

口径/谱域积分-表面积分法的研究

郭东明¹, 张春波¹, 盛贤君², 孙玉文¹, 柳敏静¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁大连 116024)

摘要: 通过分析口径积分、平面波谱理论关于天线近场计算的特点, 获得一种混合的天线近场计算方法. 结合表面积分技术, 提出了口径/谱域积分-表面积分法, 用于三维天线罩系统电性能数值仿真. 该方法吸取了口径积分和平面波谱理论的优点, 对于天线近场的分析更为精确、实用. 以弹载天线罩为仿真实例, 结果表明, 与口径积分-表面积分法和平面波谱-表面积分法相比, 口径/谱域积分-表面积分法的计算结果与实验结果更为吻合, 证明了该算法具有更高的精确度.

关键词: 天线罩; 口径/谱域积分-表面积分法; 口径积分; 平面波谱; 表面积分

中图分类号: TN820.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)09-1750-05

Study on the Aperture Integration/ Spectrum Area Integration Surface Integration Method

GUO Dong-ming¹, ZHANG Chun-bo¹, SHENG Xian-jun², SUN Yu-wen¹, LIU Min-jing¹

(1. Key Laboratory for Precision and Nontraditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. Dept of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Through analyzing the characteristic of antenna near fields calculation with the aperture integration (AI) theory and the plane wave spectrum (PWS) theory, a hybrid algorithm of antenna near fields is obtained. By combining it with the surface integration (SI) technique, the aperture integration / spectrum area integration surface integration (AI/SAFSI) method is presented, to simulate the electromagnetic performance of three dimension antenna radome system. The method united advantages of the AI and the PWS theory is more practical and precise for the analysis of antenna near fields. By taking a missile radome as simulation example, the results indicate that the proposed method is more agreeable to the experimental data than the AF-SI method and the PWS-SI method.

Key words: radome; AI/SAFSI; AI; PWS; SI

1 引言

飞行器天线罩是具有导流、透波、耐热、隔热、承载、抗冲击、耐候、气密等多种作用的重要部件. 它既是结构件, 又是发射和接收电磁波的窗口; 既要保证必需的气动外形, 适应飞行器飞行过程中的气动力、气动热和恶劣气候环境, 同时又要具有优良的电磁波传输特性^[1]. 由于天线罩的存在, 降低了天线电性能, 导致天线主瓣衰减, 副瓣升高, 产生瞄准误差^[2]. 为掌握天线罩对天线电性能的影响, 对带罩天线远场辐射特性进行数值仿真是十分必要的. 当前, 分析带罩天线电性能常用方法主要有基于几何光学的射线跟踪法(RT, Ray Tracing)、基于物理光学的平面波谱-表面积分法(PWS-SI, Plane

Wave Spectrum Surface Integration)和口径积分-表面积分法(AFSI, Aperture Integration Surface Integration). 射线跟踪法简便快捷高效, 但其近似仅在极高频率成立, 所以只适用于电大尺寸天线罩系统^[3]; 口径积分-表面积分法和平面波谱-表面积分法是现阶段具有较高精确度的分析手段, 已经应用于各种机载弹载天线罩系统的电性能分析中^[4-6]. 但这两种方法在计算近场的电场和磁场时都存在各个方向分量收敛速度不一致, 精度不一致的问题, 大幅降低了计算效率和精确度. 本文提出了一种将口径积分和平面波谱理论有机结合的天线近场计算方法, 该方法合理应用口径积分和平面波谱理论在近场计算方面的优点, 大幅提高了近场计算各个分量收敛速度的一致性, 使天线近场的仿真更为精确、实用. 这

收稿日期: 2007-05-28; 修回日期: 2008-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(No. 2005CB724104); 国家自然科学基金杰出青年科学基金(No. 50325518); 中国博士后科学基金(No. 20060400966)

种天线近场计算方法结合表面积分技术, 即得到一种实用的三维天线罩系统电性能数值仿真方法, 本文将这种数值仿真方法称为口径/ 谱域积分- 表面积分法(AI/SAFSI: Aperture Integration / Spectrum Area Integratiorr Surface Integration). 该方法具有与口径积分- 表面积分法相当的计算效率, 具有高于平面波谱- 表面积分法和口径积分- 表面积分法的精确度, 尤其在天线罩系统瞄准特性分析方面表现最为突出.

2 算法原理

天线-罩系统电性能数值仿真通常包括三个步骤:

- (1) 计算入射到天线罩内表面上的近区场, 这一步是分析带罩天线电性能最为关键的步骤, 它直接决定着算法的精确度与效率;
- (2) 确定天线罩外表面切向电磁场;
- (3) 求得天线-罩系统远区辐射场量.

2.1 天线辐射近场

天线罩一般位于天线辐射场的近场区内. 根据口径积分理论, 天线罩内壁上的点 $r(x, y, z)$ 的入射场矢量表达式如下^[3 7]:

$$\begin{cases} E_i(r) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{ms} \times R(jk_0 + \frac{1}{R}) \frac{e^{-jk_0 R}}{R} d\xi d\eta \\ H_i(r) = -\frac{j}{4\pi\mu_0\omega_0} \iint_{ms} \left[\frac{J_{ms}}{R} (jk_0 + \frac{1}{R}) + (-k_0^2 + j\frac{3k_0}{R} + \frac{3}{R^2})(J_{ms} \cdot R)R + k_0^2 J_{ms} j \right] \frac{e^{-jk_0 R}}{R} d\xi d\eta \end{cases} \quad (1)$$

式中 J_{ms} 为天线口径面上的等效磁流; R 为天线口径面上的源点 $Q(\xi, \eta, 0)$ 到近场点 $r(x, y, z)$ 的单位矢量, R 是其距离

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2} \quad (2)$$

根据平面波谱理论, 天线罩内壁上的点 $r(x, y, z)$ 的入射场矢量表达式^[8 9]:

$$\begin{cases} E_i(r) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} A(k_0) \exp(-jk_0 \cdot r) dk_0 \\ H_i(r) = -\frac{1}{j\omega_0\mu_0} \nabla \times E_i(r) \end{cases} \quad (3)$$

$A(k_0)$ 为平面波的复数振幅, 也称为平面波角谱密度函数, 它由天线口径电场切向分量的傅里叶变换得到, 表达式如下:

$$A(k_0) = \frac{1}{2\pi} \iint_S E_t(\xi, \eta) \exp(j(k_x \xi + k_y \eta)) d\xi d\eta \quad (4)$$

式中 $E_t(\xi, \eta)$ 为天线口径电场矢量切向分量; S 为天线口径区域; k_0 是自由空间矢量波数, 在笛卡尔坐标系中:

$$k_0 = k_x e_x + k_y e_y + k_z e_z \quad (5)$$

单纯采用口径积分或是平面波谱理论计算天线近

场, 都存在电场和磁场各个方向分量收敛速度不一致, 精度不一致的问题, 大幅降低了计算效率和精确度. 实际计算表明, 与天线极化方向平行的电场分量及与天线极化方向垂直的磁场分量具有基本一致的收敛速度和计算精确度, 与天线极化方向垂直的电场为 0, 电场和磁场的其余三个分量收敛速度和计算精确度大体相当.

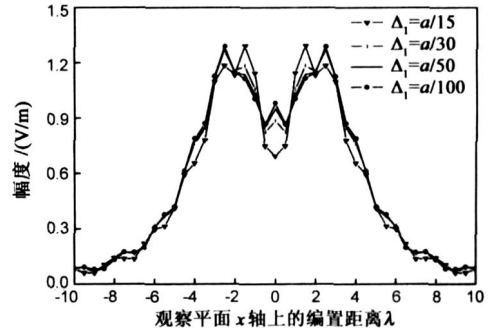


图 1 采用口径积分理论时, E_x 的收敛情况

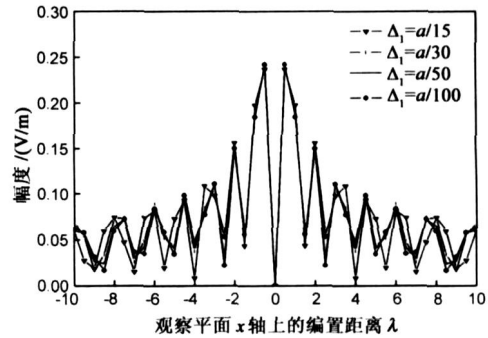


图 2 采用口径积分理论时, E_z 的收敛情况

以半径 $a = 5\lambda$ 水平极化, 均匀分布圆口径天线为例, 对距天线口径距离为 10λ 的观察平面上 x 轴上的近场分布进行计算. 由于 $E_x = 0$, E_y 和 H_x 具有基本一致的收敛速度和计算精确度, E_z , H_y 和 H_z 具有基本一致的收敛速度和计算精确度, 所以仅给出 E_y 和 E_z 的计算结果. 当采用口径积分理论时, 近场式(1)的计算为天线口径上的二重积分. 为说明问题方便, 该积分采用辛普生法, 天线口径 x 和 y 方向上的步长均取为 Δ_1 . 随 Δ_1 的变化, E_y 和 E_z 的收敛情况分别如图 1、2 所示. 当采用平面波谱理论时, 近场式(3)的计算为谱域上的积分, 同样积分采用辛普生法, 谱域 e_x 和 e_y 方向上的步长均取为 Δ_2 . 随 Δ_2 的变化, E_y 和 E_z 的收敛情况分别如图 3、4 所示. 从图 3 可以看出, 随着步长 Δ_2 的减小 E_y 迅速收敛, Δ_2 小于 $k_0/30$ 后计算曲线几乎完全重合, 而图 1 中当 Δ_1 小于 $a/30$ 时 E_y 虽已经收敛, 但随着步长 Δ_1 的减小 E_y 继续缓慢地向图 3 中 $\Delta_2 = k_0/30$ 曲线靠近. 可见, 在近场 E_y 的计算中, 平面波谱理论在收敛速度和计算精确度方面明显优于口径积分理论. 从图 2 可以看出, 随着步长 Δ_1 的减小 E_z 迅速收敛, Δ_1 小于 $a/50$ 后计算曲线几乎完全重合, 而图 4 中当 Δ_2 小于 $k_0/50$ 时 E_z 虽已

收敛,但随着步长 Δ_2 的减小 E_z 继续缓慢地向图 2 中 $\Delta_1 = a/50$ 曲线靠近. 可见,在近场 E_z 的计算中,口径积分理论在收敛速度和计算精确度方面明显优于平面波谱理论. 通过大量计算,证明对于其他口径大小的天线,口径积分理论和平面波谱理论关于天线近场区内任意点上各电磁分量的计算,随采样间距变化其收敛情况是一致的,即:口径积分理论关于 E_y 的计算同样会随着步长的减小缓慢地向平面波谱理论值靠近;平面波谱理论关于 E_z 的计算同样会随着步长的减小缓慢地向口径积分理论值靠近. 而在实际计算中需要计算成千上万乃至更多的近场点场量,依靠无限制地减小步长来提高计算精度是不现实的,这是因为:一是计算效率过低,无法完成实际工程计算;二是步长过小造成每一步长上积分值较小,由计算机数值截断误差所带来的误差相对较大,该误差在求取积分过程中经叠加后将继续被放大.

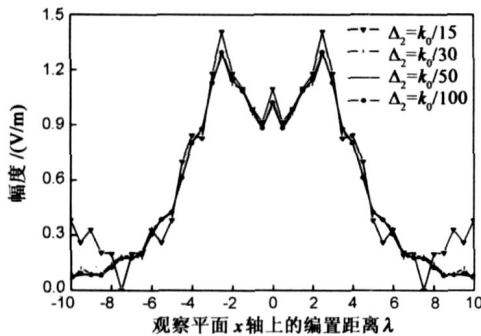


图 3 采用平面波谱理论时, E_y 的收敛情况

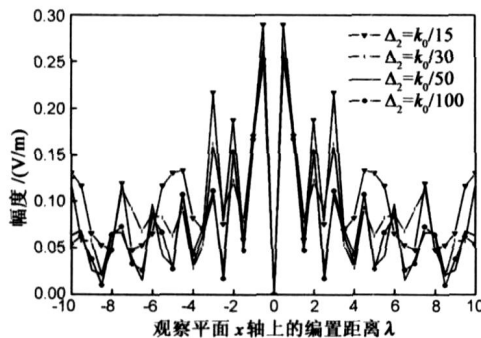


图 4 采用平面波谱理论时, E_z 的收敛情况

综上所述,在天线罩内表面入射场矢量的计算中,可采取将口径积分和平面波谱理论相结合、取长补短的方法:应用平面波谱理论计算与天线极化方向平行的电场分量及与天线极化方向垂直的磁场分量,见式(3);而电场和磁场中的其余分量则应用口径积分理论进行分析计算,见式(1).

2.2 天线罩外表面的切向场及远场的计算

将入射到天线罩内表面上的入射场等效为以能流方向传播的准平面波,入射方向取为^[10]:

$$P_A = \text{Re}(\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*) / |\text{Re}(\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*)| \quad (6)$$

所以电磁波的入射角为:

$$\theta_i = \arccos(\mathbf{P}_A \cdot \mathbf{n}_R) \quad (7)$$

式中 \mathbf{n}_R 为天线罩表面法向单位矢量. 所以,透过罩壁在罩壁外表面上的切向场矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = [\mathbf{b} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r})] \mathbf{b} \cdot \mathbf{T}_\perp + [\mathbf{t} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r})] \mathbf{t} \cdot \mathbf{T}_\parallel \\ \mathbf{H}_i(\mathbf{r}) = [\mathbf{b} \cdot \mathbf{H}_i(\mathbf{r})] \mathbf{b} \cdot \mathbf{T}_\parallel + [\mathbf{t} \cdot \mathbf{H}_i(\mathbf{r})] \mathbf{t} \cdot \mathbf{T}_\perp \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{b} 和 \mathbf{t} 分别为天线罩外表面的副法线单位矢量和切向单位矢量; \mathbf{T}_\perp 和 \mathbf{T}_\parallel 分别为垂直极化波和水平极化波的透过系数. 透过系数依据适用于 N 层介质平板的二端口网络理论可以写成下式:

$$T = \frac{2}{A + B + C + D} = T_i e^{-j\phi} \quad (9)$$

其详细计算方法参见文献[3, 4, 10], 本文不再赘述.

在进行近场远场转换时,采用表面积分技术沿天线罩表面所在的曲面对切向电场和磁场进行矢量积分,数学表达式如下^[11]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & -\frac{jk_0}{4\pi r'} e^{-jk_0 r'} \mathbf{R} \times \iint_{S_R} \mathbf{n}_R \times \mathbf{E}_i \\ & - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \mathbf{R} \times (\mathbf{n}_R \times \mathbf{H}_i) \exp(jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{R}) ds_R \end{aligned} \quad (10)$$

公式中 r' 是天线罩坐标系下原点到观察点的距离; \mathbf{R} 表示观察方向单位矢量; \mathbf{r} 是天线罩表面上采样点在天线罩坐标系下的位置矢量. 远场计算是三维曲面积分,采用数值解法,将天线罩剖分为若干个面积相近的单元,每个单元中心作为采样点,设采样点间距为 Δ . 仿真验算表明,采样点间距 Δ 对计算精确度影响很大,尤其对极低副瓣天线-罩系统影响更大,推荐 Δ 取值要小于 0.4λ . 直接在三维曲面上执行表面积分技术,较将曲面投影到二维平面然后执行表面积分技术精确,这是由于前者采样点的选取受天线罩曲率影响较小,采样点在天线罩上的分布更加均匀. 获得远场方向图后就可以计算天线-罩系统的瞄准误差和瞄准误差率.

3 实例计算

为了验证口径/谱域积分-表面积分法的有效性,以弹载天线-罩系统为研究对象进行实例仿真,并与平面波谱-表面积分法、口径积分-表面积分法及实验结果进行比较.

本例中,天线罩外型为正切卵形,长细比为 2:1,天线为圆口径天线,口径场为均匀分布,水平极化. 对 H 面电性能进行计算,图 5 为天线俯仰和方位扫描角均为 0° 时的远场方向图仿真及实验结果,图 6 为天线在俯仰面 $-25^\circ \sim +25^\circ$ 范围内做机械扫描时天线-罩系统瞄准误差仿真及实验结果,图 7 为相应的天线-罩系统瞄准误差率仿真及实验结果. 实验中,在天线负扫描角方向有天线罩转台驱动装置,它对电磁波存在干扰,所以在天线负大角度扫描区域实验值与仿真结果存在较大偏

差. 从图中可以看出, 口径积分-表面积分法和平面波谱-表面积分法的仿真结果是一致的, 结果曲线吻合的很好, 它们具有相同的精确度.

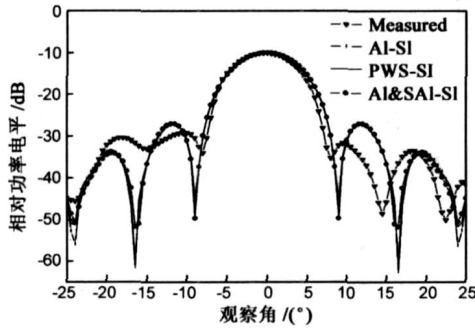


图 5 带罩天线远场方向图

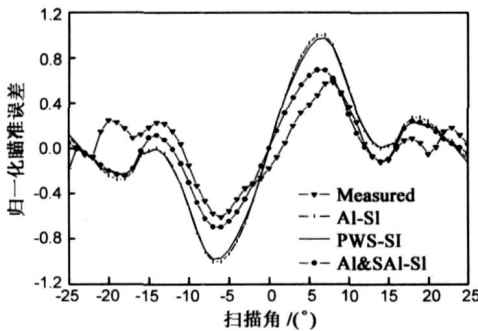


图 6 天线-罩系统瞄准误差

在远场方向图仿真中, 本文提出的口径/谱域积分-表面积分法与口径积分-表面积分法和平面波谱-表面积分法差别细微, 都与实验结果具有很好的一致性. 弹载天线罩最为重要的参数之一是瞄准误差^[12], 是远场方向图主瓣的极值与天线指向的角度偏差, 是一个关于远场方向图主瓣非常敏感的量^[13], 是带罩天线远场电性能分析的难点, 它要求远场方向图主瓣计算具有非常高的精确度. 口径/谱域积分-表面积分法与口径积分-表面积分法和平面波谱-表面积分法在远场方向图计算中虽然差别细微, 但这个微小的差别在瞄准误差上却有明显的表现, 从图 6 中可以清晰看出口径/谱域积分-表面积分法更趋近于实验值. 由于口径/谱域积分-表面积分法使得计算入射到罩壁的场更精确, 因而口径/谱域积分-表面积分法有比口径积分-表面积分法和平面波

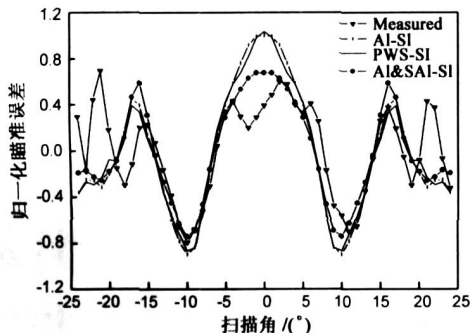


图 7 天线-罩系统瞄准误差率

谱-表面积分法更高的计算精确度. 需要说明, 本次仿真实理论模型假定理想天线罩, 天线口径场理想分布. 如果计及天线罩电厚度分布的不均匀和天线口径场分布的边缘效应等实际情况, 仿真曲线将更趋近于实测结果.

4 结论

本文通过分析口径积分和平面波谱理论在天线近场各个分量计算的特点, 提出了一种新的三维天线-罩系统电性能实用数值仿真方法: 口径/谱域积分-表面积分法. 这种方法在计算天线辐射近场时, 应用平面波谱理论计算与天线极化方向平行的电场分量及与天线极化方向垂直的磁场分量, 应用口径积分理论计算电场和磁场中的其余分量; 在计算天线-罩系统远区辐射场时采用表面积分技术. 该法对天线近场的计算更为精确、实用. 以弹载天线罩为仿真实例, 定量分析了天线-罩系统的远场方向图和瞄准误差及瞄准误差率. 口径/谱域积分-表面积分法与口径积分-表面积分法计算效率相当; 在远场方向图分析中, 口径/谱域积分-表面积分法与平面波谱-表面积分法和口径积分-表面积分法结果基本一致, 与实验值吻合较好; 在瞄准误差及瞄准误差率分析中, 口径/谱域积分-表面积分法结果与实验结果较另两种方法更为吻合, 证明口径/谱域积分-表面积分法具有更高的精确度. 该仿真方法的提出对提高天线罩电性能分析和电信设计水平具有重要意义.

参考文献:

- [1] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] James A Shifflett. CADDRAD: A physical optics radar/radome analysis code for arbitrary 3D geometries[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39(6): 73-79.
- [3] 张强, 曹伟. 基于曲面口径积分/几何光学的天线罩混合分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(4): 418-456. ZHANG QIANG, CAO WEI. The hybrid analysis of radome based on curvature aperture integration / geometry optics [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(4): 418-456. (in Chinese)
- [4] 张强, 杜耀惟, 曹伟, 等. 机载雷达罩电讯设计中的 AF-SI 仿真技术[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 1006-1008. ZHANG Qiang, DU Yao wei, CAO Wei, et al. The AF-SI simulate technique in electrical design of airborne radome [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(6): 1006-1008. (in Chinese)
- [5] D M Guo, M J Liu, R K Kang. A practical method for improving the pointing accuracy of the antenna radome system [J]. Key Engineering Materials, 2004, 257-258: 183-188.
- [6] WAN Guo bin, TANG Sharr jing, et al. Plane wave spectrum and boresight error of radome enclosed antennas [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1999, 12(2): 106-110.

- [7] Kazimierz Siwiak, Thomas B Dowling, et al. Boresight errors induced by missile radomes[J]. IEEE Trans on AP, 1979, 27(6): 832- 841.
- [8] D C F Wu, R C Rudduck. Plane wave spectrum surface integration technique for radome analysis[J]. IEEE Trans on AP, 1974, 22(3): 497- 500.
- [9] 戎华, 郭东明, 王晓明, 等. 离散天线罩曲面电性能分析的方法及数值实现[J]. 弹道学报, 2001, 13(2): 45- 49.
Rong Hua, Guo Dongming, Wang Xiaoming, et al. A numerical simulation method for analyzing the electromagnetic performance of radome constructed with discrete points[J]. Journal of Ballistics, 2001, 13(2): 45- 49. (in Chinese)
- [10] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [11] 戎华, 王晓明, 郭东明, 等. 带罩导弹远场方向图数值仿真中积分域的确定[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(9): 1245- 1250.
Rong Hua, Wang Xiaoming, Guo Dongming, et al. The determination of integral area in numerical simulation of far directional pattern of missile radome[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(9): 1245- 1250. (in Chinese)
- [12] D M Guo, M J Liu, R K Kang, et al. Determination of the grinding area and allowance in the radome grinding[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259 260: 174- 179.

- [13] 张谟杰. 主被动复合天线罩瞄准线误差分析[J]. 制导与引信, 2003, 24(3): 33- 37.
ZHANG Mσjie. Aiming line error analysis of actives passive composite radome[J]. Guidance/Fuze, 2003, 24(3): 33- 37. (in Chinese)

作者简介:



郭东明 男, 1959年4月出生于河南省温县. 大连理工大学教授、博士生导师. 研究方向为精密及特种加工、数字化设计制造及电磁理论等.



张春波 男, 1975年12月出生于黑龙江省拜泉县. 大连理工大学博士生. 研究方向为天线罩电性能数值仿真及补偿.
Email: zhangcb@2911.net