

超大电尺寸目标的物理光学高效算法分析

孟 敏, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】根据物理光学理论、理想导体边界条件和阻抗边界条件,建立了理想导体及有耗介质涂敷其表面的电大尺寸平板的物理光学高效算法公式,并将此公式推广到圆柱和球等相似表面。通过计算,给出了平板及圆柱的验证结果。以一个超大电尺寸目标RCS的计算实例充分证明了该方法的高效性和实用性。

关键词 物理光学方法; 高效算法; 超大电尺寸目标; 目标电磁散射特性

中图分类号 O441 文献标识码 A

High-Efficiency Method of Physical Optics for EM Scattering from the Target with Super Large Electrical Size

Meng Min, Nie Zaiping

(School of Electrical Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Based on the physical optics(PO) theory, perfectly electrical conductor(PEC) and leontovich boundary condition(IBC), the high-efficiency formula of the conducted flat and the PEC flat coated with radar absorb materials(RAM) is built up. This formula can also be used on the surface of cylinder and sphere surfaces. Meanwhile, several results are given to demonstrate the validation of this method. Finally, radar cross section (RCS) of an object with super large electrical size computed by this method shows the high efficiency and practicality.

Key words physical optics method; high-efficiency method; super large electrical size; electromagnetic characteristic of scattering

日益发展的微波、毫米波雷达的工程应用,迫切要求开展超大电尺寸目标的电磁散射特性研究。物理光学(PO)方法通常用于电大目标,其优点是计算速度快、所需的计算机存储量少,虽然精度不高,但并不影响它在很多领域中的实际工程应用。对于超大电尺寸目标,如毫米波雷达工作条件下的空中飞行目标,目标尺寸高达数千个波长,在现有计算条件下,仍有太大的计算量,需要过大的存储空间。所以,必须找到高效的物理光学算法计算超大电尺寸目标的雷达截面(RCS),以减小计算和存储量。本文正是基于上述需求背景,在PO及PEC、Leontovich阻抗边界条件(IBC)的理论基础上,讨论基于金属平板和涂敷金属平板的PO高效算法。

1 目标雷达截面的物理光学表达式

1.1 理想导体的雷达截面表达式

由雷达截面的定义^[1],经过换算,理想导体的RCS可用物理光学公式近似表示为

$$s = \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_i) \cdot \mathbf{e}_r e^{jkr \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} dS \right|^2 \quad (1)$$

式中 k 为波数, e_r 为接收器极化方向, n 为目标表面单位法向, h_i 为单位入射磁场, r 为接收距离, i 为入射方向, s 为散射方向, S 为目标表面。

1.2 涂敷目标的雷达截面表达式

对于涂敷材料的目标表面, PO远区散射场近似表达为

$$E^s = j\omega m \int_S J \nabla \times y dS - \int_S M \times \nabla y dS \quad (2)$$

式中 J 为表面电流, M 为表面磁流, y 为格林函数, m 为磁导率, ω 为角频率。

均匀薄涂敷的各向同性吸收材料的平板, 边界条件可用阻抗边界条件(IBC)近似^[2]。于是将表面的感应电流和磁流分为水平极化和垂直极化两部分^[3, 4], 对于涂层目标有

$$\begin{cases} M_{\perp} = n \times (1 + R^{\perp}) E_{\perp}^i \\ J_{\parallel} = n \times (1 + R^{\parallel}) H_{\parallel}^i \end{cases} \quad (3)$$

式中 R^{\perp}, R^{\parallel} 为反射系数, $E_{\perp}^i, E_{\parallel}^i$ 为入射电场的极化分解形式, $H_{\perp}^i, H_{\parallel}^i$ 为与之对应的的入射磁场^[5]。则

$$\begin{aligned} s = \frac{k^2}{p} \left| \int_S \left\{ \frac{-\cos q}{h_s \cos q + 1} [n \times (n \times e_i^{\perp})] + \frac{\cos q}{h_s + \cos q} (n \times h_i^{\parallel}) \right\} e^{jkr \cdot (i-s)} dS + \right. \\ \left. \int_S \left\{ \frac{h_s \cos q}{h_s \cos q + 1} (n \times e_i^{\perp}) + \frac{h_s \cos q}{h_s + \cos q} [n \times (n \times h_i^{\parallel})] \right\} \times s e^{jkr \cdot (i-s)} dS \right|^2 \quad (4) \end{aligned}$$

式中 q 为入射角, h_s 为相对表面阻抗, e_i^{\perp} 为入射电场垂直极化分量的单位矢量, h_i^{\parallel} 为入射磁场水平极化分量的单位矢量。

2 基于物理光学方法的高效算法研究

平面高效算法的推导示意图如图1所示, 均分为 n 个方格, 然后将其中一格再细分为 m 个方格。电磁波

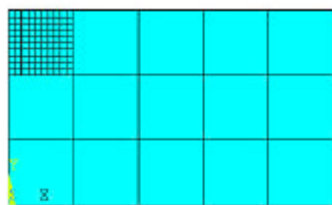


图1 高效算法推导示意图

到达大格各点与细剖分格各对应点时只存在一个相位差, 并且这些相位差是相等的。于是, 假设每格的散射中心位于格子中心。首先用物理光学积分公式求出细剖分这一格的散射场; 然后以此电场为基础, 乘上电磁波在此格与所求格之间的相位差得出所求格的电场; 再将各散射中心的电场迭加得到总的散射场; 最后由雷达截面定义得出RCS。

对于均匀剖分的电大圆柱面和球面, 某网格中每点与所选中细剖分格之间对应点的相位差相等, 也可用此种算法计算; 对于有涂敷层的目标, 利用反射系数和入射场来表征散射场, 使得原本不知道的散射场相位关系变为了已知的入射场相位关系, 所以仍可以用这种方法来进行处理。

3 高效算法验证

3.1 理想导体平板

假设平板长1 m, $f = 4.5$ GHz, 边长 $15l$ 。平面波在XOZ平面内以 $q = 45^\circ$ 入射, 虚线方向为入射方向, 计算XOZ面内垂直极化的双站RCS。图2为计算示意图。

图3为文献[2]计算结果与物理光学原始算法、高效算法计算结果比较图。从图中可知, 高效算法的正确性。使用原来的方法, 网格划分为小单元每格 $0.2l$, 高效算法剖分大单元每格尺寸为小单元的15倍; 原始算法总单元数为高效算法单元数的22.5倍, 而计算效率为高效算法的1/21。

物理光学法无法考虑各部分间的耦合及边缘绕射, 与矩量法相比, 虽然精度较低一些, 但计算量大为降低, 效率大大提高。

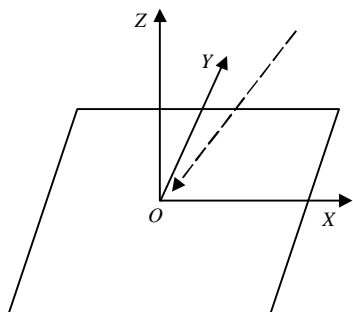


图2 金属方板双站RCS计算示意图

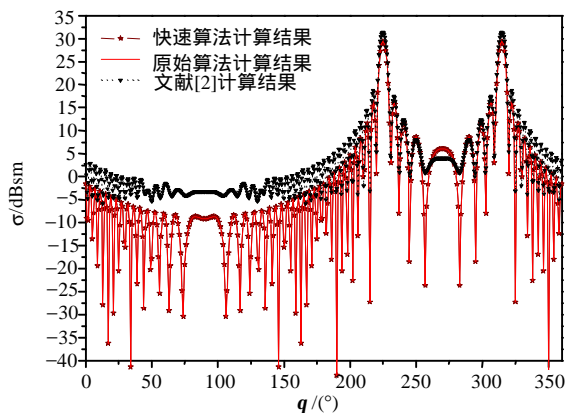


图3 金属方板双站RCS计算结果

3.2 圆柱面

图4为一半径为 a ,长度为 l 的圆柱边射后向散射RCS计算示意图,实线为入射方向;用原始PO和高效PO计算的结果如图5所示,充分证明了高效PO应用于圆柱侧面的可靠性。

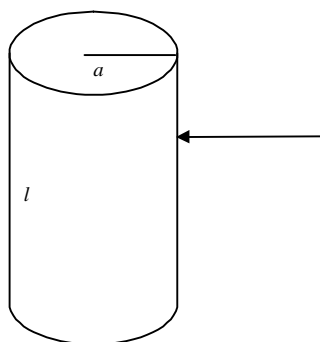


图4 圆柱计算示意图

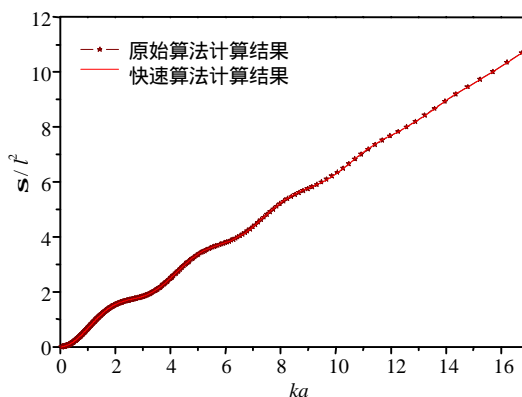


图5 对长度平方归一化的圆柱边射RCS(k 为波数)

3.3 涂敷平板

水平极化平面波照射一均匀单面涂敷平板的涂敷面。涂敷材料电参数为： $\epsilon_r = (29.78 - 2.31j)$ ， $m_r = (1.87 - 1.96j)$ 。涂层厚度为 $d = 0.5$ mm。平板长 $L = 300$ mm，宽 $W = 100$ mm，厚 $t = 1$ mm。工作频率为10 GHz。

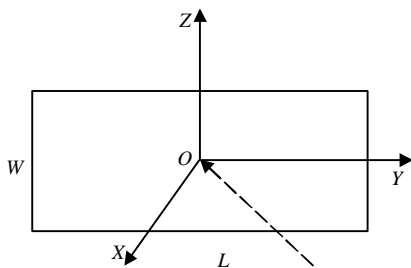


图6 平板后向散射RCS计算示意图

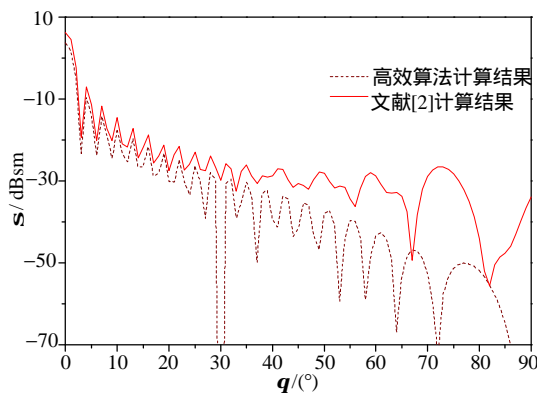


图7 涂敷平板后向RCS物理光学法计算结果

从图7中可见,高效算法也可用于涂敷平板。(在 $f = 30^\circ$ 时值的突降,是计算时相位叠加为0造成的,不同尺寸的平板在水平极化入射时也有此现象。此种计算误差在实际应用时忽略。)

4 计算实例

以此法计算机长15.5 m,翼展12 m的某型号隐身战斗机的双站RCS。照射频率为35 GHz,目标长 1800λ ,表面积约 $40\times 10^6 I^2$ 。

由于该隐身飞机采用了外形技术,其表面均由若干电大平板构成,符合本文高效算法的使用条件。假设飞机平行于 XOY 面飞行,沿负 X 轴飞行,平面波在 YOZ 入射和接收。如图所示(虚线为入射方向,点划线为接收方向; α 为入射角度, q 为接收角度),只看到飞机的尾翼。

图9为 $q=30^\circ$,平面波水平极化入射,频率为35 GHz时的双站水平极化RCS;实线为没有涂敷的情况,虚线为薄涂敷时的情况;涂敷材料电参数为: $\epsilon_r=(29.78-2.31j)$, $m_r=(1.87-1.96j)$ 。涂层厚度为 $d=0.5$ mm。

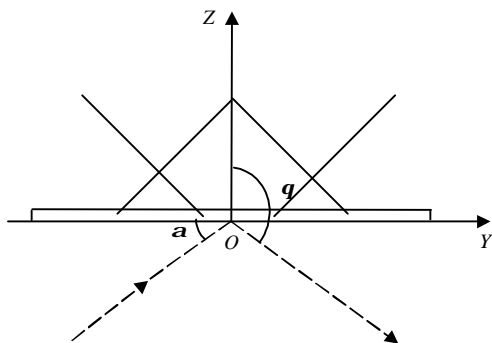


图8 计算示意图

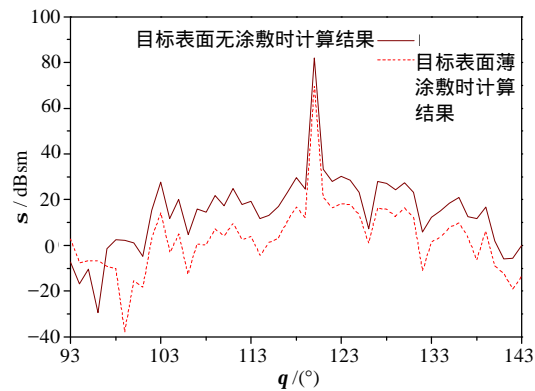


图9 水平极化入射时双站RCS

剖分时,每个大单元为大约 $10I$,每个小单元约为 $0.2I$ 。剖分中的20 929个单元用于了计算,是原来方法需用单元的1/1 604。计算一个角度入射,50个不同角度接收。无涂敷时,只占用内存1 820 K,计算时间为27 s。简单估算一下,如果以原来的方法计算,工作量将成百倍的增加,而以快速方法计算不仅节约了内存,还减少了计算量、计算时间。

5 结论

本文的快速算法仍基于物理光学方法,尽管计算精度稍差,但计算快速、节省储存。对于许多超电大尺寸的目标散射体,此种方法是很有用的。而且越是电尺寸大的物体,节约的资源越多。但上述方法只限于具有恒曲率半径的相似曲面及平面。因此,在使用了外形技术的隐身飞机RCS计算中极有应用价值。同时,很多超电大目标的局部都可用该方法处理。对于电尺寸更大的超电大目标,还可以用相应的多层算法进一步简化积分运算。

参 考 文 献

- [1] Knott, Eugena F著. 雷达散射截面 - 预估、测量、和减缩[M]. 阮颖铮, 陈海, 译. 北京:电子工业出版社,1988
- [2] 胡俊. 复杂目标矢量电磁散射的高效方法 - 快速多极子方法及其应用:[学位论文][D]. 成都:电子科技大学, 2000
- [3] 李宁, 苏超伟. 涂层目标散射的双站物理光学公式及其散射矩阵[J]. 电子学报, 1995, 22(3): 31-35
- [4] 全泽松. 电磁场理论[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1995
- [5] 徐朴. 典型涂覆目标电磁散射的极化特性分析:[学位论文][D]. 成都:电子科技大学, 1997

编辑 徐安玉