

吸波涂层目标散射特性的复射线分析*

阮颖铮 杜惠平

(电子科技大学二系,成都 610054)

摘要 将复射线理论推广到媒质有耗的情形,可以建立起损耗媒质中的复射线方法并用来分析吸波涂层目标的散射特性。该方法具有计算简便、物理概念明确、适用范围较广等特点。本文以涂层金属平板为例所进行的目标雷达截面分析结果表明,理论计算与实验结果能够很好地吻合。

关键词 吸波材料;雷达截面;复射线法

一、引言

在飞行器表面涂覆一层雷达波吸收材料,是目标雷达截面(RCS)减缩的基本方法之一^[1],因此,对吸波涂层目标电磁散射特性的研究已成为国内外在目标特性和隐身反隐身技术研究中的一个重要课题。在已有文献中,采用了若干经典方法来分析吸波涂层目标的散射特性,如积分方程法^[2]、几何光学展开法^[3]、物理光学积分法^[4]、矩量法^[4]、几何绕射法^[5]及物理绕射法^[6]等。但当实际目标电尺寸很大时,积分方程法和矩量法会遇到大型矩阵求逆的麻烦,物理光学法会明显增加积分计算量,几何光学法由于要求展开时射线间距小于 0.2λ ^[3],也会大大增加射线数目和计算工作量。这些方法的应用都在一定程度上受到了目标电尺寸的限制,因而有必要寻求一种更为简便有效的方法来分析这一类目标的电磁散射问题。

复射线理论是本世纪七十年代新发展起来的一种近似求解高频波场问题的新方法。利用复射线有关方法,可以有效地分析高频电磁散射有关问题及RCS^[6],然而这些分析目前都仅限于无耗媒质及金属导体的情形。用复射线方法来分析有损耗吸波涂层目标的散射,既是涂层目标散射特性分析方法的一种新探讨,也是复射线方法应用领域的一个新开拓。

二、损耗媒质中的复射线场

由损耗媒质中的射线光学场^[7]作适当的解析延拓(源点坐标的复延拓),便可以构造出损耗媒质中的复射线场表达式。在二维情形下这样的场可以表示为

1990.11.25 收到,1991.09.17 定稿。

* 国家教委博士点基金及国家自然科学基金资助项目。

$$\tilde{\phi} \sim \tilde{C} \exp(ik_0 \tilde{S}) / \sqrt{k_0 \tilde{S}} \quad (1)$$

其中

$$\tilde{C} = -\omega \tilde{\mu} / \sqrt{i8\pi} \quad (1a)$$

$$\tilde{S} = \tilde{n} \tilde{r} = \sqrt{\tilde{\mu} \tilde{\epsilon}} \sqrt{(x - \tilde{x}_i)^2 + (y - \tilde{y}_i)^2}, \operatorname{Re} \tilde{r} \geq 0 \quad (1b)$$

它所表征的是可观察空间中沿 \mathbf{r} 方向传播的一个局部不均匀平面波, 且沿 \mathbf{r} 方向同时有相位的滞后及因媒质有耗而引入的振幅指数衰减。该波场分布是空间波动方程

$$(\nabla^2 + k_0^2 \tilde{n}^2) \tilde{\phi} = 0 \quad (2)$$

在高频渐近条件下的解, 并能满足辐射条件, 因而是空间波场的一种可能存在的形式。在 (1) 式中, 如令 $\tilde{\mu} \rightarrow \mu$, $\tilde{\epsilon} \rightarrow \epsilon$, 则 (1) 式蜕化为无耗情形下的复射线场表达式^[8]。

进一步的分析表明, 与无耗情形下的复射线场相比较, 当媒质有耗时复源点场的特性会产生一定的变化, 如波源附近等相位面和等指数振幅面的畸变, 以及坡印廷能流方向的变化等。但是在离开复源点后, 这样一个场仍能有效地表示在空间横向凋落的高斯波束场, 而且在轴线上及近轴区域中场的分布与无耗情形相比并无原则性的变化^[9]。因而在无耗情形下适用的复射线近轴近似等方法可以进一步用于媒质有耗的情形。而对于轴线上场的处理, 仍可沿用无耗情形下的实空间射线追踪, 只是在传播过程中计及媒质损耗所引起的衰减而已。利用复射线所表示的高斯波束轴线上场以及近轴区域内场的固有特点, 可以进一步简化复射线场的分析^[10]。

三、涂层金属平板的分析模型

涂层目标与金属目标间最主要的区别在于对涂层的处理。为了探讨运用复射线方法分析涂层目标散射的可行性, 我们选择了单面单层涂覆的金属平板作为具体研究的物理模型。对这种简单涂层目标的处理, 可采用图 1 所示的两种数学分析模型, 即分层媒质模型和等效传输线模型。

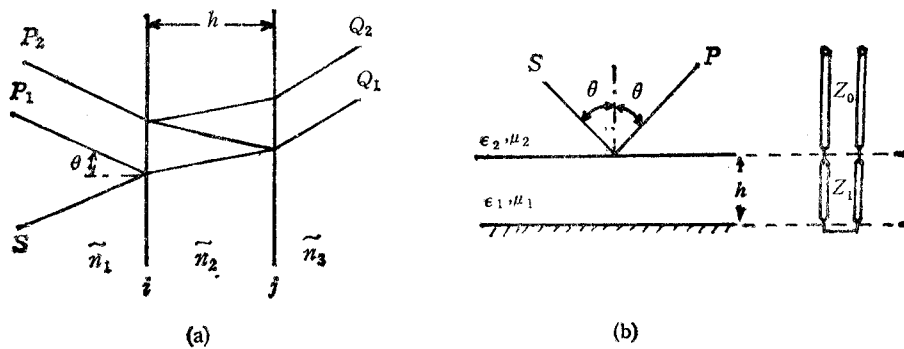


图 1 涂层金属平板的两种分析模型

(a) 分层媒质 (b) 等效传输线

在图 1(a) 所示的分层媒质模型中, 利用上述损耗媒质中复射线场的特点, 从复射线

的基本方法入手并利用近轴近似关系^[10],可以求得轴线附近一点 P'_i 处的复射线场

$$\phi(P'_i) \sim \tilde{C}\tilde{R}(\theta)(1 + \tilde{v}_R)\exp[ik_0(\tilde{S}_0 + \delta)]/\sqrt{k_0\tilde{S}} + \phi' \quad (3)$$

式中, $\tilde{R}(\theta)$ 为界面处的菲涅尔反射系数, \tilde{v}_R 为反射系数校正因子, δ 为复相位校正因子,且有

$$\tilde{v}_R = \frac{\Delta\tilde{\theta}}{\tilde{R}(\theta)} \cdot \frac{d\tilde{R}(\tilde{\theta})}{d\tilde{\theta}} \Big|_{\tilde{\theta}=\theta} \quad (4)$$

$$\delta = \tilde{n}_1 d^2 / (2\tilde{S}_0) \quad (5)$$

$$\Delta\theta = \arctg(d/\tilde{S}_0) \quad (6)$$

$$\tilde{S}_0 = S_1 + S_2 + ib\tilde{n}_1 \quad (7)$$

这里, d 为 P'_i 到轴线的距离, $S_1 + S_2$ 为从源点 S 到轴线上对应于 P'_i 的场点 P_1 的程函。(3) 式中的 ϕ' 项表示进入 \tilde{n}_2 媒质中的波场在界面 i 与 j 之间(多次)反射后再进入 \tilde{n}_1 媒质时对 P'_i 点的波场贡献。当图中涂层厚度 h 及入射角 θ 的值不大时, ϕ' 可由集合射线的方法近似求得^[11]

$$\phi' = \tilde{C} \cdot \tilde{T}_{c0}\exp[ik_0(\tilde{S}_0 + \delta_1)]/\sqrt{k_0\tilde{S}_0} \quad (8)$$

式中

$$\tilde{T}_{c0} = \frac{\tilde{t}_1\tilde{t}_2}{1 - \tilde{r}_1\tilde{r}_2\exp[i2\tilde{n}_2k_0(2h/\cos\tilde{\nu} - \tilde{L}_{c0})]} \quad (9)$$

$$\tilde{L}_{c0} = \tilde{n}_2 h \sin^2\tilde{\nu} / \sqrt{\tilde{n}_2^2 - \tilde{n}_1^2 \sin^2\theta} \quad (10)$$

$$\delta_1 = 2h/\sin\tilde{\nu} + \tilde{d}^2/(2\tilde{S}_0) \quad (11)$$

$$\tilde{d} = d + 2h\text{ctg}\tilde{\nu}\cos\theta \quad (12)$$

$$\sin\tilde{\nu} = \tilde{n}_1 \sin\theta/\tilde{n}_2 \quad (13)$$

其中, \tilde{t}_1, \tilde{t}_2 分别是 从 \tilde{n}_1 媒质进入 \tilde{n}_2 媒质及从 \tilde{n}_2 媒质进入 \tilde{n}_1 媒质时波的透射系数, \tilde{r}_1, \tilde{r}_2 则分别表示从 \tilde{n}_2 到 \tilde{n}_1 及从 \tilde{n}_2 到 \tilde{n}_3 时的反射系数, 其它各参量均同前所定义。由于涂层材料参数一般都有较大的损耗角正切, 因而集合射线的处理方法较之无耗情形更为可取。

在图 1(b) 所示的等效传输线模型中, 我们利用等效传输线的方法将涂层的作用等效为阻抗加载表面^[9]。则复射线场轴线上 P_1 附近一点 P'_i 处的场为

$$\phi(P'_i) \sim \tilde{C}\tilde{R}(\theta)(1 + \tilde{v}_R)\exp[ik_0(\tilde{S}_0 + \delta)]/\sqrt{k_0\tilde{S}_0} \quad (14)$$

这时, 除 $\tilde{R}(\theta)$ 外各参量均同前(4)~(7)式, 而 $\tilde{R}(\theta)$ 则由传统的菲涅尔反射系数变为下面的等效反射系数^[3]

$$\tilde{R} = \frac{1 - Z_0/Z_+}{1 + Z_0/Z_+} \quad (15)$$

式中

$$Z_+ = iZ_1 \text{tg}(\beta_{z_1}h) \quad (16)$$

$$Z_1 = \begin{cases} \omega\mu_1/\beta_{z_1}, & \text{平行极化时} \\ \beta_{z_1}/\omega\epsilon_1, & \text{垂直极化时} \end{cases} \quad (17)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \omega \mu_0 / \beta_{x0}, & \text{平行极化时} \\ \beta_{x0} / \omega \epsilon_0, & \text{垂直极化时} \end{cases} \quad (18)$$

$$\beta_{x0} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \cos \theta \quad (19)$$

$$\beta_{x1} = \omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \mu_0 \epsilon_0 \sin^2 \theta} \quad (20)$$

这两种处理方法各有其优缺点。前者适用范围广,既可以适用于单层涂层情形,也可以适用于多层涂层情形;既可适用于垂直入射,又可适用于斜入射;既可处理均匀涂层的情形,又可用于不均匀涂层以及结构型吸波材料等的处理,具有较大的灵活性。但其计算较为烦杂。后一种方法能进一步简化问题,减少计算量,节约计算时间及费用,但其适用范围受到了严格的限制。在图示均匀涂层的条件下,二者对涂层金属平板电磁散射特性的分析结果应该是一致的,下面的实际计算结果也证实了这一点。

四、涂层平板电磁散射的复射线分析

1. 平面波的复射线场拟合

入射平面波场可以用离开目标一定距离处的一组同向辐射的复射线场来拟合^[12]。利用(1)式可以写出拟合后的平面波入射场

$$\phi^i = \sum_m C \exp \left[-k_0 b + \frac{k_0}{2b} (y - m\Delta y)^2 \right] / \sqrt{b} \quad (21)$$

且

$$C = -\omega \mu_0 / \sqrt{i 8 \pi k_0}$$

这里, k_0 为自由空间波数, m 为整数, 表示复源点的序号, Δy 为 y 轴(展开面)上复源点间的间距, b 为复射线场的波束宽度参量。适当地选择 b 及 Δy 的取值, 可以使(21)式所表示的平面波达到任意规定的精度^[12]。

2. 反射场的求解

利用上述复射线场所表示的平面波作为涂层目标处的入射波场, 则马上可以写出反射波场的表达式

$$\phi^r = \sum_m \phi_m^r \quad (22)$$

其中, ϕ_m^r 表示第 m 个复源点在观察点处所产生的反射场贡献, 并可由前述(3)式或(14)式求得。

3. 绕射场的求解

将涂层金属平板视为涂层厚度为零的阻抗平面, 则有如下绕射公式^[5]

$$\phi^d = \frac{\exp(ik_0 \rho)}{4\sqrt{i 2 \pi k_0 \rho}} \left\{ \Gamma_A \left\{ \text{ctg} \left[\frac{\pi + (\varphi - \varphi_0)}{4} \right] \pm \text{ctg} \left[\frac{\pi - (\varphi + \varphi_0)}{4} \right] \right\} - \left\{ \text{ctg} \left[\frac{\pi - (\varphi - \varphi_0)}{4} \right] \pm \text{ctg} \left[\frac{\pi + (\varphi + \varphi_0)}{4} \right] \right\} \right\} \quad (23)$$

式中, “±”号分别对应于平行及垂直极化的情形, 且有

$$\Gamma_A = \begin{cases} \Gamma_A^{\parallel} = \frac{\eta_A - \sin \varphi_0}{\eta_A + \sin \varphi_0}, & \text{平行极化时} \\ \Gamma_A^{\perp} = \frac{\sin \varphi_0 - \eta_A}{\sin \varphi_0 + \eta_A}, & \text{垂直极化时} \end{cases} \quad (24)$$

这里, η_A 为阻抗平面的波阻抗, 其他参量均如图 2 所示。

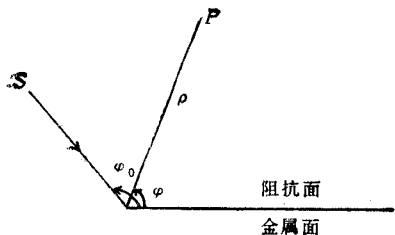


图 2 绕射场的几何关系

4. 总散射场及 RCS 计算

总散射场由反射场及绕射场经相位相加而成, 即

$$\phi' = \phi^r + \phi^d \quad (25)$$

按照 RCS 的定义, 由 (25) 式可求得无限长二维涂层金属条带的散射宽度为

$$\sigma_{\text{length}} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho |\phi'|^2 / |\phi^i|^2 \quad (26)$$

将二维目标的雷达散射宽度换算为有限长度为 $2c$ 的三维涂层金属平板法向的雷达散射截面, 可利用如下的简单变换关系^[13]

$$\sigma_{\text{area}} = (8c^2/\lambda)\sigma_{\text{length}} \quad (27)$$

五、数值分析结果

1. 涂层金属平板的 RCS

根据上述理论分析结果编写的计算机程序, 可以对各种涂层金属平板的 RCS 值进行数值分析。一组典型的结果如图 3 及图 4 所示。

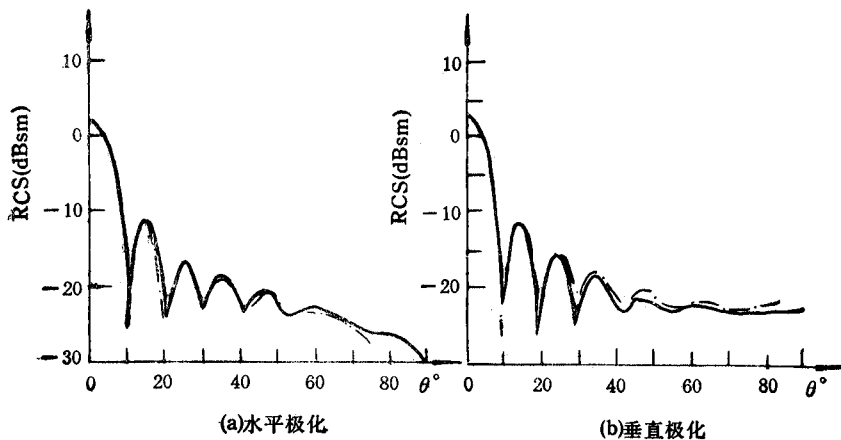


图 3 吸波涂层金属平板的 RCS 及文献[5]中的实验结果

——本文计算值 - - - 文献[5]中实验结果

平板尺寸: $15\text{cm} \times 15\text{cm}$, $f = 6\text{GHz}$, 涂层厚度 $h = 0.762\text{mm}$

涂层材料参数: $\tilde{\mu} = 1.47 - j0.853$, $\tilde{\epsilon} = 7.75 - j0.969$

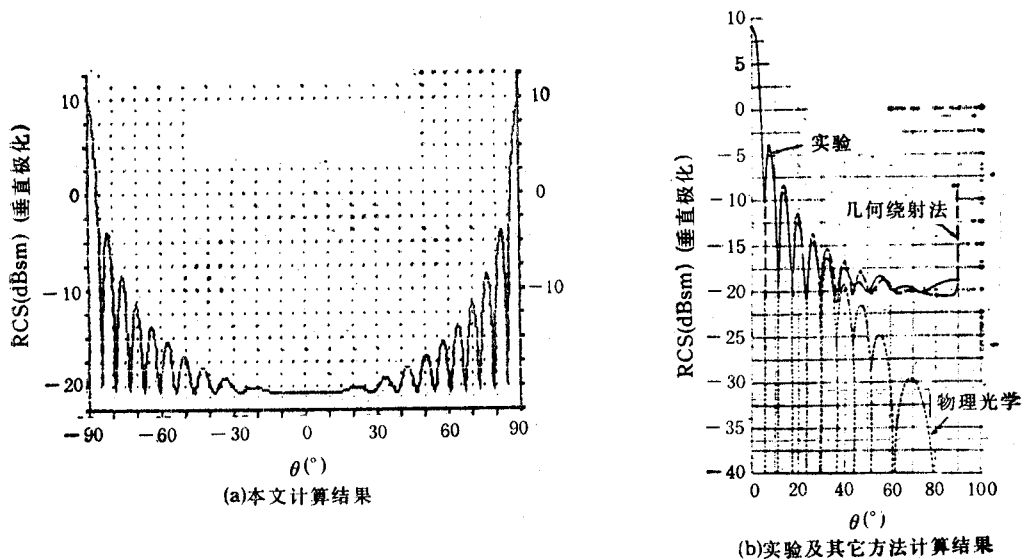


图4 无涂层金属平板(涂层厚度为零)的 RCS 及文献[13]中的实验结果
平板尺寸: $16.5\text{cm} \times 16.5\text{cm}$, $f = 9227.4\text{MHz}$, 垂直极化。

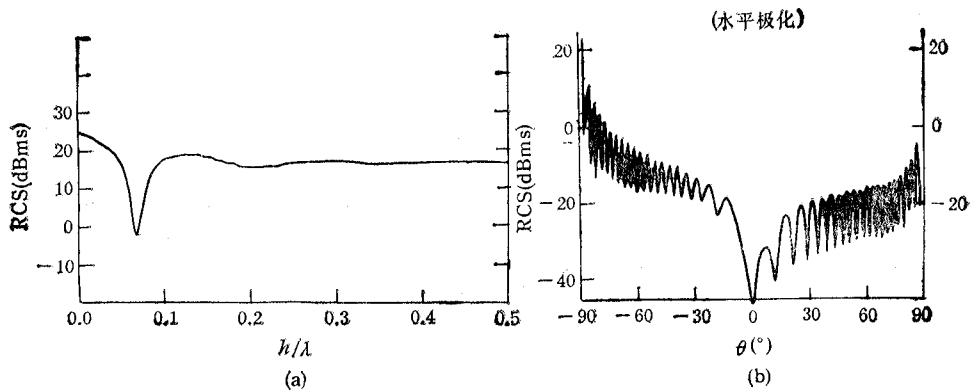


图5 涂层厚度对 RCS 减缩效果的影响

(a) 涂层金属平板最大 RCS 值与涂层厚度间的关系 (b) 两种厚度下涂层金属平板 RCS 的比较
 $2a = 2b = 50\text{cm}$, $h = 3.5\text{mm}$, $\bar{\mu} = 1.47 - j0.853$, $\bar{\epsilon} = 7.75 - j0.969$, $f = 6\text{GHz}$

图3是涂层金属平板的计算结果,图4则是无涂层金属平板(亦即涂层厚度为零时)的计算结果。由图中计算结果与实验结果的对比不难看出二者具有很好的一致性,这表明利用复射线方法可以有效地分析涂层金属目标的雷达散射截面。

2. 涂层参数对 RCS 的影响

利用吸波涂层来实现目标 RCS 减缩时,必然存在着一个涂层材料参数及涂层厚度的选择问题。恰当地选择涂层参数,可以达到最佳的 RCS 减缩效果。将上述计算程序稍作改动后,可用来对涂层参数进行优化。

对给定目标、给定频率和给定的涂层材料,涂层厚度对吸波效果有极大的影响。图

5(a) 表示涂层平板目标最大 RCS 值在给定参数下与涂层厚度间关系的理论计算结果。

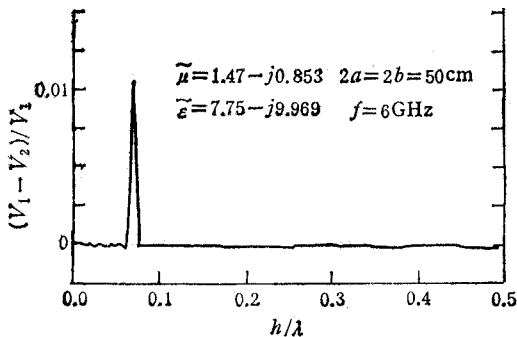


图 6 两种模型数值分析结果的比较

V_1 为分层媒质模型下求得的最大 RCS 值
 V_2 为等效传输线模型下求得的最大 RCS 值
 (图中的 $j9.969$ 应为 $j0.9691$)

过用复射线法分析涂层目标散射特性的两种分析模型。图 6 给出了两种模型下数值分析结果的比较。由图可见,相对误差与涂层厚度有关,但其最大值不超过 1%。由此可见,对于工程计算,两种方法具有同样的计算精确度。

六、结 束 语

在军用目标特性和隐身反隐身技术研究中,雷达目标散射特性的实验研究固然重要,但其理论研究的作用也不容忽视,因为它具有花费少,周期短,效益高,灵活多变等特点。在理论研究的诸多方法中,复射线的分析方法更有其独到之处。通过前面的分析不难得出如下的结论:

(1) 复射线分析的结果有实际应用价值和指导意义。从上述数值分析不难看出,该方法的结果与实验结果非常吻合,因此,它可以作为实验的辅助手段。同时,采用复射线分析能大量节约计算时间及费用,因而更符合实际需要。

(2) 复射线场具有波束传播特性,当目标电尺寸很大时,可通过增大复源点间距 Δy 并适当选择参量 b 的方法来减少计算量并保证计算精度,因而可在一定程度上缓解计算工作量随目标电尺寸增大而迅速增加的矛盾,对高频大目标较为有效。

(3) 复射线分析方法具有广泛的适用范围。既可以分析金属目标,也可以分析涂层目标,既可以分析目标的 RCS 值,也可以对涂层材料有关参量作低 RCS 优化。

本文虽然只讨论了平板涂覆的简单情形,但这种方法亦可以推广到其它更为复杂的涂层目标。例如文献[15]用这种方法分析涂层角反射器的 RCS,所得理论结果与实验结果也十分吻合。本文方法程序也可推广到一次和二次凸面和凹面情况,以及多散射体组合等复杂目标,有关结果将另文发表。

参 考 文 献

- [1] E. F. Knott 等著,阮颖铮等译,雷达散射截面——预估、测量和减缩,电子工业出版社,北京,1988 年 11 月。

由图可见,当厚度 $h \approx 0.06\lambda$ 时,涂层材料具有最佳的吸波效果。图 5(b) 表示厚度为零与最佳厚度时计算的涂层平板 RCS 分布图的比较,由图可见其峰值 RCS 可减小约 20 dB。

经改动后的上述程序也可用于涂层材料等效电参数 $\tilde{\mu}$, $\tilde{\epsilon}$ 的低 RCS 优化选择,并可利用材料参数与其微观构成之间的关系^[14],直接进行涂层材料配方的优化,以达到最佳的吸波隐身效果。

3. 两种分析模型的比较

在前面的理论分析中,我们曾介绍

- [2] 徐晓文, 涂层目标散射特性及其模型测量的理论研究, 电子科技大学博士学位论文, 成都, 1989 年.
- [3] H. Ling, R. C. Chou, S.W. Lee, *IEEE Trans. on AP*, **AP-37** (1989) 2, 194—205.
- [4] R. Mittra (ed.), *Computer Techniques for Electromagnetics*, Pergamon Press, New York, (1973).
- [5] 阮成礼, 王秉中, 部分涂覆机翼结构 RCS 研究, 军用目标特性和传输特性论文与摘要汇编, 1989 年, 青岛, 第 60—60 页.
- [6] 阮颖铮, 电子学报, **17**(1989)3, 89—94.
- [7] M. Born, E. Wolf, *Principle of Optics*, 6th ed. Pergamon Press, New York, (1980).
- [8] 阮颖铮编著, 电磁射线理论基础, 成都电讯工程学院出版社, 成都, 1989 年 4 月.
- [9] 阮颖铮, 杜惠平, 应用科学学报, **10**(1992)2, 13—19.
- [10] 阮颖铮, L. B. Felsen, 应用科学学报, **7** (1989) 2, 174—177.
- [11] 阮颖铮, 电子科学学刊, **11** (1989) 4, 368—377.
- [12] 冯文澜, 阮颖铮, 电子科学学刊, **12**(1990)6, 664—667.
- [13] R. A. Ross, *IEEE Trans. on AP*, **AP-14** (1966) 3, 329—335.
- [14] 贾宝福, 强扰动理论及其在隐身用吸波材料研究中的应用, 电子科技大学博士学位论文, 成都, 1989 年.
- [15] 阮颖铮, 杜惠平, 电子科技大学学报, **20** (1991) 4, 368—374.

COMPLEX RAY ANALYSIS OF SCATTERING FROM RAM COATED TARGETS

Ruan Yingzheng Du Huiping

(University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract With the extension of complex ray theory (CRT) from lossless media into lossy ones, the complex ray analysis in lossy media can be constructed, and effectively used in the problems of scattering analysis of objects coated with radar absorbing materials (RAM). This method has advantages, such as simple calculation procedure, clear physical meaning, wide application area etc. As an example, the radar cross-section (RCS) of conducting flat plates coated with RAM is analyzed. The results show that the theoretical predictions agree very well with the experimental results.

Key words Radar absorbing material; Complex ray; Radar cross-section