

计算开口腔体 RCS 的前后向物理光学迭代法

许小艳 龚书喜

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要 文章首先介绍了物理光学迭代法的基本原理, 并用此方法计算了单端开口腔体的 RCS(雷达散射截面)。在此基础上, 利用物理光学迭代法与前后向算法相结合的欠松弛迭代算法, 减少了计算时间, 提高了算法的收敛性。

主题词 电磁波散射 物理光学 迭代 前后向算法 雷达散射截面

0 引言

在飞行器 RCS 分析中, 进气道等开口腔结构的计算一直是一个难点。在早期对腔体电磁散射特性的分析中, 应用模式匹配方法^[1]检验计算结果, 后来发展了一些基于射线理论的高频近似方法, 例如弹跳射线法(SBR 法)^[2]; 但 SBR 法不能充分考虑射线束多次散射引起的形变, 使计算精度受到影晌。物理光学(IPO)法是在物理光学电流的基础上考虑多次散射的一种迭代方法^[3], 用光学电流与修正电流叠加来逼近导体目标表面的实际电流, 相比 SBR 方法提高了计算精度, 且计算时每平方波长仅需划分 9~16 块小面元就可获得较好的精度, 并且不需要进行矩阵求逆运算, 相比纯数值法提高了计算效率。此外, IPO 法物理概念清晰, 便于编程实现。

但是由于腔体内部多次反射特性导致了物理光学法收敛过慢。文章采用物理光学迭代法与前后向算法相结合的欠松弛迭代算法^[4], 计算了有主传播及回波路径的单端开口腔体的 RCS, 结果证明此方法有较快的收敛特性。

1 物理光学迭代法原理

图 1 表示一个任意形状的单端开口腔体, S_a 表示口径面, S_c 表示腔体内壁面。组成腔体的面是电大尺寸且光滑的, 时谐因子为 $e^{j\omega t}$, 自由空间波长为 λ 。物理光学迭代法具体步骤如下:

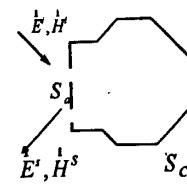


图 1 任意形状单端开口腔体

· 应用基尔霍夫原理, 腔内壁等效电磁场近似为:

$$\vec{H}(\vec{r}_c) = \int_{S_a} (\hat{n}' \times \vec{H}_a(\vec{r}'_a)) \times \nabla G((\vec{r}_c - \vec{r}'_a) dS_a + \frac{1}{jkZ} \nabla \times \int_{S_a} (\vec{E}_a(\vec{r}'_a) \times \hat{n}') \times \nabla G(\vec{r}_c - \vec{r}'_a) dS_a \quad (1)$$

$$\vec{E}(\vec{r}_c) = - \int_{S_a} (\vec{E}_a(\vec{r}'_a) \times \hat{n}') \times \nabla G((\vec{r}_c - \vec{r}'_a) dS_a + \frac{1}{jkY} \int_{S_a} (\hat{n}' \times \vec{H}_a(\vec{r}'_a)) \times \nabla G(\vec{r}_c - \vec{r}'_a) dS_a \quad (2)$$

其中 \hat{n}' 是口径面 S_a 上的内法向矢量。

· 物理光学迭代法通过迭代使用物理光学法, 记入了多次散射的影响。迭代物理光学公式为:

$$\vec{J}_n(\vec{r}_c) = \vec{J}_0(\vec{r}_c) + 2\hat{n} \times \int_{S_c} \vec{J}_{n-1}(\vec{r}'_c) \times \nabla G(\vec{r}_c - \vec{r}'_c) dS'_c \quad (3)$$

式中积分为主值积分, n 表示迭代次数, 初始电流 $\vec{J}_0(\vec{r}'_c)$ 用物理光学电流进行近似, 即:

$$\vec{J}_0(\vec{r}'_c) = \begin{cases} 2\hat{n}' \times \vec{H}(\vec{r}'_c) & \text{照明区} \\ 0 & \text{阴影区} \end{cases} \quad (4)$$

· 求出腔体内壁近似真实电流 $\vec{J}(\vec{r}_c)$ 后, 再由基尔霍夫近似求得口径面上的散射场:

$$\vec{E}'(\vec{r}_a) = \frac{1}{jkY} \nabla \int_{S_c} \vec{J}(\vec{r}'_c) \times \nabla G(\vec{r}_a - \vec{r}'_c) dS'_c \quad (5)$$

$$\vec{H}'(\vec{r}_a) \int_{S_c} \vec{J}(\vec{r}'_c) \times \nabla G(\vec{r}_a - \vec{r}'_c) dS'_c \quad (6)$$

利用电磁场表面等效原理, 其等效电磁流为:

$$\vec{J} = (-\hat{n}) \times \vec{H}'(\vec{r}_a) \quad (7)$$

$$M = \vec{E}'(\vec{r}_a) \times (-\hat{n}) \quad (8)$$

· 计算等效电磁流在腔外远区的散射场公式为:

$$E_\theta(\vec{r}, \theta, \varphi) = \frac{jke^{-jk\vec{r}}}{4\pi r} [L_\theta(\theta, \varphi) + ZN_\theta(\theta, \varphi)] \quad (9)$$

$$E_\varphi(\vec{r}, \theta, \varphi) = \frac{jke^{-jk\vec{r}}}{4\pi r} [L_\varphi(\theta, \varphi) - ZN_\varphi(\theta, \varphi)] \quad (10)$$

式中:

$$N_\theta(\theta, \phi) = \int_{S_a} [J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta] e^{jk\vec{r} \cdot \vec{r}_a} dS_a \quad (11a)$$

$$N_\varphi(\theta, \phi) = \int_{S_a} [-J_z \sin \phi + J_y \cos \phi] e^{jk\vec{r} \cdot \vec{r}_a} dS_a \quad (11b)$$

$$L_\theta(\theta, \phi) = \int_{S_a} [M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta] e^{jk\vec{r} \cdot \vec{r}_a} dS_a \quad (11c)$$

$$L_\varphi(\theta, \phi) = \int_{S_a} [-M_z \sin \phi + M_y \cos \phi] e^{jk\vec{r} \cdot \vec{r}_a} dS_a \quad (11d)$$

\hat{r} 是远区场 \vec{r} 位矢的单位矢量。

上述原理中, 物理光学迭代法以高频物理光学电流近似为基础, 对腔体表面进行离散, 取样密度为每平方波长 $9 \sim 16$ 个点(而低频法, 如矩量法, 每平方波长至少 100 个点才能满足计算精度)。(3) 式中使用迭代方法逐步求解得到趋于收敛的电流分布, 避免了直接求解电流分布所需的矩阵求逆运算。由此可见, 物理光学迭代法相比低频数值法, 采用较少的离散面元逐步迭代求解, 减少了计算量, 提高了计算效率。

2 前后向算法

在解决单向或双向传输的电磁散射问题的方法中, 前后向方法是一种高效的方法^[5,6]。在前后向算法中, 离散电流元沿传播方向按顺序计数, 在每次前后向迭代后电流都得到更新, 如图 2 所示。

应用前后向算法计算腔体内壁电流公式为:

前向迭代:

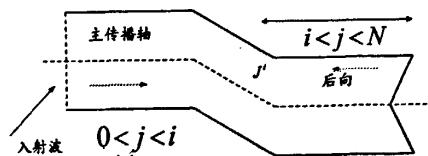


图 2 前后向迭代中波沿波导轴传播示意图

For $i = 1, 2, \dots, N$

$$\begin{aligned}\vec{J}_{n+1/2}(i) &= \vec{J}_0(i) + 2\hat{n} \times \sum_{j=1}^{i-1} (\vec{J}_{n+1/2}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + \\ &2\hat{n} \times \sum_{j=i+1}^N (\vec{J}_n(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j)\end{aligned}\quad (12)$$

后向迭代：

For $i = N, N-1, \dots, 1$

$$\begin{aligned}\vec{J}_{n+1}(i) &= \vec{J}_0(i) + 2\hat{n} \times \sum_{j=1}^{i-1} (\vec{J}_{n+1/2}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + \\ &2\hat{n} \times \sum_{j=i+1}^N (\vec{J}_{n+1}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j)\end{aligned}\quad (13)$$

N 表示总面元数, n 表示迭代次数。

为了提高算法收敛性, 降低迭代发散几率, 引进欠松弛因子 ω , 此时前后向物理光学迭代公式变为:

前向迭代：

For $i = 1, 2, \dots, N$

$$\begin{aligned}\vec{J}_{n+1/2}(i) &= \omega \vec{J}_0(i) + 2\omega\hat{n} \times \sum_{j=1}^{i-1} (\vec{J}_{n+1/2}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + \\ &2\omega\hat{n} \times \sum_{j=i+1}^N (\vec{J}_n(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + (1 - \omega) \vec{J}_n(i)\end{aligned}\quad (14)$$

后向迭代：

For $i = N, N-1, \dots, 1$

$$\begin{aligned}\vec{J}_{n+1}(i) &= \omega \vec{J}_0(i) + 2\omega\hat{n} \times \sum_{j=1}^{i-1} (\vec{J}_{n+1/2}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + \\ &2\omega\hat{n} \times \sum_{j=i+1}^N (\vec{J}_{n+1}(j) \times \nabla G(\vec{r}_i - \vec{r}_j)) \Delta S(j) + (1 - \omega) \vec{J}_{n+1/2}(i)\end{aligned}\quad (15)$$

对于 IPO 电磁散射问题, ω 取值为 $0 < \omega \leq 1$, 表示欠松弛因子。

3 计算结果

分析模型: 频率为 10GHz 的平面波以偏移入射平面轴线 z 轴 θ 角的方向入射单端开口的圆形理想导体腔 ($D \times L = 8\lambda \times 12\lambda$, 其中 D 为腔口直径, L 为腔体长度, λ 为入射波工作波长, 值为 0.03m), 如图 3 所示。

应用 IPO 法分析时, 在每平方波长取 16 个点, 迭代进行 3~5 次时趋于收敛, 结果与射线弹跳法进行比较, 如图 4 所示。

当频率为 10GHz 的平面波以偏移入射平面轴线 z 轴 θ 角的方向入射单端开口圆形理想导体腔 (腔体尺寸为 $D \times L = 4\lambda \times 4\lambda$, 其中 D 为腔口直径, L 为腔体长度, λ 为入射波波长) 时, 分别采用 IPO 和前后向 IPO 两种方法进行计算。在使用前后向 IPO 方法计算时, 欠松弛因子取为 0.95, 每平方波长取 16 个点。当满足收敛判断时, 前后向 IPO 方法迭代次数为 3 次, 计算时间为 14 分钟; 而 IPO 法迭代次数为 5 次, 计算时间为 25 分钟。计算结果如图 5 所示。由此可知, 前后向 IPO 在保证精度的同时, 加快了计算速度。

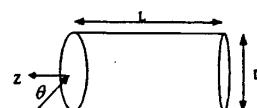
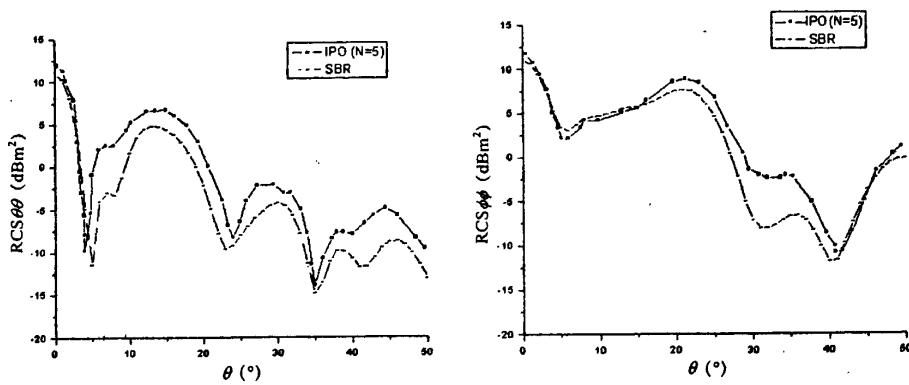
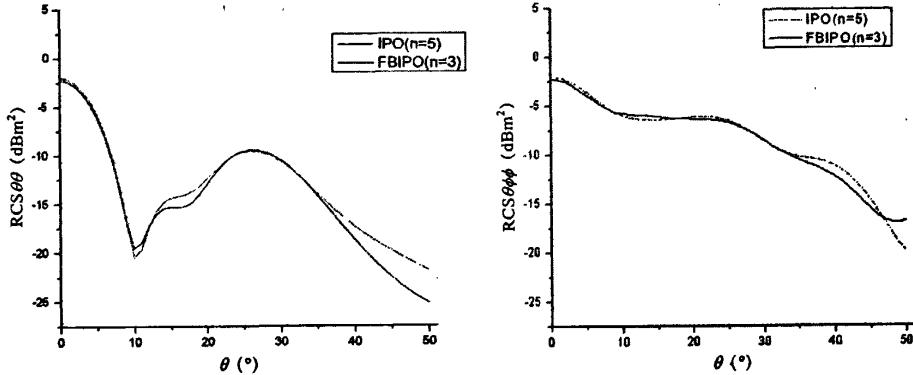


图 3 单端开口圆形理想导体腔体

图4 单端开口圆形理想导体腔体($(D \times L = 8\lambda \times 12\lambda)$)的RCS曲线图5 单端开口圆形理想导体腔体($(D \times L = 4\lambda \times 4\lambda)$)的RCS曲线

4 结论

文章首先应用 IPO 算法计算了一单端开口理想圆柱腔体,在此基础上,采用前后向与 IPO 结合的欠松弛迭代算法再次计算此腔体。通过比较得知,前后向 IPO 在保证精度的同时,相比 IPO 法,改进了迭代的收敛性,加快了计算速度。

参考文献

- 1 Pathak P H and Burkholder R J. Modal, ray and beam techniques for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. AP-37, No. 5: 635~647, May 1989
- 2 Ling H, Chou R C and Lee S W. Shooting and bouncing rays; calculating RCS of an arbitrary cavity. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 37, No. 2: 194~205, February 1989
- 3 Obelleiro F, Rodriguez J L and Burkholder R J. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 43, No. 4: 356~361, April 1995
- 4 Burkholder R J and Lundin T. Forward-backward iterative physical optics algorithm for computing the RCS of open-ended cavities. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 53, No. 2: 793~799, February 2005
- 5 Holliday D, Deraad L L and St-Cyr G J. Forward-backward: a new method for calculating low-grazing angle scattering. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 44, No. 5: 722~729, May 1996
- 6 Pino M R, Landesa L, Rodriguez J L, et al. The generalized forward-backward method for analyzing the scattering from targets on ocean-like rough surfaces. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 47, No. 6: 961~969, Jun. 1999

作者简介

许小艳 1984 年生,西安电子科技大学电子工程学院硕士研究生。研究方向:电大尺寸开口腔体的 RCS 研究。

The Forward-Backward IPO Algorithm for Calculating Open-Ended Cavities

Xu Xiaoyan, Gong Shuxi

(National Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The principle of iterative physical optics(IPO) algorithm is introduced, in which open-ended waveguide cavities are analyzed. then the forward-backward methodology is combined with iterative physical optics(IPO) algorithm, with relaxation parameter to control the convergence characteristics introduced, to be more efficient.

Subject Term Electromagnetic scattering, iterative physical optics, forward-backward algorithm, radar cross sections

(上接第 66 页)

参考文献

- 1 [美] Skolnik M I 主编. 王军, 林强, 米慈中等译. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社. 2003
- 2 马晓岩, 向家彬, 朱裕生等. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社. 1998

作者简介

胡爱明 1965 年生, 1986 年毕业于西安电子科技大学电子工程系, 现为中国电子科技集团公司第 38 研究所高级工程师。主要从事雷达信号处理研制工作。

胡可欣 1964 年生, 1986 年毕业于西安电子科技大学, 现为中国电子科技集团公司第 38 研究所高级工程师, 某大型雷达产品主持设计师。研究方向为雷达总体设计。

An Improved Design and application of Moving Targets Detection

Hu Aiming, Hu Kexin

(China Electronic Technology Group Corporation No. 38 Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract This paper introduced the estimation of clutter noise ratio and its application in MTD system detail. This method can improve and adaptive performance for radar. Final result indicates the method is practical and effective. MTD Technology has been widely used in the radar signal processing. Detection for Moving Targets. The Estimation of Clutter Parameter in MTD System. This method can improve and adaptive performance for radar. Final result indicates the method is practical and effective.

Subject Term moving targets detection(MTD); doppler filter bank; filter design; improvement factor

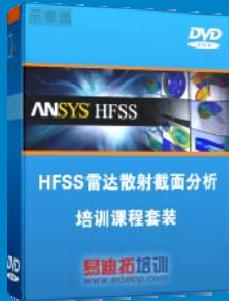
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程:

● HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>