

文章编号 1005-0388(2001)03-0287-04

# 雷达散射截面基于 MBPE 模型的 在频空两域的双内插<sup>\*</sup>

熊 邺 方 大 纲 盛 卫 星

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** Padé 多项式模型一般被用于频域上的模基参数估计 (MBPE), 为了将空域信息卷入拟合公式, 混合的 MBPE 技术采用了 Padé 多项式和单项式或多项式相结合的方法以便同时在频域和空域进行双内插。这种技术已在天线中得到应用, 文此将该技术应用于雷达散射截面 (RCS) 领域。为了得到更高的精度和更快的计算机处理时间, 采用了将大矩阵分块计算, 空频域分区内插, 以及自适应算法等方法。

**关键词** 内插 雷达散射截面 模基参数估计

中图分类号 TN951 文献标识码 A

## The simultaneous interpolation of RCS in both the spatial and frequency domains using model-based parameter estimation

XIONG Ye FANG Da-gang SHENG Wei-xing

(School of Electronic and Photoelectronic Technology, Nanjing University

of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The Padé rational function fitting model commonly used for model-based parameter estimation (MBPE) in frequency domain is enhanced to include spatial dependence in the numerator and denominator coefficients. This method has been used for the simultaneous interpolation of antenna radiation patterns in both the spatial and frequency domains. In this paper, we use this method on the simultaneous spatial and frequency interpolation of radar cross section (RCS). In addition, we use the block matrix technique, the optimized segmentation technique and the adaptive algorithm which improve the approximate fidelity and reduce the computational burden significantly.

**Key words** interpolation RCS MBPE

## 1 引言

建立基于频率和角度的 RCS 的数据库是一项非常艰巨的工作, 特别是在存储介质和处理时间上都有很高要求的时候。例如, 一个典型的高频 RCS 的数据在某一频点上要用 64000 个数据来表示, 假

如计算的频带为 1GHz 到 8GHz, 要求每 1MHz 做一次采样, 则要 2.56 亿个数据才能完全表示出这个 RCS。由于线性插值的数据量大, 精度低, 于是提出了 MBPE。由于 MBPE 模型是和所要解决的问题的物理概念密切相关的, 在通常情况下可以用更少的数据, 更少的时间恢复出更加精确的 RCS。

Douglas H. Werner 在天线理论上提出的混合 MBPE 技术是对以往的 MBPE 技术的重大改进, Padé 多项式匹配模型被引进来使其可以同时在频域和空域上对方向图进行内插<sup>[1]</sup>。简单的单项式和二项式不能精确的建立频率响应的零极点模型, 但是他们可以在单个频点上准确的对方向图的空域数据进行内插。在本文中, 为了建立高频 RCS 的数据模型, 采用了改进的混合 MBPE 技术, 该技术由一个具有零极点的有理式的频率匹配模型和空域的单项式或多项式匹配模型组成。由于该模型是建立在所要解决的问题的物理背景的基础上, 因此所需要估计出的模型参数和相应的计算时间也大大减少, 所需的数据存储空间也明显降低。本文采用了优化算法进一步提高改进的混合 MBPE 技术的效能, 为了节省计算时间, 文中将 MBPE 算法中所需要的大矩形阵划分为多个小矩阵, 使计算时间节省了近一半; 为了提高计算精度, 将所需进行处理的频域和空域范围进一步进行划分, 使模型估计出的参数在各个子区间上都能达到相当高的精度; 为了合理的划分各个子区间, 使需要估计的参数最少, 所恢复出的 RCS 精度较高, 采用了自适应算法对矩阵区间进行了动态划分。文中采用了两个实际的应用例子对采用 MBPE 模型进行数据处理的效果进行了分析。所处理的 RCS 数据是通过矩量法对一个电小尺寸的圆柱体计算得到的, 入射波的频率变化范围为 1GHz 到 1.1GHz, 圆柱体的长度为 0.828m, 其圆截面半径为 0.065m。两个例子分别表述了采用分区建模和整体建模方法所采用的模型参数的复杂程度和进行数据恢复的精度。

## 2 模型的建立

MBPE 模型是一种基于所要解决问题的物理概念的智能的曲线拟合技术。MB(Model-Based) 是建立基于研究问题的物理概念的拟合模型; PE(Parameter Estimation) 是通过建立的模型和研究数据的抽样值相匹配而获得模型的参数<sup>[2][3][4]</sup>。

可以将 RCS 的频域特性用有理多项式的方式表示出来, 为了有效的表示出 RCS 表现在频域的零

极点特性, 本文采用了分式性质的有理多项式:

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{N_0 + N_1s + N_2s^2 + \dots + N_ns^n}{D_0 + D_1s + D_2s^2 + \dots + D_{d-1}s^{d-1} + s^d} \quad (1)$$

这里  $F(s)$  表示为 RCS 的频率响应,  $s$  表示复频率  $j\omega$ , 该模型有  $n+d+1$  个参数需要提取。

为了将空域信息卷入式(1), 可以将其中的  $n+d+1$  个系数都表示为空域内的角度的多项式的函数:

$$F(\theta, s) = \frac{N(s, \theta)}{D(s, \theta)} = \frac{[N_0(\theta) + N_1(\theta)s + N_2(\theta)s^2 + \dots + N_n(\theta)s^n]}{[D_0(\theta) + D_1(\theta) + D_2(\theta)s^2 + \dots + D_{d-1}(\theta)s^{d-1} + s^d]} \quad (2)$$

其中:

$$N_0(\theta) = N_0^0 + N_0^1\theta + N_0^2\theta^2 + \dots + N_0^k\theta^k$$

$$N_1(\theta) = N_1^0 + N_1^1\theta + N_1^2\theta^2 + \dots + N_1^k\theta^k$$

⋮

$$N_n(\theta) = N_n^0 + N_n^1\theta + N_n^2\theta^2 + \dots + N_n^k\theta^k$$

$$D_0(\theta) = D_0^0 + D_0^1\theta + D_0^2\theta^2 + \dots + D_0^k\theta^k$$

$$D_1(\theta) = D_1^0 + D_1^1\theta + D_1^2\theta^2 + \dots + D_1^k\theta^k$$

⋮

$$D_{d-1}(\theta) = D_{d-1}^0 + D_{d-1}^1\theta + D_{d-1}^2\theta^2 + \dots + D_{d-1}^k\theta^k$$

$k$  表示为拟合空域信息的单项式的最高次项的次数。通过(2)式的变换, 就可以将总共  $(n+d+1) \times k$  个系数通过以下的矩阵形式写出来<sup>[1]</sup>

$$AX = B \quad (3)$$

$A$  是一个  $(kn + kd + k) \times (kn + kd + k)$  的大型二维矩阵, 当要估计的参数很多的时候, 这种方法所消耗的计算时间是相当多的。

为了节省计算时间, 本文采用了分块矩阵的方法, 首先将角度的  $k$  个抽样值分别作为常量代入(2)式, 得到  $k$  个和复频率有关的方程组:

$$a_i x_i = b_i \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

其中:

$$a_i = \begin{bmatrix} 1 & s_1 & \dots & s_1^n & -F(\theta_i, s_1) & -F(\theta_i, s_1)s_1 & \dots & -F(\theta_i, s_1)s_1^{d-1} \\ 1 & s_2 & \dots & s_2^n & -F(\theta_i, s_2) & -F(\theta_i, s_2)s_2 & \dots & -F(\theta_i, s_2)s_2^{d-1} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & s_{n+d+1} & \dots & s_{n+d+1}^n & -F(\theta_i, s_{n+d+1}) & -F(\theta_i, s_{n+d+1})s_{n+d+1} & \dots & -F(\theta_i, s_{n+d+1})s_{n+d+1}^{d-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} F(\theta_i, s_1) s_1^d \\ F(\theta_i, s_2) s_2^d \\ \vdots \\ F(\theta_i, s_{n+d+1}) s_{n+d+1}^d \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x_i = \begin{bmatrix} N_0(\theta_i) \\ N_1(\theta_i) \\ \vdots \\ N_n(\theta_i) \\ D_0(\theta_i) \\ D_1(\theta_i) \\ \vdots \\ D_{d-1}(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过解这  $k$  个  $(n+d+1)$  元方程组, 可以得到在所有抽样角度下的系数矩阵  $x_i$ 。有了这  $(n+d+1)$  个系数在  $k$  个采样角度下的变化关系, 又可以建立  $(n+d+1)$  个  $k$  元方程组。

$$c_j y_j = d_j \quad j = 1, 2, \dots, n+d+1 \quad (8)$$

其中

$$c_j = \begin{bmatrix} 1 & \theta_1 & \cdots & \theta_1^k \\ 1 & \theta_2 & \cdots & \theta_2^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \theta_k & \cdots & \theta_k^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$y_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} N_j^0 \\ N_j^1 \\ \vdots \\ N_j^K \end{bmatrix} & 0 \leq j < n+1 \\ \begin{bmatrix} D_j^0 \\ D_j^1 \\ \vdots \\ D_j^K \end{bmatrix} & n+1 \leq j < n+d+1 \end{cases} \quad (10)$$

$$d_j = \begin{cases} \begin{bmatrix} N_j(\theta_1) \\ N_j(\theta_2) \\ \vdots \\ N_j(\theta_k) \end{bmatrix} & 0 \leq j < n+1 \\ \begin{bmatrix} D_j(\theta_1) \\ D_j(\theta_2) \\ \vdots \\ D_j(\theta_k) \end{bmatrix} & n+1 \leq j < n+d+1 \end{cases} \quad (11)$$

通过以上方法解  $k$  个  $(n+d+1)$  元方程组和  $(n+d+1)$  个  $k$  元方程组, 可以用大约原来方法一半的时间解出所需的模型参数。

如果将空域信息的水平扫描角和垂直扫描角都考虑进去, 那么原来表征空域信息的单项式可以由相应的二项式代替<sup>[1]</sup>:

$$N_i(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^{p_n+1} \sum_{k=1}^j N_i^{(j-k, k-1)} \theta^{j-k} \phi^{k-1} \quad (12)$$

$$D_i(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^{p_n+1} \sum_{n=1}^m D_i^{(m-n, n-1)} \theta^{m-n} \phi^{n-1} \quad (13)$$

其中  $P_n$  是二项式当中的最高次数。可以利用和上面相似的技术将矩阵进行分块以提高计算速度。

由于在高频情况下, RCS 的数据变化非常复杂, 要该 MBPE 模型完全应用于整个角度和频率范围, 且要达到足够的精度是相当困难的, 甚至是不可实现的。本文采用将 MBPE 模型的应用范围细分的方法, 即将所要处理的 RCS 数据在频域用择优算法(或自适应算法)分成  $m$  个段, 在空域相应的分成  $n$  个段, 构造  $m \times n$  个模型去分别去处理这  $m \times n$  个区间。这种方法在某种程度上来说也相当于将矩阵分块, 既将原来处理大矩阵的问题化成处理  $m \times n$  个区间上的小矩阵, 从而使在计算精度大幅提高的同时其计算速度也进一步提高。

对 RCS 数据范围的合理分段也是减少数据量, 提高计算精度的一个相当重要的环节, 尤其不等间隔分段有着非常明显的作用。文中采用自适应优化方法, 计算出在给定精度和给定参数上限制下的最佳分段。

### 3 数值结果

为了简单起见, 本文处理的高频 RCS 数据是通过矩量法程序对一个电小尺寸的圆柱体计算得到的, 入射波的频率变化范围为 1GHz 到 1.1GHz, 水平扫描角度变化范围为 0 到 90°, 圆柱体的长度为 0.828m, 其圆截面半径为 0.065m。

模型建立和数据恢复采用了本文上面所提到的方法, 并与原始方法进行了对比。在相同模型参数下, 不采用分子区间的方法建立的模型恢复数据的最大误差为 10.85dB(见图 1), 而采用了优化算法划分过后, 建立了两个基于不同子区间的 MBPE 模型, 立即使恢复数据的最大误差下降为 53.98dB(见图 2)。

同时, 这种算法所需的计算时间也大大降低。以奔腾 II 型计算机(主频 333MHz)为例, 当不采用分块矩阵的方法计算图 1 中所示的数据时, 所耗的计算机时间为 3.16s, 当采用分块矩阵的方法再计算同样的数据时, 所耗的计算机时间为 1.98s。

这种基于双内插 MBPE 模型的 RCS 数据的处理方法和以往的方法相比也有很大的优越性。以本文提到的圆柱体的 RCS 数据为例, 若用经典的线性

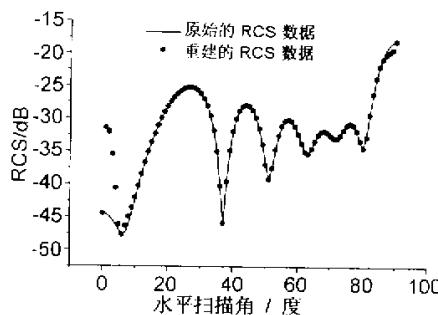
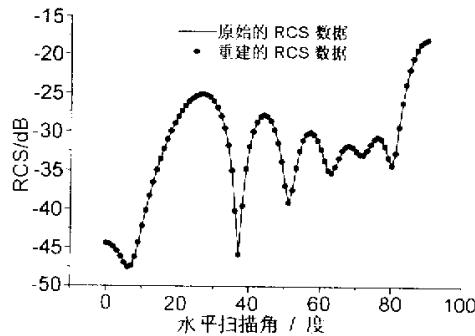


图 1 不分区进行数据恢复

图 2 将空域分成两个子区间  
分别建立 MBPE 模型

插值方法进行处理,要达到 $-50\text{dB}$ 的精度,至少要每 $1\text{MHz}$ 取一个点,角度每 $1$ 度取一个点,要恢复出数据必须有 $18000$ 个数据点。而图2当中所用的方法,频域提取的参数共 $10$ 个,空域提取的参数只用了 $27$ 个,总的数据量才 $270$ 个,比线性插值所用的要少得多。

## 4 结论

改进的 MBPE 算法在数据量巨大的情况下,无论在计算时间、计算精度、存储空间等各个方面与传统方法相比有着巨大的优越性,因此基于 MBPE 模型的频空域双内插方法在 RCS 的数据处理方面有着广泛的应用前景。对于 MBPE 模型在 RCS 数据处理方面的更深层次的应用,正在进行更深入的研究。

## 参考文献

- [1] Douglas H. Werner and Rene J. Allard. The Simultaneous Interpolation of Antenna Radiation Patterns in Both the Spatial and Frequency Domains Using Model-Based Parameter Estimation [J]. IEEE Trans. On Antennas Propagat., 2000, 48(3): 383~391.
- [2] E. K. Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetic Pt. 1 [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(1): 40~52.
- [3] E. K. Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetic Pt. 2 [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(2): 51~65.
- [4] E. K. Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetic Pt. 3 [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(3): 49~66.

熊 麒 (1978-),男,江苏人,于 2000 年 7 月在南京理工大学电磁场与微波技术专业获学士学位,现为该校电磁场与微波技术专业博士研究生。

方大纲、盛卫星 见《电波科学学报》2000 年,第 2 期,第 142 页。

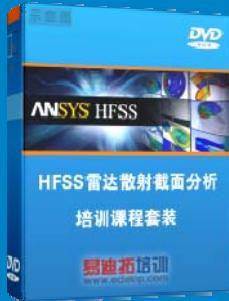
## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>