

介质涂敷电大腔体电磁散射 IPO 研究

何小祥 徐金平* 顾长青

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016)

* (东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘要: 将迭代物理光学法(IPO)推广应用于研究具有非完纯导电边界的电磁散射问题, 建立了相应的理论模型, 并应用到内壁涂敷介质的电大尺寸腔体的电磁散射特性分析中。在每一次 IPO 迭代步骤中, 应用 Fresnel 反射系数计算出介质表面总场。通过多次迭代, 求出腔体内壁上稳定的电磁场分布, 进而计算出腔体的电磁散射特性。数值结果表明了这种扩展的 IPO 方法的在分析电大尺寸介质涂敷目标中的正确性和高效性。

关键词: 迭代物理光学, Fresnel 反射系数, 介质涂敷腔体

中图分类号: TN0441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)01-0136-03

IPO for Analysis of EM Scattering by Dielectric Coated Electrically Large Cavities

He Xiao-xiang Xu Jin-ping* Gu Chang-qing

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* (State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract A theoretical model of Iterative Physical Optics (IPO) is established for the ElectroMagnetic (EM) scattering problem with imperfectly conducting boundary and applied to the analysis of EM scattering by a dielectric coated electrically large cavity. In each IPO iteration step, the total field on the dielectric surface is computed utilizing the Fresnel reflection coefficient. By employing iteration process, the EM field distribution on the inner wall of the cavity is predicted and then the scattering fields of the cavity are obtained. Numerical results demonstrate that the improved IPO algorithm is correct and effective for the analysis of dielectric coated electrically large targets.

Key words Iterative Physical Optics (IPO), Fresnel reflection coefficient, Dielectric coated cavity

1 引言

在飞行器、舰船等目标的电磁隐身技术中, 飞行器的进气道、座舱, 舰船的烟囱等腔体结构是重要的散射源, 对其采取隐身措施非常必要。涂敷吸波材料是常用的一种减小雷达散射截面(RCS)的有效方法, 因此对涂敷介质的非完纯导电腔体目标的电磁散射特性进行分析具有重要的工程意义。上述腔体结构在常用雷达波段内电尺寸都较大, 对于有部分介质涂敷的腔体结构, 以往常采用高低频混合方法进行分析^[1-5], 将涂敷介质部分应用低频方法进行处理, 完纯导体部分应用高频方法进行分析。相对于高频方法, 高低频混合算法的计算时间长, 内存消耗大, 从而一定程度上限制了它在介质涂敷腔体电磁分析中的应用。直接使用高频方法对介质涂敷腔体的电磁散射特性进行分析^[6]无疑可以大大缩减计算时间和内存消耗。迭代物理光学(IPO)方法^[7]是一种分析腔体

目标的电磁散射性行之有效的高频方法。文献[8]提出了 IPO 方法的子域连接法, 并用于分析复杂深腔结构的散射特性。但是, 现有的 IPO 方法仅限于分析完纯导电边界的高频电磁问题。文献[4,5]将这种方法分别与矢量有限元法、时域有限差分方法(FDTD)相结合成功地分析了终端结构复杂腔体的电磁散射特性。

本文将 IPO 方法推广应用到非完纯导电边界的电磁分析中, 建立了具有阻抗边界的 IPO 算法理论模型, 并应用于分析电大尺寸、介质涂敷腔体的电磁散射特性, 有效拓宽了 IPO 的应用范围。相对于高低频混合方法, 该方法程序实现简单, 计算时间少, 内存消耗小。

2 理论模型

作为一种高频方法, IPO 方法通过迭代计入了电磁场在腔体内的多次反射, 提高了计算精度。图 1 是一个由部分介

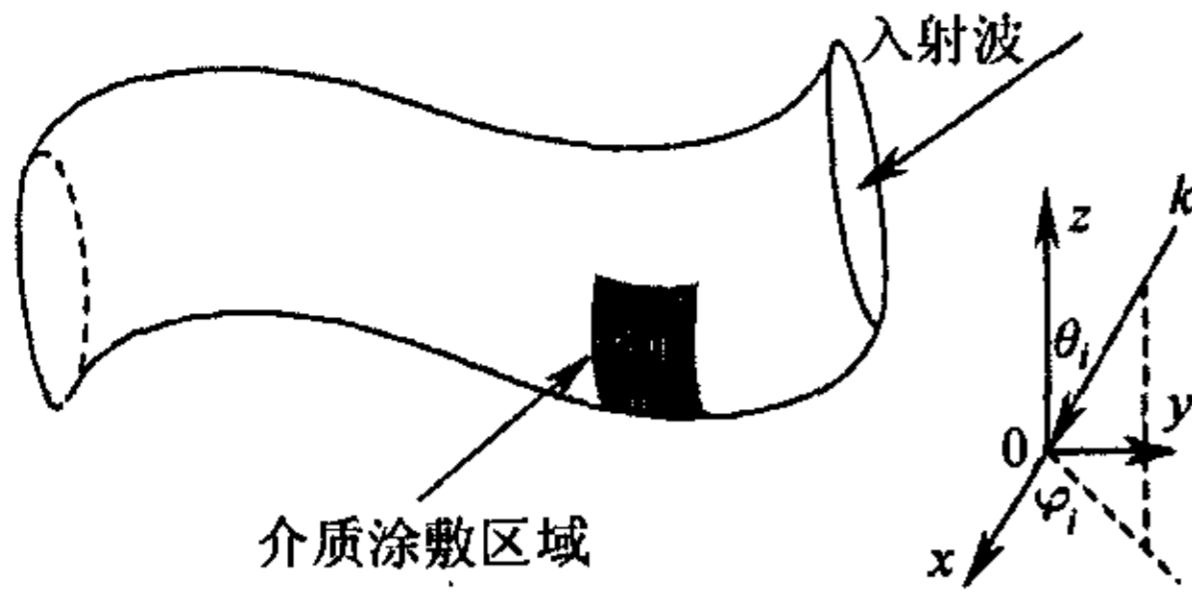


图1 部分介质涂敷腔体示意图

质涂敷导电壁构成的开口深腔结构示意图。设一均匀平面电磁波照射到该开口腔体, 若不考虑腔体壁外侧的散射及口面绕射贡献, 腔体口面上的入射电磁场 $E(r'_a), H(r'_a)$ 在腔体内侧壁上产生的初始总场为入射场和反射场之和。通过介质涂层表面的 Fresnel 反射系数, 利用 Kirchhoff 近似公式可得初始总场为

$$H_0(r_c) \approx \int_{S_a} (1 + R(r_c, r'_a, \epsilon_r, d)) (\hat{n}' \times H_a(r'_a)) \times \nabla G(r_c - r'_a) dS'_a + \frac{1}{jkZ} \nabla \times \int_{S_a} (1 + R(r_c, r'_a, \epsilon_r, d)) \times (E_a(r'_a) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_c - r'_a) dS'_a \quad (1)$$

$$E_0(r_c) \approx - \int_{S_a} (1 - R(r_c, r'_a, \epsilon_r, d)) (E_a(r'_a) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_c - r'_a) dS'_a + \frac{1}{jkY} \nabla \times \int_{S_a} (1 - R(r_c, r'_a, \epsilon_r, d)) \times (\hat{n}' \times H_a(r'_a)) \times \nabla G(r_c - r'_a) dS'_a \quad (2)$$

式中, k 是自由空间波数, $Z = 1/Y$ 是自由空间波阻抗, \hat{n}' 是腔体侧面 S_c 上内法向单位矢量, R 为介质涂敷表面反射系数, 根据 Fresnel 定理, 反射系数 R 是场点位置 r , 源点位置 r' , 介质特性 ϵ_r 和厚度 d 的函数, 反射系数 R 的具体求解过程参见文献[9]。对于完纯导体表面, $R=1$, 式(1)和(2)转化为磁场积分方程。当 $R=0$ 时, 式(1)和(2)退化为传统的 Kirchhoff 近似公式。 G 是自由空间 Green 函数, 对于三维情况, $G(r_c - r'_a) = e^{-jk|r_c - r'_a|} / (4\pi|r_c - r'_a|)$, $\nabla G(r, r')$ 是格林函数的梯度, 可表达为

$$\nabla G(r, r') = \hat{R}(jk + 1/R) [e^{-jkr} / (4\pi R)]$$

其中, $R = |r - r'|$, $\hat{R} = (r - r') / R$ 。

大部分高频方法不考虑目标表面各单元间的相互作用, 由表达式(1), (2)计算出目标表面电磁场分布(金属表面的电流分布)后, 直接求解散射场。IPO 方法通过迭代计入了各单元间的耦合, 从而提高了精度。在 IPO 迭代过程中, 运用 Fresnel 反射系数和 Kirchhoff 近似公式计算出介质单元表面总场:

$$H_n(r_c) \approx H_{n-1}(r_c) + \int_{S_c} (1 + R(r_c, r'_c, \epsilon_r, d)) \times (\hat{n}' \times H_{n-1}(r'_c)) \times \nabla G(r_c - r'_c) dS'_c + \frac{1}{jkZ} \nabla \times \int_{S_c} (1 + R(r_c, r'_c, \epsilon_r, d)) \times (E_{n-1}(r'_c) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_c - r'_c) dS'_c \quad (3)$$

$$E_n(r_c) \approx E_{n-1}(r_c) - \int_{S_c} (1 - R(r_c, r'_c, \epsilon_r, d)) \times (E_{n-1}(r'_c) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_c - r'_c) dS'_c + \frac{1}{jkY} \nabla \times \int_{S_c} (1 - R(r_c, r'_c, \epsilon_r, d)) \times (\hat{n}' \times H_{n-1}(r'_c)) \times \nabla G(r_c - r'_c) dS'_c \quad (4)$$

式中积分号 \int 为主值积分, n 为迭代次数 ($n=1, 2, 3, \dots$), 通过多次迭代, 获得腔体侧壁上稳定的电磁场分布。同一平面上各介质涂敷单元间相互作用无法应用 Fresnel 反射系数获得, 只能使用其它办法, (如介质涂敷表面格林函数), 考虑到在实际工程应用中介质涂敷厚度往往很薄, 介质表面各单元间的相互作用较小(当涂敷厚度为零时, 相互作用消失), 可以运用近似的方法将其忽略不计, 本文最后所给出的数据结果验证了这种近似的合理性。

通过式(3)、式(4)的迭代, 求得侧壁电磁场分布后, 应用传统的 Kirchhoff 近似公式:

$$H(r_a) \approx \int_{S_c} (\hat{n}' \times H_c(r'_c)) \times \nabla G(r_a - r'_c) dS'_c + \frac{1}{jkZ} \nabla \times \int_{S_c} (E_c(r'_c) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_a - r'_c) dS'_c \quad (5)$$

$$E(r_a) \approx - \int_{S_c} (E_c(r'_c) \times \hat{n}') \times \nabla G(r_a - r'_c) dS'_c + \frac{1}{jkY} \nabla \times \int_{S_c} (\hat{n}' \times H_c(r'_c)) \times \nabla G(r_a - r'_c) dS'_c \quad (6)$$

得到腔体口面的电磁场分布, 然后通过辐射矢量求得腔体的散射场:

$$E_\theta^s(r, \theta, \phi) = (jke^{-jkr} / (4\pi r)) [L_\theta(\theta, \phi) + ZN_\theta(\theta, \phi)] \quad (7)$$

$$E_\phi^s(r, \theta, \phi) = (jke^{-jkr} / (4\pi r)) [L_\phi(\theta, \phi) - ZN_\phi(\theta, \phi)] \quad (8)$$

辐射矢量 $L_\theta, L_\phi, N_\theta, N_\phi$ 的求解方法参见文献[8]。通过散射场表达式可以得到介质涂敷腔体的 RCS 曲线。

3 数值结果

为了验证本文将 IPO 方法推广到介质涂敷目标分析中的理论模型的正确性和有效性, 根据以上算法, 编写程序对介质涂敷矩形腔体的电磁散射问题进行了分析。腔体尺寸为 $a \times b \times c$, 其中, a 和 b 分别表示腔体横截面矩形的长和宽, c 为腔体深度。电磁波波长 $\lambda = 1\text{m}$ 。

图2为底部涂敷介质的矩形腔体的 $\theta\theta$ 极化单站 RCS 曲线。其中 $\epsilon_r = (2.25, -5E-4)$, $\mu_r = 1.0$, 介质涂敷厚度为 0.01λ , 腔体尺寸为 $5\lambda \times 5\lambda \times 10\lambda$ 。从图中可以看出, 在 0° 到 50° 的范围内应用 IPO 方法分析得到的曲线与应用文献[4]所提出的 IPO/FEM 方法得到的数据曲线吻合得非常好, 从而验证了本算法的正确性。由于在工程应用中, 0° 到 50° 范围内数据曲线最为重要, 且当入射角度加大后, 腔体内的

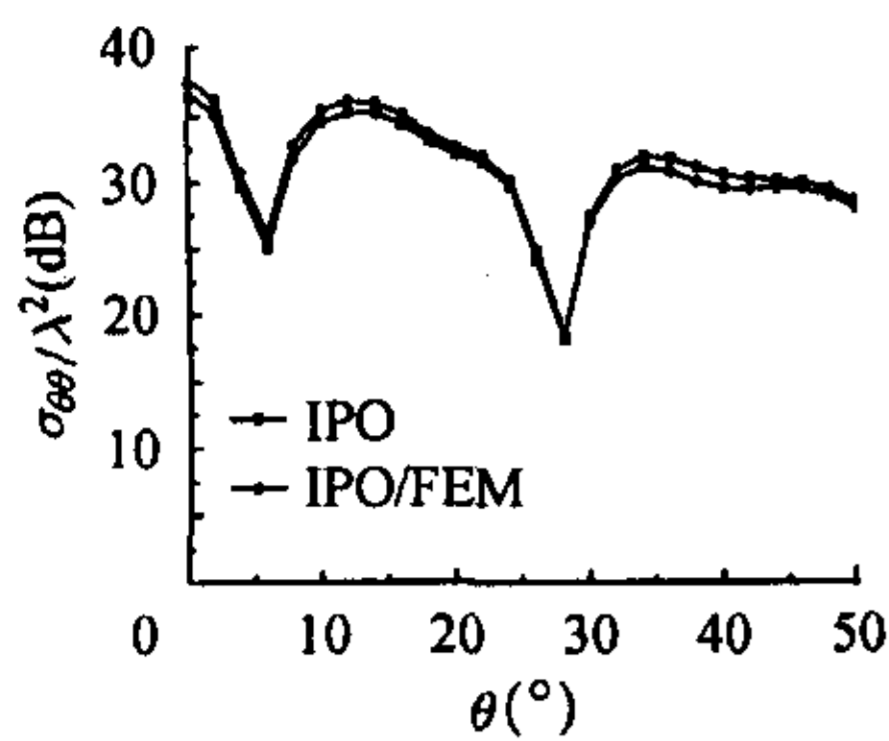


图2 底部涂敷一层较薄
介质腔体单站 RCS 曲线

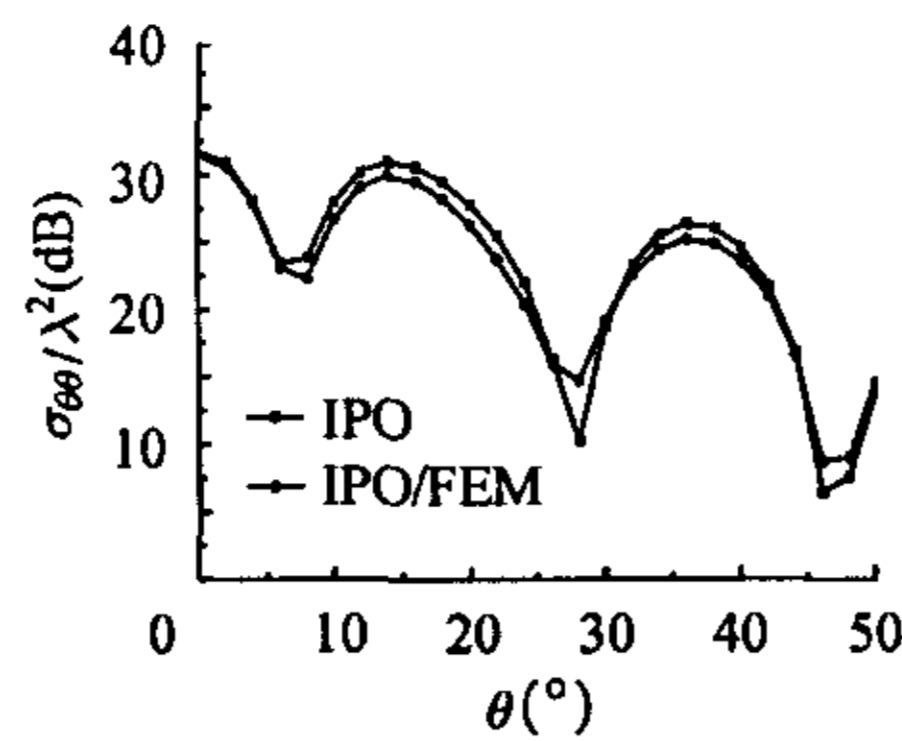


图3 底部涂敷一层较厚
介质腔体单站 RCS 曲线

电磁波反射次数增加, IPO 计算精度不高, 所以本文的计算实例均在 0° 到 50° 范围内进行分析。

在腔体底部涂敷一层厚度为 0.1λ 的介质, 介电常数 $\epsilon_r = (3.25, -0.13)$, $\mu_r = 1.0$, 腔体尺寸为 $4\lambda \times 4\lambda \times 8\lambda$ 。应用 IPO 和 IPO/FEM 方法计算得到的单站 RCS 曲线绘于图 3。可见, 对于介质涂敷较厚度和介电常数较大时, 采用 IPO 得到数据结果与使用 IPO/FEM 得到数据结果仍然吻合很好。与高低频相结合的混合算法相比, 利用 IPO 方法对介质涂敷腔体进行分析, 无需使用低频方法进行处理, 节省了大量的计算时间和内存消耗, 以图 3 的 RCS 曲线计算为例, 在 AMD 1.2G 的 PC 机上应用文献[4]的 IPO/FEM 方法进行计算, 所需内存为 46.416M, 计算时间 10h8min; 而应用本文所给出的 IPO 方法进行分析, 所需内存为 2.6M, 计算时间只需 15min44s, 计算时间仅为 IPO/FEM 方法的 2.6%, 内存消耗也仅为 5.6%。

图 4 为分别应用本文的 IPO 方法和文献[4]所提出的 IPO/FEM 方法对底部介质涂敷腔体进行分析所得双站 RCS 曲线, 可以看出, 二者的一致性很好。腔体尺寸为 $4\lambda \times 4\lambda \times 8\lambda$, 底部涂敷介质的厚度为 0.05λ , 介电常数 $\epsilon_r = (4.0, -1.05)$, $\mu_r = 1.0$, θ 极化电磁波入射角度为 $\varphi_i = 0^\circ$, $\theta_i = 30^\circ$, 散射角度 $\varphi_s = 0^\circ$ 。

本文应用 IPO 方法对一个侧壁涂敷介质的矩形腔体的单站 RCS 进行了计算。腔体尺寸为 $4\lambda \times 4\lambda \times 4\lambda$, 介质涂层厚度为 0.05λ , 介电常数 $\epsilon_r = (3.25, -0.13)$, $\mu_r = 1.0$ 。计算结果如图 5 所示。图中同时给出了应用 FDTD 方法计算得到的结果, 在 0° 到 50° 范围内两者吻合较好。

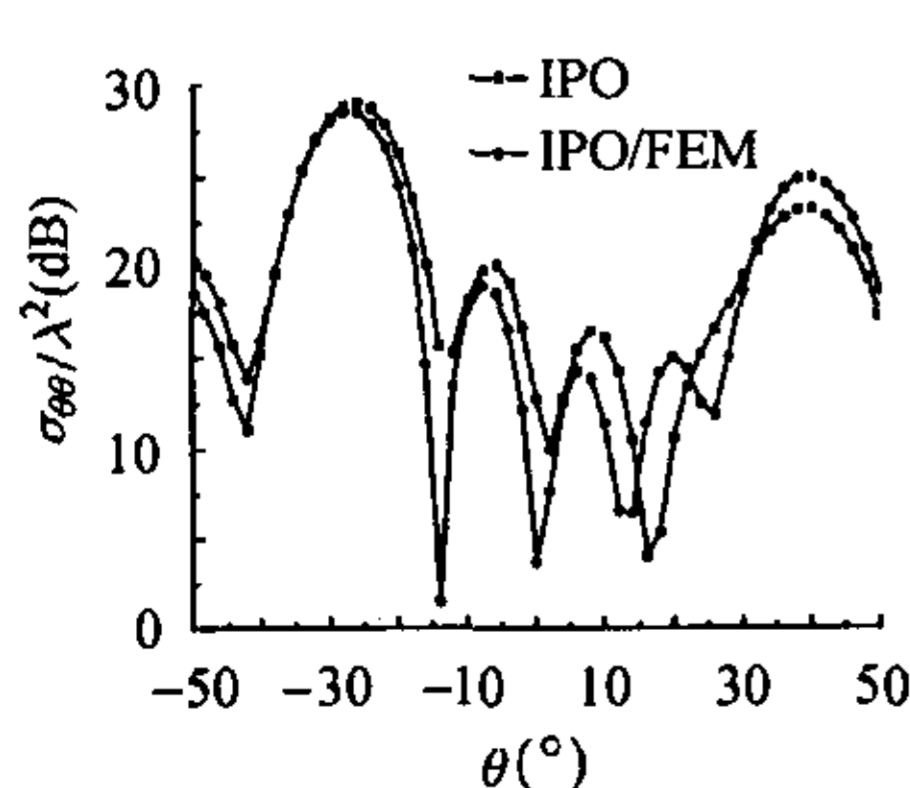


图4 底部涂敷介
质腔体双站 RCS 曲线

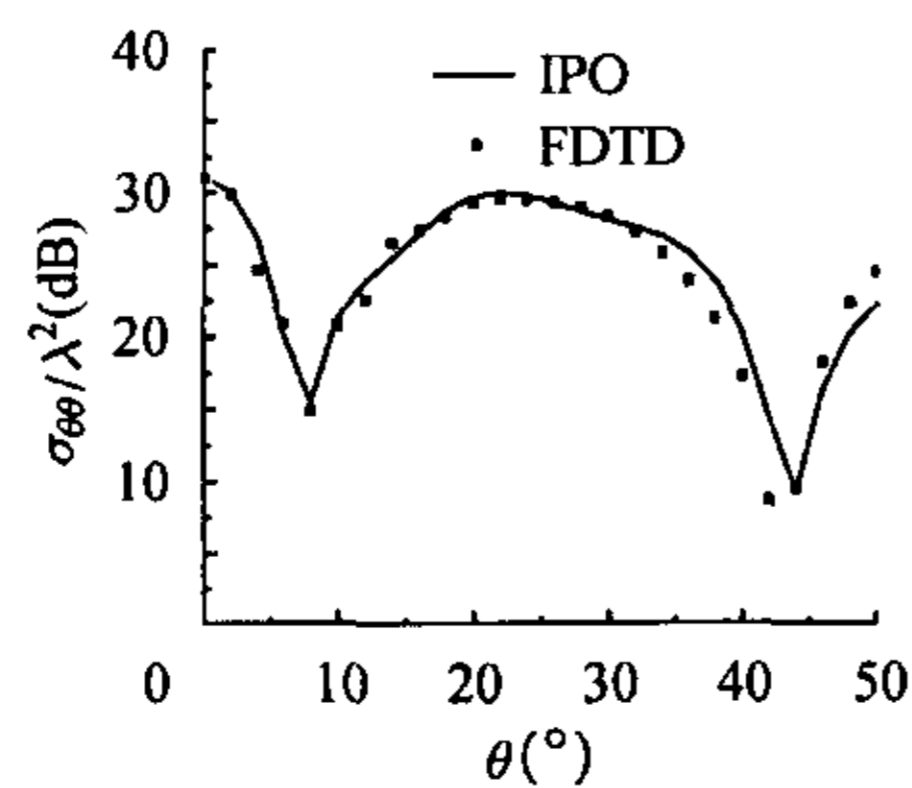


图5 侧壁涂敷介
质腔体单站 RCS 曲线

4 结论

本文将 IPO 方法推广到非完纯导电边界电磁特性分析中, 拓宽了这种方法的应用范围。对于部分涂敷介质的腔体等复杂目标, 采用这种纯粹的高频方法与高低频混合方法相比, 可以大大地节省计算机内存和计算时间。将这种推广的 IPO 方法与低频方法 (如 FEM) 相结合, 则可用于工程实际中涂敷吸波材料、具有复杂终端结构的腔体目标 (如飞行器进气道) 的电磁散射问题分析。

参考文献

- [1] 王树民, 李明之, 王长清. GRE-FDTD 混合法对二维矩形终端任意形状进气道 RCS 的计算. 电子学报, 2000, 28(6): 138 - 141.
- [2] Robert Lee, Tsc-Tong Chia. Analysis of electromagnetic scattering from a cavity with a complex termination by means of a hybrid ray-FDTD method. *IEEE Trans. on AP*, 1993, AP-41(11): 1560 - 1569.
- [3] Tsc-Tong Chia, Robert J. Burkholder, Robert Lee. The application of FDTD in hybrid methods for cavity scattering analysis. *IEEE Trans. on AP*, 1995, AP-43(10): 1082 - 1089.
- [4] 何小祥, 徐金平, 顾长青. 电大尺寸复杂结构腔体电磁散射的 IPO/FEM 混合法研究. 电子与信息学报, 2003, 25(2): 247 - 253.
- [5] 顾长青, 王璟. IPO-FDTD 混合法计算三维复杂腔体的 RCS. 电波科学学报, 2003, 18(4): 385 - 388.
- [6] Ling Hao, Lee Shung-wu, Chou Ri-chee. High frequency RCS of open cavities with rectangular and circular cross section. *IEEE Trans. on AP*, 1989, AP-37(5): 648 - 654.
- [7] Obelleiro F, Rodriguez J L, Burkholder R J. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities. *IEEE Trans. on AP*, 1995, AP-43(4): 356 - 361.
- [8] 顾长青, 舒永泽, 徐金平. 物理光学迭代法的子域连接法. 电子学报, 2001, 29(3): 420 - 422.
- [9] Klement D, Preeissner J, Stein V. Special problems in applying the physical optics method for backscatter computations of complicated objects. *IEEE Trans. on AP*, 1988, AP-36(2): 228 - 273.

何小祥: 男, 1976 年生, 博士, 主要研究方向: 计算电磁学、电磁散射。

徐金平: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算电磁学、天线与电磁散射、毫米波理论与技术、电磁兼容。

顾长青: 男, 1958 年生, 教授, 主要研究方向: 天线与电磁兼容、电磁场数值计算。