

# 基于一维散射中心模型的 RCS 频率全角度外推

郑舒予<sup>1</sup>, 张小宽<sup>1</sup>✉, 刘 铭<sup>2</sup>, 徐嘉华<sup>1</sup>, 赵唯辰<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051;  
3. 长春理工大学, 长春, 130022)

**摘要** 目标 RCS 频率外推是减小目标 RCS 数据存储的有效手段之一。利用 FEKO 电磁仿真软件得到目标回波数据, 结合经典谱估计算法, 提出了一种基于 GTD 散射中心模型的目标 RCS 频率全角度外推方法。以弹头目标为例, 首先利用 1~2 GHz 频率后向电磁散射数据, 提取 GTD 散射中心模型参数; 其次利用 RCS 频率全角度外推方法, 实现了弹头目标在 3 GHz、4 GHz 频率上的 RCS 全角度外推; 最后通过将外推数据与 FEKO 仿真数据进行对比, 验证了外推方法的准确性与可靠性。仿真实验表明, 外推结果与 FEKO 的仿真结果在整体趋势及强散射点对应的位置上具有较高的吻合度, 可有效描述雷达目标的散射特性。

**关键词** 散射中心; 参数提取; FEKO; RCS 频率全角度外推

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.012

**中图分类号** TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0079-05

## RCS Frequency Full Angle Extrapolation Based on One-dimensional Scattering Center Model

ZHENG Shuyu<sup>1</sup>, ZHANG Xiaokuan<sup>1</sup>✉, LIU Ming<sup>2</sup>, XU Jiahua<sup>1</sup>, ZHAO Weichen<sup>3</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Equipment Management and UAV Engineering College, Air Force Engineering University,  
Xi'an 710051, China; 3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Target RCS fitting extrapolation is one of the effective means to save storage space of target RCS database. In this paper, based on the target echo data obtained by FEKO and the classical spectral estimation algorithm, a frequency full angle extrapolation of RCS of a typical missile warhead target is performed. First, based on the simulation data of 1~2 GHz, the parameters of the GTD (geometric theory of diffraction) scattering center model is extracted. Secondly, the RCS of the warhead target at 3 GHz and 4 GHz is extrapolated by using the proposed method. Finally, the extrapolated data are compared with the data obtained by FEKO, and the accuracy and the reliability of the extrapolation method proposed are verified. The simulation results show that the extrapolation results and the simulation results of FEKO are a highly similarity on the overall trend and at the strong scattering points, which can also be used to effectively describe the scattering characteristics of radar targets. The proposed method provides a theoretical

**收稿日期:** 2019-07-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61372033)

**作者简介:** 郑舒予(1996—), 男, 吉林吉林人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理与电磁散射理论研究。E-mail: 1846372244@qq.com

**通信作者:** 张小宽(1973—), 男, 陕西扶风人, 教授, 硕士生导师, 主要从事雷达目标电磁散射研究。E-mail: ezxk@sina.com

**引用格式:** 郑舒予, 张小宽, 刘铭, 等. 基于一维散射中心模型的 RCS 频率全角度外推[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 79-83. ZHENG Shuyu, ZHANG Xiaokuan, LIU Ming, et al. RCS Frequency Full Angle Extrapolation Based on One-dimensional Scattering Center Model[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 79-83.

support for RCS frequency full angle extrapolation and has a wide application in military.

**Key words:** scattering centers; parameter extraction ; FEKO ; RCS frequency full angle extrapolation

通过建立 GTD 散射中心模型并估计提取其中散射参数,进而利用模型实现目标的 RCS 频率和角度外推,可大大节省存储空间,这对于实时仿真、雷达目标识别等应用领域具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

许多学者对雷达目标 RCS 数据拟合与外推进行了比较深入的研究<sup>[3-7]</sup>,解决了 RCS 数据库存储空间过大及在某些条件下目标 RCS 难以测量等雷达目标回波数据实测问题,为非合作目标 RCS 预测与估计提供了可靠参考。但多数研究只针对某一固定角度实现目标的 RCS 频率外推,尚未有文献对目标 RCS 频率全角度外推进行研究,导致 RCS 外推在某些特定角度上具有较好的外推结果,而在其他角度域内效果较差,因此具有较大的局限性。

针对上述问题,本文对 RCS 频率全角度外推进行研究。基于 GTD 散射中心模型,将 FEKO 仿真得到的目标后向散射电场数据及 RCS 数据作为原始数据,利用盖尔圆算法、改进的 TLS\_ESPRIT 算法、最近邻域准则法、最小二乘法分别对 GTD 散射中心模型中的散射参数估计提取,并将提取出的参数用于目标频率全角度外推。仿真表明本文的外推数据与 FEKO 仿真数据具有较高的吻合度,验证了本文方法的可靠性与准确性。

## 1 GTD 散射中心模型

典型的散射中心模型主要包括理想点散射中心模型<sup>[8]</sup>、衰减指数和模型<sup>[9]</sup>、基于几何绕射理论(GTD)模型<sup>[10-12]</sup>、属性散射中心模型<sup>[13-16]</sup> 4 种。GTD 模型对光学区雷达目标的描述更为准确,其表达形式更接近实际的散射机理。本文采用 GTD 模型对目标的散射中心进行参数提取。以宽带雷达为例,目标的后向散射电场的 GTD 散射中心模型为:

$$E(f_m) = \sum_{i=1}^I C_i D_i + \omega(f_m) \quad (1)$$

$$C_i = A_i (j f_m / f_0)^{\alpha_i} \quad (2)$$

$$D_i = \exp(-4\pi j f_m \mathbf{r}_i / c) \quad (3)$$

式中: $I$  为散射中心数目; $A_i$  为散射强度; $\mathbf{r}_i$  为散射中心位置矢量; $f_m = \Delta f_0 + f_m$ ,  $f_0$  为初始频率,  $\Delta f$  为步进频率,  $m$  为步进数;  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 表示电磁波的传播速度;  $\omega(f_m)$  为加性复高斯白噪声;  $\alpha_i$  为第  $i$  个散射中心对应的散射类型,其中参数  $\alpha$  根据散射体结构的不同选取不同的值,且为  $1/2$  的整数倍<sup>[17]</sup>。对不同的典型散射结构,  $\alpha$  的取值见表 1。

表 1 典型散射结构的  $\alpha$  值

典型散射结构	$\alpha$ 取值
二面角、三面角、平面法向反射	1
单曲面反射、圆柱面反射	0.5
双曲面反射、球面反射	0
边缘绕射	-0.5
尖顶绕射	-1

## 2 基于 GTD 散射中心模型估计散射参数

GTD 散射中心模型主要包括散射中心数目  $I$ 、散射强度  $A_i$ 、散射中心位置矢量  $\mathbf{r}_i$ 、散射类型  $\alpha_i$  共 4 类未知的待定参数,利用 FEKO 仿真得到的目标散射回波数据并结合盖尔圆算法、改进的 TLS\_ESPRIT 算法、最近邻域准则法、最小二乘法可对上述 4 类参数进行估计提取。

### 2.1 GTD 散射中心模型的简化

由于式(1)有指数函数和幂函数 2 种形式,参数估计处理比较困难,因此将式(1)进行简化近似处理。得 GTD 散射中心模型的简化式:

$$E(f_m) = \sum_{i=1}^I B_i P_i^m + \omega(f_m) \quad (4)$$

式中:

$$B_i = A_i \exp(j \frac{\pi \alpha_i}{2}) \exp(-4\pi j f_0 \mathbf{r}_i / c) \quad (5)$$

$$P_i = (1 + \alpha_i \frac{\Delta f}{f_0}) \exp(-4\pi j \Delta f \mathbf{r}_i / c) \quad (6)$$

根据式(6)可知,只要求出  $P_i$ ,就可得到散射位置参数及散射类型参数,求解公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{r}_i = \frac{-\text{angle}(P_i)c}{4\pi \Delta f} \quad (7)$$

$$\alpha_i \approx \frac{\ln |P_i| f_0}{\Delta f} \quad (8)$$

GTD 散射中心模型经过近似化简后,散射系数估计问题就可转化为经典空间谱估计问题,因此可利用经典空间谱估计算法对散射参数进行提取。

### 2.2 基于盖尔圆算法确定散射中心数目

本文基于盖尔圆算法<sup>[18]</sup>确定散射中心数目,其判断准则见式(9):

$$\text{GDE}(k) = r_k - \frac{D(L)}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} r_i > 0 \quad (9)$$

式中: $D(L) \in [0, 1]$  是与快拍数有关的调整因子;  $k$

$\in [1, m-2]$ , 当  $k$  从小取到大时, 假设 GDE( $k$ ) 第 1 次出现负数对应为  $k_0$ , 则散射中心数目为  $k_0 - 1$ 。

### 2.3 基于改进的 TLS-ESPRIT 算法估计散射中心位置参数

在确定散射中心数目的前提下, 本文基于谱估计方法中改进的 TLS-ESPRIT 算法对散射中心位置参数进行估计提取, 主要过程如下:

1) 在 FEKO 仿真得到的目标后向散射电场数据中选取 2 个  $P \times 1$  维向量  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ , 其中:

$$\mathbf{x}_1(m) = [E(f_m), E(f_{m+1}), \dots, E(f_{m+P-1})]^T$$

$$\mathbf{x}_2(m) = [E(f_{m+1}), E(f_{m+2}), \dots, E(f_{m+P})]^T = \mathbf{x}_1(m+1)$$

$E(f_m), E(f_{m+1}), \dots, E(f_{m+P})$  对应不同频率下 FEKO 的目标后向散射电场数据。根据  $\mathbf{x}_1(m), \mathbf{x}_2(m)$  构造矩阵:

2) 求  $\mathbf{Z}$  的自相关矩  $\mathbf{R}_{ZZ}$ , 并对  $\mathbf{R}_{ZZ}$  进行特征值分解;

3) 提取  $\mathbf{R}_{ZZ}$  的信号子空间  $\mathbf{U}_S$  并将其分成 2 个部分  $\mathbf{U}_{S1}$  和  $\mathbf{U}_{S2}$ , 构造:  $\mathbf{U}_{S12} = [\mathbf{U}_{S1}, \mathbf{U}_{S2}]$

4) 计算下列特征值分解:

$\mathbf{U}_{S12}^H \mathbf{U}_{S12} = \mathbf{F} \mathbf{\Lambda} \mathbf{F}^H$ , 并将  $\mathbf{F}$  分解成  $k \times k$  的 4 个子矩阵即:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} \end{bmatrix}$$

5) 计算  $\mathbf{P}_i = -\mathbf{F}_{12} \mathbf{F}_{21}^{-1}$ , 根据式(7)可估算出散射中心的位置参数  $\mathbf{r}_i$ 。

### 2.4 基于最近邻域准则估计散射中心类型参数

对于不同的散射结构, 会对应不同的散射中心类型参数; 即使是对于同一散射结构, 在不同观测角度下也会对应不同的类型参数, 因此需要对散射类型参数进行实时估计提取, 以确保散射中心模型对目标散射特性描述的准确性。采用谱估计改进的 TLS-ESPRIT 算法可以解算出  $\mathbf{P}_i$ , 根据式(8)可以估计散射中心类型参数  $\alpha_i$ , 但由此得出的  $\alpha_i$  需要利用最近邻域准则进行离散化分类处理, 使其属于表 1 中的 5 种类型。

### 2.5 基于最小二乘法提取散射中心强度

GTD 散射中心模型的目标散射回波可用式(10)表示<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}' \mathbf{S}^* + \mathbf{w} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{X} = [E(f_0), E(f_1), \dots, E(f_{m-1})]^T$  为不同频率下的目标散射回波数据;  $\mathbf{S}^* = [A_1, A_2, \dots, A_I]^T$  为不同散射中心的散射强度;  $\mathbf{w}$  为不同频率下的高斯白噪声。

$$\mathbf{A}' = [\alpha'_1(\alpha_i, \mathbf{r}_1), \alpha'_2(\alpha_i, \mathbf{r}_2), \dots, \alpha'_I(\alpha_i, \mathbf{r}_I)] \quad (11)$$

$$\alpha'_i(\alpha_i, \mathbf{r}_i) = \begin{bmatrix} (j \frac{f_0}{f_0})^{\alpha_i} \exp(-4\pi j f_0 \mathbf{r}_i / c) \\ (j \frac{f_1}{f_0})^{\alpha_i} \exp(-4\pi j f_1 \mathbf{r}_i / c) \\ \vdots \\ (j \frac{f_{m-1}}{f_0})^{\alpha_i} \exp(-4\pi j f_{m-1} \mathbf{r}_i / c) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{X}$  是已知回波电场数据, 而  $\mathbf{A}'$  可由式(10)及式(11)估计得到, 因此估计散射强度参数就转化为求未知矩阵  $\mathbf{S}^*$  问题。根据最小二乘法可得:

$$\mathbf{S}^* = (\mathbf{A}'^H \mathbf{A}')^{-1} \mathbf{A}'^H \mathbf{X} \quad (13)$$

## 3 目标 RCS 频率全角度外推

以弹头目标为例, 通过 FEKO 仿真数据与散射中心参数提取算法提取 4 种散射参数, 由此可构建弹头目标的一维 GTD 散射中心模型, 并对目标的 RCS 进行频率全角度外推。外推流程见图 1。

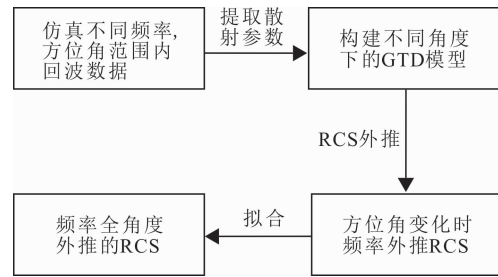


图 1 RCS 频率全角度外推流程图

### 3.1 外推原理

目标雷达散射面积(RCS)是表征雷达目标对电磁波散射能力的一个物理量, 定义为:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{E}^s$  为散射电场强度;  $\mathbf{E}^i$  为入射电场强度。

在散射中心模型中的散射参数已知的条件下, 目标后向散射电场频率响应可用 GTD 散射中心模型表征:

$$E(f_m) = \sum_{i=1}^I A_i (j f_m / f_0)^{\alpha_i} \exp(-4\pi j f_m \mathbf{r}_i / c) \quad (15)$$

因此式(14)可由式(16)表示:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E(f_m)|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (16)$$

根据式(16)可对目标 RCS 进行频率外推。

### 3.2 频率全角度外推仿真实验

某型弹头目标 CAD 模型如图 2 所示, 利用 FEKO 电磁仿真软件计算其某一频段内的全角度后向散射回波数据, 并以此估计散射参数并构建 GTD 散射中心模型, 实现弹头目标 RCS 的频率全角度外推。

推,入射电磁波具体入射参数的设置如下:仿真入射频率为1~2 GHz,频率步进为0.04 GHz,方位角取0°~180°。本文仿真所用的弹头目标是轴对称的,HH(水平)极化与VV(垂直)极化仿真结果在趋势上基本一致,因此本文仅以HH极化为例进行仿真。利用上述回波数据提取散射参数从而外推频率3 GHz、4 GHz下的目标电场值与RCS值。

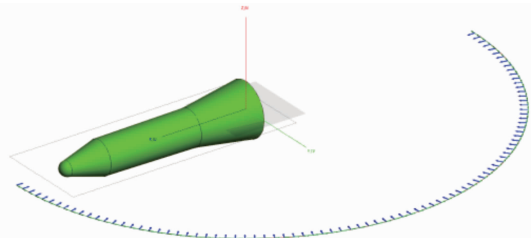


图2 某型弹头 RCS 计算示意图

根据回波数据估计出散射参数并得到 GTD 散射中心模型,基于模型外推弹头目标在 3 GHz 及 4 GHz、HH 极化下的回波电场值与 RCS 值,并与 FEKO 仿真结果进行对比,对比结果见图 3~6。

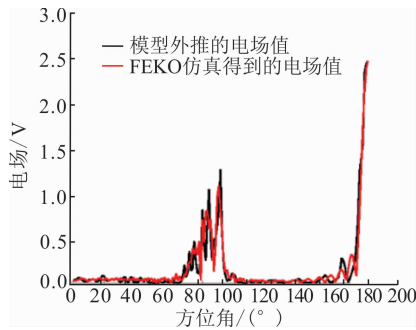


图3 3 GHz、HH 极化电场数值对比

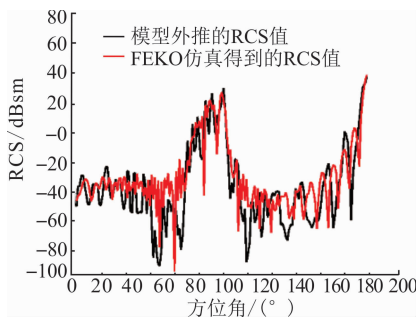


图4 3 GHz、HH 极化 RCS 数值对比

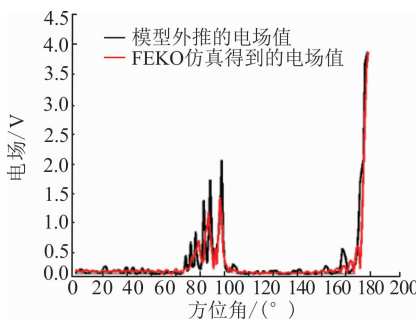


图5 4 GHz、HH 极化电场数值对比

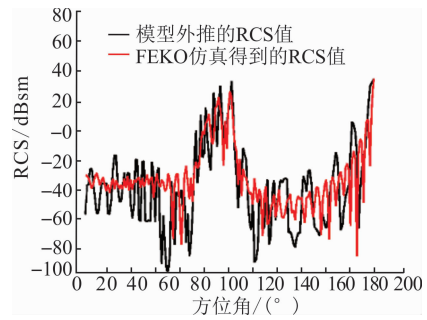


图6 4 GHz、HH 极化 RCS 数值对比

由图 3~图 6 结果可知,本文算法仿真结果与 FEKO 的仿真结果在整体趋势及强散射点对应的位置上具有较高的吻合度。强散射中心是由侧面及尾部的镜像散射引起的,目标的回波电场及 RCS 幅值较大,此时模型频率外推的结果较好,吻合度最高。但对散射回波较弱的角域,随着外推频率的增大,拟合效果变差,因为该区域散射强度较弱因此模型的拟合结果欠佳,这也从侧面说明 GTD 模型对强散射体的描述更为准确。

综上所述,利用 GTD 散射中心模型对某型弹头目标 RCS 频率全角度外推可取得较为准确的结果。根据仿真结果可以看出,在准确估计散射中心模型参数的基础上,基于目标强散射点对应的回波数据进行散射参数估计提取,可实现目标 RCS 频率全角度外推,进而构建的 GTD 散射中心模型可较为准确地描述目标散射特性。

### 4 结语

本文提出一种基于一维散射中心模型的 RCS 频率全角度外推方法,该方法利用已有的仿真数据实现对未知频率全角度 RCS 数据外推,并能够对目标 RCS 预测与目标 RCS 数据库构建提供理论支撑,可节省存储空间,解决雷达目标探测、目标识别等对 RCS 数据的需求问题,具有广泛的军事应用前景。

### 参考文献(References):

[1] 聂在平,方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模[M]. 北京:国防工业出版社,2009.  
NIE Z P, FANG D G. Modeling of Electromagnetic Scattering Characteristics of Target and Environment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

[2] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.  
HUANG P K, YIN H C, XU X J. Radar Target Characteristics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)

- [3] 邱志强. 基于空间谱估计的雷达目标散射中心提取研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.  
QIU Z Q. Extraction of Radar Target Scattering Center Based on Spatial Spectral Estimation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [4] 王菁. 光学区雷达目标散射中心提取及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.  
WANG J. Extraction and Application of Radar Target Scattering Center in Optical Region [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [5] 胡艳. 复杂散射体 RCS 频率特性曲线的拟合与外推[D]. 成都:电子科技大学,2007.  
HU Y. Fitting and Extrapolation of RCS Frequency Characteristic Curves of Complex Scatters [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [6] 熊邺,方大纲,刘铁军. 电磁场数值计算中的内插与外推[J]. 电波科学学报,2002,17(4):325-333.  
XIONG Y, FANG D G, LIU T J. Interpolation and Extrapolation of Electromagnetic Field Numerical Calculation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(4): 325-333. (in Chinese)
- [7] QUAN X Y, ZHANG B C, WANG Z D, et al. An Efficient Data Compression Technique Based on BPDN for Scattered Fields from Complex Targets[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(10): 109302.
- [8] WEHNER D R. High Resolution Radar[M]. 2nd Ed. Boston, MA: Artech House, 1995.
- [9] HURST M P, MITTRA R. Scattering Center Analysis via Prony's Method[J]. IEEE Trans AP, 1987, 35(8): 986-988.
- [10] BHALLA R, LING H. 3D Scattering Center Extraction Using SBR Technique[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1996, 44(11): 1445-1453.
- [11] YAN H, LI S, LI H M, et al. Monostatic GTD Model for Double Scattering Due to Specular Reflections or Edge Diffractions[C]//2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2018.
- [12] YU X X, HUO Y H, YING C, et al. Performance Analysis for Two Parameters Estimation Methods of GTD Model[C]//2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. [S. l.]: IEEE, 2018.
- [13] JIA S Q, LA D S. Tomographic SAR Imaging Based on GTD Model and Compressed Sensing[C]// 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. [S. l.]: IEEE, 2016.
- [14] DING B Y, WEN G J, ZHONG J R, et al. Robust Method for the Matching of Attributed Scattering Centers with Application to Synthetic Aperture Radar Automatic Target recognition[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(1): 016010.
- [15] POTTER L C, MOSES R L. Attributed Scattering Centers for SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 5(1): 79-91.
- [16] DING B Y, WEN G J, HUANG X H, et al. Data Augmentation by Multilevel Reconstruction Using Attributed Scattering Center for SAR Target Recognition [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(6): 979-983.
- [17] 贺治华,张旭峰,黎湘. 一种 GTD 模型参数估计的新方法[J]. 电子学报,2005,33(9): 1679-1682.  
HE Z H, ZHANG X F, LI X. A New Method for Parametric Estimation of GTD Model [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1679-1682. (in Chinese)
- [18] WU H T, YANG J F, CHEN F K. Source Number Estimators Using Transformed Gerschgorin Radii[J]. IEEE SP, 1995, 43(6): 1325-1333.
- [19] POTTER L C, GUPTA I J. A Parametric Model for Radar Scattering [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1995, 43(10): 1058-1068.

(编辑:徐敏)