

文章编号: 0255-8297(2003)04-0331-03

基本散射体 RCS 的分析和综合

时振栋, 唐 璞, 刘宏伟, 胡 艳

(电子科技大学 微波工程系, 四川 成都 610054)

摘要: 在分析各种简单散射体的散射特性后, 综合出一个对任意简单形状散射体雷达散射截面(RCS)的普适表达式. 此式是研究非理想缩比条件下复杂散射体 RCS 模型测量值的反演, 复杂散射体 RCS 频率特性曲线的外推, 以及由 RCS 频率特性来识别雷达目标的理论基础.

关键词: 基本散射体; 雷达散射截面; 模型测量; 频率特性

中图分类号: TN011 文献标识码: A

The RCS Analysis and Synthesis of the Elementary Scatterers

SHI Zhen-dong, TANG Pu, LIU Hong-wei, HU Yan

(Microwave Engineering Department, The University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A general expression for the radar cross section(RCS) of an arbitrarily simple-shaped scatterer is synthesized after analyzing the scattering characteristics of the simple-shaped scatterers. This is a theoretical basis not only for the deduction of RCS values in the model measurement of the complex scatterer under the non-ideal scaling conditions and the extrapolation of RCS frequency characteristic curve of the complex scatterer, but also for identifying radar targets through RCS frequency characteristics.

Key words: basic scatterer; RCS; model measurement; frequency characteristics

近年来, 复杂形状飞行物体的电磁波散射已经引起广泛注意. 由于任何复杂散射体都是由很多简单几何形状的基本散射体组成的, 所以对复杂散射体散射特性的研究都从简单散射体入手. 已有许多文章对多种简单形状散射体进行过深入的分析^[1,2], 本文是在这些工作的基础上进行归纳, 希望对任意简单形状物体的散射特性得到一个普适的表达式, 以便为进一步深入研究复杂散射体的散射特性奠定基础.

文献[2,3]指出, 如果散射体的尺度与波长之比 l/λ 远大于 1, 则简单散射体的 RCS 可近似地表示为

$$\sigma = \lambda^n f(l/\lambda) \quad (1)$$

组成复杂形状物体的各种简单散射体可以根据其表面在两个相互垂直方向上的曲率半径进行分类:

- (A) 二维均为无限大(平板);
- (B) 一维无限大, 另一维为非零有限值(直柱面);
- (C) 一维无限大, 另一维为零半径(直边缘);
- (D) 二维均为非零有限值(双向弯曲面, 如椭球, 球, 抛物面);
- (E) 一维非零有限值, 另一维为零半径(平面曲边缘);
- (F) 二维曲率半径均为零(尖顶).

在式(1)中, 从(A)~(F), n 的值分别为 -2, -1, 0, 0, 1 和 2. 尽管式(1)给出了简单散射体散射特

性的初步规律,但未曾指出 $f(l/\lambda)$ 的函数形式. 为了解决这个问题,我们再综合其他文章,并根据电磁相似原理的分析^[4]后认为,基本散射体(在这里是指具有如下特点的简单形状散射体:在这些散射体上没有两个或者两个以上分离的散射中心)的 RCS 可具体表达为

$$\sigma/\lambda^2 = A(l/\lambda)^n \text{sinc}^2(Bl/\lambda) \text{sinc}^2(Cl/\lambda) \quad (2)$$

式中 l 为散射体的代表长度. 它代表散射体尺寸大小的某个几何长度,对给定的散射体,此值可根据需要适当选择. 在散射体的大小间进行比较时,作为比较标准的模型散射体的代表长度一旦选定,与此散射体几何相似的其他散射体的代表长度就应按散射体间的相似比例缩放.

在式(2)中, A, B, C 是与工作波长 λ 无关的常数, $\text{sinc}(x)$ 函数的定义为 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$, 对于由(A)到(F)的6种简单散射体, n 分别在 4~0 间取值.

现在我们根据有关文献中提供的各种简单散射体的 RCS 来证明式(2)的正确性.

(1) 平板

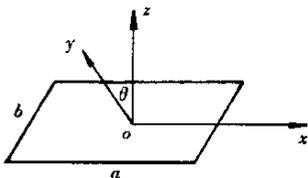


图1 平板的散射

对于两边缘分别平行 x 轴和 y 轴的矩形平板(如图1),按物理光学理论的分析,其 RCS 为^[5]

$$\sigma/\lambda^2 = 4\pi a^2 b^2 \cos^2 \theta \text{sinc}^2(2b \sin \theta \sin \varphi / \lambda) \cdot \text{sinc}^2(2a \sin \theta \cos \varphi / \lambda) / \lambda^4 \quad (3)$$

比较式(2)、(3)容易看出,只要在式(2)中取 $A = 4\pi a^2 b^2 \cos^2 \theta / l^4$, $B = 2b \sin \theta \sin \varphi / l$, $C = 2a \sin \theta \cos \varphi / l$, $n = 4$,式(2)和式(3)就完全一致.

应当注意, A, B, C 和 n 都与波长 λ 无关,而且对于几何相似但大小不同的矩形平板,对应地它们有相同的值. 因此,从模型平板 RCS 测量的数据中获得的 A, B, C 和 n 值可推广到与其相似的原型测量中去.

还可把式(2)应用到具有任意边界形状的平板情况,因为对于任意边界形状的平板可以找到与它等效的矩形平板(两者的 RCS 相同)^[6],而等效矩形平板的 A, B, C, n 仍与波长无关.

(2) 直柱面

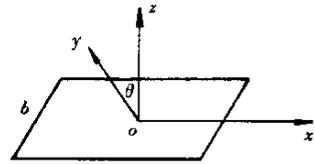


图2 柱面的散射

对于柱轴平行 x 轴且两端面为垂直平面的直柱面情况(如图2),已知其 RCS 为^[5]

$$\sigma/\lambda^2 = 2\pi h^2 \rho \cos \theta \text{sinc}^2(2h \sin \theta / \lambda) / \lambda^3 \quad (4)$$

其中 h 是直柱面的长度, ρ 是在垂直入射面的柱面横截面上散射体表面的曲率半径. 如果取 $n = 3$, $A = 2\pi \rho h^2 \cos \theta / l^3$, $B = 2h \sin \theta / l$, $C = 0$,式(2)就和式(4)一致. 由于 A, B, C 和 n 都与波长无关,它们也能应用于具有相似性的模型测量中. 还可以证明,式(4)能推广到端面为曲面形状的直柱体情况^[6].

(3) 直边缘

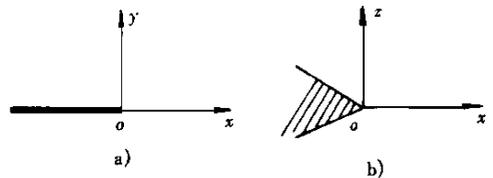


图3 直边缘的散射

按几何绕射理论和等效边缘电流的概念,直边缘的绕射场可表示为^[7](如图3)

$$\sigma/\lambda^2 = d^2 g(\beta) \text{sinc}^2(2\pi d \cos \beta / \lambda) / (\pi \lambda^2) \quad (5)$$

式中 d 为直边缘的长度, $g(\beta)$ 是仅与散射角有关的因子. 容易看出,若取 $A = d^2 g(\beta) / (\pi \lambda^2)$, $B = 2\pi d \cos \beta / l$, $C = 0$, $n = 2$ 直边缘的绕射也包含在式(2)所示的规律中.

(4) 表面双向弯曲的散射体

已知凸曲面的 RCS 为^[5]

$$\sigma/\lambda^2 = \pi \rho_1 \rho_2 / \lambda^2 \quad (6a)$$

式中 ρ_1 是入射面内散射体表面的曲率半径, ρ_2 是与入射面垂直的平面中散射体表面的曲率半径. 显然,对于这种情况,只要 $A = \pi \rho_1 \rho_2 / l^2$, $B = 0$, $C = 0$, $n = 2$,就能使式(2)与式(6a)完全相同. 而且在这种情况下, A, B, C 和 n 都与波长无关.

对于散射体表面为凹曲面的情况,例如腔^[1]和抛物反射面天线^[8],已知其正向垂直入射时的 RCS 为

$$\sigma/\lambda^2 = 4\pi S^2/\lambda^4 \quad (6b)$$

式中 S 为腔口或抛物面天线口径的面积. 这时若用式(2)表达, 则有 $A = 4\pi S^2/\lambda^4$, $B = 0$, $C = 0$, $n = 4$. 显然 A, B, C 和 n 都与波长无关. 斜向入射时, RCS 还与散射角有关, 即 B, C 将随角度改变, 但他们仍与波长无关. 可见式(2)能适用于散射体表面为凸或凹的两种情况, 尽管两种情况下参数 n 并不相同.

(5) 曲边缘

根据介绍, 离开导电平面边缘(或尖劈)远区的后向散射场遵从如下规律^[9]:

$$E = D/\sqrt{2\pi\rho/\lambda}$$

式中的因子 D 只与场的相位、极化方向和波的传播方向有关, ρ 为圆柱坐标下场点与散射源间的距离. 对于连续改变切向的有限长导电曲边缘, 其中某一小段的散射场可在上式的基础上乘以 $e^{-j\pi/4}\delta l/\sqrt{\lambda\rho}$ (δl 是曲边缘上一段微分弧长), 即: $\delta E = D e^{-j\pi/4}\delta l/(\sqrt{2\pi\rho})$, 沿整个边缘积分后, 整个曲边缘的散射场 E 与 l/ρ 成正比, 且

$$\sigma/\lambda^2 \sim (l/\lambda)^2 \quad (7)$$

不难看出, 若取 $n = 2$, $B = 0$, $C = 0$, 式(7)也包含在式(2)中.

实际上, 可以把直边缘看作是曲边缘的一种特殊情况. 因直边缘上各微分元的散射场间有恒定相位差, 它们在场点因叠加而使总场中出现 $\text{sinc}(x)$ 函数(如式(5)). 至于平面上的曲边缘, 在边缘所在平面的垂直方向上, 各微分弧段的散射场也因相干而使总场的 RCS 与波长无关^[8].

(6) 尖顶

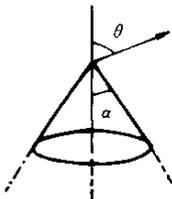


图 4 尖顶的散射

文献[9]对如下两种情况下尖顶的后向散射已分别给出结果:

1. 窄角锥(半顶角 $\alpha \ll \pi/2$)

$$\sigma/\lambda^2 = \frac{\alpha^4}{16\pi} \left(\frac{3 + \cos^2\theta}{4\cos^3\theta} \right)^2 \quad (8a)$$

2. 宽角锥($\theta \ll \alpha < \pi/2, \theta = 0$)

$$\sigma/\lambda^2 = \frac{1 - 2\cos^2(\pi - \alpha)}{16\pi\cos^4(\pi - \alpha)} \quad (8b)$$

可见式(8a)中 $A = \frac{\alpha^4}{16\pi} \left(\frac{3 + \cos^2\theta}{4\cos^3\theta} \right)^2$, 式(8b)中 $A = \frac{1 - 2\cos^2(\pi - \alpha)}{16\pi\cos^4(\pi - \alpha)}$, 两式中的 $B = 0, C = 0, n = 0$, 它们都与 l/λ 无关, 因而式(2)对尖顶的散射也是适用的.

综上所述, 可以得到这样的结论: 式(2)能表示任何基本散射体的散射规律. 对于两个几何相似的基本散射体, 式中 A, B, C 和 n 对应地有相同的值. 这里所说的几何相似是指两散射体间对应的角度相等(包括散射体的形状、电磁波的入射方向、散射方向和极化方向), 且散射体间对应长度成比例(即对应的外形尺寸, 对应的电磁波波长均有同一比值). 在这样的相似条件下, 由模型测量所得的值 A, B, C 和 n 可推广到原型散射体中去.

这个结论的重要性是显而易见的, 它不仅在实际理想缩比条件下已用于原型散射体 RCS 的计算, 而且为非理想缩比条件下复杂散射体 RCS 模型测量值的反演, 复杂散射体频率特性曲线的外推, 以及由频率特性来识别雷达目标奠定了理论基础.

参考文献:

- [1] Maffett Andrew Lewis. Topic for a Statistical Description of RCS [M]. N Y: John Wiley & Sons Inc, 1989. Chap 11.
- [2] Eli Brookner. Aspects of Modern Radar [M]. MA: Artech House Inc, 1988.
- [3] Crispin J W Jr, Maffett A L. RCS estimation for simple shape[J]. Proceedings of The IEEE, 1965, 53(8): 833 - 848.
- [4] 时振栋. 有耗电磁系统的相似性[J]. 应用科学学报, 1991, 9(1): 24 - 28.
- [5] Shi Z D. Effects of variance in the size of the scatterer on its RCS[J]. Microwave and Optical Technology Letter, 1993, 6(5): 301 - 304.
- [6] 时振栋, 刘宏伟, 唐璞. 基本散射体的散射规律[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(增刊 1): 6 - 9.
- [7] Youssef Nazih N. RCS of complex targets[J]. Proceedings of The IEEE, 1989, 77(5): 722 - 734.
- [8] 唐璞, 时振栋, 钟碧华, 等. 抛物面天线的雷达散射截面[J]. 电波科学学报, 2001, 16(增刊): 94 - 96.
- [9] Ruck G T, et al. RCS Handbook[M]. N Y: Pknum Press, 1970. 105 - 133.

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/>