

应用渐近波形估计技术快速计算宽带雷达散射截面*

孙玉发^{1,2)} 徐善驾¹⁾

¹⁾中国科学技术大学电子工程与信息科学系,安徽,合肥,230027;

²⁾安徽大学电子工程与信息科学系,安徽,合肥,230039)

摘要 将渐近波形估计技术应用到矩量法中,计算了任意形状二维理想导体目标的宽带雷达散射截面.计算中使用矩量法和奇异值分解技术求解电场积分方程,得到一展开频率点的表面电流密度,通过 Padé 近似求出给定频带内任意频率点的表面电流密度分布,进而计算出散射场和雷达散射截面.奇异值分解技术的使用消除了电场积分方程的内谐振问题.对数值计算结果与矩量法逐点求解的结果进行了比较,两者吻合良好,且计算效率提高了约一个数量级.

关键词 矩量法,渐近波形估计,雷达散射截面.

FAST COMPUTATION OF WIDE-BAND RADAR CROSS SECTION USING ASYMPTOTIC WAVEFORM EVALUATION TECHNIQUE*

SUN Yu-Fa^{1,2)} XU Shan-jia¹⁾

¹⁾Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei, Anhui 230027, China;

²⁾Department of Electronic Engineering and Information Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract The asymptotic waveform evaluation (AWE) technique was applied to the method of moments to calculate the radar cross section (RCS) of an arbitrarily shaped two-dimensional perfect electric conductor over a wide frequency band. The method of moments and the singular value decomposition technique were used to solve the electric field integral equation, and the surface electric current density for a single frequency was obtained. In the AWE technique, the surface current on the perfect electric conductor is expanded in a rational function via the Padé approximation. Using the function, the electric current distribution can be obtained at any frequency within the given frequency range, which is used to compute the scattered fields and the wide-band RCS. The employment of the singular value decomposition technique eliminates the interior resonance problem which suffered from the electric field integral equation. The numerical results are in good agreement with the results obtained by the method of moments at each frequency. The computational efficiency is improved by more than an order of magnitude.

Key words method of moments, asymptotic waveform evaluation, radar cross section.

引言

应用矩量法求解电场积分方程(EFIE)或磁场积分方程(MFIE)可以精确地预估理想导体目标的雷达散射截面(RCS),但每次计算只能得到一个频率点的RCS.而在雷达目标识别中,需要目标的宽带RCS以产生一维距离像和合成孔径雷达像.与其它频域方法一样,为了获得目标的宽带RCS,应用矩量法就必须在频带内的每个频率间隔点上逐点计

算,当目标的RCS随频率变化剧烈时,必须以很小的频率间隔计算才能得到精确的频率响应,这就意味着在整个频带内矩阵方程求解次数的增加.为了克服这个缺点,E. H. Newman^[1]和G. J. Burke^[2]分别通过内插阻抗矩阵和使用基于模型参数估计的方法获得了宽带数据.一种新技术——渐近波形估计(AWE)技术被提出,并首先用于超大规模集成电路的适时分析^[3].最近,AWE技术被逐渐应用到电磁问题的分析中^[4-6].本文将AWE技术应用到矩量法中,并结合奇异值分解技术计算了无限长理想导体

*教育部年度重点科研基金(批准号00179)资助项目
稿件收到日期2001-02-23,修改稿收到日期2001-09-11

*The project supported by the Scientific Research Foundation of Education Ministry of China (No.00179)
Received 2001-02-23, revised 2001-09-11

圆柱、三角柱和导体条的宽带 RCS. 数值计算表明: 奇异值分解技术的使用消除了 EFIE 的内谐振, AWE 技术的使用提高了计算效率, 在给定频带内获得了满意的结果.

1 理论

对于任意形状二维理想导体目标的散射问题, 其电场积分方程为

$$\frac{k\eta}{4} \int_l J_z(\vec{\rho}') H_0^{(2)}(k|\vec{\rho} - \vec{\rho}'|) dl' = E_z^i(\vec{\rho}), \quad (1)$$

ρ 在 l 上, 式(1)中 l 为导体截面的周线, J_z 为导体表面上的电流密度, E_z^i 为入射电场, $H_0^{(2)}$ 为第二类零阶 Hankel 函数, $\vec{\rho}$ 和 $\vec{\rho}'$ 分别表示场点和源点的位置矢量, k, η 分别为自由空间波数和波阻抗.

将理想导体的周界 l 划分成 N 段, 选择脉冲函数作为基函数, δ 函数作为检验函数, 应用矩量法^[7] 可将 EFIE 化成矩阵方程

$$Z(k)I(k) = V(k), \quad (2)$$

式(2)中 Z 为阻抗矩阵, V 为激励向量, 它们的元素表达式分别为

$$Z_{mn}(k) = \frac{k\eta}{4} \int_{\Delta l_n} H_0^{(2)}[k\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}] dl, \quad (3)$$

$$V_m = e^{-jk(x_m \cos\theta_i + y_m \sin\theta_i)}, \quad (4)$$

式(4)中 θ_i 为入射平面波与 x 轴间的夹角.

求解式(2), 只能得到一个频率点的导体表面电流. 为了得到给定频带内的导体表面电流分布, 就必须以一定的频率间隔重复求解式(2). AWE 技术是通过将 $I(k)$ 展开成关于 k_0 的泰勒级数得到频带内的导体表面电流分布, 即

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\infty} m_n (k - k_0)^n, \quad (5)$$

展开系数的表达式为

$$m_0 = Z^{-1}(k_0)V(k_0), \quad (6)$$

$$m_n = Z^{-1}(k_0) \left[\frac{V^{(n)}(k_0)}{n!} - \sum_{i=1}^n \frac{Z^{(i)}(k_0)m_{n-i}}{i!} \right], \quad (7)$$

式(7)中 $Z^{(i)}$ 表示 $Z(k)$ 的 i 阶导数, $V^{(n)}$ 表示 $V(k)$ 的 n 阶导数.

然而, 泰勒级数展开的精度受收敛半径的限制, 为了扩大收敛范围, 可通过 Padé 近似将 $I(k)$ 展开成有理函数, 即

$$I(k) = \frac{\sum_{i=0}^L a_i (k - k_0)^i}{1 + \sum_{j=1}^M b_j (k - k_0)^j}, \quad (8)$$

对于给定的 $L + M$, 当 $L = M$ 或 $L = M + 1$ 时, 式(8)逼近式(5)的误差最小.

将式(8)代入式(5), 两边同乘以有理函数的分母, 根据 $k - k_0$ 同幂项系数相等得

$$\begin{bmatrix} m_L & m_{L-1} & m_{L-2} & \cdots & m_{L-M+1} \\ m_{L+1} & m_L & m_{L-1} & \cdots & m_{L-M+2} \\ m_{L+2} & m_{L+1} & m_L & \cdots & m_{L-M+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{L+M-1} & m_{L+M-2} & m_{L+M-3} & \cdots & m_L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{L+1} \\ M_{L+2} \\ M_{L+3} \\ \vdots \\ M_{L+M} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= m_0, \\ a_1 &= m_1 + b_1 m_0, \\ a_2 &= m_2 + b_1 m_1 + b_2 m_0, \\ &\vdots \\ a_L &= m_L + \sum_{i=1}^{\min(L, M)} b_i m_{L-i}. \end{aligned} \quad (10)$$

求解式(9)和式(10)可确定系数 a_i 和 b_j , 并代入式(8)便得到给定频带内任意频率点导体表面电流密度, 进而计算出散射场和 RCS. 显然, 在 AWE 方法中, 只需进行一次矩阵求逆运算, 便可得到给定频带内导体表面电流密度的分布, 这正是 AWE 方法提高计算效率的原因所在.

众所周知, 当计算频率接近内谐振频率时, 直接求解 EFIE 将会得到错误的结果. 本文采用奇异值分解^[8] 的方法来消除 EFIE 的内谐振.

2 数值计算与结果

为了验证本文方法的有效性, 首先计算了 TM 平面波垂直入射到一半径 $a = 1$ cm 的无限长理想导体圆柱上的 RCS 频率响应. 圆柱的周界被等分为 128 段. 选择 AWE 的展开频率点为给定频带 (32 ~ 38 GHz) 的中心频率, 即 35 GHz. 使用 Padé 近似 ($L = 4, M = 3$) 和泰勒级数展开 (4 阶、7 阶) 得到的数值结果与矩量法逐点计算结果 (结合奇异值分解方法) 的比较如图 1 所示. 由图 1 可见: 在给定频带内, Padé 近似与矩量法结果一致, 而泰勒级数展开的结果只在中心频率附近与矩量法的结果吻合良好, 即使泰勒级数展开由 4 阶增加到 7 阶, 与矩量法结果一致的频率范围也未扩大.

在上述给定频带内, 直接求解 EFIE 得到的结

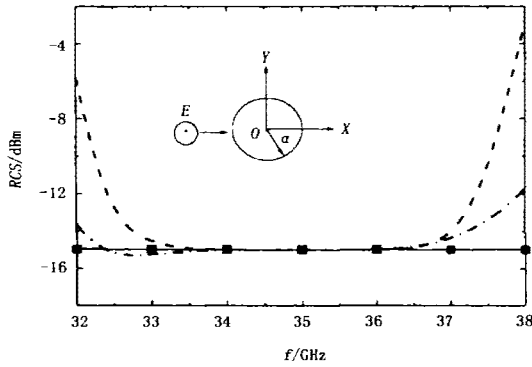


图1 圆柱 RCS 与频率间的关系 ($a = 1 \text{ cm}$)

■ 矩量法结果, — AWE-Padé 结果 ($L = 4, M = 3$),
 - - - AWE-Taylor 结果 (7 阶),
 - · - AWE-Taylor 结果 (4 阶)

Fig. 1 RCS of a circular cylinder as a function of frequency ($a = 1 \text{ cm}$)

■ the method of moments, — AWE-Padé ($L = 4, M = 3$),
 - - - AWE-Taylor (7th order),
 - · - AWE-Taylor (4th order)

果和应用奇异值分解方法得到的结果与解析解结果的比较如图 2 所示. 由图 2 可见: 当计算频率在内谐振频率点及其附近时, 直接求解 EFIE 得到的结果与解析解结果相差较大, 而应用奇异值分解方法得到的结果与解析解结果吻合良好, 有效地消除 EFIE 的内谐振.

其次对 TM 平面波垂直入射到无限长理想导体三角柱上的 RCS 频率响应进行了计算. 计算频率为 15 ~ 55GHz, AWE 的展开频率点为频带的中心频率 35GHz. 三角柱两直角边长 a 分别取为 1cm 和 5cm, 其周界被等分为 120 段和 360 段. AWE-Padé 近似

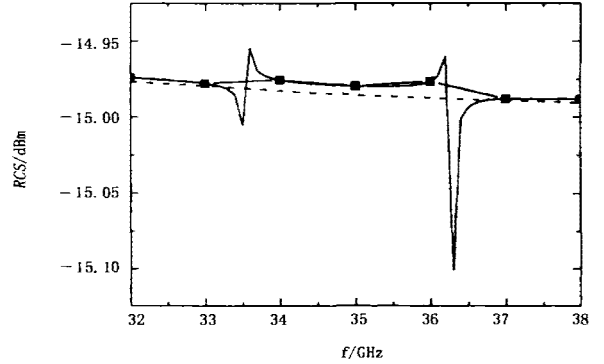


图2 圆柱 RCS 的比较

— 直接解 EFIE 的结果, - - - 解析解结果
 —■ 应用奇异值分解计算的结果

Fig. 2 Comparison of RCS of a circular cylinder — EFIE, - - - analytical results

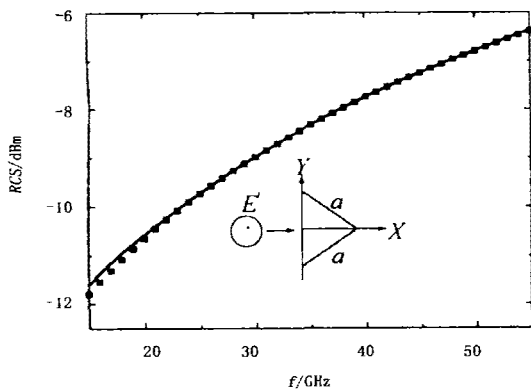
—■ the singular value decomposition method

($L = 4, M = 3$) 的计算结果与矩量法逐点计算结果的比较如图 3(a)、(b) 所示.

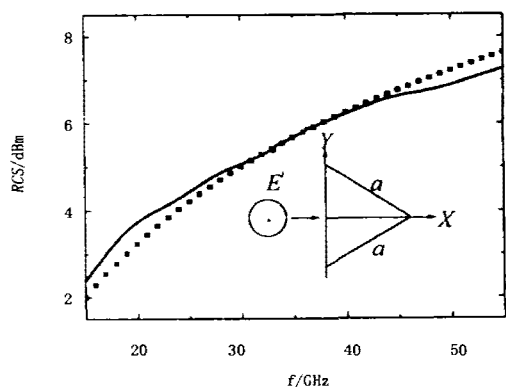
最后对 TM 平面波以 45° 角斜入射到无限长理想导体条上的 RCS 频率响应进行了计算, AWE 的展开频率点为 30GHz, 导体条宽 W 分别为 1cm 和 5cm, 厚度 d 均为 0.1cm, 其周界被等分为 44 段和 204 段. AWE-Padé 近似 ($L = 4, M = 3$) 的计算结果与矩量法逐点计算结果的比较如图 4(a)、(b) 所示.

由图 3 和 4 可见: 随着散射体电尺寸的增大, AWE-Padé 近似结果与矩量法结果一致的频率范围相应地减小.

AWE-Padé 近似与矩量法逐点计算所用的 CPU



(a)



(b)

图3 三角柱 RCS 与频率间的关系 (a) $a = 1 \text{ cm}$ (b) $a = 5 \text{ cm}$

■ 矩量法结果 — AWE-Padé 结果 ($L = 4, M = 3$)

Fig. 3 RCS of a triangular cylinder as a function of frequency

■ the method of moments — AWE-Padé ($L = 4, M = 3$) (a) $a = 1 \text{ cm}$ (b) $a = 5 \text{ cm}$

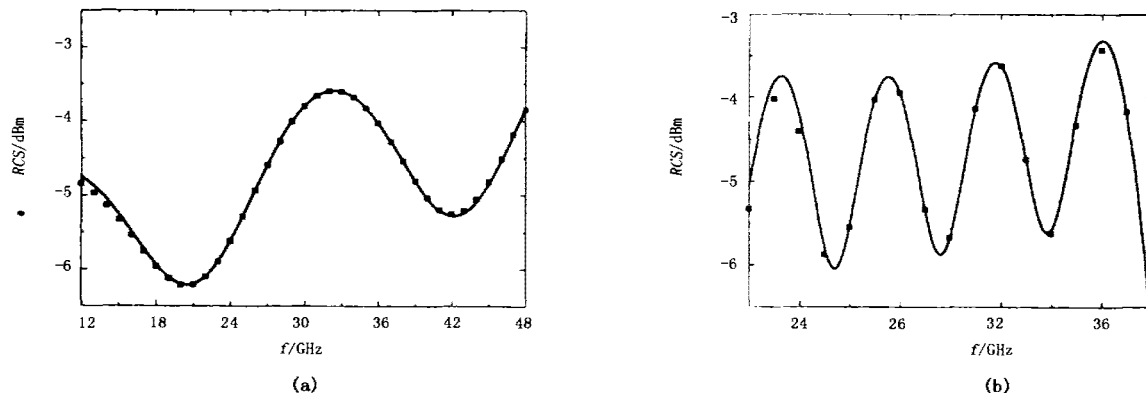


图4 导体条 RCS 与频率间的关系 (a) $W = 1\text{cm}, d = 0.1\text{cm}$ (b) $W = 5\text{cm}, d = 0.1\text{cm}$

■ 矩量法结果 — AWE-Padé 结果 ($L = 4, M = 3$) (7 阶)

Fig. 4 RCS of a conducting strip as a function of frequency (a) $W = 1\text{cm}, d = 0.1\text{cm}$ (b) $W = 5\text{cm}, d = 0.1\text{cm}$

■ the method of moments — AWE-Padé ($L = 4, M = 3$) (7th order)

时间如表 1 所列,所有的计算都是在奔腾 II 400 计算机上进行的.由此可见:应用 AWE 技术,计算效率比传统的矩量法提高了约一个数量级.

3 结论

本文给出了快速计算目标宽带 RCS 的 AWE 方法.应用矩量法和奇异值分解技术求解 EFIE,得到一展开频率点的导体表面电流密度,通过 Padé 近似求出频带内任意频率点的导体表面电流密度,进而计算出散射场和 RCS.奇异值分解技术的使用有效地消除了 EFIE 的内谐振问题.与传统的矩量法相比较,AWE 技术的应用极大地提高了计算效率.从文中计算实例可以看出:

(1) Padé 近似与矩量法逐点计算结果一致的有效带宽比泰勒级数展开的宽,即使增加泰勒级数展开的阶数,也不能明显改善其有效带宽.

(2) AWE 精确预估目标 RCS 的带宽与散射体的电尺寸有关.对于给定的 AWE 阶数,随着尺寸的增加,有效带宽相应地减小.

(3) 要想在任意给定的频带内获得准确的 RCS,需要使用多个频率展开点的 AWE 方法.

REFERENCES

- [1] Newman E H. Generation of wide-band data from the method of moments by interpolating the impedance matrix. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1988, **36**: 1820 — 1824
- [2] Burke G J, Miller E K, Chakrabarti S, et al. Using model-based parameter estimation to increase the efficiency of computing electromagnetic transfer function. *IEEE Trans. Magn.*, 1989, **25**: 2807 — 2809
- [3] Pillage L T, Rohrer R A. Asymptotic waveform evaluation for timing analysis. *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, 1990, **9**: 352 — 366
- [4] Polstyanko S V, Dyczij-Edlinger R, Lee J F. Fast frequency sweep technique for the efficient analysis of dielectric waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1997, **45**: 1118 — 1126
- [5] Li M, Zhang Q J, Nakhla M. Finite difference solution of EM fields by asymptotic waveform techniques. *IEEE Proc. Part H*, 1996, **143**: 512 — 520
- [6] Erdemli Y E, Gong J, Reddy C J, et al. Fast RCS pattern fill using AWE technique. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1998, **46**: 1752 — 1753
- [7] Harrington R F. *Field Computation by Moment Methods*. New York: Macmillan, 1968
- [8] SUN Yu-Fa, XU Shan-Jia. Calculation of scattering cross section at the interior resonance based on the singular value decomposition. *Acta Electronica Sinica* (孙玉发,徐善驾.基于奇异值分解的方法求解目标内谐振时的散射截面.电子学报), 2001, **29**(7): 958 — 960

表 1 CPU 时间比较
Table 1 Comparison of CPU time

实例	AWE-Padé		传统的矩量法		时间 倍数
	CPU 时间(s)	频率点	CPU 时间(s)	频率点	
图 2(a)	367.23	401	429.19	41	11.43
图 2(b)	3459.6	401	4011.3	41	11.34