转, 即

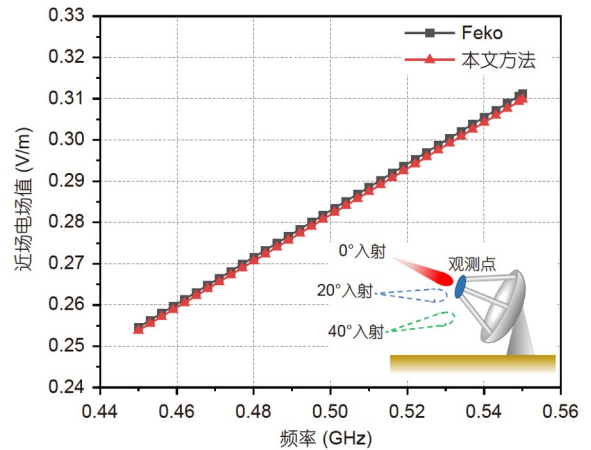


图 11 0°入射结果对比图

Figure 11 Comparison of 0° incidence results.

表 2 不同入射角度入射计算资源与计算时间对比

Table 2 Comparison of incidence computing resources and computing time at different incidence angles

入射角度	算法	网格数量(个)	计算时间 (s)
0°	Feko	142.1万	5032
	本文		2034
10°	Feko	142.1万	5500
	本文		2108
20°	Feko	142.1万	5832
	本文		2120
30°	Feko	142.1万	5765
	本文		2028
40°	Feko	142.1万	5455
	本文		2200

在不同角度下入射时, 对射电望远镜产生的干扰影响. 考虑到实际旋转角度以及算法的结构, 选择10°,

20°, 30°和40°这四个角度来进行分析计算. 图12为干扰信号从不同角度入射时, 本文算法和Feko全波仿真算法计算结果对比图. 随着入射角度的增加, 位于焦点处的观测点接收到的干扰信号会逐渐降低, 并且出现振荡. 这是由于干扰信号斜入射时, 部分反射的电磁干扰信号将不再汇聚于焦点处, 即观测点处, 电场能量将会减小.

此外, 由于反射角度及波程差的不同, 干扰信号会随着频率的变化出现不同程度的抵消, 从而形成振荡. 干扰信号振荡频率会随着入射角的增加而加剧. 在这4个角度下, 本文提出的算法与全波仿真结果基本吻合. 在计算时间方面, 本文提出的算法相较于全波仿真分别减少了61.67%, 63.65%, 64.82%和59.68%.

3.2.2 多源

由于射电望远镜系统是一个由多个子系统组合而

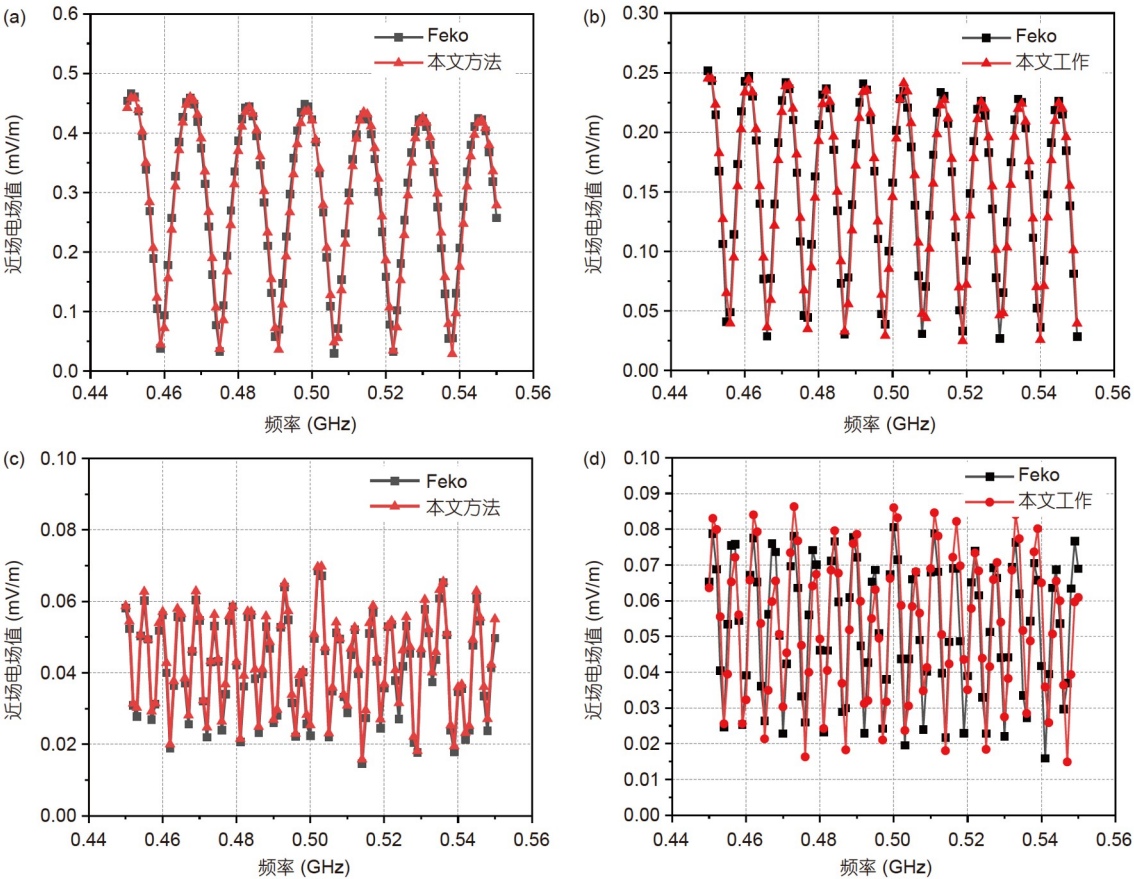


图 12 不同角度入射结果对比图. (a) 10°入射; (b) 20°入射; (c) 30°入射; (d) 40°入射
Figure 12 Comparison of incident results at different angles. (a) 10° incidence; (b) 20° incidence; (c) 30° incidence; (d) 40° incidence.

成的复杂系统, 为了保障天文观测工作的有效开展, 通常是多个子系统联合运行. 然而每一个子系统在工作时都可能会成为射电望远镜系统的干扰源, 因此, 在实际的分析中, 还需要考虑多个干扰源的情况. 由于前面章节已经讨论了不同角度下的干扰情况, 对于多源的情况则需考虑干扰信号矢量叠加以及不同位置下的波程差. 具体计算公式如下.

假定有两个来自不同方向不同位置的干扰源, 假设其电场分别为

$$\mathbf{E}_1 = E_{1m} \sin(\omega_1 t - \beta_1 x_1 + \varphi_1) \mathbf{j}, \quad (14)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_{2m} \sin(\omega_2 t - \beta_2 x_2 + \varphi_2) \mathbf{j}. \quad (15)$$

磁场可以表示为

$$\mathbf{H}_1 = \frac{E_{1m}}{Z_0} \sin(\omega_1 t - \beta_1 x_1 + \varphi_1) \mathbf{k}, \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_2 = \frac{E_{2m}}{Z_0} \sin(\omega_2 t - \beta_2 x_2 + \varphi_2) \mathbf{k}, \quad (17)$$

其中, $\beta_1 = \frac{\omega_1}{v}$, $\beta_2 = \frac{\omega_2}{v}$, Z_0 为空间波阻抗, 总的平均辐射功率密度为

$$S_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dt, \quad (18)$$

式中, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为两个干扰源的矢量叠加. 从上式可以得出, 在不考虑损耗的情况下, 针对多个干扰源的情况下, 通过对每一个干扰源进行求解, 再进行矢量叠加, 即可得到多个干扰源干扰下射电望远镜系统口径面处的散射情况.

4 讨论与结论

本文围绕 110 m 射电望远镜口径面瞬态电磁干扰分析的问题, 依据射电望远镜系统的基本组成信息及工作特性, 结合周边地理位置信息, 对其主要干扰源进行分析; 基于偶极子天线理论分析干扰源的辐射特性, 并计算在工作情况下, 周边子系统辐射干扰信号的幅值大小; 通过时域物理光学法对射电望远镜系统反射面天线的近场瞬态干扰进行求解分析, 讨论了不同子系统在不同角度下对射电望远镜系统产生的电磁干扰情况; 同时也给出了多个子系统同时工作下, 反射面观测点处电磁干扰计算方法; 此外, 通过 Feko 软件进行全波仿真, 验证了基于时域物理光学法的近场电磁耦合算法的计算流程以及算法的可行性, 具有一定工程应用价值.

参考文献

- Xu Q L. Research on Electromagnetic Interference Coupling Analysis Method for Radio Telescopes Based on Electromagnetic Topology (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xidian University, 2019. 1–15 [许清琳. 基于电磁拓扑的射电望远镜电磁干扰耦合分析方法研究. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2019. 1–15]
- Liu Y, Liu Q. A prediction method for electromagnetic interference of large aperture radio telescope. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 099514 [刘晔, 刘奇. 大口径射电望远镜台址电磁干扰预测方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099514]
- Waterman P J. Conducting radio astronomy in the EMC environment. *IEEE Trans Elec Compa*, 1984, 26: 29–33
- Wilson C, Storey M, Tzioumis T. Measures for control of EMI and RFI at the Murchison Radioastronomy Observatory. In: *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Melbourne, 2013. 1–4
- 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
- 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
- Li J B, Peng B, Liu D L. Electromagnetic environmental spectrum monitoring with large radio telescopes (in Chinese). *Chin J Radio Waves*, 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]
- 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 [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, 44: 059511]
- Liu Q, Chen M Z, Li Y, et al. An evaluation for electromagnetic radiation of electronic devices of telescope (in Chinese). *Astro Res Technol*, 2015, 12: 292–298 [刘奇, 陈卯燕, 李颖, 等. 射电天文台站电子设备电磁辐射评估. 天文研究与技术, 2015, 12: 292–298]
- Xu Q L, Qiu Y X, Tian J, et al. Interference coupling analysis based on a hybrid method: Application to a radio telescope system. *Res Astron*

- Astrophys, 2018, 18: 014
- 11 Zhang J F. Electromagnetic Compatibility Design of Active Adjustment System for the Main Reflecting Surface of Radio Telescope Antennas (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 [张锦峰. 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]
 - 12 Wang Z K, Gu X L, Cao R. High power microwave coupling field distribution calculation in buildings based on physical optics method (in Chinese). *Intense Laser Particle Beams*, 2019, 31: 34–41 [王振坤, 顾祥龙, 曹锐. 基于物理光学法的建筑物内高功率微波耦合场分布计算. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 34–41]
 - 13 Zhan D Z, Jin C J, Wu Z Z. Electromagnetic interference of high-voltage power lines to radio telescopes (in Chinese). *Astro 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]
 - 14 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *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]
 - 15 Wang H. Uncertainty Analysis of Electromagnetic Coupling Effects in Interconnecting Cables inside Electronic Devices (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. 15–30 [王浩. 电子设备腔内互联线缆电磁耦合效应的不确定性分析. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2022. 15–30]
 - 16 Hidayat T, Munir A, Dermawan B, et al. Radio frequency interference measurements in Indonesia. *Exp Astron*, 2014, 37: 85–108
 - 17 Yan Z. Electromagnetic Pulse Aperture and its Electromagnetic Topology Model (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 15–30 [闫哲. 电磁脉冲孔合及其电磁拓扑模型. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 15–30]
 - 18 Li H, Liu Q, Wang N, et al. Research on avoidance method of strong RFI of radio telescope in far field (in Chinese). *Astron J*, 2021, 62: 31–40 [李欢, 刘奇, 王娜, 等. 射电望远镜远场区域强干扰源规避方法研究. *天文学报*, 2021, 62: 31–40]
 - 19 Liu H B. Research on Interference Path Based on Electromagnetic Topology Theory (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2009 [刘海滨. 基于电磁拓扑理论的干扰路径研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2009]
 - 20 Xiao P. Research on Electromagnetic Interference Modeling and Calculation Methods for Interconnection Cables of Electromechanical Equipment (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. 20–30 [肖培. 机电设备互连线缆电磁干扰建模及计算方法研究. 博士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2019. 20–30]
 - 21 Zhang B X. Research on Calculation Methods for Electromagnetic Radiation of Interconnected Cables (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. 1–15 [张冰雪. 互连线缆电磁辐射计算方法研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2018. 1–15]
 - 22 Sun L. Analysis of Electromagnetic Leakage Mechanism in Interconnecting Cables and Research on Suppression Methods (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. 1–20 [孙磊. 互连线缆电磁泄漏机理分析与抑制方法研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2017. 1–20]
 - 23 Zhang Y P, Da X Y, Xie T C. Electromagnetic topology analysis model of shielding efficiency of slot box (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2014, 26: 234–239 [张亚普, 达新宇, 谢铁城. 孔缝箱体屏蔽效能电磁拓扑分析模型. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 234–239]
 - 24 Jiao J L, Wang C, Liu Y. Electromagnetic compatibility simulation technology of cable bundle (in Chinese). *J Microwaves*, 2012, 28: 57–60 [焦金龙, 王晨, 刘源. 线缆束电磁兼容仿真技术. *微波学报*, 2012, 28: 57–60]
 - 25 Guo G, Guo L, Wang R. The study on near-field scattering of a target under antenna irradiation by TDSBR method. *IEEE Access*, 2019, 7: 113476–113487
 - 26 Yan Z, He J, Sun W J, et al. The transient response of hole alignment is solved by electromagnetic topology method (in Chinese). *J Univ Elec Sci Technol*, 2023, 42: 852–856 [闫哲, 何晶, 孙婉君, 等. 应用电磁拓扑方法求解孔线合的瞬态响应. *电子科技大学学报*, 2013, 42: 852–856]
 - 27 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 289512
 - 28 Li H, Liu Q, Wang N, et al. Research on avoidance method of strong rfi of radio telescope in far field (in Chinese). *Acta Astron Sci*, 2021, 62: 31–40 [李欢, 刘奇, 王娜, 等. 射电望远镜远场区域强干扰源规避方法研究. *天文学报*, 2021, 62: 31–40]
 - 29 Cown B J, Ryan C E. Near-field scattering measurements for determining complex target RCS. *IEEE Trans AP*, 1989, 37: 576–585
 - 30 Guo G, Guo L, Wang R, et al. Time-domain near-field scattering from composite target-ocean scene illuminated by far-field antenna sources. In: 2021 13th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory. Zhuhai, 2021. 1–3
 - 31 Jia J, Rinas D, Frei S. Prediction of radiated fields from cable bundles based on current distribution measurements. In: International Symposium

on Electromagnetic Compatibility. Rome, 2012. 1–7

- 32 Tian T, Huang X J, Xu Y L, et al. A wideband energy selective surface with quasi-elliptic bandpass response and high-power microwave shielding. In: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023. 11: 1–10
- 33 Xu J, Lv Y H. Analysis of radiated emissions from multiconductor lines. In: 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, 2008. 1009–1012

Calculation method of near-field coupling of a 110-m radio telescope caused by transient radiation interference of equipment within the observatory site

PENG HuanHuan¹, ZOU Qi¹, XIAO Pei¹, LIU MengYao¹, CAI MingHui²,
LIU Qi² & LI GaoSheng^{1*}

¹ College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

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

*Corresponding author (email: gaosheng7070@vip.163.com)

Radio telescopes are renowned for their high sensitivity and resolution. However, subtle electromagnetic interference from internal sources within the observatory site can considerably disrupt their operational state, thereby aggravating the challenges associated with astronomical observations. This study addresses the issue of near-field coupling induced by transient radiation interference from internal sources within the observatory site of the 110-m radio telescope. For this purpose, a hybrid calculation method based on dipole approximation and time-domain physical optics is proposed. The analysis commences with a meticulous examination of transient radiation interference emanating from internal sources at the observatory site. Leveraging the principles of dipole antenna theory, the near-field radiation sources are analyzed and accurately modeled. By integrating the time-domain physical optics approach, the electromagnetic coupling characteristics of the internal sources of radiation interference on the near-field aperture plane of the radio telescope are comprehensively analyzed and quantified. Finally, the efficacy of the proposed method is validated using the FEKO full-wave algorithm. The proposed method serves as a theoretical foundation for analyzing the influence of interference from internal sources of radiation at the observatory site on the astronomical observations of the 110-m radio telescope.

radio telescope, transient interference, near-field coupling, physical optical method

PACS: 95.55.Jz, 95.75.Wx, 41.20.Jb, 84.40.Ba

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0224](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0224)