

各向异性材料涂覆目标电磁散射特性仿真

余定峰* 何思远 朱国强 张凡
(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要: 该文基于阻抗边界条件(IBC), 提出了 3 维各向异性材料涂覆目标电磁散射特性的矩量法(MoM)解决方案。根据表面等效原理, 采用感应电磁流以 3 维 RWG(Rao-Wilton-Glisson)矢量基函数展开的伽略金法。以表面阻抗矩阵表征电磁参数, 实现各向异性材料涂覆目标的电磁仿真, 算例结果与 Mie 级数解等精确结果吻合良好。对各向异性材料涂覆复杂目标的电磁散射特性进行分析, 为目标的雷达隐身和反隐身提供理论支持。

关键词: 电磁散射; 各向异性; 阻抗边界条件; RWG (Rao-Wilton-Glisson)

中图分类号: TN011; TN04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1718-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01230

Simulation of the Electromagnetic Scattering for Target Coated with Anisotropic Materials

Yu Ding-feng He Si-yuan Zhu Guo-qiang Zhang Fan
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The Method of Moments (MoM) based on Impedance Boundary Condition (IBC) is presented to analyze the electromagnetic scattering characteristics of three-dimensional target coated with anisotropic materials. According to the surface equivalence principle, Galerkin method is used with electric or magnetic current expanded by three-dimensional Rao-Wilton-Glisson (RWG) vector basis functions. The electromagnetic simulation of target coated with anisotropic materials is performed with the electromagnetic parameters characterized by the surface impedance matrix, while the numerical results agree well with the exact results such as Mie series solution. Analyses for the electromagnetic scattering properties of complex targets coated with anisotropic materials are presented, which provide theoretical support for the radar stealth and anti-stealth.

Key words: Electromagnetic scattering; Anisotropic; Impedance Boundary Condition (IBC); Rao-Wilton-Glisson (RWG)

1 引言

目标雷达散射截面(RCS)的缩减在军事领域具有重要的意义, 是雷达对抗中的关键技术之一。将雷达吸波材料涂覆于目标表面, 不仅能削弱散射电磁波的能量, 还有望将入射的电磁波朝着无关的方向散射, 这已成为复杂军用目标电磁隐身技术所追求的目标, 同时也成为雷达反隐身领域所关心的研究课题, 在电子对抗中有着广阔的应用前景。

3 维各向异性材料涂覆目标的电磁散射特性研究多年来一直是计算电磁学领域颇受关注的课题。Monzon^[1]于 1989 年提出了求解 3 维各向异性介质旋转体电磁散射的解析方法。随后 Chang 等人^[2]提出了基于阻抗边界条件的积分方程方法, 但目标的结

构都只限于旋转体。Pelosi 等人^[3]提出了一种物理光学方法, 用于分析各向异性材料涂覆平面结构目标的散射, 但高频方法适用于电大尺寸问题, 且未作非平面结构目标表面各向异性方面的研究。Kobidze 等人^[4]于 2004 年提出了 3 维非均匀各向异性介质体散射的矩量法, 电流采用体 RWG 矢量基函数展开, 虽然不适合本文研究的表面各向异性薄层材料涂覆目标的电磁散射问题, 但颇具指导意义。国内耿友林等人^[5]采用解析法研究了各向异性铁氧体介质涂覆导体球的电磁散射, 陈博韬等人^[6]采用物理光学法(PO)与有限元法混合方法研究了各向异性材料部分涂覆导体的散射特性, 毛仕春等人^[7]研究了二维各向异性椭圆柱的电磁散射, 但都采用张量磁导率或介电常数模拟各向异性材料。各向异性材料涂覆目标电磁散射有两种不同建模方法, 一种仍然以材料涂覆目标为建模对象, 另一种则将材料涂覆目标等效为表面阻抗目标来建模, 它们在描述散射目标时

2010-11-08 收到, 2011-01-25 改回

国家自然科学基金(60671040, 61001059)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

*通信作者: 余定峰 ydf.xiaofeng@gmail.com

即表现出极大的差异，而后者往往具有更广泛的适用性^[8]。

对于大多数雷达吸波材料涂覆目标，可用 Leontovich 阻抗边界条件近似分析其表面电磁散射特性^[9]。本文研究了基于阻抗边界条件的矩量法 (MoM-IBC) 求解各向异性材料涂覆目标电磁散射特性的原理和过程。根据表面等效原理，采用感应电磁流以 RWG 矢量基函数展开的伽略金矩量法^[10]，选用表面电场积分方程可简单有效地处理介质涂覆任意形状（表面开放或者封闭）目标的电磁散射问题。

2 MoM-IBC 算法原理

根据等效原理，薄层介质涂覆导电目标可等效为目标表面等效电流源 \mathbf{J} 和磁流源 \mathbf{M} 散射电磁场的问题。如图 1 所示，为了清晰地描述目标表面的各向异性，在目标表面建立局部参考坐标系 (x, y, z) ，其中 x, y 为目标表面的两个切向单位矢量， z 为外法线方向单位矢量。目标表面涂覆各向异性材料的光轴方向矢量设为 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ，其中 u 轴与 x 轴的夹角为光轴偏角 α 。

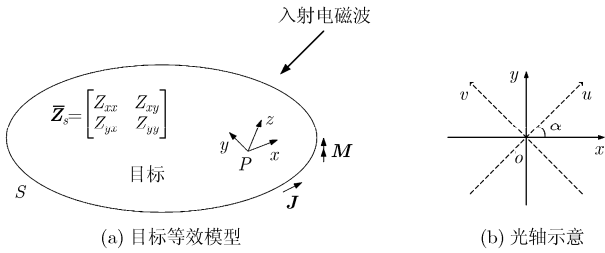


图 1 电磁波照射各向异性材料涂覆目标及各向异性光轴示意

对于任意形状的 3 维目标，通过光轴偏角 α 建立各向异性光轴与参考坐标之间的转换关系，得到任意主轴分布的目标表面阻抗的表达式为^[11]

$$\bar{\mathbf{Z}}_s = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha Z_{uu} + \sin^2 \alpha Z_{vv} & \cos \alpha \sin \alpha (Z_{uv} - Z_{vu}) \\ \cos \alpha \sin \alpha (Z_{uv} - Z_{vu}) & \cos^2 \alpha Z_{vv} + \sin^2 \alpha Z_{uu} \end{bmatrix} \quad (1)$$

阻抗边界条件是由前苏联学者 Leontovich 在 1944 年提出的，适用于非理想导体或有耗涂层的理想导体与周围媒质的界面上，它可以表示为

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}) = -\bar{\mathbf{Z}}_s \cdot (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}) \quad (2)$$

在各向异性材料涂覆目标的表面边界 S 上应用等效原理，将复合散射体等效为感应电流和感应磁流在其表面上的分布。这组等效源满足

$$\mathbf{M} = \mathbf{E} \times \hat{\mathbf{n}}, \quad \mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H} \quad (3)$$

考虑到磁场积分方程依赖的边界条件在求解薄壳、条带或平板等开放结构的电磁散射问题时会失

效，故选用电场积分方程(略去时谐因子 $e^{j\omega t}$)

$$\mathbf{E}^s = -jk\eta\mathbf{A} - \nabla\phi_e - \nabla \times \mathbf{F} \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ 为自由空间波数， $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 为自由空间波阻抗， $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int \mathbf{J}(\mathbf{r}')G(\mathbf{r}|\mathbf{r}')d\mathbf{s}'$ 为磁矢位， $\phi_e(\mathbf{r}) = \int \frac{\rho_e(\mathbf{r}')}{\varepsilon} G(\mathbf{r}|\mathbf{r}')d\mathbf{s}'$ 和 $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int \mathbf{M}(\mathbf{r}')G(\mathbf{r}|\mathbf{r}')d\mathbf{s}'$ 分别为电标位和电矢位， $G(\mathbf{r}|\mathbf{r}') = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$ 为 3 维格林函数， \mathbf{r}' 和 \mathbf{r} 分别代表源点和场点位置。

对于介质涂覆导电目标的电磁散射问题，选用表面积分方程，且等效电流源和磁流源都分布于目标表面，利用 ANSYS 软件建立目标的高精度几何模型并用三角形面元剖分，再将电流以 3 维 RWG 矢量基函数展开，试函数取与基函数相同的形式，即伽略金矩量法，既保证电流在三角形面元交界处的连续性，又使结果具高稳定性。

面结构上的 RWG 基函数定义为^[10]

$$\mathbf{f}_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \boldsymbol{\rho}_n^+, & \mathbf{r} \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \boldsymbol{\rho}_n^-, & \mathbf{r} \in T_n^- \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

则等效电流可表示为

$$\mathbf{J} \cong \sum_{n=1}^N I_n \mathbf{f}_n(\mathbf{r}) \quad (6)$$

应用电流连续性方程可得

$$\rho_e = \frac{-1}{j\omega} \nabla \cdot \mathbf{J} \quad (7)$$

依据散射叠加定理得

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s \quad (8)$$

联立式(2)，式(3)和式(8)得

$$(\bar{\mathbf{Z}}_s \cdot \mathbf{J} - \mathbf{E}^s)|_t = \mathbf{E}^i|_t \quad (9)$$

采用伽略金匹配，选用与基函数相同形式的试函数 \mathbf{f}_m 作用于式(9)，并将式(4)代入其中得

$$\langle \bar{\mathbf{Z}}_s \cdot \mathbf{J} + jk\eta\mathbf{A} + \nabla\phi_e + \nabla \times \mathbf{F}, \mathbf{f}_m \rangle = \langle \mathbf{E}^i, \mathbf{f}_m \rangle \quad (10)$$

式中 $\langle \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle = \int_S \mathbf{f} \cdot \mathbf{g} d\mathbf{s}$ 表示对两个矢量函数的内积的积分。将电流的展开式(6)代入式(10)得到一个 $N \times N$ 线性方程组，写成矩阵形式为

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{Z} = [Z_{mn}]$ 是 $N \times N$ 矩阵， $\mathbf{I} = [I_n]$ 和 $\mathbf{V} = [V_m]$ 是 N 维列向量。 \mathbf{Z} 和 \mathbf{V} 的矩阵元素分别为

$$Z_{mn} = \langle jk\eta \mathbf{A}(\mathbf{f}_n) + \nabla \phi_e(\mathbf{f}_n), \mathbf{f}_m \rangle + \langle \bar{\mathbf{Z}}_{sn} \cdot \mathbf{f}_n + \nabla \times \mathbf{F}(\hat{\mathbf{n}} \times (\bar{\mathbf{Z}}_{sn} \cdot \mathbf{f}_n)), \mathbf{f}_m \rangle \quad (12)$$

$$V_m = \langle \mathbf{E}^i, \mathbf{f}_m \rangle \quad (13)$$

式中 $\mathbf{A}(\mathbf{f}_n)$ 和 $\phi_e(\mathbf{f}_n)$ 分别表示表面电流 \mathbf{f}_n 产生的磁矢位和电标位, $\mathbf{F}(\hat{\mathbf{n}} \times (\bar{\mathbf{Z}}_{sn} \cdot \mathbf{f}_n))$ 表示表面磁流 $\hat{\mathbf{n}} \times (\bar{\mathbf{Z}}_{sn} \cdot \mathbf{f}_n)$ 产生的电矢位^[12]. \mathbf{E}^i 为入射电场, 根据激励源的不同可取不同的形式, 一般为平面波入射, 则 $\mathbf{E}^i = (E_\theta \hat{\theta}_0 + E_\phi \hat{\phi}_0) e^{-jk \cdot \mathbf{r}}$.

需要注意的是, 当源点 \mathbf{r}' 所在三角形面元与场点 \mathbf{r} 所在三角形面元重合时, 格林函数及其梯度的积分出现奇异性, 文献[13]对奇异积分的处理作了详细的推导, 这里不做赘述. 利用稳定的双共轭梯度迭代法快速求解矩阵方程, 即可得到表面电流的展开系数, 从而求得介质涂覆 3 维导电目标的电磁散射特性. 当表面阻抗矩阵元素 $Z_{uu} = Z_{vv}$ 且 $\alpha = 0^\circ$ 时, 该算法退化为 3 维各向同性材料涂覆目标的 MoM-IBC 算法. 当阻抗矩阵 $\bar{\mathbf{Z}}_s = \mathbf{0}$ 时, 由式(12)可以看出, 该算法退化为 3 维完纯导电(PEC)目标的 MoM 算法. 因而本文提出的 MoM-IBC 算法可以进行导电目标表面全部或局部涂覆各向同性介质或各向异性介质材料情况下的电磁仿真, 模拟战场环境下的隐身目标的雷达特性预估.

3 数值算例及结果分析

算例 1 PEC 球及各向同性材料涂覆导电球的电磁散射特性. 由于 PEC 球及各向同性材料涂覆导电球的电磁散射已有 Mie 级数解, 故这里给出用 MoM-IBC 算法求解得到的双站 RCS, 验证算法的准确性. 先考察入射角 $\theta_0 = 0^\circ, \phi_0 = 0^\circ$, 频率为 $f = 300$ MHz, 电场 θ 极化的平面波照射半径 $a = 1$ m 的导电球的双站 RCS, 散射角 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ, \phi = 0^\circ$. 再将导电球表面涂覆各向同性材料, 其阻抗参数为 $Z_{uu} = Z_{vv} = (0.5 + j0.5)\eta, \alpha = 0^\circ$. 计算得到的归一化双站 RCS 结果如图 2 所示, 与 Mie 级数结果吻合良好.

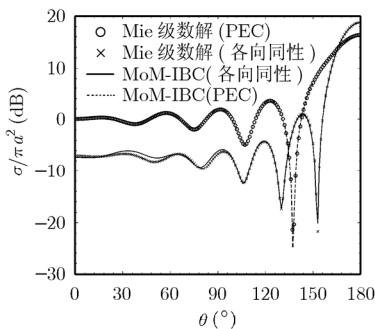


图 2 PEC 及各向同性材料涂覆导电球的双站 RCS

算例 2 各向异性材料涂覆导电薄平板的电磁散射有许多重要的实际应用, 是复杂 3 维金属目标 RCS 缩减的理论基础. 考察边长 76 mm 无限薄正方形 PEC 平板, 上表面涂覆各向异性材料, 各向异性光轴与参考坐标的夹角为 $\alpha = 35^\circ$, 阻抗参数为 $Z_{uu} = 2\eta, Z_{vv} = 5\eta$. 平面波探测, $\theta_0 = 0^\circ \sim 90^\circ, \phi_0 = 25^\circ$, 频率为 $f = 9.2$ GHz, 电场 θ 极化. 根据后向散射场计算得到的单站 RCS 结果如图 3 所示, 与 Pelosi 文献结果吻合良好, 且在接近 90° 掠入射平板时物理光学方法已无法准确预估, 而本文提出的 MoM-IBC 算法仍然有效.

算例 3 各向异性材料涂覆空间卫星目标的电磁散射特性. 卫星低轨道飞行时容易被雷达侦察截获, 可以利用等离子体来衰减雷达波以达到隐身的目的. 由于宇宙射线的作用, 在大气层外空间存在着大量的带电粒子, 可以考虑利用一定位形的磁场(如磁镜)来将这些粒子束缚在卫星周围形成隐身的等离子体, 而且磁场应能适时产生^[14]. 将等离子体层覆盖的卫星目标等效为各向异性材料涂覆目标, 以各向异性表面阻抗表征复合目标的电磁参数, 利用 MoM-IBC 算法可进行空间目标的 RCS 精确预估.

如图 4 所示卫星模型, 分别考察卫星表面为 PEC 及卫星表面涂覆各向异性等离子体情况下的电磁散射特性. 各向异性光轴与参考坐标的夹角为 $\alpha = 10^\circ$, 阻抗参数为 $Z_{uu} = (1 - j0.05)\eta, Z_{vv} = (1 + j0.1)\eta$. 平面波探测, 入射角度为 $\theta_0 = 0^\circ \sim 180^\circ, \phi_0 = 90^\circ$, 频率为 $f = 300$ MHz, 电场 θ 极化, 根据后向散射场计算得到的单站 RCS 结果如图 5 所示. PEC 情形 MoM-IBC 算法与商用电磁建模分析软件 FEKO(MLFMM)仿真结果一致. 当卫星表面涂覆各向异性等离子体材料时, RCS 缩减效果非常明显, 且峰值的方位相对于 PEC 情形而言会有一定的偏移, 体现了各向异性材料对目标散射回波的幅度衰减和相位扰动双重效应, 从而实现强有力的雷达隐身效果.

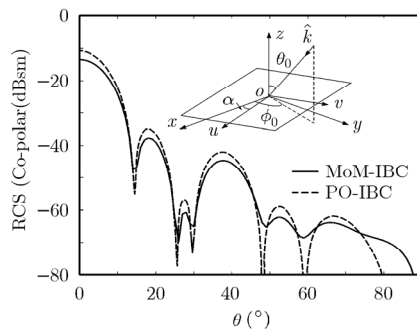


图 3 各向异性材料涂覆导电薄平板的单站 RCS

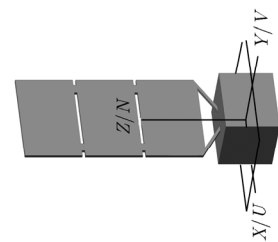


图 4 卫星模型

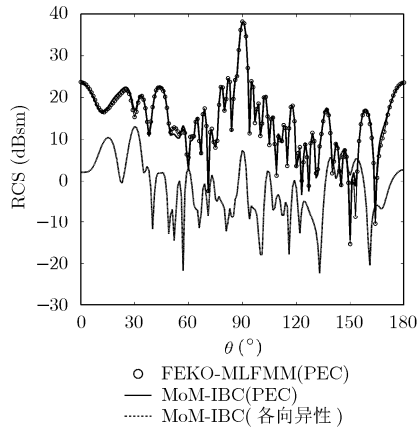


图 5 PEC 及各向异性材料涂覆卫星的单站 RCS

4 结论

基于阻抗边界条件，本文提出了 3 维各向异性材料涂覆目标电磁散射特性的 MoM-IBC 预估算法。通过若干典型算例，验证了该算法的正确性。需要说明的是，为了便于与文献结果对比，给出的各向异性材料是涂覆在平板结构上，但该 MoM-IBC 算法可用于任意结构表面的各向异性材料涂覆情形。当退化为各向同性材料涂覆或 PEC 情形时，MoM-IBC 算法仍然精确有效，大大拓宽了其应用范围，可进行导电目标表面全部或局部涂覆各向同性或各向异性材料情形下的电磁仿真，为目标的雷达隐身提供理论支持。如果将该算法与当下流行的快速多极子^[15]、多层 UV 分解^[16]等快速算法结合，则可更好地应用于工程实际问题。

参考文献

- [1] Monzon J C. Three-dimensional field expansion in the most general rotationally symmetric anisotropic material: application to scattering by a sphere[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, AP-37(6): 728-735.
- [2] Chang A H, Yee K S, and Prodan J. Comparison of different integral equation formulations for bodies of revolution with anisotropic surface impedance boundary conditions[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, AP-40(8): 989-991.
- [3] Pelosi G, Manara G, and Fallai M. Physical optics expressions for the fields scattered from anisotropic impedance flat plates[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1997, 14(6): 316-318.
- [4] Kobidze G and Shanker B. Integral equation based analysis of scattering from 3-D inhomogeneous anisotropic bodies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, AP-52(10): 2650-2658.
- [5] 耿友林, 吴信宝, 官伯然. 导体球涂覆各向异性铁氧体介质电磁散射的解析解[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1740-1743. Geng You-lin, Wu Xin-bao, and Guan Bo-ran. The analytical solution to the electromagnetic scattering by an anisotropic ferrite-coated conducting sphere[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1740-1743.
- [6] 陈博韬, 谢拥军, 李晓峰等. 各向异性材料部分涂覆导体的散射特性研究[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(6): 992-996. Chen Bo-tao, Xie Yong-jun, and Li Xiao-feng, et al. Scattering characteristic of conducting targets with partially-coated anisotropic medium[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(6): 992-996.
- [7] 毛仕春, 吴振森, 邢赞扬. 二维各向异性椭圆柱的电磁散射[J]. *电子学报*, 2010, 38(3): 529-533. Mao Shi-chun, Wu Zhen-sen, and Xing Zan-yang. Scattering by a homogeneous anisotropic elliptic cylinder: two-dimensional case[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(3): 529-533.
- [8] Senior T B A and Volakis J L. *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*[M]. London, UK, IEE, 1995: 1-6.
- [9] Lin R, Haavisto A, and Arkkio A. Analysis of eddy-current loss in end shield and frame of a large induction machine[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(3): 942-948.
- [10] Rao S M, Wilton D R, and Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, AP-30(3): 409-418.
- [11] Chen Hai-tao, Zhu Guo-qiang, and He Si-yuan. Using genetic algorithm to reduce the radar cross section of three-dimensional anisotropic impedance object[J]. *Progress in Electromagnetic Research B*, 2008, (9): 231-248.
- [12] Sadigh A and Arvas E. Electromagnetic scattering from arbitrarily shaped conducting bodies coated with a thin layer of lossy magnetic material[J]. *IEE Proceedings-H*, 1993, 140(4): 249-253.
- [13] Graglia R D. On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-D Green's function or its gradient on a plane triangle[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, AP-41(10): 1448-1455.
- [14] 袁忠才. 飞行器的等离子体隐身应用[J]. *航天电子对抗*, 2004, (5): 42-44. Yuan Zhong-cai. Application of plasma stealth for aircraft[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2004, (5): 42-44.
- [15] 潘小敏, 盛新庆. 一种高性能并行多层快速多极子算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(3): 580-584. Pan Xiao-min and Sheng Xin-qing. A high-performance parallel MLFMA[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(3): 580-584.
- [16] Deng Fang-shun, He Si-yuan, and Chen Hai-tao, et al. Numerical simulation of vector wave scattering from the target and rough surface composite model with 3-D multilevel UV method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, AP-58(5): 1625-1634.

余定峰：男，1986 年生，博士生，研究方向为目标电磁散射、雷达成像。
何思远：女，1982 年生，博士，研究方向为复杂环境中目标电磁散射特性仿真与分析、电磁散射与逆散射。
朱国强：男，1959 年生，教授，博士生导师，研究方向为军用目标电磁散射特性、天线理论与技术。