

一种预估有行波散射特征目标的 RCS 的新方法*

吴萍, 吴先良

(安徽大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230039)

摘要:在图形电磁计算方法的基础上补充行波散射贡献,对高频区有行波散射特征目标的 RCS 的预估开展了研究.从而在保留了图形电磁计算方法快速预估目标镜面散射的同时,以行波计算提高有行波散射特征目标的 RCS 的预估精度,进一步拓宽了该计算方法的应用领域.

关键词:雷达散射截面;图形电磁计算;行波

中图分类号:TN971. *1 **文献标识码:**A

0 引言

当入射电场有一分量与表面相切,并在表面波传播方向上时,在长表面会引起表面行波.如果表面终端以一个不连续性为界,则出现反射,因此表面行波可能对目标的雷达散射截面给出大的贡献.行波现象不仅出现在细长物体,它也是其它结构比如机翼或导弹等物体的一个普通散射特征^[1].事实上,在机身蒙皮的连接处,由于裂缝或间隙会引起表面不连续,因此,即使大表面的子区域也会展现出这种效应.现在还没有常规方法来计算任意结构上的行波振幅,而这一点又是在预估复杂目标的 RCS 时所要求的.

本文尝试将端射天线类比的行波计算方法^[2]与图形电磁计算方法(GRECO)相结合,计算具有行波散射特征的目标的 RCS.

1 图形电磁计算方法

对大多数目标而言,其 RCS 的主要贡献者来自面元和棱边.应用 GRECO(图形电磁计算)方法计算 RCS 非常有效,它具有运算速度快,实时性好的优点. GRECO 方法通过对屏幕上目标的可视像素求和,来实现 RCS 计算中的面积分和线积分.因此,对于固定大小的视窗而言,计算目标 RCS 所需的计算时间及对存储量要求与目标复杂性和电尺寸无关.

GRECO 法应用以下方法求解理想导体表面高频电磁散射效应:理想导体表面反射用物理

* 收稿日期:2003-04-20

基金项目:国家自然科学基金(69971001)和安徽省教育厅项目(2003KJ011)资助项目.

作者简介:吴萍,女,1974年生,副教授. E-mail: ping_wu_2002@sohu.com

光学进行计算;棱边绕射用等效电流法和物理绕射理论增量长度绕射系数进行求解.将面元与棱边的散射效应综合起来,求得其面元与棱边对 RCS 的贡献.

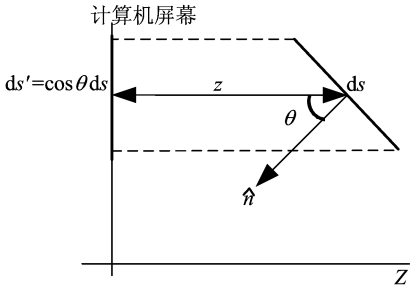


图 1 表面元及其在屏幕上的投影

Fig. 1 Surface element and its projection on the workstation screen

1.1 理想导体表面 RCS 的预估

理想导体表面 RCS 计算公式如下^[2,3]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E^s}{E^i} \right|^2 = \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S (\hat{z} \cdot \hat{n}) e^{2jkz} ds \right|^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int \cos \theta e^{2jkz} ds \right|^2 \quad (1)$$

式中: θ 为表面法矢与入射方向的夹角, z 为观察者到观察点的距离.

GRECO 方法处理目标图象为目标三维表面在计算机屏幕上的投影(如图 1),上式可按象素离散为:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{PIXELS}} \cos^n \theta \sin c \left(\frac{kl}{\cos \theta} \sin \theta \right) e^{2jkz} \Delta s \right|^2 \quad (2)$$

其中:PIXELS 表示所有象素点, Δs 为一象素点面积, l 表示每一方形象素 ds' 所在屏幕上的线度. $\cos^n \theta$ 因子用于消除弯曲表面单站 RCS 效应在靠近照明区和阴影区交界处,由于相位的快速变化导致数值方法计算物理光学表面积分出现一些误差.

1.2 棱边散射场求解

由高频电磁理论棱边远区散射场可用等效线电流法求解.其单站散射场可表示为:

$$E^s = E_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int_{\text{EDGE}} [-D_{\parallel} \sin \gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_x \cos \gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_{\perp} \cos \gamma \hat{e}_{\perp}^i] e^{2jkz} dl' \quad (3)$$

其中线积分沿入射波所照明棱边进行, \hat{e}_{\parallel}^i 和 \hat{e}_{\perp}^i 是平行和垂直于入射面的单位矢量,该入射面由入射线 \hat{z} 和棱边 \hat{t} 的方向确定, γ 为入射电场和 \hat{e}_{\perp}^i 的夹角, D_{\parallel} 、 D_{\perp} 为单站增量长度绕射系数,运用雷达散射截面的定义即可得各种线极化的棱边 RCS 表示式,见文献[2].

以同向水平极化和水平发射-垂直接收的交叉极化为例可表示为:

$$\sigma_{HH} = \frac{1}{\pi} \left| \sum_{\text{EDGES}} \left[-D_{\parallel} \frac{t_x^2}{t_x^2 + t_y^2} - D_{\perp} \frac{t_y^2}{t_x^2 + t_y^2} \right] e^{2jkz} \Delta l \right|^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{HV} = \frac{1}{\pi} \left| \sum_{\text{EDGES}} \left[-D_{\parallel} \frac{t_x t_y}{t_x^2 + t_y^2} - D_{\perp} \frac{t_x t_y}{t_x^2 + t_y^2} \right] e^{2jkz} \Delta l \right|^2 \quad (5)$$

其中: γ 为入射电场和 \hat{e}_{\perp}^i 的夹角, D_{\parallel} 、 D_{\perp} 为单站增量长度绕射系数, Δl 为象素点大小(线度), t_x 、 t_y 、 t_z 为棱边归一化方向矢量.

2 类比法计算行波效应

2.1 端射天线类比法

针对表面行波问题,可用端射天线类比法^[4]分析.图 2(b)中去掉了图 2(a)中激励导线的射频发生器而用一个入射平面波来代替,因为平面波在导线上激励的电流波正如信号发生器的激励一样,所以可以得到同样形状的辐射方向图.

图 2 (c) 去掉终端阻抗, 表示的是一条孤立导线的特性, 平面波从近于细导线掠入射方向入射, 该电场一旦具有沿导线轴向的分量, 该电场感应的表面电流沿导线轴向流动而形成行波电流, 形成表面行波的双站散射贡献. 当导线终端未能以匹配负载终结时前向电流行波将由于失配反射而产生反向传播的后向电流行波. 根据同一机理, 后向电流行波将在反方向产生二次辐射. 正是这种后向电流行波的辐射构成了表面行波的单站 RCS, 终端反射越强, 后向 RCS 贡献越大.

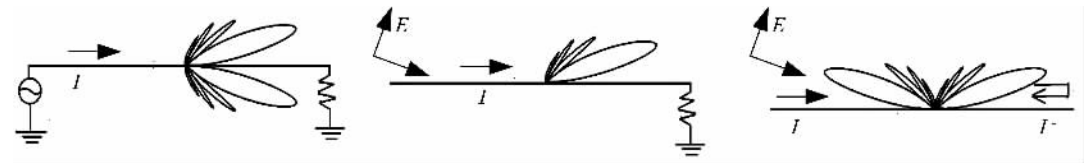


图 2 表面行波极坐标方向图

Fig. 2 Sketch map of polar coordinates for surface traveling wave

考察图 2 (a) 所示的长导线行波天线, 天线的终端接以匹配负载, 其阻抗等于导线的特征阻抗. 于是在导线上将产生幅度为 I_0 的电流终端方向 (z 方向) 传播:

$$I(z) = I_0 e^{(jkz/p)} \tag{6}$$

式中, $p = v/c$ 表示行波相对相速, (v 为表面行波的相速, c 为自由空间光速). 沿导线长度 l 积分后可求得该行波电流的总辐射场. 对于细长棒, RCS 的近似结果为:

$$\sigma = A \left\{ \frac{\sin \theta}{(a - p \cos \theta)} \sin \left[\frac{1}{2kl} (1 - p \cos \theta) \right] \right\}^2 \tag{7}$$

式中: kl 表示物体的电长度, θ 是掠入射角, 系数 A 包括物体尾端所接终端体的反射系数以及物体表面电导率或表面阻抗的影响.

2. 2 以平板为例分析行波散射效应

对于平板行波散射, 平板越长, 行波电流幅值越大. 此时基于物理光学解的 GRECO 方法不能完全表达平板的散射场. 行波电流 I_e 产生的辐射场为:

$$\bar{E} = -ik\Psi_0 \int Z_0 I_e \hat{S} \times (\hat{S} \times \hat{b}) e^{ikr} dt \tag{8}$$

式中 Z_0 表示自由空间波阻抗, $\Psi_0 = \exp(jkr/4\pi r)$ 表示为远场格林函数, \hat{b} 沿行波电流行进方向的单位矢, k 为波数, I_e 为行波电流. 目标端点处是边缘, 因此可用 GTD 理论导出其等效电流形式为^[5]:

$$I_e = \frac{i2(\hat{t} \cdot \bar{E}_i) D_e}{kZ_0 \sin^2 \beta_i} + \frac{i2(\hat{t} \cdot \bar{H}_i) D_{em}}{k \sin \beta_i} \tag{9}$$

其中 D_e 、 D_{em} 为绕射系数, 具体表达式见文献^[1].

对水平极化 (因为当电场与入射面正交时, 即垂直极化时, 平板上不能激起表面行波), 将式 (9) 代入式 (8), 远区场近似表达式为:

$$E_s = -ikl\Psi_0 I_0 \sin \theta_0 \frac{\sin \left[\frac{1}{2p} kl (1 - p \cos \theta) \right]}{\frac{1}{2p} kl (1 - p \cos \theta)} \tag{10}$$

I_0 为 I_e 幅度(假定其沿行波方向为常数), θ 为观察点方向与沿行波电流行进方向的单位矢的夹角.

端射天线类比法还可以用于弯曲表面,例如头部尖顶.此时由于较大的行进距离,表面波的轴向速度会略低于它沿表面的速度,可以根据附加的行进距离对表面波规定一个平均相速 p .

3 计算实例

3.1 平板 ($5\lambda \times 5\lambda$) 在水平极化入射时 RCS 的计算

入射波频率 10 GHz. 图 3 中实线表示实测结果, (a) 图中虚线为 GRECO 方法的计算结果, (b) 图中的虚线为行波计算结果, 点划线表示在 GRECO 基础上补充了行波计算效应后的总的计算结果. 图 3 (a) 是以 GRECO 方法计算的平板 ($5\lambda \times 5\lambda$) 在水平极化入射时的结果与实测结果的比较. 可以看出在正入射两边 20° 到 30° 范围内, GRECO 方法预估的很准确, 而在这个范围之外, 预估结果比实测偏小. 这是因为在水平极化情况下, 很适合于激励起行波, 而 GRECO 方法没有考虑非镜面行波散射机制.

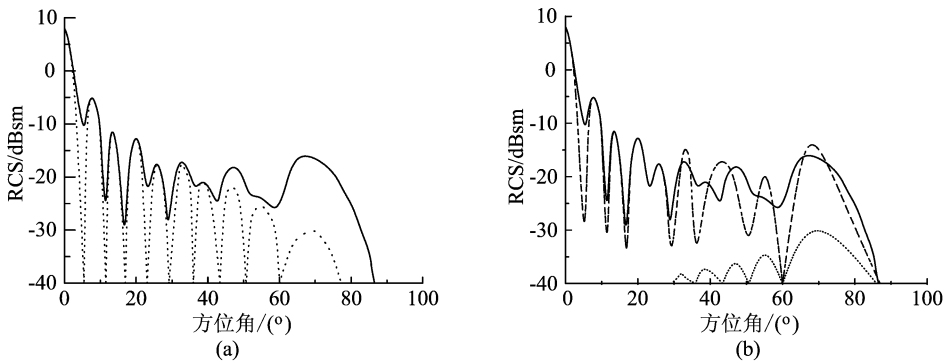


图 3 平板计算结果及与实测结果的比较

Fig. 3 Measured and predicted RCS for a perfectly conducting square plate

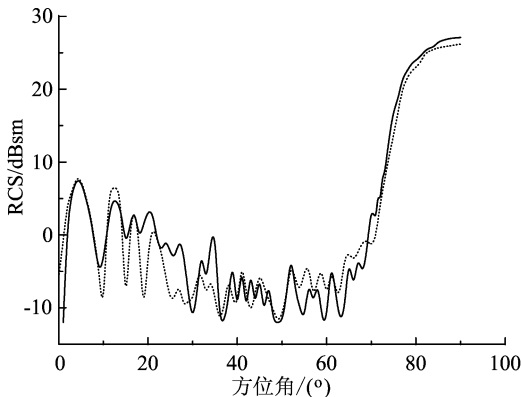


图 4 细长橄榄体计算结果

Fig. 4 RCS prediction for circular ogives.

根据上述分析,很显然只要在 GRECO 方法求出的 RCS 的基础上补充行波散射贡献,便可得到与实测相近的结果.运用类比法求得该正方形的行波散射将在离正入射 68° 处有极大值,这与图 3 中的实测情形非常吻合.图 3 (a)、(b) 的曲线验证了该方法的有效性.

3.2 小顶角细长橄榄体的 RCS 的计算

橄榄体长 39.2λ , 顶角 30° , 为一细长体.水平极化轴向入射波频率 3 GHz.图 4 可以看出预估的结果与实测结果相近.在入射角较小时,行波效应明显.

参 考 文 献

- [1] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. 阮颖铮等译. 雷达散射截面—预估、测量和减缩[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988. 102-280.
- [2] Rius J M and Jofre Luis . High-frequency RCS of complex radar targets in real time[J]. IEEE Trans. Antennas Propagent. , 1993, 41(9): 1308-1319.
- [3] Rius J M *et al.* . Recent techniques for RCS prediction of complex objects[A]. Journees Inter. de Nice Sur lec Antennas[C]. Nice: 1994 Conferences. 205-214.
- [4] Peters L. Jr. End-fire echo area of long, thin bodies[J]. IRE Trans. Antennas Propag. , 1958, 6(1): . 133-139.
- [5] 汪茂光. 几何绕射理论, 第二版[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [6] 韩明华, 袁乃昌. 光学区复杂目标 RCS 计算及软件集成技术进展[J] 电子商务, 1998(4): 9-12.
- [7] Ruck George T, Barrick Donald E, Stuart William D. , *et al.* . Radar Cross Section Handbook [M]. New York: Plenum Press, 1970, 9-879.
- [8] 王宝发, 刘铁军. 复杂飞行目标电磁散射特性及计算[J]. 电子学报 1994, 22(9): 70-75.
- [9] 黄培康等. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [10] Wang B F, Zhang W J, Chen Wai-Kai. A systematic design method of multilayer composite-glass with thin metallic layer[J]. IEEE Trans. on Micro. & Tech, 1997, 45(1): 126-129.

RCS Prediction Based on The Hybrid Method of GRECO & Travelling Wave Theory

WU Ping, WU Xian-liang

(*Department of Electronic Engineering and Information Science, Anhui University, Hefei 230039, China*)

Abstract: Graphical Electromagnetic Computing (GRECO) is recognized as one of the most important method of RCS computation for the high-frequency region. But as the effect of traveling wave was not considered in GRECO, the agreement between GRECO and our measurement is not favorable. The effect should be analyzed by other methods. By the hybrid method of GRECO and traveling wave theory satisfactory results are obtained.

Key Words: radar cross section; graphical electromagnetic computing ; travelling wave