一种计算多层涂覆目标RCS的快速算法

王 勇 许小剑

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出一种用于计算表面涂覆多层雷达吸波材料目标雷达散射截面(RCS, Radar Cross Section)的快速算法. 对于拟合成面元和棱边的多层涂覆目标, 应用物理光学法及阻抗边界条件计算多层涂覆面元的RCS, 并将物理绕射理论与等效电磁流法结合, 用于计算多层涂覆棱边的RCS. 在计算中, 预先计算出目标不同涂覆表面反射系数矩阵, 有效地提高了计算的速度和效率. 应用上述方法计算表面涂覆单层及多层涂覆材料的平板和典型旋转体的RCS, 通过与文献给定结果的对比, 验证了该算法的有效性. 对多层涂覆复杂目标RCS的仿真计算结果, 进一步表明了该方法的准确性以及在提高计算速度方面的效果.

关 键 词: 雷达吸波材料; 雷达散射截面; 物理光学法; 物理绕射理论; 等效电磁流法; 反射系数

中图分类号: TN 011.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)07-0838-06

Fast RCS calculation technique for targets coated with multi-layer RAM

Wang Yong Xu Xiaojian

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A fast radar cross section (RCS) calculation technique for targets coated with multi-layer radar absorbing materials (RAM) was presented. The targets were modeled as a combination of facets and wedges. Physical optics (PO) method and impedance boundary condition (IBC) were used for RCS calculation of coated facets. Physical theory of diffraction (PTD) combined with method of equivalent edge current (MEC) was applied for the scattering computation of coated wedges. During the RCS calculation, matrices of reflecting coefficient were pre-calculated and stored. This greatly improves the speed of scattering calculation. RCS of single-layer and multi-layer coated plates and typical revolving solids were calculated, demonstrating that results have good agreement with those in reference. Further results of complex target show the validity of this method in improving accuracy and computing speed.

Key words: radar absorbing material; radar cross section; physical optics; physical theory of diffraction; method of equivalent edge current; reflection coefficient

随着雷达探测技术的发展, 军事目标的电磁隐身性能逐渐成为衡量其在实战中生存能力的一项重要指标. RCS(Radar Cross Section)缩减作为一种有效的减小目标可探测性方法已经引起了广泛关注并得到实用. 涂覆雷达吸波材料(RAM, Radar Absorbing Material)作为减小目标雷达回波的一种技术手段, 可以有效缩减RCS而不需要改变目标的外部形状. 因此, 这方面的研究近几十年来一直受到重视. 相应地, 涂覆目标的RCS计算也得到了很大发展.

计算金属衬底的涂覆RAM目标的方法主要有高频近似法、体-表面积积分法(V-SIEM, Volumetric-Surface Integral Equation Method)、矢量有限元-快速多极子法(FEM-FMM, Finite Ele-

收稿日期: 2007-06-19

作者简介: 王 勇(1975—), 男, 辽宁大石桥人, 博士生, wangyong-lucky@tom.com.

ment Method-Fast Multipole Method)、阻抗边界条件法(IBC, Impedance Boundary Condition)等[1-2]. 其中,高频近似方法可用于分析任意厚度的 RCS,是一种近似方法. V-SIEM 和 FEM-FMM 可以分析涂覆任意厚度 RAM 目标,计算精确性也较高,但是对于复杂目标,这两种方法的计算量很大,计算仿真更难达到实时性的要求.

本文提出一种计算表面涂覆多层 RAM 目标 RCS 的快速算法. 将物理光学法(PO, Physical Optics)与 IBC 结合来求解涂覆 RAM 面元的 RCS[3-4],并应用物理绕射理论(PTD, Physical Theory of Diffraction)[5]及等效边缘电磁流法(MEC, Method of Equivalent edge Current)[6],推导出涂覆多层 RAM 阻抗劈的散射场近似计算公式,用于计算涂覆棱边的 RCS. 计算中采用了预先算出多层涂覆平板的反射系数矩阵,有效提高了多层递归运算的速度. 应用上述方法对表面涂覆的简单及复杂目标的 RCS 进行计算,同时满足了计算精度和速度要求.

1　涂覆 RAM 小面元的 RCS 计算

对于导体目标,在高频区的远场条件下,应用 PO 方法得到在接收端接收到的导体目标散射场满足[7]

$$\hat{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{e}}\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{sf}}=\left\{\frac{\mathrm{j}k}{4\pi}\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}kr}}{r}\mid\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}\mid\hat{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{e}}\cdot[(\hat{\boldsymbol{n}}\times\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{i}})+(\hat{\boldsymbol{n}}\times\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{i}})\times\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{s}}]\cdot\int_{s}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}}-\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{s}})\boldsymbol{r}'}\mathrm{d}a'\right\}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}}-\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{s}})\boldsymbol{R}}\quad(1)$$

式中,$\boldsymbol{E}_{\mathrm{sf}}$为面元表面的散射场;$\hat{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{e}}$ 为接收电场的极化单位向量;$k=2\pi/\lambda$,λ 为雷达波长;$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为面元表面的单位外法向;$\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{i}}$,$\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{i}}$ 为入射电磁场的极化方向的单位向量;$\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}}$,$\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{s}}$ 为入射和散射传播方向上的单位向量;$\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}}-\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{s}})\boldsymbol{R}}$表示雷达相对于面元位置产生的相移;$\boldsymbol{R}$ 为面元相对于雷达天线的位置矢量.

考虑在理想导体小面元上涂覆多层 RAM 时的情况,多层涂覆所选用的表面涂层一般是具有特殊散射特性的有耗介质. 为简化分析,通常在物体外表面施加适当的阻抗边界条件,通过参考无限大平面情况下的散射问题,确定出与材料散射特性相关的反射系数,进而求得介质表面的散射场.

当积分表面是理想导体时,在垂直极化和水平极化条件下,其表面反射系数分别为:$R_{\perp}=-1$,$R_{/\!/}=1$. 当积分表面是一层或多层介质时,已知面元表面各层介质材料的厚度以及介电常数和磁导率,如图 1 所示,则该平面处的反射系数可通过以下的递推公式算出[4].

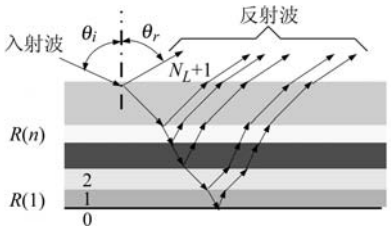


图 1　多层介质散射示意图

对于垂直极化,有

$$R_{\perp}^{(1)}=\frac{\rho_{\mathrm{ort}}^{(1)}-\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(1)}D^{(1)}R_y^{(1)}]}{1-\rho_{\mathrm{ort}}^{(1)}\cdot\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(1)}D^{(1)}R_y^{(1)}]}\quad(2)$$

$$R_{\perp}^{(n)}=\frac{\rho_{\mathrm{ort}}^{(n)}+R_{\perp}^{(n-1)}\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(n)}D^{(n)}R_y^{(n)}]}{1+\rho_{\mathrm{ort}}^{(n)}R_{\perp}^{(n-1)}\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(n)}D^{(n)}R_y^{(n)}]}\quad n=2,3,\cdots,N_L\quad(3)$$

对于水平极化,有

$$R_{/\!/}^{(1)}=\frac{\rho_{\mathrm{par}}^{(1)}-\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(1)}D^{(1)}R_y^{(1)}]}{1-\rho_{\mathrm{par}}^{(1)}\cdot\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(1)}D^{(1)}R_y^{(1)}]}\quad(4)$$

$$R_{/\!/}^{(n)}=\frac{\rho_{\mathrm{par}}^{(n)}+R^{(n-1)}\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(n)}D^{(n)}R_y^{(n)}]}{1+\rho_{\mathrm{par}}^{(n)}R^{(n-1)}\exp[-\mathrm{j}2k\beta^{(n)}D^{(n)}R_y^{(n)}]}\quad n=2,3,\cdots,N_L\quad(5)$$

在式(2)~式(5)中

$$\rho_{\mathrm{par}}=\frac{Z^{(n)}R_y^{(n)}-Z^{(n+1)}R_y^{(n+1)}}{Z^{(n)}R_y^{(n)}+Z^{(n+1)}R_y^{(n+1)}}\quad(6)$$

$$\rho_{\mathrm{ort}}=\frac{Z^{(n)}R_y^{(n+1)}-Z^{(n+1)}R_y^{(n)}}{Z^{(n)}R_y^{(n+1)}+Z^{(n+1)}R_y^{(n)}}\quad(7)$$

各层的阻抗为

$$Z_0=Z^{(N_L+1)}=1\quad(8)$$

$$Z^{(n)}=\sqrt{\frac{\mu_r^{(n)}}{\varepsilon_r^{(n)}}}\quad(9)$$

各层入射角的余弦值为

$$R_y^{(N_L)}=\cos\theta_i\quad(10)$$

$$R_y^{(n)}=\sqrt{1\frac{\sin^2\theta_i}{\varepsilon_r^{(n)}\mu_r^{(n)}}}\quad(11)$$

各层的折射率为

$$\beta(n)=\sqrt{\varepsilon_r^{(n)}\mu_r^{(n)}}\quad(12)$$

式(8)~式(12)中,$n=1,2,3,\cdots,N_L$;θ_i 是入射角;θ_0 是第 n 层的折射角.

应用递推式(2)~式(5),可以算出涂有多层介质的平板面元的反射系数. 应用阻抗边界条件得到涂覆 RAM 小面元 RCS 的积分表达式为

$$\sqrt{\sigma_{\mathrm{facef}}}=\frac{\mathrm{j}k}{2\sqrt{\pi}E_0}\int_{s}[(\hat{\boldsymbol{e}}_r\cdot\hat{\boldsymbol{e}}_{\perp})(1-R_{\perp})\cdot E_{\perp}\cos\theta+\hat{\boldsymbol{e}}_r\cdot(\hat{\boldsymbol{n}}\times\hat{\boldsymbol{e}}_{\perp})\cdot(1+R_{/\!/})E_{/\!/}-(\hat{\boldsymbol{e}}_r\times\hat{\boldsymbol{s}})\cdot\hat{\boldsymbol{e}}_{\perp}(1-R_{/\!/})E_{/\!/}\cdot\cos\theta+\hat{\boldsymbol{e}}_r\times\hat{\boldsymbol{s}}\cdot(\hat{\boldsymbol{n}}\times\hat{\boldsymbol{e}}_{\perp})(1+R_{\perp})E_{\perp}]\cdot\exp[\mathrm{j}k\boldsymbol{r}\cdot(\hat{\boldsymbol{i}}-\hat{\boldsymbol{s}})]\mathrm{d}s\quad(13)$$

式中，$\hat{\boldsymbol{e}}_{\perp}$ 为入射电场和反射电场垂直入射面的极化方向；$\hat{\boldsymbol{s}}$ 为雷达接收方向单位向量；E_0 为入射场的幅值.

将计算得到的反射系数代入式(13)，即可计算得到涂覆 RAM 面元的 RCS 值.

2 涂覆棱边 RCS 计算

对于电尺寸较大的表面涂覆 RAM 目标，棱边绕射的贡献是不可忽略的一个重要因素. 对于边缘的贡献，几何绕射理论(GTD，Geometrical Theory of Diffraction)对多种散射问题提供了很好的解决方法. 但是，GTD 是一种宽角理论，它在阴影边界和反射边界是不适用的，其结果中存在散焦区和奇异点. MEC 与 PTD 解决了 GTD 中的焦散区问题和奇点问题. 在 PTD 中，把散射场表示为表面的物理光学贡献和边缘绕射贡献之和，并利用二维劈的严格解来提取边缘贡献. 只要从严格解中减去物理光学(表面)的贡献，余下的一定是边缘自身的贡献，因为这里只考虑表面和边缘两种散射特征.

当电磁波照射到劈上时，根据 MEC 原理，劈的散射场可以用相应的赫兹电场和磁场矢量位 $\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{e}}$，$\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{m}}$ 表示，即

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}=\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{e}}+\mathrm{j}kZ\nabla\times\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{m}} \tag{14}$$

其中

$$\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{e}}=\frac{Z}{\mathrm{j}k}\oint_{l}\boldsymbol{I}_{\mathrm{e}}\phi\,\mathrm{d}l' \tag{15}$$

$$\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{m}}=\frac{Y}{\mathrm{j}k}\oint_{l}\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}\phi\,\mathrm{d}l' \tag{16}$$

式中，ϕ 为自由空间的格林函数；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{e}}$，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}$ 为假设棱边边缘的顶点可以被丝状电磁流线源代替的情况下，棱边边缘的顶点所产生的散射[7].

当棱边表面涂覆多层 RAM 时，可以将劈面看成具有一定量值的等效阻抗面. 在单站情况下，棱边的等效电流 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{e}}$，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}$ 的值可以通过下式计算得到：

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{e}}=\frac{-2\hat{\boldsymbol{t}}\cdot(\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})\cdot f\cdot R_{\mathrm{wedge}}^{/\!/}}{\mathrm{j}KZ\sin^2\beta} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}=\frac{-2\hat{\boldsymbol{t}}\cdot(\boldsymbol{H}_{\mathrm{i}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})\cdot g\cdot R_{\mathrm{wedge}}^{\perp}}{\mathrm{j}kY\sin^2\beta} \tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}$ 与 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{i}}$ 为入射场的电场和磁场向量；$\hat{\boldsymbol{t}}$ 为沿棱边切向的单位向量；β 为入射场的波印庭矢量与棱边切线方向的夹角；Z 与 Y 分别为自由空间的阻抗和导纳；$R_{\mathrm{wedge}}^{/\!/}$，$R_{wedge}^{\perp}$ 分别为入射电场方向平行于棱边、垂直于棱边时的棱边的等效单站反射系数.

当只考虑长度为 L 的表面涂覆多层 RAM 的直劈时，对于入射场为平面波的情形，假设在棱边的整长度上没有相移，则式(15)、式(16)中的围线积分可以被除数长度为 L 的棱边上的线性积分所替代. 将式(15)、式(16)代入式(14)并应用远场近似，得到接收端的散射场为[7]

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{P}}_e\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{sw}}=&\frac{L}{2\pi}\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}kr}}{r}\mid\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}\mid\cdot\\&[(\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{i}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})(\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{s}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})\cdot f\cdot R_{\mathrm{wedge}}^{/\!/}+\\&(\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{i}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})(\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{s}}\cdot\hat{\boldsymbol{t}})\cdot g\cdot R_{\mathrm{wedge}}^{\perp}]/\sin^2\beta\cdot\\&\frac{\sin(kL\cos\beta)}{kL\cos\beta}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}}\cdot\boldsymbol{R}}\end{aligned} \tag{19}$$

式中，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{sw}}$ 为棱边散射电场；$\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{s}}$ 与 $\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{s}}$ 为散射电磁场的极化单位向量，$\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{s}}=\hat{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{e}}$；$\boldsymbol{R}$ 为从原点到棱边中点的向量的位置. 绕射系数 f 和 g 分别为[3]

$$f=\begin{cases}(X-Y)-(X_1-Y_1)\\\qquad 0\leqslant\psi_i\leqslant\alpha-\pi\\(X-Y)-(X_1-Y_1)-(X_2-Y_2)\\\qquad\alpha-\pi\leqslant\psi_i\leqslant\pi\\(X-Y)-(X_2-Y_2)\\\qquad\pi\leqslant\psi_i\leqslant\alpha\end{cases} \tag{20}$$

$$g=\begin{cases}(X+Y)-(X_1+Y_1)\\\qquad 0\leqslant\psi_i\leqslant\alpha-\pi\\(X+Y)-(X_1+Y_1)-(X_2+Y_2)\\\qquad\alpha-\pi\leqslant\psi_i\leqslant\pi\\(X+Y)-(X_2+Y_2)\\\qquad\pi\leqslant\psi_i\leqslant\alpha\end{cases} \tag{21}$$

式中，无下标的系数 X，Y 是来自 GTD 中的 Keller 绕射系数，X_1，Y_1，X_2，Y_2 来自于一致性物理光学贡献. X，Y 及 X_1，Y_1，X_2，Y_2 的计算表达式参见文献[3].

对于均匀涂覆 RAM 的金属衬底劈，当入射场照射到边缘上时，将在绕射点处产生绕射场. 对于发生的一次绕射，入射波在涂覆目标上的绕射与反射波穿过大约相同的涂层厚度. 因此，劈的垂直极化和水平极化的一次绕射场的等效反射系数可以用两个劈面的反射系数近似. 其等效的反射系数为

$$R_{\mathrm{wedge}}^{/\!/,\perp}=\begin{cases}R_1^{/\!/,\perp} & \text{只有上表面被照射}\\R_2^{/\!/,\perp} & \text{只有下表面被照射}\\(R_1^{/\!/,\perp}+R_2^{/\!/,\perp})/2 & \text{上下表面同时被照射}\end{cases} \tag{22}$$

式中，$R_1^{/\!/}$，$R_1^{\perp}$ 分别为水平、垂直极化时，棱边的上

表面对应于入射场方向上的反射系数;$R_2^{/\!/}$,$R_2^{\perp}$ 为棱边下表面对应于入射场方向上水平、垂直极化时的反射系数.构成棱边的上、下表面的垂直极化、水平极化反射系数可以通过式(2)～式(5)计算得到.

对于涂覆 RAM 棱边的二次绕射,由于通常一次绕射的绕射波沿边缘爬行过程中大部分绕射波被 RAM 涂层吸收并发生能量转换,只有少部分绕射波能到达二次散射点.因此,雷达接收端能接收到的二次绕射波一般很微弱,本文忽略不计.此时,远场条件下不考虑高次绕射时涂覆多层 RAM 棱边的 RCS 表达式为

$$\sqrt{\sigma_{\text{wedge}}} = \frac{L}{\sqrt{\pi}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}kr} \cdot \left[(\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{t}})(\hat{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{s}} \cdot \hat{\boldsymbol{t}}) \cdot f \cdot R_{\text{wedge}}^{/\!/} + (\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{t}})(\hat{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{s}} \cdot \hat{\boldsymbol{t}}) \cdot g \cdot R_{\text{wedge}}^{\perp} \right] \Big/ \sin^2\beta \cdot \frac{\sin(kL\cos\beta)}{kL\cos\beta} \mathrm{e}^{\mathrm{j}k\hat{\boldsymbol{k}}_{\mathrm{i}} \cdot \boldsymbol{R}} \tag{23}$$

3　算法验证

为了检验上述算法,分别选取简单及复杂目标,应用本文方法进行了计算.在计算过程中,首先计算出目标不同涂覆表面反射系数矩阵.在随后的运算中,从反射系数矩阵直接调用这些反射系数,从而可极大地提高计算速度.

3.1　多层涂覆平板的 RCS 计算

为了与文献[8]公布的结果相比较,各层涂覆参数如表 1 所示.平板的各层所涂的材料号及厚度如表 2 所示.计算得到的反射系数随频率的变化如图 2 所示.

表 1　几组有耗、无耗的介电、磁性吸波材料的介电常数及磁导率

材料特性	材料号	参　数			
无损耗介电材料	1	ε_r			
(注①)		50−j0			
有损耗磁性材料		μ_r(1 GHz)	α	μ_i(1 GHz)	β
(注②)	2	3	1.0	15	0.957
	3	7	1.0	12	1.0
有损耗介电材料	4	ε_r(1 GHz)	α	ε_i(1 GHz)	β
(注③)		5	0.861	8	0.569
松驰磁性材料	5	μ_m		f_m	
(注④)		30		2.5	

注:①$\mu=1-\mathrm{j}0$;②$\varepsilon=15-\mathrm{j}0$,$\mu=\mu_r-\mathrm{j}\mu_i$;$\mu_r(f)=\mu_r(1\,\mathrm{GHz})/f^{\alpha}$;$\mu_i(f)=\mu_i(1\,\mathrm{GHz})/f^{\beta}$;$f$(GHz);③$\mu=1-\mathrm{j}0$,$\varepsilon=\varepsilon_r-\mathrm{j}\varepsilon$;$\varepsilon_r(f)=\varepsilon_r(1\,\mathrm{GHz})/f^{\alpha}$;$\varepsilon_i(f)=\varepsilon_i(1\,\mathrm{GHz})/f^{\beta}$;$f$(GHz);④$\varepsilon=15-\mathrm{j}0$,$\mu=\mu_r-\mathrm{j}\mu_i$;$\mu_r(f)=\dfrac{\mu_m f_m^2}{f^2+f_m^2}$;$\mu_i(f)=\dfrac{\mu_m f_m f}{f^2+f_m^2}$;$f$,$f_m$(GHz).

表 2　频率变化区间介于 0.2～2 GHz 时,平板的各层涂覆的材料号及厚度

层号	材料号	厚度/cm
1	2	0.154
2	2	0.166
3	2	0.055 9
4	4	0.143
5	5	0.088 8

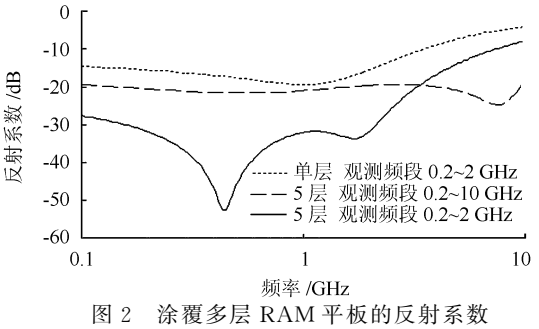


图 2　涂覆多层 RAM 平板的反射系数

图 2 中单层平板用材料 4,厚度 $t=0.249$ cm.

从图 2 可以看到,在平板上涂覆表 2 所示的 5 层 RAM 后,在垂直入射时,反射系数在 0.2～2 GHz频段内衰减超过 −30 dB.涂覆表 3 的 5 层涂覆材料平板,在 0.2～10 GHz 频段上,反射系数随频率变化曲线几乎是水平的,大约有 18 dB 的衰减.单层涂覆平板的反射系数在 0.2～2 GHz 频段上约有 15 dB 的衰减.上述结果与文献[8]中公布的结果相符.从图中可以发现,适当组合的多层涂覆 RAM 比单层涂覆 RAM 能更有效的实现 RCS 缩减,并且可以比单层涂覆时获得更宽的有效衰减频带.

表 3　频率变化区间介于 0.2～10 GHz 时,各层所用材料号及厚度

层号	材料号	厚度/cm
1	1	0.064 9
2	2	0.193
3	3	0.140
4	4	0.177
5	5	0.043 4

图 3 将本文的方法计算单面涂覆 RAM 的金属方形平板的 RCS 的计算结果同文献给出的测量结果进行了比较.平板边长为 6 cm,频率为 10 GHz,涂层参数 $\varepsilon_r=11.826-\mathrm{j}0.166\,39$,$\mu_r=1.539-\mathrm{j}1.224\,1$,涂层厚度 $t=0.13$ cm.由图 3 可见,在接近平板的法向入射方向,计算结果与测量结果吻合较好.当入射方向沿平板边缘入射时(对应图中 0°,180°,360°方位角),其 RCS 值与测量值有偏差.这主要是由于平板具有一定的厚度,当入射场方向平行于平板时,在该方位角上同时计算 2 个长直角劈与 2 个厚度方向上的短直角劈产生的绕射,这样导致该方位角上的 RCS 值增大.

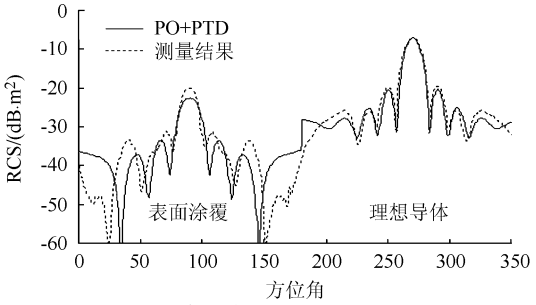


图3 单面涂覆平板的RCS,VV

3.2 涂覆旋转体的RCS计算

图4给出了表面涂覆RAM圆锥的RCS.锥的顶角 $\alpha=30°$,底面直径 $D=3\lambda$.涂覆材料参数为 $\varepsilon_r=7-j1.5$, $\mu_r=2-j1$,厚度 $t=0.04\lambda$.

由图4可见,本文中应用PO+PTD计算得到的仿真结果(实线部分)与文献[9]中矩量法计算结果在主瓣区吻合较好,在副瓣区的计算结果有小量偏差,该偏差应该是由于未计及高阶绕射而产生.

此外,文献[9]中还给出了PTD(此处未给出)结合增量长度绕射系数(ILDC,Incremental Length Diffraction Coefficients)计算的结果,与本文中计算结果在大部分方位角上相一致.但应用ILDC算法计算量很大,而本文中算法具有较高的计算速度.

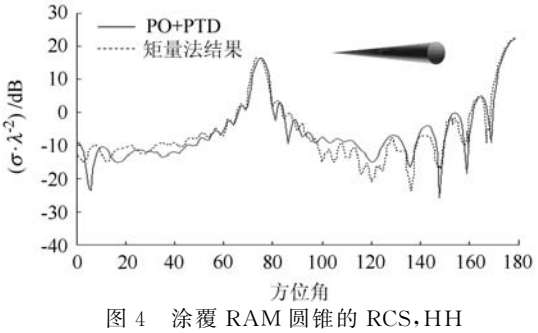


图4 涂覆RAM圆锥的RCS,HH

图5示出了涂覆RAM圆柱的RCS.圆柱底面直径 $D=3\lambda$,高度 $L=4\lambda$.涂覆参数为 $\varepsilon_r=4-j1.5$, $\mu_r=2-j1$,厚度 $t=0.04\lambda$.观察图5可见,本文中的计算结果(实线部分)与文献[9]中的矩量法计算结果较好的吻合,进一步验证了应用PTD计算表面涂覆棱边绕射的正确性.

3.3 涂覆RAM的复杂目标RCS计算

为进一步演示本文算法的有效性,选取图6中右上角所示的AGM-84a导弹目标.弹体长3.4 m,弹体半径0.17 m,频率 $f=10$ GHz.选择表3中所示的各层RAM参数,分别计算金属表面及5层涂覆RAM表面时目标的RCS值.HH和VV极化下的RCS计算结果如图6和图7所示.

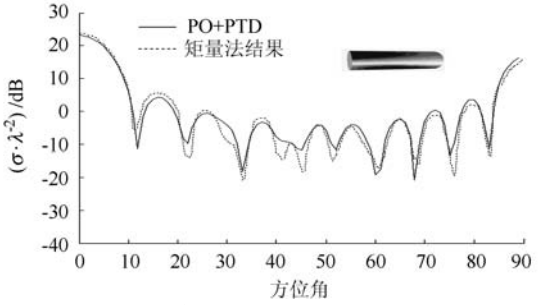


图5 涂覆RAM圆柱的RCS,HH

观察图6可以看到,在频率为10 GHz时,涂覆表3中的5层RAM后,可以使目标的RCS平均减小约17~18 dB.目标划分为4 800个面元及224个棱边,计算机为AMD Athlon 64 Processor 3200+主频2.0 GHz,内存960 Mbit时,计算得到图6、图7中多涂覆结果用时约85 s,与全金属目标计算所用时间大致相当.

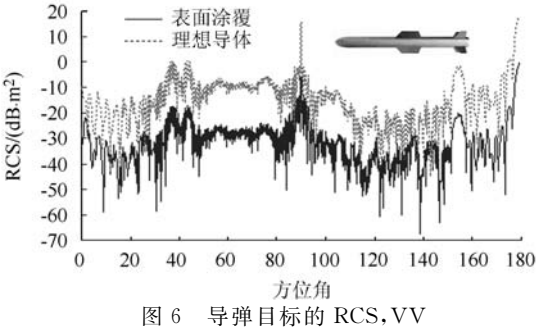


图6 导弹目标的RCS,VV

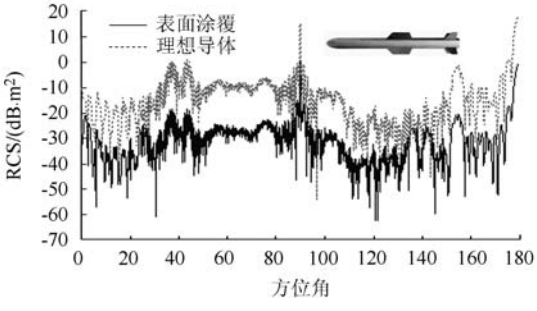


图7 导弹目标的RCS,HH

4 结束语

本文研究了一种表面涂覆多层RAM目标的RCS快速计算方法.文中应用PO及IBC经典解法计算了涂覆多层RAM面元的RCS,并根据PTD理论与MEC方法,得出多层涂覆棱边的RCS解析解表达式,成功地用于计算涂覆棱边的RCS.为加快计算速度,预先计算出不同入射角时面元的反射系数矩阵,减少了多层递归运算的次数.应用本文方法对典型涂覆目标及复杂的涂覆RAM目标的RCS计算,表明本文方法具有较高

的计算速度和准确度.

参考文献(References)

[1] Volakis J L, Chatteri jee A, Kemple L C. Review of the finite element method for three-dimensional electromaynetic scattering[J]. J Opt Soc A, 1994,11(4):1422－1433

[2] Rojas R G, AL-hekail Z. Generalized impedance/resistive boundary conditions for electromagnetics scattering problems[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1988, 36(7): 956－970

[3] 阮颖铮.雷达散射截面与隐身技术[M].北京:国防工业出版社, 1998:120－125
Ruan Yingzheng. Radar dross section and stealth technique [M]. Beijing: Defence Industry Publication House, 1998: 120－125(in Chinese)

[4] 赵维江.复杂目标雷达截面计算方法研究[D].西安:电子科技大学电子工程学院,1999:49－50(in Chinese)
Zhao Weijiang. Study on prediction techniques of radar cross section of complex targets[D]. Xi'an: School of Electronic and Information Engineering, Xidian University, 1999: 49－50(in Chinese)

[5] Ufimtsev P Y. Method of edge waves in the physical theory of diffraction [M]. Moscow: Soviet Radio Publication House,1962:1－243

[6] Michaeli A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. IEEE Trans Antennas and Propatat, 1984, 32 (3): 252－258

[7] Youssef N N. Radar cross section of complex targets[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(5): 722－732

[8] Mosallaei H, Yahya R S. RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 1594－1606

[9] Syed H H, Volakis J L. PTD analysis of impedance structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(7): 983－988

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 832 页)

参考文献(References)

[1] 任兆生,薛利豪,石立勇,等.战斗机地面停放座舱热环境下的热应激测试[C]//中国航空学会人体工程航医救生专业分会第七届学术交流年会论文集.北京:中国航空学会人体工程航医救生专业分会,2006:219－221
Ren Zhaosheng, Xue Lihao, Shi Liyong, et al. Cabin themal environment heat stress testing when fighter on ground [C]//Proceeding of Seventh Conference on Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering. Beijing: Technical Committee of Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering-CSAA, 2006:219－221(in Chinese)

[2] 任兆生,石立勇,薛利豪,等.以冰胶为制冷介质的降温背心冷却效果研究[C]//中国航空学会人体工程航医救生专业分会第七届学术交流年会论文集.北京:中国航空学会人体工程航医救生专业分会,2006:222－227
Ren Zhaosheng, Shi Liyong, Xue Lihao, et al. Study of cooling vest with refrigerant of ice-gum[C]//Proceeding of Seventh Conference on Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering. Beijing: Technical Committee of Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering-CSAA, 2006:222－227(in Chinese)

[3] 邱义芬.舱外液冷通风服-人体热调节系统的数值模拟与实验研究[D].北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院,1999
Qiu Yifen. Experimental research and numerical simulation of liquid and ventilation cooling garment and human thermoregulation system for extravehicular activity[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)

[4] 邱义芬,袁修干,梅志光,等.舱外航天服通风系统传热分析[J].航空学报,2001,22(5):444－446
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of ventilation system used for EVA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 444－446 (in Chinese)

[5] 邱义芬,袁修干,梅志光,等.舱外航天液冷服传热分析[J].航天医学与医学工程,2001, 14(5):364－367
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of liquid cooling garment used for extravehicular activity[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5): 364－367 (in Chinese)

[6] Lotens W A, Havenith G. Effects of moisture absorption in clothing on the human heat balance[J]. Ergonomics, 1995, 38(6):1092－1113

(责任编辑:刘登敏)