# 应用复跳频和 AWE 技术快速计算目标宽带 RCS

# 王智军, 孙玉发

(安徽大学电子科学与技术学院,安徽合肥 230039)

摘 要:对于任意给定的频段,单个频率展开点的渐近波形估计技术很难满足精度要求。文章将复跳频技术与渐近波形估计技术结合快速预估任意形状导电柱体的雷达散射截面,即通过一种简单的二进制搜索算法,自动选择渐近波形估计技术多个频率展开点,实现对任意频段宽带电磁散射特性的精确分析。
 关键词:渐近波形估计;复跳频;雷达散射截面
 中图分类号:TN011 文献标识码:A 文章编号:1003-5060(2009)05-0759-03

# Fast computation of wide-band radar cross section using complex frequency hopping and asymptotic waveform evaluation techniques

WANG Zhi-jun, SUN Yu-fa

(School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: For any given frequency band, the asymptotic waveform evaluation(AWE) technique using one frequency point can not satisfy the demand of precision. A complex frequency hopping technique in combination with the AWE technique is used to calculate the radar cross section of arbitrary shape metallic cylinders quickly. Multi-frequency points in AWE are chosen automatically by a simple binary search algorithm. And the precise analysis of electromagnetic scattering characteristics can be made for an arbitrary wide frequency band.

Key words: asymptotic waveform evaluation; complex frequency hopping; radar cross section

矩量法<sup>[1]</sup>(MOM)是精确预估任意形状目标 雷达散射截面(RCS)的一种重要方法。在矩量法 求解过程中,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 其他频域方法一样,为了获得目标的宽带 RCS, 应用矩量法就必须在给定频带内的每个频率点上 逐点计算,占用了大量的 CPU 时间和内存。为 了克服这个缺点,文献[2,3]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。一种类似的技术——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分 析<sup>[4]</sup>。近年来,该技术已被逐渐应用到电磁问题 的分析中<sup>[5-7]</sup>,直接对由电磁场积分方程离散化 得到的矩阵方程进行处理,在窄频带电磁散射特性的分析中具有明显的优越性。但随着频带的增大,若对于任意给定的频段,由于泰勒级数收敛半径的限制,单个频率展开点的AWE技术很难满足精度要求,必须进行多个频率点展开才能得到整个频段上的精确解。

本文应用复跳频技术<sup>[8,9]</sup>,即通过一种二进 制搜索算法自动选择满足给定误差容限的多个频 率展开点,实现任意频段任意形状导体柱宽带电 磁散射特性的快速精确分析。

# 1 基本原理

#### 1.1 AWE 技术

采用矩量法,电磁场积分方程可离散成矩阵

收稿日期:2008-07-18;修改日期:2008-10-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60771034)

作者简介:王智军(1985一),男,安徽合肥人,安徽大学硕士生;

孙玉发(1966一),男,安徽全椒人,安徽大学教授,硕士生导师.

方程为:

$$\mathbf{Z}(k)\mathbf{I}(k) = \mathbf{V}(k) \tag{1}$$

其中,Z(k)是阻抗矩阵;V(k)是激励向量;I(k)是 未知电流向量。

AWE 技术通过将(1)式中的 I(k)展开成关于中心频率点  $k_0$  的泰勒级数,得到频带内的目标表面电流,即:

$$\mathbf{I}(k) = \sum_{n=0}^{\infty} m_n (k - k_0)^n$$
 (2)

展开系数表示为:

$$n_0 = Z^{-1}(k_0)V(k_0) \tag{3}$$

$$m_{n} = Z^{-1}(k_{0}) \left[ \frac{V^{(n)}(k_{0})}{n!} - \sum_{i=1}^{n} \frac{Z^{(i)}(k_{0})m_{n-i}}{i!} \right]$$
(4)

其中,*Z<sup>(i)</sup>*表示 *Z*(*k*)的第*i* 阶导数;*V<sup>(n)</sup>*表示 *V*(*k*) 的第*n* 阶导数。为了扩大泰勒级数的收敛半径, 可通过 Padé 逼近将 *I*(*k*)展开为有理函数,即:

$$\mathbf{I}(k) = \frac{P_L(k-k_0)}{Q_M(k-k_0)} = \frac{\sum_{i=0}^{L} a_i (k-k_0)^i}{\sum_{j=1}^{M} b_j (k-k_0)^j + 1}$$
(5)

根据 Padé 逼近理论<sup>[10]</sup>,L 和 M 满足如下关系:

$$L = M$$
  $L + M$  为偶数 (6)

↓|*L*−*M*|=1 *L*+*M* 为奇数 这时,(5)式逼近(2)式的误差最小。 由(5)式可得:

$$\sum_{j=0}^{M} M_{L+i-j} b_j = -m_{L+i}, \quad i = 1, 2, \cdots, M \quad (7)$$
$$a_i - \sum_{j=0}^{i-1} m_j b_{i-1} = m_i, \quad i = 1, 2, \cdots, M \quad (8)$$

将由(7)式和(8)式求得的  $a_i$ 、 $b_j$  值代入(5)式,可得到频带内目标的表面电流,进而求出目标的宽带 RCS。

#### 1.2 CFH 技术

在展开频率点 f。附近,应用 AWE 技术得到 的解是精确的。然而 AWE 技术在单个频率点展 开的收敛半径有限,因而随着频率逐渐远离展开 频率点 f。解的精确度逐渐下降。在许多实际应 用中经常需要求一个任意给定频段的解,此时,企 图通过一个展开频率点来获得整个频段上的精确 解是不可能的,必须进行多点展开才能得到整个 频段上的精确解,使用 CFH 技术可以自动选择 满足给定误差容限的多个展开频率点,即通过一 种简单的二进制搜索算法实现。 假设给定频段的最低、最高频率分别为 fmin、 fmax,RCS 的误差容限为 error,可通过下面的步 骤来选择给定频段内满足精度要求的多个展开频 率点,具体算法如下:

(1) 计算频带内的中心频率点  $f_{mid} =$  0.5( $f_{min}+f_{max}$ ),并在此点将 I(k)进行 Padé 逼近 展开为有理函数,得到  $f_{min}$ 、 $f_{max}$ 处的 RCS 值,分 别与由 MOM 在该 2 点处计算得到的 RCS 值进 行比较,得出误差 err1、err2。

(2) 判断 errl < error 和 err2 < error,若两者 同时满足,输出中间频率点  $f_{mid}$ ,跳出程序;若不 能同时满足,应用 AWE 技术在频段[ $f_{min}$ , $f_{mid}$ ]和 [ $f_{mid}$ , $f_{max}$ ]重复步骤(1),直到在离  $f_{min}$ 、 $f_{max}$ 最近 的区域分别找到相应的跳频点  $f'_{min}$ 、 $f'_{max}$ ,将  $f_{min}$ ← $f'_{min}$ 、 $f_{max}$  ← $f'_{max}$ ,重复上述步骤计算。

### 2 数值计算结果

为了验证本文方法的正确性,首先对 TM 平 面波垂直入射到一个半径为 a=1 cm 的无限长理 想导体圆柱上的 RCS 频率响应进行了分析,结果 如图 1 所示。

其中,纵坐标 F 表示 RCS/ $\lambda$  取对数,单位为 dB。圆柱截面的周界被等分为 128 段。选择 AWE 的 展 开 频 率 点 为 给 定 频 段 (0.5~15 GHz)的中心频率 7.75 GHz,步长为 0.1 GHz。Padé 逼近中 L=4, M=3。

由图 1 可见,在给定频带中心频率 7.75 GHz 附近,单点 AWE 得到的结果与矩量法逐点计算 结果一致,其中矩量法以 0.5 GHz 频率间隔逐点 计算,共 30 个频率点。随着频率离开展开频率点 越远,单点逼近的效果就越差,即单点 AWE 得到 的数据准确性迅速降低。而用 CFH 技术(取其 容限误差为 0.1dB)在整个频带内搜索到的 3 个 跳频点分别为 2.3 GHz,5.9 GHz,11.375 GHz, 得到的结果在整个频段上与 MOM 逐点计算结 果吻合良好。

计算 TM 平面波垂直入射到无限长理想导体三角柱上的宽带 RCS,结果如图 2 所示。计算频率为 0.5~20.5 GHz, AWE 的展开频率点为频带的中心频率 10.5 GHz,步长为 0.1 GHz。等边三角柱边长 a 取为 1 cm,其周界被等分为 120 段。CFH 技术(取其容限误差为 0.1 dB)在整个频带内搜索到的 2 个跳频点分别为 5.5 GHz、15.5 GHz。其中矩量法逐点计算以 1 GHz 频率间隔逐点计算,共 21 个频率点。



对 T M 平面波分别以 0°和 45°角斜入射到无 限长理想导体条的 RCS 频率响应进行分析,结果 如图 3、图 4 所示。



图 4 45°角入射导体条的 RCS 频率响应

计算频率为 0.5~10.5 GHz。AWE 的展开 频率点为 5.5 GHz,步长为 0.1 GHz。矩量法逐 点计算以 0.5 GHz 频率间隔逐点计算,共 21 个 频率点。导体条宽 W 为 l0 cm,厚度 d 为 l cm,其 周界分别被等分为 44 段。当以 0°角入射时 CFH 技术(其容限误差为 0.1 dB)在整个频带内搜索 到的 3 个跳频点分别为 1.125 GHz、3.625 GHz、 8 GHz。以 45°角入射时在整个频带内搜索到的 3 个跳频点分别为 1.75 GHz、4.25 GHz、8 GHz。

# 3 结束语

本文给出了一种自动选择多个频率展开点的 渐近波形估计技术,实现了任意形状导体柱任意 频段宽带 RCS 的快速计算。

数值计算结果表明,本文方法具有较高的计 算精度和计算效率,可进一步推广到复杂目标任 意频段宽带电磁散射特性的快速分析中。



- Harrington R F. Field computation by moment methods
   [M]. New York: Macmillan, 1968:10-100.
- [2] Newman E H. Generation of wide-band data from the method of moments by interpolating the impedance matrix
   [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1988, 36: 1820-1824.
- [3] Burke G J, Miller E K, Chakrabarti S, et al. Using modelbased parameter estimation to increase the efficiency of computing electromagnetic transfer function [J]. IEEE Trans Magn, 1989, 25: 2807-2809.
- [4] Pillage L T, Rohrer R A. Asymptotic waveform evaluation for timing analysis [J]. IEEE Trans Computer-Aided Design, 1990, 9:352-366.
- [5] Slone R D, Lee R, Lee J F. Well-conditioned asymptotic waveform evaluation for finite elements [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 2003, 51:2442-2447.
- [6] Reddy C J, Deshpande M D, Cockrell C R, et. al. Fast RCS computation over a frequency band using method of moments in conjunction with asymptotic waveform evaluation technique [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1998,46:1229-1233.
- [7] Jiao D, Jin J M. Fast and accurate frequency-sweep calculations using asymptotic waveform evaluation and the combined-field integral equation [J]. Radio Science, 1999, 34: 1055-1063.
- [8] Chiprout E, Nakhla M S. Analysis of interconnect networks using complex frequency hopping (CFH) [J]. IEEE Trans Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1995, 14:186-200.
- [9] Kolbehdari M A, Nakhla M S, Zhang Qijun. Simultaneous time and frequency domain solutions of EM problems using finite element and CFH techniques [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1996, 44: 1526-1534.
- [10] 徐献瑜,李家楷,徐国良. Padé 逼近概论[M]. 上海:上 海科学技术出版社,1990:20-80.

(责任编辑 吕 杰)