

复杂目标宽带电磁散射特性幅相分离插值方法

田 超, 谢拥军, 李晓峰, 王 博

(天线与微波技术国家重点实验室, 西安电子科技大学, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文针对目标散射体表面感应电流的特性, 提出了一种新的插值方法——幅相分离法, 该方法将最佳一致逼近和相位提取结合起来, 通过求解给定频带内的切比雪夫节点和节点处的表面电流, 结合相位提取得到整个频带内的感应电流, 从而快速有效地计算了复杂目标的宽带雷达散射截面. 数值结果证明了方法的有效性和准确性.

关键词: 幅相分离法; 最佳一致逼近; 相位提取; 宽带雷达散射截面

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0485-04

Amplitude-Phase Detached Interpolation of Scattering from Complex Targets in a Broad Band

TIAN Chao, XIE Yong-jun, LI Xiao-feng, Wang Bo

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The characteristic of surface electric currents on conducting objects is presented in this paper. A new interpolation theory (Amplitude-phase detached interpolation) is introduced. The best uniform approximation in conjugation with the phase extracted is applied to the conventional high-frequency method. The nodes of Chebyshev within a given frequency range were found firstly, and the surface electric currents at these nodes were computed by the conventional high-frequency method. Then the electric current distribution, which is used to compute the scattered fields and the wideband radar cross section (RCS), can be obtained at any frequency within the given frequency range via amplitude-phase detached interpolation. The numerical results show that this method is efficient and accurate.

Key words: amplitude-phase detached interpolation; the best uniform approximation; phase extracted; wide-band radar cross section

1 引言

快速而准确的获得目标超宽带电磁散射特性对于高分辨雷达、成像技术以及目标识别的研究具有重要意义, 然而超宽带雷达的工作频率范围非常宽, 要准确的分析带内每个频点的散射特性将非常耗费时间, 因此, 如何利用频带内少数频点所携带的电磁信息来获得整个频带内的电磁散射特性就显得尤为重要.

近年来, 随着计算方法的发展, 计算电磁学中的插值方法取得了长足的进步. 波形渐进估计 (AWE)^[1~4] 技术已经成功的被用于目标宽带电磁散射特性的分析中, 该方法的主要思想是通过求解电、磁场积分方程, 得到展开频率点的目标表面电流密度, 通过泰勒级数展开以及 padé 近似获得频带内任意频率点的目标表面电流密度, 进而计算出散射场和 RCS. 该方法的使用使得计算效率大大提高, 但该方法的有效计算频带受到泰勒级数

和 padé 近似本身性质的限制, 而且计算过程中需要存储稠密的阻抗矩阵及其多阶导数, 占用了大量内存. 文献[5~7]中提出模型参数估计 (MBPE) 以及文献[9, 10]中提出的切比雪夫逼近也成功的分析了目标宽带电磁散射特性. 这两种方法具有易实现且不受具体算法限制等优点, 然而对于复杂目标, 雷达散射截面 (RCS) 随频率的变化极度剧烈, RCS 的频率响应曲线非常复杂, 这样就需要获得大量的采样点的信息, 计算效率将大大降低. 另外, 对于目标尺寸远大于工作波长的高频区域, 准确地应用插值方法显得非常困难. 最近, 相位提取基函数^[8] 已被成功提出, 应用到了电磁散射特性分析中.

本文针对目标散射体表面感应电流的特性, 提出一种新的插值方法——幅相分离法, 该方法将最佳一致逼近和相位提取结合起来, 通过求解给定频带内的切比雪夫节点和节点处的目标表面电流, 结合相位提取得到整个频带内的感应电流, 从而快速有效地计算了复杂电大目

标的宽带雷达散射截面. 数值结果证明了方法的有效性和准确性.

2 幅相分离法

2.1 相位提取

在散射问题中, 目标导体表面感应电流的主要相位因子为 $e^{ik \cdot r}$, 在高频区, 感应电流的变化与该相位因子紧密相关. 下面以物理光学法为例, 具体阐述该方法.

物理光学法本质上是一种高频分析方法, 它是用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射场的源, 然后对表面感应电流积分而求得散射场. 物理光学法给散射体表面的感应电流赋予简单明确的值, 电流在金属体表面满足以下边界条件:

$$J \approx 2\hat{n} \times H_i \quad (1)$$

其中是入射波的磁场, 可以表示成 $H_i = H_0 e^{ik \cdot r}$.

因此, 在导体表面上任意点的感应电流 J 的主要相位因子为 $e^{ik \cdot r}$, 则感应电流 J 可以表示如下:

$$J = F e^{ik \cdot r} \quad (2)$$

其中 k^i 是入射波矢量包含有频率和角度的信息, 可以表示如下:

$$k^i = k_0(\hat{x} \sin\theta^i \cos\varphi^i + \hat{y} \sin\theta^i \sin\varphi^i + \hat{z} \cos\theta^i) \quad (3)$$

F 是一个随频率和相位变化的光滑函数, 并且在 k^i 附近 F 随频率的变化非常小. $e^{ik \cdot r}$ 就是我们要提取的相位.

2.2 最佳一致逼近

经过相位提取之后, 式(2)中的 F 是一个随频率和相位变化的光滑函数, 但是有时相位提取之后的 F 随频率的变化依然很剧烈. 最佳一致逼近是由俄国数学家切比雪夫提出, 具有良好的收敛性, 而且它具有编程简单不受具体算法限制等优点. 所以我们可以用最佳一致逼近理论^[9,10]进行计算函数 F , 其具体过程如下:

对于给定频带 $f \in [f_m, f_n]$, 对应的波数 $k \in [k_m, k_n]$, 先作坐标变换, 令

$$\bar{k} = \frac{2k - (k_m + k_n)}{k_n - k_m} \quad (4)$$

则函数 $F(k)$ 可以表示如下:

$$F(k) = F\left(\frac{\bar{k}(k_n - k_m) + (k_m + k_n)}{2}\right) \quad (5)$$

其中 $\bar{k} \in [-1, 1]$.

设 $T_l(\bar{k}) (l = 1, 2, \dots, n)$ 为 l 阶切比雪夫多项式, 其定义如下:

$$T_0(\bar{k}) = 1, T_1(\bar{k}) = \bar{k} \quad (6)$$

$$T_{l+1} = 2\bar{k}T_l(\bar{k}) - T_{l-1}(\bar{k}), 2 \leq l \leq n \quad (7)$$

引入函数 $D(\bar{k})$, 令

$$D(\bar{k}) = F\left(\frac{\bar{k}(k_n - k_m) + (k_m + k_n)}{2}\right) = F(k) \quad (8)$$

则 $F(k)$ 在 $[k_m, k_n]$ 内的切比雪夫逼近为

$$F(k) = D(\bar{k}) \approx \sum_{i=0}^{n-1} c_i T_i(\bar{k}) - \frac{c_0}{2} \quad (9)$$

若 $\bar{k}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 $T_n(\bar{k}) (\bar{k} \in [-1, 1])$ 的 n 个零点, 则

$$\bar{k}_i = \cos\left(\frac{i-0.5}{n}\pi\right), i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$c_l = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n D(\bar{k}_i) T_l(\bar{k}_i) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n F(k_i) T_l(\bar{k}_i) \quad (11)$$

其中

$$k_i = \frac{\bar{k}_i(k_n - k_m) + (k_m + k_n)}{2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

对于目标函数 $F(k)$ 的最佳一致逼近, 可先求出 $T_n(\bar{k}) (\bar{k} \in [-1, 1])$ 的 n 个零点 \bar{k}_i , 然后根据式(12)求出 $F(k)$ 在 $[k_m, k_n]$ 中的 n 个切比雪夫节点 k_i , 再用物理光学(这里也可用其它数值方法)求出函数 $F(k_i)$, 通过式(11)求出 c_l , 代入式(9)算出整个频带内 $F(k)$, 最后由式(2)得到整个频带内的感应电流, 从而快速有效地分析了复杂目标宽带的电磁散射特性.

3 数值结果

从上面的理论可以看出该方法具有普遍性, 它不受具体的算法限制. 为了验证该方法的有效性和准确性, 首先考虑一个半径为 0.3cm 的金属球, 如图 1 所示, 该模型被剖分成 558 个三角面元, 计算频段 5GHz ~ 45GHz. 图 2 给出了使用多层快速多极子逐点计算和幅相分离法(APD)(阶数 $n = 7$)插值计算的 RCS 频率响应曲线的比较图.

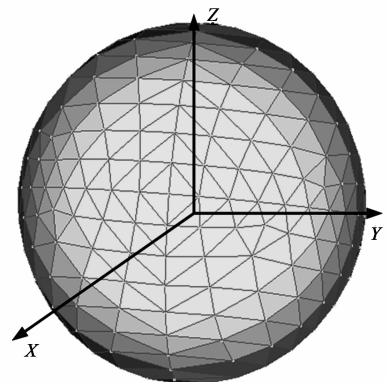


图1 球体的剖分图

从图 2 可以看出使用多层快速多极子逐点计算和幅相分离法(APD)(阶数 $n = 7$)插值计算的 RCS 频率响应曲线吻合的非常好, 验证了该方法的准确性. 对于复杂电大目标的情况, 我们使用直接方法(PO)逐点计算和幅相分离法(APD)插值计算 RCS 的结果进行比较.

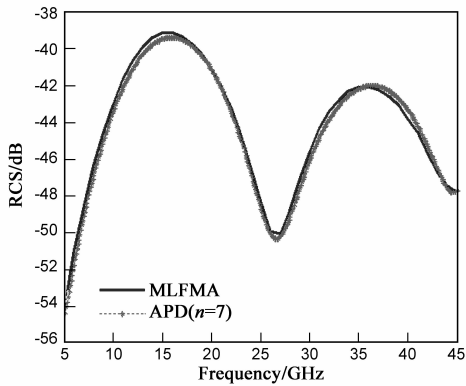


图2 单站RCS频率响应曲线

下面考虑一个简单的组合体.如图3所示,该模型由一个半球和一个椎体组成,半球的半径为3m,椎体的高度为10m.该模型被剖分成30908个三角面元.计算频段为10GHz~200GHz.图4分别给出了任选的4个不同入射角度下使用直接方法(PO)逐点计算和幅相分离

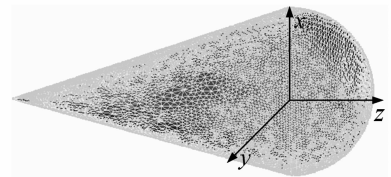


图3 简单组合体的剖分图

法(APD)(阶数 $n=8$)插值计算的 RCS 频率响应曲线的比较图.

最后对巡航导弹导体目标的电磁散射特性进行分析,如图5所示,巡航导弹模型的剖分图,该导弹总长为6.17m,主体圆柱的半径为0.2665m,两翼间的距离为2.62m.该模型被剖分成12352个三角面元,计算频段为10GHz~200GHz.图6分别给出了任选的4个不同入射角度下使用直接方法(PO)逐点计算和幅相分离法(APD)(阶数 $n=8$)插值计算的 RCS 频率响应曲线的比较图.

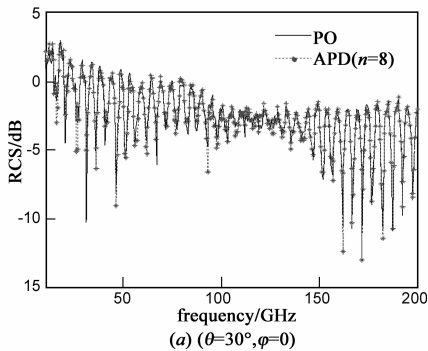
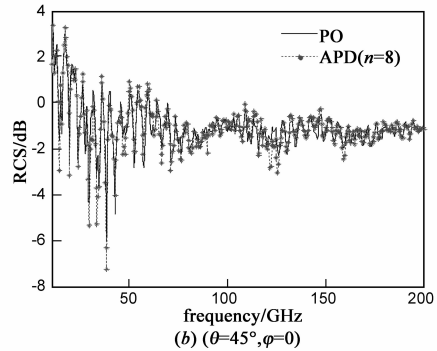
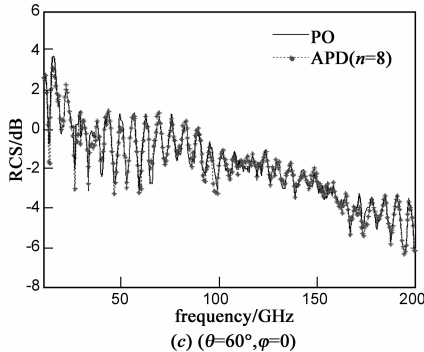
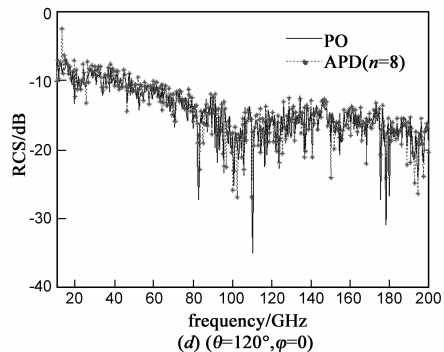
(a) ($\theta=30^\circ, \varphi=0$)(b) ($\theta=45^\circ, \varphi=0$)(c) ($\theta=60^\circ, \varphi=0$)(d) ($\theta=120^\circ, \varphi=0$)

图4 单站RCS频率响应曲线

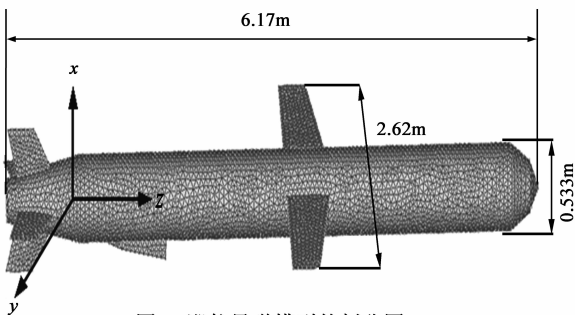


图5 巡航导弹模型的剖分图

4 结论

本文针对目标散射体表面感应电流的特性,提出一种新的插值方法一幅相分离法,该方法将最佳一致逼近和相位提取结合起来,通过求解给定频带内的切比雪夫节点和节点处的目标表面电流,进而结合相位提取得到整个频带内的目标表面电流,快速有效地计算了复杂电大目标的宽带雷达散射截面.从上面的理论可以看出该方法具有普遍性,它不受具体的算法限制,上述结果说明了方法的有效性和准确性.

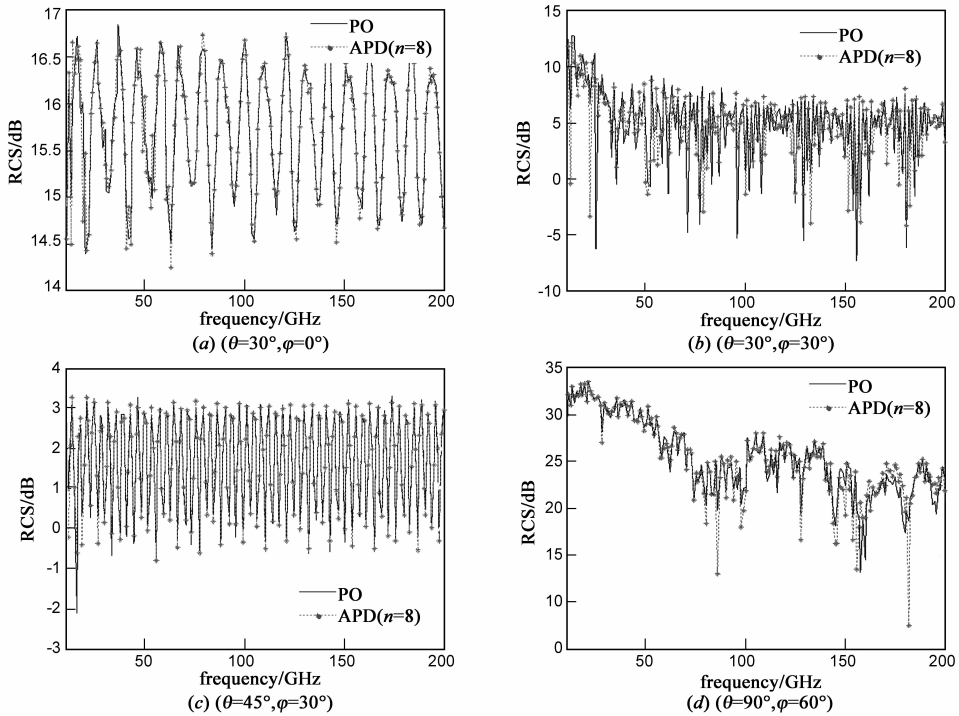


图6 单站RCS频率响应曲线

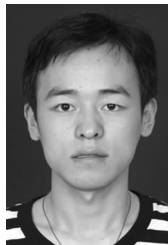
参考文献:

- [1] C R Cockrell, F B Beck. Asymptotic waveform evaluation (AWE) technique for frequency domain electromagnetic analysis[M]. NASA Tech. Memo 110292, Nov. 1996. 2 - 14.
- [2] R D Slone, R Lee, J-F Lee. Well-Conditioned asymptotic waveform evaluation for finite elements[J]. IEEE Trans, 2003, 51 (9): 2442 - 2447.
- [3] You-Bao Wang, Bo Y M, Ji G Q, Ben D, Jiang G X, Cao W. Hybrid Technique of Fast RCS Computation With Characteristic Modes and AWE[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 464 - 467.
- [4] Z peng, X-Q Sheng. Application of asymptotic waveform approximation technique to hybrid FE/BI method for 3D scattering[J]. Science in China Series F-Inf Sci, 2007, 50(1): 124 - 134.
- [5] R J Allard, D H Werner, J S Zmyslo, P L Werner. Model-Based Parameter Estimation of Antenna Radiation Pattern Frequency Spectra[A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Atlanta, 1998. 62 - 65.
- [6] E K Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetics, part III. Applications to EM integral equations[J]. IEEE Antennas and Propag. Magazine, 1998, 40(3): 49 - 66.
- [7] R J Allard, D H Werner. The model-based parameter estimation of antenna radiation patterns using windowed interpolation and spherical harmonics [J]. IEEE Trans, 2003, 51 (8): 1891 - 1906.
- [8] Zaiping Nie, Su Yan, Shiquan He, Jun Hu. On the basis func-

tions with traveling wave phase factor for efficient analysis of scattering from electrically large targets[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2008, PIER 85, 83 - 114.

- [9] Mingsheng Chen, Xianliang Wu, Wei Sha, Zhixiang Huang. Fast Frequency Sweep Scattering Analysis for Multiple PEC Objects[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2007, 22(2): 250 - 253.
- [10] S Jokar, B Mehri. The best approximation of some rational functions in uniform norm[J]. Applied Numerical Mathematics, 2005, 55: 204 - 214.

作者简介:



田超 男, 1984年5月出生于陕西富平, 西安电子科技大学硕士研究生, 主要研究兴趣: 电磁场数值计算及其应用工作。
E-mail: tianchao0420@126.com



谢拥军 男, 1968年5月出生于陕西西安, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算微波与计算电磁学, 微波通信, 电磁兼容及电波传播特性等。
E-mail: yjxie@xidian.edu.cn