2012 年 10 月 北京航空航天大学学报 October 2012
第38卷 第10期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 38 No. 10

飞机进近着陆电磁环境建模与辐射分布分析

王 磊 苏东林 谢树果 赵子华

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 机场终端区电磁、地形和地物在拓扑、物理和语义上的异构性导致进近着陆电磁环境构成机理复杂,很难用单尺度解析模型表征电磁环境的本质属性. 在分析终端区多要素层次构成机理和关联耦合特征的基础上,提出一种多层融合的进近着陆电磁环境模型架构. 综合采用矩量法和射线追踪法模拟台站辐射特性和地空电波传播模式,建立进近着陆区域电磁辐射强度量化表征与空间分布计算模型,有效降低了场边界特性不规则时空变化带来的电波预测误差. 结合某机场地形和航向台数据,对终端区主航道和余隙航道的电磁辐射强度和覆盖范围进行计算和对比分析. 仿真结果验证了本建模与分析方法的有效性.

关 键 词: 进近着陆; 电磁环境; 辐射分布; 矩量法; 射线追踪法

中图分类号: O 441.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1369-06

Modeling of electromagnetic environment and radiation distribution analysis for aircraft approaching and landing

Wang Lei Su Donglin Xie Shuguo Zhao Zihua

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Electromagnetic field, terrain and obstacle are three vital elements which constitute electromagnetic environment in aerodrome terminal. Because of their inhomogeneity in topology, physics and semanteme, it is difficult to express the characteristic of the electromagnetic environment for aircraft approaching and landing with determined model. Based on the attribute of hierarchy and the coupling interrelation of those three elements, a multi-layer fused electromagnetic environment model frame for aerodrome terminal was put forward. In order to reduce the computation error induced by the non-regulation boundary variation of electromagnetic field, a combination of method of moment(MoM) and ray tracing methods was used to simulate the radiation pattern and wave propagation, and radiation intensity expression and distribution computation flow in approaching and landing area were described. Simulation experiment of the radiation computation in approaching area based on one aerodrome dataset shows the validity of the modeling method.

Key words: approaching and landing; electromagnetic environment; radiation distribution; method of moment; ray tracing method

飞机进近着陆电磁环境是由机场终端区无线电台站电磁辐射、地空电波传播媒质以及各种有源无源电磁干扰构成的复杂开放巨系统,是影响飞机进近着陆安全的重要因素. 传统上获取终端区电磁环境信息主要基于实际飞行测试,不仅技术难度大、投资耗费高,而且测试时间和周期受多种客观条件制约[1]. 因此,研究飞机进近着陆电磁环境仿真建模方法,构建机场终端区电磁辐射表征与计算模型,科学分析与快速生成进近着陆电磁环境时空分布信息,对于弥补飞行实测不足、

收稿日期: 2011-10-14; **网络出版时间**: 2012-04-19 17:17

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120419.1717.002.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB731801)

作者简介: 王 磊(1981 -),男,陕西大荔人,博士生,wlei@ee.buaa.edu.cn.

提高终端区电磁环境评估效率具有重要价值.

机场终端区电磁、地形和地物在拓扑、物理和语义上的异构性导致电磁环境构成机理十分复杂,很难用单尺度解析模型表征进近着陆电磁环境的本质属性. 文献[2-3]对机场终端区台站参数、电磁环境保护以及地形和障碍物数据提出了相关指标要求,但未给出具体的电磁环境建模方法. 文献[4]基于飞机动力学和导航数据库,建立飞机近程无线电导航系统的行为级仿真模型,模拟无线电信标信号随飞机状态的变化过程. 文献[5]通过实际飞行测试和数据分析,给出了一种求解机场终端区电磁频谱使用和信号分布的工程估算方法,但两者由于均未考虑终端区地形地物对台站电磁辐射的反射、绕射效应,导致计算结果精度不高. 文献[6-7]采用有限元法、物理光学法以及几何绕射理论等多种混合数值方法,分析机场区域大型地物(如机库、停靠飞机等)对导航信号造成的散射和失真效应,指出建立系统仿真模型的关键点在于对系统所处客观世界足够准确的模拟、描述和评估. 这种方法对少量散射体影响下的系统电磁兼容性分析较为适用,但不适用于解决进近着陆电磁环境研究中地形、地物、干扰要素关联耦合复杂、电磁计算涉及空间范围大以及终端区准确数据获取困难等现实问题.

本文在分析进近着陆电磁环境构成机理以及多要素关联耦合特征的基础上,提出一种多层融合的进近着陆电磁环境模型架构. 针对场边界特性不规则时空变化带来的电磁辐射表征与计算困难,综合采用矩量法和射线追踪法建立终端区辐射源和地空电波传播模型,量化表征和计算地形地物影响下电磁辐射空间分布. 最后结合某机场地形和台站数据,对终端区航向台电磁辐射强度和覆盖范围进行仿真计算和分析.

1 进近着陆电磁环境体系架构

系统层次性和分形理论认为,一个复杂系统可以由低级到高级逐级组织整合成为系统整体,复杂系统具有自然分形的自相似性属性,可以采用多种分形维数从不同角度刻画分形对象的复杂结构特征[8]. 飞机进近着陆电磁环境包含终端区无线电台站、地形、地物和干扰体等众多实体要素,是一个复杂开放的巨系统. 各要素几何尺度不一、物理内涵相异、语法和语义表达方式多样,整体结构呈现出显著的多源异构特征和多维分层性质. 根据系统构成机理和要素耦合关联关系,将电磁环境从整体到局部、从宏观到微观逐步分解,用一种由几何层、物理层、行为层和态势层以及数据库构成的多层融合模型表现系统从低层到高层不同质的涌现性. 整体架构如图 1 所示.

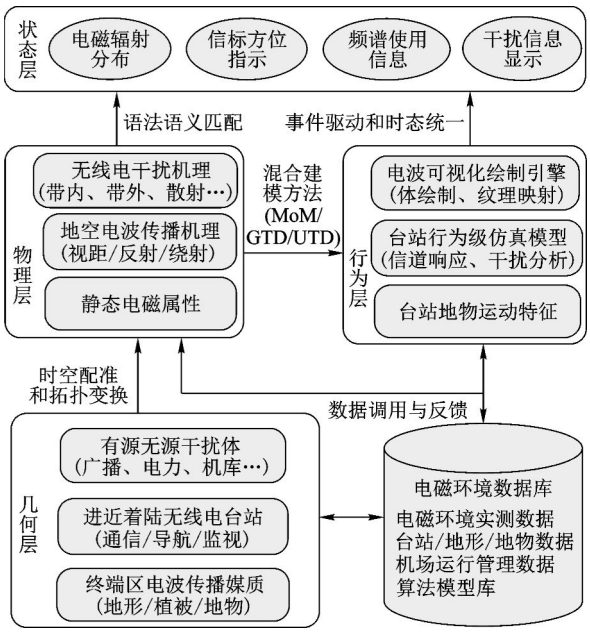


图 1 飞行终端区电磁环境分层融合模型架构

1.1 几何层描述

几何层主要描述终端区无线电台站、地形、地貌、地物等电波传播媒质以及有源干扰体、无源干扰体的拓扑和形状特征. 无线电台站建模主要是对发射接收天线系统的几何建模. 地形模型根据实际终端区地形地物的数字高程数据、矢量数据、栅格数据和图像数据,在一定的投影坐标系中分层构建. 对于数据库中没有的各种随机地物模型,如跑道周边新建建筑、停靠飞机等,需根据散射体的姿态和形状参数建立干扰体结构等效模型. 各要素模型要在统一的空间坐标系下(一般为地理坐标)完成统一配准和表达.

1.2 物理层描述

物理层主要描述台站、地形、地物和干扰要素的静态电磁属性信息. 台站天线需要根据不同的天线种类、形状以及安装条件,建立与实体参数相一致的仿真模型,并采用合适的数值仿真算法,计算得到天线三维方向图和增益等近远场辐射特征. 对于地形、地物和干扰要素,则要在几何层模型基础上,进一步描述实体的电参数、材质参数和相关频率信号参数. 物理层还要根据无线电频段和业务范围,提供相应的电波传播模型、电磁散射模型和干扰机理模型. 各要素模型的数据结构和逻辑关系由数据库系统统一表示和分类管理.

1.3　行为层描述

行为层主要描述无线电台站的位移特征和动态电磁特征,包括实体运动特征模型、系统行为级仿真模型、信号时频域响应模型以及电磁波可视化绘制引擎.

建立行为层的目的,一方面是在各要素状态参数支持下,依照事件驱动机理,刻画飞机进近着陆过程中由于各要素物理状态以及时间、空间和频率尺度变化,所引起的各要素物理和电磁属性,以及台站运行区域电磁信号在时间、空间和频率空间的响应,从而为状态层描述电磁场变化提供逻辑结构和数据驱动模型. 另一方面,结合状态层电磁环境表现需求和纹理映射等关键技术,构建电波可视化绘制引擎,将不可见的场数据映射为可见可绘制的图元数据,并通过可视化的手段揭示场数据的分布和演化规律,为状态层信息显示提供算法和数据支持.

1.4　状态层描述

状态层是进近着陆电磁环境模型架构的表现和互操作窗口,主要包括台站运行区域电磁辐射分布、台站地理位置分布、频谱使用信息和干扰信息显示等模块. 状态和显示模块根据行为层提供的算法和数据支撑,按照用户需求直观展现电磁环境各构成要素在空域、频域、时域和能量域的分布状态. 同时利用系统生成的人机交互界面,对几何层、物理层和行为层的相关参数进行灵活设置,有针对性地展现进近着陆电磁场景变化过程.

1.5　电磁环境数据库

电磁环境数据库包括终端区电磁环境实测数据、要素数据、机场运行管理数据以及相关电磁算法集. 数据库的作用是将各种多源异构数据通过元数据管理规则转化为表结构统一的数据集合,向各逻辑层提供相应约束条件定义下的数据子集,保证数据的高效调用和传递. 同时,定期加载各逻辑层反馈的计算结果,不断更新数据和信息样本,从而实现对数据的闭环控制和按需分发.

1.6　各层相互关系

电磁环境模型体架构各个层次以及数据库是一个有机融合的统一整体,几何层提供电磁环境的空间分布和载体,物理层提供电磁环境的本质属性——电磁信息,实现几何空间到电磁空间的映射;行为层为状态层各模块提供在电磁环境信息计算和展示方面共性的物理和信号特征,状态层汇聚前三层的数据和计算结果,并按照信号、台站、频谱、干扰等主题进行可视化展现. 数据库为各层提供基础数据支撑,并管理更新电磁环境信息.

2　终端区电磁辐射表征与分布计算

终端区地形、地物和气象环境的不规则时空变化使电磁波边界特性表现出明显的非平稳性和随机性. 地空电波传播的物理机制和传播模式涉及反射、绕射、吸收以及多径干涉等多重效应,导致终端区电磁辐射发生衰减、衰落、极化偏移和时、频域畸变等效应. 根据终端区电磁辐射产生机理,运用射线追踪方法描述和表征电磁辐射的传播特性,通过建立进近着陆电磁辐射多要素模型,阐述了电磁辐射计算的方法和流程.

2.1　终端区电磁辐射表征

射线跟踪方法基于电磁理论、几何光学理论(GO,Geometrical Optics)、几何绕射理论(GTD ,Geometrical Theory of Diffraction)以及一致性几何绕射理论(UTD,Uniform geometrical Theory of Diffraction),通过模拟电磁射线的传播路径来确定多径信道中发射机与接收机之间所有可能的射线路径,从而计算场点的电磁参数. 射线在传播过程中,遇到障碍物时发生反射或绕射,根据一致性几何绕射原理和镜面反射原理计算出反射点和绕射点处的场强.

在地形条件比较复杂的机场,随着进近着陆飞机高度逐步降低(典型从 2 000 m 到 4 m),终端区中的山体和高大障碍物将进入台站天线与飞机接收机通信链路菲涅尔区,如图 2 所示. 进近空域电磁辐射是由直射、反射和绕射电波干涉形成的合成场量.

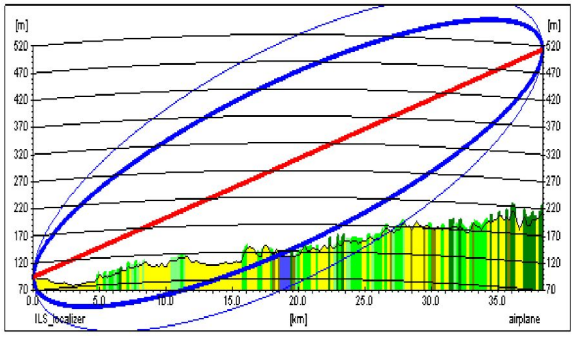


图 2　进近着陆典型地空电波传播路径剖面图

根据射线跟踪原理,进近着陆台站运行覆盖区内 r 接收点处的电磁信号场强可表示为

$$\boldsymbol{E}(r) = \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{E}(r_n) \tag{1}$$

其中,N 为到达接收点 r 的射线总数;$\boldsymbol{E}(r_n)$ 为第 n 条到达接收点射线的场强矢量,且

$$\boldsymbol{E}_n(r_n) =$$

$$\boldsymbol{E}_0 G_{\mathrm{t}}(\theta_n,\varphi_n)\left(\prod_{i=1}^{m}\overline{\overline{\boldsymbol{R}}}_i A_{\mathrm{rs}}\right)\left(\prod_{j=1}^{q}\overline{\overline{\boldsymbol{D}}}_j \boldsymbol{A}_{\mathrm{ds}}\right)\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr_n}}{r_n} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{E}_0$ 为单位距离处全向点源天线的辐射场强；$G_{\mathrm{t}}(\theta_n,\varphi_n)$ 为台站天线在第 n 条射线方向上的增益；$\overline{\overline{\boldsymbol{R}}}_i$ 和 $\overline{\overline{\boldsymbol{D}}}_j$ 分别为第 n 条射线第 i 次并矢反射系数和第 j 次并矢绕射系数；$\boldsymbol{A}_{\mathrm{rs}}$ 和 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{ds}}$ 分别为反射和绕射扩散因子，它取决于边缘的几何形状和电磁特性，以及入射波的入射方向、极化特性和类型；r_n 为第 n 条射线经过的传播路程[9].

2.2 终端区电磁辐射要素建模和分布计算

基于进近着陆电磁环境模型架构，依据电磁辐射表征内涵，分别构建台站、地形和地物的几何模型、物理模型和行为模型，合理选取电磁辐射分布表现参数，预测进近着陆空域的电磁辐射分布状态.

2.2.1 终端区地形地物环境建模

地形地物建模涉及的地理范围一般包括以跑道几何中心为圆心、半径为 45 km 以上的实体. 数据组织按照图层结构以数据高程数据、矢量数据、栅格数据和图像扫描数据分层叠加，以经纬度、国家坐标以及高度轮廓等多种格式划分和展现. 数据分辨率按照进近程序类别和区域范围相应设置，终端控制区外分辨率达到 50 m，适用于Ⅱ/Ⅲ类进近区分辨率达到 5 m. 台站天线的敏感区和保护区内的地形地物，一般要根据台站建模和辐射特性分析的要求，建立精确的全尺寸几何和物理模型. 各层和各类数据最后在地理坐标系中完成空间尺度变化和配准.

2.2.2 地面台站建模

终端区台站建模，主要是对台站的天线的辐射特性进行建模. 进近着陆无线电信标天线一般均为大型天线阵列，运用数值仿真算法时剖分网格数据巨大，同时方向系数很容易受到阵列配置结构和周围地形地物的影响. 采用矩量法(MoM, Method of Moment)结合快速多极子算法可以在保证高精度数值结果的基础上，显著提高大网格剖分数量条件下的运算效率. 根据天线阵列形状、材质、架设条件、周围地貌等物体尺寸和电磁属性，将物理实体模型映射为电磁计算模型，合理设置算法参数并在系统行为级仿真信号的激励下，得到准确的天线阵列的方向图和增益特性.

2.2.3 进近着陆地空电波传播模型

现有考虑地形地物因素影响的地空电波传播模型包括基于双射线原理的 ITU-P. 528 模型、基于地形绕射原理的 ITU-P. 452 模型以及物理光学法等高频近似方法. 由于双射线模型要求地表光滑，其计算精度受到菲涅尔区视距限制，在飞机高度较低时存在较大误差[10]；地形绕射模型是一种概率统计模型，而且由于未考虑绕射信号相位变化，应用于直射、反射和绕射相混合的低空信道传播精度不高；物理光学方法考虑到散射物体表面电流再辐射效应，对金属散射体计算精度较高，但运行包含大型山体和障碍物散射效应时运算效率有所降低. UTD 采用射线追踪方法，分析不同类型的反射和绕射造成的电磁散射问题. 由于它考虑了信号散射相位因素、不受物体尺寸限制以及精度高、运算量不大等特点，同时克服了几何绕射理论在入射和反射阴影边界两侧过渡区内失效的缺点，可有效改善进近着陆传播大范围多尺度电波传播计算和信号场强预测精度.

综合上述分析，终端区电磁辐射分布计算流程如图 3 所示.

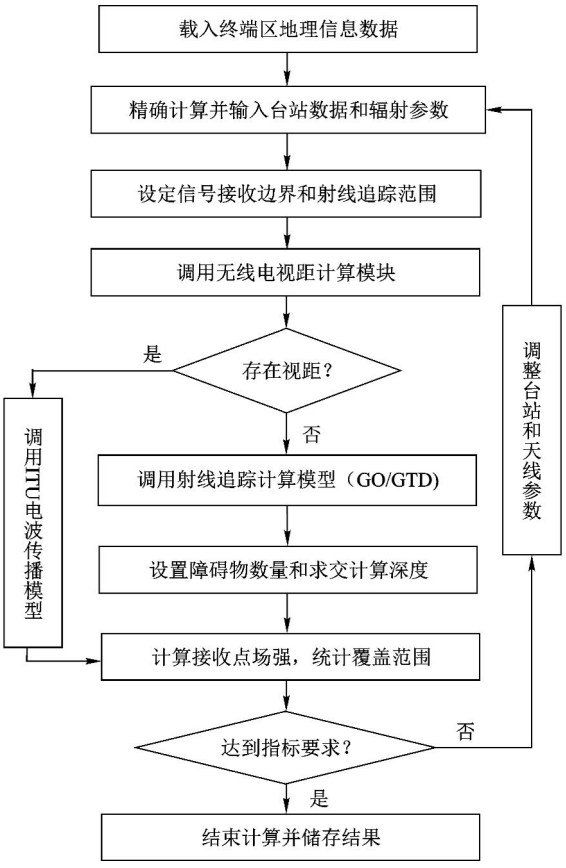


图 3 飞行终端区电磁辐射分布计算流程

3 仿真计算实例分析

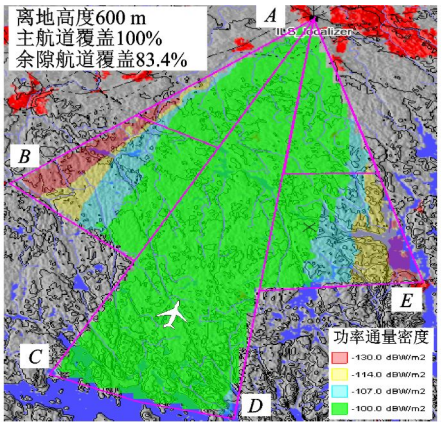
根据上述电磁环境模型架构和电磁辐射分布计算方法，建立某机场仪表着陆系统航向台电磁辐射多层融合模型，并对台站运行区域电磁信号覆盖进行仿真计算. 分析步骤遵循图 3 流程.

3.1　仿真设置

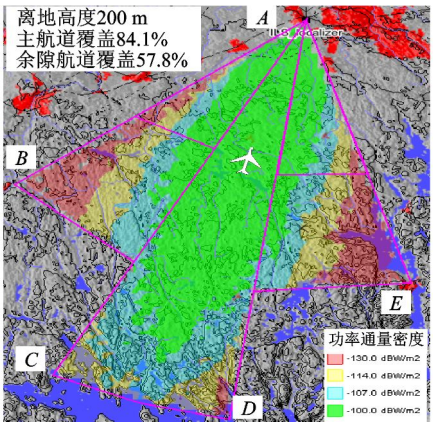
1）载入地理数据. 在仿真平台上载入以分层形式(栅格数据、矢量数据、扫描格式)存放的某机场终端区地理信息数据,地形最佳分辨率为50 m,比例尺 1∶25 000. 选取机场跑道中线延长线上某点(离跑道着陆终端 150 m)作为航向台天线阵架设位置.

2）设置航向台发射机和天线参数. 台站发射机工作频率为 110 MHz,发射信号为载波加边带信号和纯边带叠加而成的双音频调幅格式. 根据实际发射机数据建立系统行为级仿真模型,模拟系统输出信号的时频域特征. 发射天线阵列由 14 副对数周期阵子单元组成.

3）设定计算边界. 根据航向台电磁环境要求,设定如图 4 所示系统运行覆盖区. 其中 $AB = AE = 31.5$ km, $AF = AD = 46.3$ km, $\angle ABE = 35^0$, $\angle ACD = 20^0$, ACD 的角平分线为跑道延长线,所包含区域为主航道. ABE 区域中除主航道区以外的区域为余隙航道.



a　距地面 600 m 高度功率通量密度分布



b　距地面 200 m 高度功率通量密度分布

图 4　航向台电磁辐射强度分布图

4）调用电波传播模型. 采用统计模型和几何光学模型进行对比分析. 统计模型采用国际电联航空移动传播模型 P. 528,射线追踪模型采用一致性几何绕射理论,障碍物数量设置为 3 个.

3.2　仿真结果及分析

1）在考虑天线阵列架设结构和周围地形因素条件下,采用矩量法建立对数周期天线阵全尺寸仿真模型,并应用快速多极子算法,得到如图 5 所示航向台天线阵三维远场方向图. 其中天线 H 面最大增益为 22.7 dB,半功率角为 5°.

2）图 4a、图 4b 分别给出离地 600 m 和 200 m 高度航道区,航向台电磁辐射功率通量密度的分布情况. 由图 4a 可知,在离地 600 m 高度,仿真航向台有效信号(大于 -100 dBW/m^2)覆盖率为 100%,余隙航道有效信号(大于 -107 dBW/m^2)覆盖率为 83.4%,考虑到指标中余隙航道信号一般要比主航道低 10 ~ 20 dB,上述结果可以达到指标要求. 在图 4b 中,当离地高度降至 200 m 时,由于地形因素对信号传播的遮挡或损耗作用,主航道和余隙航道有效信号覆盖率分别降至84.1%和 57.8%,而在这个高度,飞机会处于着陆区(距机场中心 18.5 km 扇形区域),其主航道信号覆盖率为 100%,符合指标要求.

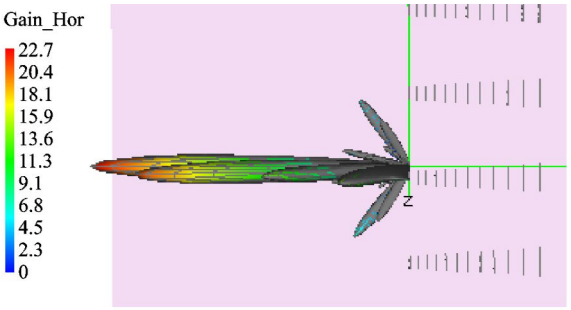
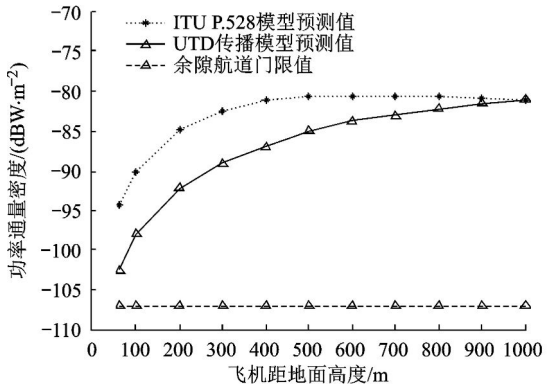
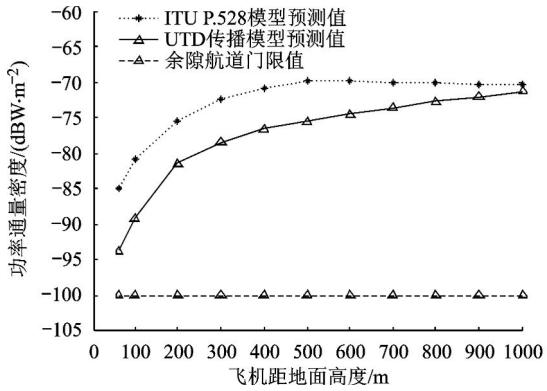


图 5　航向台天线阵三维仿真方向图

3）为进一步分析进近着陆区域电磁辐射分布,基于前述航向台电磁发射模型,分别采用 ITU P. 528 传播模型和 UTD 模型,给出了主航道和余隙航道电磁场功率通量密度 90% 统计值与飞机离地高度的关系. 如图 6a 和图 6b 所示. 由图可知,虽然在航线台近距区域由于地形因素影响,功率密度值显著降低,但主航道和余隙航道功率密度中值均大于门限值,说明该电磁辐射强度达到电磁环境指标要求. 但采用 ITU P. 528 模型预测值比 UTD 模型平均分别高 4.4 dB 和 4.9 dB,表明若采用基于双射线传播机理的 P. 528 模型可能会造成对辐射强度的过高预测,从而可能对台站电磁环境保护甚至飞行安全带来不利影响. 同时也证明采用 UTD 模型能够充分反映地形地物对电波的反射和绕射效应,提高复杂地形条件下航道安全运行区域和电磁环境保护区域计算的准确性.



a 主航道功率通量密度与高度关系



b 余隙航道功率通量密度与高度关系

图 6 进近着陆不同高度电磁辐射强度

4 结束语

飞机进近着陆电磁环境是影响飞机着陆安全的重要因素. 研究飞机进近着陆电磁环境仿真建模方法,构建机场终端区电磁辐射表征与计算模型,有助于科学分析与快速生成进近着陆电磁环境分布信息,弥补飞行实测方法的诸多不足. 本文在对机场终端区电磁、地形、地物等相关要素耦合机理分析的基础上,构建多层融合的进近着陆电磁环境体系架构,综合采用矩量法和射线追踪方法,量化表征和计算进近着陆电磁辐射分布信息. 通过对某机场终端区航向台电磁辐射强度和覆盖范围的仿真计算和分析表明,该方法能够较好地体现地形、地物等因素对进近着陆电磁环境的影响机理及效应,有效降低由于场边界特性不规则时空变化带来的电磁辐射计算误差,对于提高进近着陆电磁环境评估的准确性和效率具有重要价值.

参考文献(References)

[1] ICAO. Manual on testing of radio navigation [R]. ICAO Doc 8071,2002

[2] ICAO. Radio navigation aids[R]. ICAO Annex 10,2006

[3] ICAO. Guidelines for electronic terrain, obstacle and aerodrome mapping information[R]. ICAO Doc 9881,2009

[4] 黄金明. 飞行模拟器近程无线电导航系统建模与仿真[J]. 计算机仿真,2007,24(2):282 - 285
Huang Jinming. Modeling and simulation of short-range radio navigation system in flight simulator[J]. Computer Simulation, 2007,24(2):282 - 285(in Chinese)

[5] Sandra V Koppen. Airborne RF measurement system (ARMS) and analysis of representative flight RF environment[R]. NASA/TP-2007-214883,2007

[6] Greving G, Biermann W D, Mundt R. Status of advanced scattering distortion system analysis for navaids and radar-examples of A380 and wind turbines[C]// Felix Yanovsky, Proceedings of Microwaves, Radar and Remote Sensing 2008 Symposium. Kyiv, Ukraine: National Aviation University, 2008:42 - 47

[7] Greving G. Hybrid numerical scattering field analysis embedded into simulations of complex radio based systems-examples, capabilities and limitations[C]// Greving G. Proceedings of the 11th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. New York: IEEE, 2009:493 - 496

[8] 刘兴堂,梁炳成. 复杂系统建模理论、方法与技术[M]. 北京:科学出版社,2010:43 - 51
Liu Xingtang, Liang Bingcheng. The theory, method & technique for complex system modeling[M]. Beijing: Science Press, 2010: 43 - 51(in Chinese)

[9] Holm P. UTD-diffraction coefficients for higher order wedge diffracted fields [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1996: 44(6):879 - 888

[10] Arnaud Dedryvere. A general model for VHF aeronautical multipath propagation channel[R]. ICAO AMCP/WG-D//WP6, 1999

(编 辑:娄 嘉)