

航天发射场电磁环境仿真模型研究

王雷

(陆军工程大学 石家庄校区静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

摘要: 航天发射场电磁环境日趋复杂和恶劣, 电磁辐射及干扰已经成为影响航天发射安全不可忽视的重要因素, 为了有效控制和规避电磁干扰对航天发射与测控系统产生的不良影响, 需要对航天发射场电磁环境进行仿真研究; 通过对比分析理论模型、确定性模型和经验模型等几种常用的电波传播模型, 从计算效率、计算准确度以及使用的难易程度出发分析了几种模型对于航天发射场电磁环境仿真的应用; 通过适当选择经验模型, 能够在获得理想的仿真效果, 而且很大程度上缩短了仿真时间、减少对硬件系统的要求; 得出可以利用经验模型对航天发射场电磁环境的进行仿真分析; 利用经验模型对雷达电磁场覆盖分布情况进行了仿真分析, 进一步验证了该模型的适用性。

关键词: 航天发射场; 电磁环境; 传播模型; 经验模型

Researching the Simulation Model for Electromagnetic Environment of Aerospace Launch Sites

Wang Lei

(Electrostatic and Electromagnetic Protection Research Institute, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: As the electromagnetic environment of aerospace launch sites had become increasingly complex and severe, that the interference of the electromagnetic radiation had become the important ignored factors to influence the safety of the aerospace launch sites. So the simulation calculation for the electromagnetic environment of the aerospace launch sites must be studied. Through the contrast analysis of several common radio waves propagation model, such as the theory model, deterministic model and experience model and so on, the simulation of the electromagnetic environment of aerospace launch sites was analyzed by these several models from the calculation efficiency and accuracy of the calculation and the difficult degree of use. The ideal simulation result could be calculated by the experience model, and the simulation time was shortened. The experience model was more suitable for theoretical analysis of the electromagnetic environment of aerospace launch sites. The radar electromagnetic field distribution was simulated by using the experience model.

Keywords: aerospace launch sites; electromagnetic environment; propagation model; empirical model

0 引言

航天发射是一项风险性极大的科研试验活动, 为了确保航天发射安全, 必须在发射准备阶段和发射过程中采取一切必要措施, 排除各种对航天发射安全有影响的因素。大量的电子信息装备使得战场空间中的电磁信号非常密集, 形成了极为复杂的电磁环境。航天发射场电磁环境日趋复杂和恶劣, 航天发射试验中遭遇不明电磁干扰的情况时有发生, 电磁辐射及干扰已经成为影响航天发射安全不可忽视的重要因素。为确保航天发射的安全性和可靠性, 全面掌握航天发射场各类用频装备的电磁辐射情况以及电磁环境态势, 有效控制和规避电磁干扰对航天发射与测控系统产生的不良影响, 需要对航天发射场电磁环境进行仿真研究, 本文以对航天发射场电磁环境仿真为前提, 研究电磁环境仿真的电波传播模型, 并确立适合航天发射场电磁环境仿真的传播模型。

1 电波传播模型对比分析

发射场区的土壤类型、场区建筑物、山地丘陵、森林植被等地理环境因素都对电磁波传播有不同程度的影响, 为能够快速准确地计算出辐射源周围的电磁场分布, 进行电磁场环境的仿真, 需建立满足计算精度和计算速度使用要求的模型。

理想情况下, 自由空间的电波传播损耗为:

$$L_f = 32.4 + 20\lg d + 20\lg f \quad (1)$$

式中, f 是载波频率, d 是发射机与接收机之间的距离。可以看出, 自由空间传播损耗只与工作频率和传播距离有关。在自由空间中, 无线电波传播是相对简单的现象。对于无限大的自由空间来说, 一个有限大小的波源所发射的电磁波都是以球面波形式向外传播的, 在球面上某一给定的立体角内功率密度将保持不变。但是在现实环境中, 由于传播路径上存在着各种影响, 如高山、海洋、植被、湖泊、地面建筑、高空电离层影响, 以及地球曲面的影响等。因而电磁波具有绕射、反射、散射和波导传播等比自由空间复杂得多的传播方式。

由于工程实践上的需要, 人们建立了很多复杂环境下的电波传播预测模型, 这些模型可以分为三类: 理论模型、确定性模型和经验模型^[1-2]。

1.1 理论模型

理论模型是按照理想的条件, 例如统一的建筑物高度和建

收稿日期: 2017-07-29; 修回日期: 2017-09-06。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277181)。

作者简介: 王雷(1981-), 男, 河北人, 博士, 讲师, 主要从事电磁信号处理方向的研究。

筑物间距等,进行理论计算得出来的近似公式。理论模型计算效率高、精度上高、易于使用。

理论模型是按照理想的条件,例如统一的建筑物高度和建筑物间距等,进行理论计算得出来的近似公式。理论模型计算效率高、精度上高、易于使用。

海军航空工程学院的刘晓娣,利用抛物方程模型结合复杂地形条件研究了电波在空间区域的传播特性^[3]。复杂地形条件下的 PE 模型如下所示:

$$\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} = ik \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right] u(x, z) + ik(m-1)u(x, z) \quad (2)$$

式中, x, z 分别表示传播距离和传播高度; $m = n + z/a_e$ 为修正折射率, a_e 为地球的半径, n 是传播媒介的折射率; $k = 2\pi/\lambda$ 为真空中的传播常数, λ 为电波波长。该模型采用边界平移法处理复杂地形边界,利用分步傅里叶算法实现快速求解,并通过非均匀网格技术提高空间任意一点的场强计算精度,提高了复杂环境下电波传播损耗预测的精确性和实时性。

装备指挥技术学院采用三维矢量抛物方程方法建立了电磁环境仿真模型,在此基础上提出了基于旋转波阵面处理不规则地表边界条件的算法,并简化了边界处理过程;提出了近似系数求解多频点反复计算的方法;通过该算法对地形高程进行插值,分析了脉冲电波在不均匀大气结构中的传播特征^[4]。

理论模型仅适用于有相似假设条件的场景中,且只能预测某一距离上而非某一场点的传播损耗,为此不选其作为航天发射场的计算模型。

1.2 确定性模型

确定性模型通常运用射线追踪技术或 FDTD 技术根据电磁波传播理论进行接收点场强的计算,可以预测电波传播环境中各个场点的场强,适用于城市环境下的室内、室外传播环境,其计算开销随着环境的范围和环境模型数据的精细程度的增加而增大。确定性模型是在严格的电磁理论上从麦克斯韦方程组导出的公式。根据电波传播的初始条件和边界条件,求解这些公式就可得到路径上的电波传播特性。初始条件由发射源决定,一般相对固定,边界条件则是由传播媒介与地表界面的形状和电磁特性决定,通常随传播环境的变化而不同。一般来说,环境描述的精度直接决定了边界条件的精度,从而也最终决定了确定性模型的精度。由于确定性模型对具体环境中的电波传播特性有很高的预测精度,因而成为当前电波传播领域主要的研究方向。基于时域有限差分法^[5] (FDTD, Finite Difference Time-Domain method) 和射线追踪法^[6] (RTM, Ray tracing method) 等数值计算方法的确定性模型成为研究电磁环境中电波传播特性的常用方法。

FDTD 方法有两个缺陷:第一,由于数值稳定性、数值色散和各向性的影响,其仿真结果的误差会随着时间积累而越来越大,导致仿真结果的偏差甚至失真;第二,该方法计算量非常大,导致适用条件是电磁环境中的建筑物分布比较规则、简单,不适合环境日益复杂的城市环境。国防科技大学在信号仿真中,对信号仿真的 FDTD 算法进行详细的推导,分析了该算法的稳定性以及局限性^[7]。他指出利用该方法对电磁场信号不能实时仿真、所需时间较长,并且无法获得电磁场信号的具体信息。

射线跟踪方法最早出现在 20 世纪 80 年代初,基于几何光

学(GO)原理,通过模拟射线的传播路径来确定反射、折射和阴影等。它将从辐射源发射出来的波看作很多的射线,然后追踪每一条射线的传播轨迹直到射线所携带的能量变得很小,可以忽略或者射线到达接收点为止,由追踪的结果决定射线是舍弃还是保留到最终的计算结果。对于障碍物的绕射,通过引入绕射射线来补充 GO 理论,即几何绕射理论(GTD)和一致性绕射理论(UTD)。

射线跟踪法的基本思想是:首先确定一个发射源的位置,根据空间中的建筑物特征和分布找出发射源到每个接收位置(测试点)所有射线的传播路径,然后根据菲涅耳等式和几何绕射理论/一致性绕射理论(GTD、UTD)等,确定反射和绕射损耗等,这样相应得到每条路径到每个测试点的场强,将同一测试点处到达的所有路径的场强做相干叠加,得到每一个测试点处总的接收场强。

射线追踪方法是基于高频场的“局部性”,将电磁波在路径上的传播简化为直射、反射和绕射,这样便可根据地形环境数据库搜索主要的传播路径,再根据各路径对场的贡献最终得出总的场。射线追踪算法要根据地形的面、劈尖、顶点的位置来搜索主要的传播路径,因此,当需要计算的场景存在不规则地形或建筑物表面上的面、劈尖、顶点数目很多时,需要追踪的射线就非常多,这样计算过程就会很复杂。而地形复杂正是航天发射场仿真面临的实际问题,另外,现有的基于射线追踪法模型缺乏对电磁波在岩石、数目、水面等发射场周围典型材质反射率的高精度仿真计算效果。综合考虑上述因素,在航天发射场电波传播仿真计算时,不使用射线追踪算法。

1.3 经验模型

经验模型^[8]是由大量测量数据经统计分析后所归纳出的公式。这类模型中,比较典型的有 Egli 模型、Okumura-Hata 模型^[9]、CCIR(现为 ITU-R)公式^[10]、Ibrahim-Parsons 模型、COST231-Hata 模型、Lee 模型等。经验模型方法简单,应用时不需要详细的环境信息,非常方便快捷,通常应用于城镇、市郊的电波传播特性预测工程中。经验模型是根据真实场景的电波传播损耗实测结果进行建模后得出的近似计算公式^[11-15],这种模型易于使用,在具有类似于原始测量环境的场景中能够得到很高的精度。

基于经验公式的传播模型更适用于航天发射场这样的大面积开阔地带,且计算速度快。经验模型包括多种电波传播模型,例如国际无线电联盟推荐的用于超高频及甚高频传播曲线及地面、海洋混合路径的补偿的 ITU ITU-R P.370、用于甚高频、超高频段地面业务点对面无线电传播预测模型 ITU-R P.1546、混合类型传播模型 ITU-R P.452、用于单障碍或多障碍绕射的传播计算模型 ITU-RP.526、用于地球与空间传播路径计算的传播模型 ITU-R P.619-1、用于中波频段的电离层散射的计算模型 ITU-R P.1147、用于超视距传输考虑电离层散射的计算模型 ITU-R P.617^[16],以及 HATA 模型、Cost-HATA 模型、WALFISCH-IKEGAMI 模型、VPUP 模型等。这些模型都是源于实测数据的经验公式,仿真效果差异较大,如 HATA 模型适用于 150 MHz-1500 MHz 频率的电磁波传播计算;Cost-HATA 模型适用于 1500 MHz-2000 MHz 频段的定向天线,但对发射机及接收机的高度有限制;WALFISCH-IKEGAMI 模型以最强的传播方向为主,较快的粗略计算。因此,通过适当选择这些基于经验公式的电波传播模型,能够在获得理想的仿

真效果, 而且很大程度上缩短了仿真时间、减少对硬件系统的要求。另外, 虽然这些经验模型在对实际模型的简化基础上得到的, 与实际情况存在一定差异, 但是只要利用现场实测结果对理论模型进行修正, 就能使其更贴近实际电波传播过程, 从而得到科学合理的电磁仿真结果。

第二炮兵工程大学通过对比分析现有电波传播模型及不同计算模式, 提出了应用 Longley-Rice 模型的点对点模式作为飞行器控制通信电波传播损耗的仿真模型^[17]。

Longley-Rice 模型中, 含有收发天线的有效高度为 h_{e1} 和 h_{e2} , 地球表面折射率 N_s , 位置、极化方向、地形不规则度为 Δh , 电磁波频率为 f , 地面电导率 σ 和相对介电常数 ϵ_r 等因素。根据电波本身特性, 同时兼顾传播环境的电气特性, 不同路径长度的传播损耗参考中值如下式所示:

$$\Delta_{ref} = \begin{cases} \max(0, \Delta_e + K_1 d + K_2 \lg d) & 0 \leq d \leq d_{ls} \\ \Delta_{ed} + m_d d & d_{ls} \leq d \leq d_x \\ \Delta_{es} + m_s d & d_x \leq d \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δ_{ed} 、 Δ_{es} 、 Δ_e 分别表示自由空间下衍射、散射和视距时的传播损耗值; m_d 和 m_s 分别为衍射和散射损耗系数; d_{ls} 为光滑地面距离, d 为传播距离, d_x 表示此处的衍射损耗和散射损耗相等; K_1 和 K_2 为传播损耗系数。利用公式 (3) 我们就可以计算出衍射传播损耗、散射传播损耗和视距传播损耗等参数。

因此, 从计算速度、计算精度以及操作难易程度出发, 选择经验模型作为航天发射场电波传播的仿真模型。

2 经验模型应用举例

在某地区部署有一部对空雷达, 工作频段为 S 波段, 在雷达台东部方向有一个干扰台。现假定干扰台尚未开始干扰, 使用经验模型计算该对空雷达在指定高度的电磁场覆盖情况。采用瑞普电磁环境仿真软件进行覆盖范围计算, 覆盖范围工具的主要功能: 针对所选台站, 进行覆盖范围计算时, 可以完成场强、功率通量密度、信号强度、接收功率、传输损耗、余隙、信干比、要求天线高度、地形余隙角、最大干扰力、可用场强、余量、单频网覆盖、单频网时延差等计算。可以进行单台站的二维或者三维覆盖计算, 同时也完成多台站的合成覆盖计算; 软件采用的传播模型有国际电联建议书模型、经验统计模型、Detvag-90 模型, 不同的工程用例, 可以选择不同的传播模型进行计算; 计算范围可根据实际工程需求进行定义, 软件的计算速度支持五种不同分辨率的设置, 分辨率越低计算速度越快。覆盖计算的结果, 可以用任意数量的层次和颜色在地图中显示, 也可以导出为特定格式的数值结果。如图 1 所示为该对空雷达对海拔两千米进行探测时, 可以探测到的飞行器的最小雷达散射截面分布。

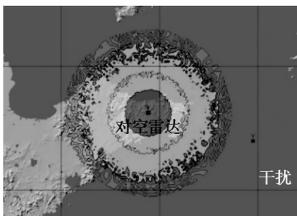


图 1 雷达探测 2000 m 的最小散射截面分布

当干扰台以相同频率对该对空雷达进行干扰时, 使用经验模型对雷达电磁场分布覆盖受压制情况进行计算分析, 得到结

果如图 2 所示。

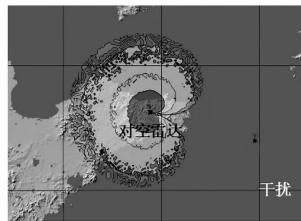


图 2 干扰台对雷达电磁场分布覆盖干扰情况

同时, 可以将图 1 和图 2 的结果在三维图中显示出来, 其三维分布图分别如图 3 和图 4 所示。

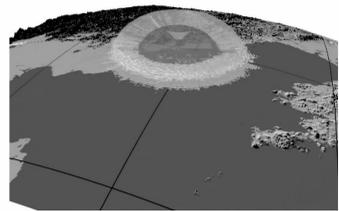


图 3 雷达探测 2000 m 的最小散射截面三维分布

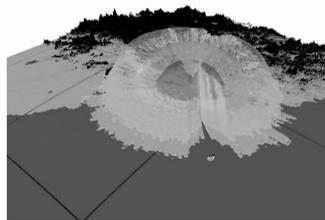


图 4 干扰台对雷达电磁场分布覆盖干扰情况三维分布

通过以上实例分析, 可以看出利用经验模型可以很好地将雷达电磁场分布情况仿真计算出来, 并能够将干扰台对雷达电磁场覆盖面积的干扰情况分析出来。该实例是在野外大的环境下计算电磁场分布的, 同样可以证实利用经验模型适合于对航天发射场电磁环境的仿真计算。

3 结论

本文通过对比分析理论模型、确定性模型和经验模型等几种常用的电波传播模型, 从计算效率、计算准确度以及使用的难易程度出发分析了几种模型对于航天发射场电磁环境仿真的应用, 通过理论对比分析得出经验模型更适合于对航天发射场的理论分析。另外, 通过利用经验模型对雷达电磁场覆盖分布和干扰台对雷达覆盖影响情况的计算, 也可以得出该模型适合于对航天发射场电磁环境的计算仿真。

参考文献:

[1] Catedra M F, Perez J, F. Saez de Adana, et al. Efficient ray-tracing techniques for three-dimensional analyses of propagation in mobile communications: application topicocell and microcell scenarios. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40 (2): 15-28.
 [2] Iskander M F, Yun Z Q. Propagation prediction models for wireless communication systems. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50 (3): 662-673.