

用复射线展开法分析目标的雷达截面***

冯文澜 阮颖铮
(电子科技大学, 成都)

摘要 本文根据复射线分析和场的高斯波束展开, 提出了一种计算复杂目标电磁散射特性的简便方法。由于复射线法不受目标形状的限制, 因此该方法可用于任意形状的目标。本文以矩形进气道为例, 进行了雷达截面分析计算, 并将计算值与测试值比较, 结果表明这种方法是可行的。

关键词 雷达截面; 电磁散射; 复射线分析; 平面波展开。

1. 引言

随着隐身技术的发展, 为了研究军事目标的电磁散射特性, 雷达截面 (RCS) 的计算分析受到很大重视。目前所采用的方法有: 几何光学法, 物理光学法, 几何绕射理论, 平面波谱技术和微波网络法等。这些方法对于分析简单目标和电尺寸较小的模型是行之有效的, 但对于复杂的边界条件以及真实的电大尺寸目标将会受到计算机存贮量、计算时间冗长和计算公式复杂等限制。如几何光学法, 不仅受边界奇异限制, 且当电尺寸增大时, 所需计算的射线数剧增, 使计算几乎无法进行。又如微波网络法, 随着电尺寸的增大, 内部导波模式将迅速增多, 模式简并更加复杂, 不仅定量分析不能实现, 就是定性分析也很难入手。为了对实际目标的设计提供有力手段, 发展一些有效的算法来计算不同目标的雷达截面势在必行。本研究的目的就在于探索把场的高斯波束展开和复射线分析法^[1-3]用于计算杂复目标雷达截面的可行性。

2. 场的高斯波束展开和复射线方法

由复射线分析可知^[3], 复源点场在实空间表示一个定向辐射的聚束波, 在波束轴线两边场按高斯函数急剧减小。因此, 当入射场是针状波束的散射场(如雷达波束)时, 可以由高斯波束很好地近似, 因而可以直接利用复射线理论计算目标的电磁散射特性。但是, 当目标远离发射雷达时, 目标接收到的场近似为平面波场。这时, 不能直接用高斯波束来近似平面波场, 必须设法将平面波展开为高斯函数, 才能利用复射线理论来进行分析计算。

关于函数的高斯展开, 至今还没有一套准确的方法来解决这一问题^[1-4]。函数的展开本身是一个纯数学问题。要想将一个函数展开成另一函数的线性组合, 其关键是展开系数的求解。

一个基本的高斯函数可表示为

$$G(x) = (\sqrt{2/T})^{1/2} \exp[-\pi(x/T)^2] \quad (1)$$

* 1989年2月12日收到, 1989年10月27日修改定稿。

** 国家教会博士点基金和机电部电子科学研究院资助课题。

由于高斯函数不具备正交性^[3]，因此要将一个函数展开为高斯函数的迭加，其展开系数是不能一确定的，无法用解析表达式给出。八十年代以来，一些专家和学者开始利用双正交函数来研究函数的高斯波束展开；比如 Hermite-Gauss 展开和 Laguerre-Gauss 展开^[4]。这些双正交函数的展开实际上都是高斯调制的正交展开。而函数的纯高斯展开问题并没有得到解决。

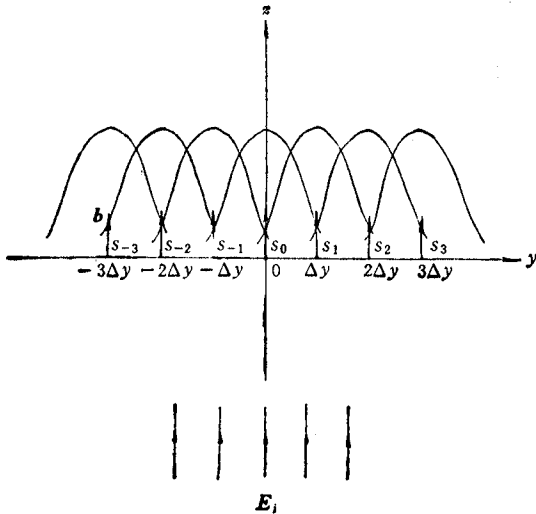


图1 均匀平面波的高斯波束拟合

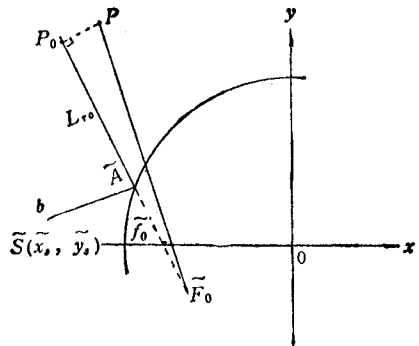


图2 复射线的微扰原理

本文采用拟合法将平面波展开为高斯波(复源点场)。因为远离发射雷达的目标所接收到的信号是均匀平面波，因此可用一系列等幅、同相均匀分布的复源点来近似。如图1所示，设 E_i 为目标接收到的均匀平面波， s_0, s_1, s_2, \dots 为一系列波束矢量为 $b^{[2]}$ 、间距为 Δy 的位于 y 轴上的复源点；通过适当选择 b 和 Δy ，可以使如下迭加式达到足够高的拟合精度。

$$E_i \approx \sum_l \frac{C}{\sqrt{kR}} \exp(kb) \exp\left[\frac{k(y - l\Delta y)^2}{2b}\right], \quad (l \text{ 为整数}) \quad (2)$$

有了这些与入射场等效的复源点场，便可应用复射线理论来分析目标的电磁散射。在复射线近轴近似技术中^[2]，根据中心复射线的实射线属性，可避免用复费马原理去进行费时的搜索过程。利用实射线轨迹可以简便地求得轴向场^[6]为

$$E_{P_0} = -\frac{\omega\mu_0}{\sqrt{8\pi jk_0\tilde{L}_1}} \tilde{T}_M \tilde{D}_M e^{jk_0\tilde{\psi}_M} \quad (3)$$

式中， \tilde{L}_1 为中心复射线遇到任何障碍物或媒质分界面散射之前传播的光程； \tilde{T}_M 为总的复传输系数； \tilde{D}_M 表示总的复扩散因子； $\tilde{\psi}_M$ 为沿复射线散射的总光程。解出轴向场后，再利用微扰原理对波束轴向场进行复相位和复振幅校正^[6]，即可求得偏离主轴的任意观察点处的近似场。如图2所示，已知中心轴上 P_0 点的场，则偏离中心轴的 P 点的场为：

$$E_P \approx E_{P_0} \exp(jk_0\Delta\tilde{L}) \quad (4)$$

式中 $\Delta\tilde{L} \approx d^2/(2\tilde{D}_{r_0}) = d^2/[2(\tilde{r}_0 + L_{r_0})]$ 。 $d = \overline{PP_0}$ 是微扰距离， \tilde{r}_0 是虚象点 \tilde{F}_0 到反

射点 \tilde{A} 的复距离, L_{r0} 是反射点到轴线上 P_0 点的距离。

需要指出,在复射线展开法中,必须对每一复源点分别进行上述的追踪和计算,并在观察点进行场的迭加,才能求出观察点的总场。不过,由于复源点场的凋落特性,对某一确定的观察点,并不是所有的复源点都有实质贡献,因而积分或迭加总是在有限范围内进行的。这样就可以简化运算,提高运算速度。

3. 数值结果

图 3 是一个长 255mm, 口径尺寸 57mm × 57mm 的矩形截面金属进气道, 图上绘出了其中某一射线的追踪情况。利用了约 1500 条 C 语句在 IBMPC/XT 机上完成了射线追踪和场的迭加运算。图 4 是图 3 所示模型的计算结果以及与文献[7,8]的实验、计算结

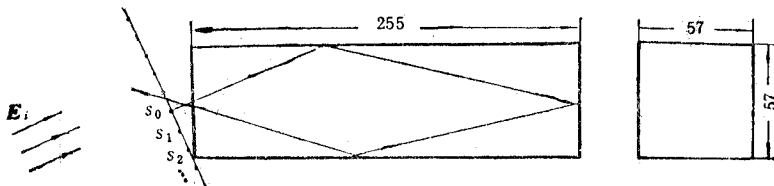


图 3 计算模型

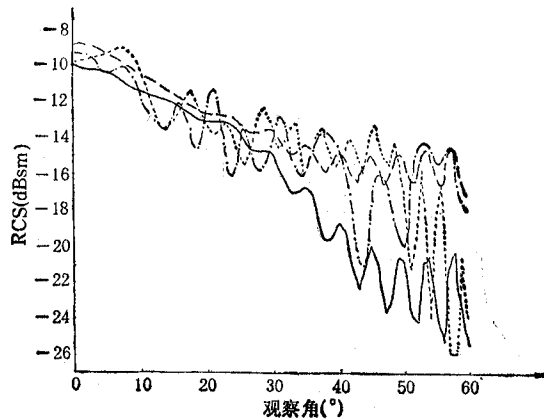


图 4 图 3 所示模型的计算结果与文献[7,8]结果的比较

..... [7] 测量值 ---- [8] 理论值 —— [7] 理论值 -·-·- 本文计算值

(水平极化, $\lambda = 3.2587\text{cm}$)

果的比较。由图可见,本计算结果与实测值是比较吻合的。图 5、6 分别是在垂直极化与水平极化下,以每 0.5° 为间隔所计算出的 -60° — $+60^\circ$ 范围内的 241 个 RCS 值。从图中可发现 RCS 总的变化趋势是与测量值相符的。由于射线在进气道内反射次数较多,因此当角度稍有微小变化时,其 RCS 就会出现很大起伏。此外,该方法还具有运算速度快的优点,完成一次每 2° 为间隔的 -60° — $+60^\circ$ 范围的 RCS 计算(图 4 的结果就是以 2° 为间隔所连成的),仅需 CPU 时间 124s,平均每追踪、迭加计算一个场点的时间约 2s。这对处理更复杂目标是很重要的。

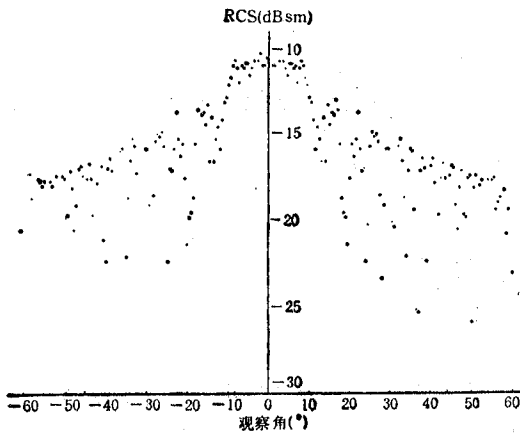


图5 图3所示模型垂直极化下的 RCS 值

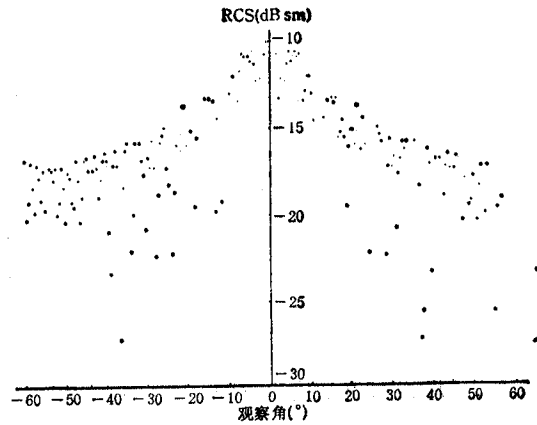


图6 图3所示模型水平极化下的 RCS 值

4. 结束语

本文用复源点场来拟合平面波场,从而实现了利用复射线近轴近似的简化方法去分析复杂目标的 RCS。从算例的结果看,该方法是简单可行的,并有进一步深入研究和推广应用的价值。例如,可以利用这种方法来计算蛇形进气道、吸收材料涂敷的进气道、天线罩、天线和雷达舱等复杂的大口径腔体的电磁散射,有关结果将另文发表。

参 考 文 献

- [1] L. B. Felsen, *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**(1986)4, 486—496.
- [2] 阮颖铮,通信学报, **8**(1987)4,49—57.
- [3] 阮颖铮,成都电讯工程学院学报, **16**(1987)1,28—33.
- [4] A. J. Bogush, Jr., R. E. Elkins, *IEEE Trans. on AP*, **AP-34**(1986)2, 228—243.
- [5] M. J. Bastiaans, *Optik*, **57**(1980)1, 95—102.
- [6] Y. Z. Ruan, L. B. Felsen, *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**(1986)4, 566—579.
- [7] H. R. Witt, E. L. Price, *Proc. IEE*, **115**(1968)1, 94—100.
- [8] 郭荣伟,舒永泽,隐身式进气道机理与应用研究(1),南京航空学院内部报告,1987 年.

ANALYSIS OF TARGET RCS BY COMPLEX RAY EXPANSION

Feng Wenlan Ruan Yingzheng

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu)

Abstract Based on the complex ray method and source expansion with a set of Gaussian beams, a new method for analysis and calculation of radar cross-section (RCS) of a complex target is presented. This method can be used for arbitrary shaped object, because complex ray analysis is not limited by the shape of object. A hollow rectangular pipe as a model of an air intake is investigated. The effectiveness of this method can be proved from the comparison of calculated and measured results.

Key words Radar cross-section (RCS); Electromagnetic scattering; Complex ray analysis; Plane wave expansion