

# 基于一维散射中心匹配的雷达目标识别

付耀文, 贾宇平, 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文提出了一种新的基于目标一维散射中心匹配的雷达目标识别方法. 该方法在计算两目标匹配函数之前, 先根据目标尺寸大小在目标中心附近设定一个距离窗, 将位于此距离窗以外的散射中心剔除, 以减轻目标区域以外虚假散射中心的影响. 对剩下的目标散射中心, 根据两目标散射中心之间的距离, 对目标之间的散射中心配对, 然后定义两目标的匹配函数为所有配对散射中心的“匹配能量”和与两目标所有散射中心能量和的比值. 对五类目标缩比模型的外场测量数据进行分类识别实验, 结果表明该方法具有良好的目标识别能力, 而且对加性高斯白噪声和雷达带宽不敏感.

**关键词:** 雷达目标识别; 一维散射中心; 匹配函数

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 03-0404-05

## Radar Target Classification Based on One Dimensional Scattering Centers Matching

FU Yao-wen, JIA Yu-ping, ZHUANG Zhao-wen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract** This paper presents a new approach to radar target classification based on one-dimensional scattering centers matching. This approach firstly excludes the spurious scattering centers outside of target region using the range window around target region. Then the scattering centers of two targets are associated in pairs according to their relative ranges. The matching function of two targets is defined by the ratio of the total “matching energy” of all the matched scattering center pairs and the total energy of the two targets’ scattering centers. The performance of the proposed approach is examined through classification experiments. The results show that this approach has good target classification capability, and it is robust to additive Gaussian white noise and radar bandwidth.

**Key words** radar target classification; one-dimensional scattering centers matching function

### 1 引言

在光学区, 目标总的电磁散射可以等效为多个散射中心的电磁散射合成. 目标的散射中心主要产生于目标的边缘、凸面曲率不连续点、棱角及尖端等部位, 代表了目标的精细物理结构. 散射中心是光学区雷达目标识别的一个重要基础. 利用目标宽频带频率响应所具有的高距离分辨能力, 可以对目标径向散射中心进行孤立. 对目标宽频带频率响应作逆付立叶变换可以得到目标散射中心在目标径向距离上的投影分布, 即目标一维距离像. 对目标宽频带的频率响应进行参数建模, 通过估计模型参数可以直接求出更为准确的目标径向一维散射中心的相对位置、强度和大致类型. 目标一维距离像和一维散射中心反映了目标径

向精细的结构特征, 而且相对于雷达目标二维成像来说, 目标一维距离像或一维散射中心的获取与处理要简单的多. 因此, 利用目标一维距离像或目标一维散射中心进行目标识别是一个非常具有吸引力的雷达目标识别方案, 也是当前国内外研究的一个热点课题<sup>[1~3]</sup>.

目标一维距离像和一维散射中心对姿态角非常敏感, 这是利用目标一维距离像和一维散射中心进行目标识别所要克服的主要问题. 处理这个问题的一种思路是在方位和俯仰方向分别以一定角度间隔建立全姿态的目标一维距离像或一维散射中心的模板库, 采用模板匹配法进行目标识别<sup>[4~7]</sup>. 对目标一维距离像来说, 该方法的主要缺点是为了存储所有目标类别全姿态的一维距离像需要非常大的存储空间. 和直接存储目标一维距离像相比, 存储目

标一维散射中心需要的存储空间要少的多。但是在提取目标一维散射中心时, 散射中心的数目一般都是由算法自动选取。由不同目标或同一目标处于不同姿态角的测量数据提取的散射中心数目一般都不相同, 甚至由同一目标相同姿态角下不同信噪比的测量数据提取的散射中心数目都可能不同, 因此直接利用一维散射中心匹配来识别目标时, 构造合适的目标匹配函数显得尤为重要<sup>[7]</sup>。

文献[7]在假定目标散射中心距离已经对准了的情况下, 介绍了一种基于目标一维散射中心匹配的目标识别方法。但是其定义的目标匹配函数对目标各个散射中心相对距离、幅度考虑不够, 而且也没有考虑由于噪声导致的目标区域以外虚假散射中心的影响。针对其不足, 本文提出了一种新的基于目标一维散射中心匹配的目标识别方法。该方法在计算两目标匹配函数之前, 先根据目标尺寸大小在目标中心附近设定一个距离窗, 将位于此距离窗以外的散射中心剔除, 以减轻目标区域以外虚假散射中心的影响。对剩下的目标散射中心, 根据两目标散射中心之间的距离, 对目标之间的散射中心配对, 然后定义两目标的匹配函数为所有配对散射中心的“匹配能量”和与两目标所有散射中心能量和的比值。对五类目标缩比模型的外场测量数据进行分类识别实验, 结果表明该方法具有良好的目标识别能力, 而且对加性高斯白噪声和雷达带宽不敏感。

## 2 基于矩阵束方法的一维散射中心提取

在光学区, 目标总的电磁散射可以等效为一些离散的散射中心的电磁散射的叠加, 对于频率步进雷达, 目标回波模型可以近似表示为<sup>[7]</sup>:

$$y(k) = \sum_{m=1}^M d_m p_m^k, \quad k=0 \dots, N-1 \quad (1)$$

这就是目标频率响应的指数和模型,  $y(k)$  为第  $k$  个频率点的目标频域 RCS,  $N$  为频率步进数,  $M$  表示目标散射中心的数目,  $d_m$  表示散射中心的强度,  $p_m$  称为模型的极点,  $p_m$  的模  $|p_m|$  反映了散射中心的几何类型,  $p_m$  的相角  $\arg(p_m)$  反映了散射中心的相对距离。相角  $\arg(p_m)$  与散射中心相对距离  $r_m$  的关系为:

$$r_m = -\frac{\arg(p_m) c}{4\pi \Delta f}, \quad m=1 \dots, M \quad (2)$$

$\Delta f$  是跳频间隔,  $c$  是光速。散射中心  $\{d_m, p_m\}$  的能量定义为:

$$E_m = \sum_{k=0}^{N-1} |d_m|^2 |p_m|^k = |d_m|^2 \frac{1 - |p_m|^N}{1 - |p_m|^2} \quad (3)$$

模型参数集  $\{d_m, p_m\}_{m=1}^M$  精确地表征了目标径向分布的散射中心, 提取目标一维散射中心也就是根据目标频域测量数据  $y(k)$  估计模型参数集  $\{d_m, p_m\}_{m=1}^M$ 。目前指数和模型参数的估计方法有很多, 如 Prony 方法、MUSIC 方法、矩阵束方法等等。矩阵束方法利用指数和信号的性质, 通过求解矩阵束的广义特征值一次性地估计出指数和模型

的极点, 具有很高的计算效率和抗噪声能力。本文中采用矩阵束方法来提取目标一维散射中心。

令:

$$y_k = [y(k), y(k+1), \dots, y(N-L+k-1)]^T \quad (4)$$

$$Y_0 = [y_{L-1}, y_{L-2}, \dots, y_0] \quad (5)$$

$$Y_1 = [y_L, y_{L-1}, \dots, y_1] \quad (6)$$

其中上标  $T$  表示转置,  $L$  称为束参数,  $M \leq L \leq N-M$ 。易知:

$$Y_0 = P_L D P_R \quad (7)$$

$$Y_1 = P_L D P_R \quad (8)$$

其中

$$P_L = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ p_1 & p_2 & \dots & p_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1^{N-L+1} & p_2^{N-L+1} & \dots & p_M^{N-L+1} \end{bmatrix},$$

$$P_R = \begin{bmatrix} p_1^{L-1} & p_1^{L-2} & \dots & \mathbf{1} \\ p_2^{L-1} & p_2^{L-2} & \dots & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{1} \\ p_M^{L-1} & p_M^{L-2} & \dots & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

$$D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_M\}, \quad P = \text{diag}\{p_1, p_2, \dots, p_M\}.$$

如果测量数据  $y(k)$  无噪声影响且严格满足式(1), 可以证明  $Y_0$  的 Moore-Penrose 逆  $Y_0^+$  和  $Y_1$  乘积  $Y_0^+ Y_1$  具有  $M$  个非零特征值和  $L-M$  个零特征值, 其中式(1)中的模型极点  $\{p_m\}_{m=1}^M$  就等于  $Y_0^+ Y_1$  的  $M$  个非零特征值<sup>[8]</sup>。这样就将模型极点的估计问题转化为求取  $Y_0^+ Y_1$  的  $M$  个非零特征值问题。实际上由于噪声及模型误差的影响, 矩阵  $Y_0^+ Y_1$  的特征值一般都是非零的。

目标散射中心的数目  $M$  一般是未知的, 需要依某种准则自动估计, 可以采用赤池信息量准则 (AIC) 法或最小描述长度 (MDL) 法来估计  $M$ <sup>[9, 10]</sup>。确定了散射中心数目  $M$  后, 为减小噪声和模型误差的影响, 对  $Y_0, Y_1$  进行奇异值分解<sup>[11]</sup>:

$$Y_0 = [U_0, U'_0] \begin{bmatrix} S_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S'_0 \end{bmatrix} [V_0, V'_0] \quad (9)$$

$$Y_1 = [U_1, U'_1] \begin{bmatrix} S_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S'_1 \end{bmatrix} [V_1, V'_1] \quad (10)$$

其中  $S_0$  是  $Y_0$  的  $M$  个主奇异值构成的对角矩阵,  $U_0, V_0$  是  $Y_0$  的  $M$  个主左、右奇异矢量构成的矩阵,  $S'_0$  是  $Y_0$  的非主奇异值构成的对角矩阵,  $U'_0, V'_0$  是  $Y_0$  的非主左、右奇异矢量构成的矩阵,  $S_1, U_1, S'_1, U'_1, V'_1$  的含义与此类似。令:

$$Y_{0r} = U_0 S_0 V_0 \quad (11)$$

$$Y_{1r} = U_1 S_1 V_1 \quad (12)$$

用  $Y_{0r}, Y_{1r}$  分别代替  $Y_0, Y_1$  估计式(1)中的模型极点  $\{p_m\}_{m=1}^M$ , 即计算矩阵  $Y_{0r}^+ Y_{1r}$  的  $M$  个最大的特征值作为模型极点  $\{p_m\}_{m=1}^M$ 。

求得了模型极点  $\{p_m\}_{m=1}^M$  后, 这  $M$  个极点  $\{p_m\}_{m=1}^M$  对

应的幅度系数  $\{d_m\}_{m=1}^M$ , 通过式 (13) 求出:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix} = (\tilde{P}^H \tilde{P})^{-1} \tilde{P}^H \begin{bmatrix} y(0) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \tilde{P} = \begin{bmatrix} p_1^0 & \cdots & p_M^0 \\ \vdots & & \vdots \\ p_1^{N-1} & \cdots & p_M^{N-1} \end{bmatrix}.$$

### 3 基于一维散射中心匹配的目标识别

#### 3.1 算法基本思路

目标一维散射中心反映了目标径向精细的结构特征, 当目标姿态角变化较小时, 目标一维散射中心相对不变. 基于一维散射中心匹配的目标识别的基本思路是:

(1) 根据测得的目标频域 RCS 数据, 采用参数建模的方法提取目标的一维散射中心;

(2) 在方位和俯仰方向分别以一定角度间隔建立所有类别目标的全姿态一维散射中心模板库;

(3) 根据测得的待识别目标的频域 RCS 数据, 用同样的方法提取待识别目标的一维散射中心, 计算其与模板库中所有一维散射中心模板的匹配函数. 如果已知待识别目标姿态角的大致范围, 可以只用这个姿态角范围内的模板与待识别目标的一维散射中心进行匹配, 从而减少计算量、提高识别性能;

(4) 将待识别目标判为匹配函数值最大的模板所对应的目标类别.

目标一维散射中心比目标一维距离像更为精确地表征了目标径向的结构特征, 而且和直接存储目标一维距离像相比, 存储目标一维散射中心需要的存储空间要少得多. 但是在提取目标一维散射中心时, 散射中心的数目一般都是由算法自动选取. 由不同目标或同一目标处于不同姿态角的测量数据提取的散射中心数目一般都不相同, 甚至由同一目标相同姿态角下不同信噪比的测量数据提取的散射中心数目都可能不同, 因此利用一维散射中心匹配来识别目标时, 构造合适的目标匹配函数显得尤为重要.

#### 3.2 匹配函数定义

设提取的目标一维散射中心为  $\{d_i, p_i\}_{i=1}^M$ , 则散射中心  $\{d_i, p_i\}$  对应的时域响应  $Y_i(r)$  为<sup>[12]</sup>:

$$Y_i(r) = \frac{d_i e^{-j2\pi r/R}}{e^{-j2\pi r/R} - p_i} \quad (14)$$

$R = \frac{c}{2\Delta f}$  为最大不模糊距离. 该目标对应的时域响应  $Y(r)$  为:

$$Y(r) = \sum_{i=1}^M \frac{d_i e^{-j2\pi r/R}}{e^{-j2\pi r/R} - p_i} \quad (15)$$

设目标 A 的一维散射中心为  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}_{i=1}^{M_A}$ , 目标 B 的一维散射中心为  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}_{j=1}^{M_B}$ . 文献[7]在假定两目标散射中

心距离对准了的情况下定义了一种目标匹配函数, 其定义如式 (16) 示:

$$f_{AB} = \sum_{i=1}^{M_A} \sum_{j=1}^{M_B} f_{ij} \quad (16)$$

式 (16) 中  $f_{ij}$  表示目标 A 中散射中心  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}$  和目标 B 中散射中心  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}$  两散射中心的匹配函数, 其定义如式 (17) 示:

$$f_{ij} = \int_r Y_{Ai}(r) Y_{Bj}^*(r) dr = \left| \frac{d_{Ai} d_{Bj}^*}{1 - p_{Ai} p_{Bj}^*} \right| \quad (17)$$

式 (17) 中上标\* 表示取共轭.

由式 (16) 定义的两目标匹配函数不能很好地反映两目标一维散射中心的匹配程度. 首先, 式 (16) 中定义的两目标匹配函数对散射中心之间的相对位置考虑不够, 它是其中一个目标所有散射中心与另一个目标所有散射中心由式 (17) 定义的散射中心匹配函数的和, 待识别目标和模板库中散射中心数目越多的目标的匹配函数值可能越大. 其次, 由式 (17) 定义的两个散射中心的匹配函数是这两个散射中心时域响应的相关, 同一散射中心和幅度越大的散射中心的匹配函数值越大, 因此其并不能很好地表征两散射中心的匹配程度. 另外, 由于噪声的影响, 在提取的目标一维散射中心中也可能含有目标区域以外的虚假散射中心, 这些虚假的散射中心将降低目标识别的性能, 文献[7]中也没有考虑.

针对上述问题, 在计算两目标匹配函数之前, 先根据目标尺寸大小在目标中心附近设定一个距离窗, 将位于此距离窗以外的散射中心剔除以减轻目标区域以外虚假散射中心的影响. 然后在假定两目标散射中心距离已对准的情况下, 根据两目标散射中心之间的距离对两目标剩下的散射中心配对. 最后定义两目标的匹配函数为所有配对散射中心的“匹配能量”与两目标所有散射中心能量和的比值.

设经过距离加窗后目标 A 和目标 B 剩下的散射中心为  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}_{i=1}^{M_A}$  和  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}_{j=1}^{M_B}$ , 且目标 A 和目标 B 的散射中心的距离已经对准, 对两目标散射中心配对的具体步骤如下:

(1) 根据式 (2) 计算目标 A 和目标 B 的散射中心的相对距离  $\{r_{Ai}\}_{i=1}^{M_A}$  和  $\{r_{Bj}\}_{j=1}^{M_B}$ ;

(2) 设以目标 A 为基准, 从  $i=1$  开始, 从目标 B 的散射中心  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}_{j=1}^{M_B}$  中未被配对的散射中心中找出与目标 A 的散射中心  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}$  相对距离差最小且小于某一门限的散射中心, 则认为目标 B 中该散射中心与目标 A 的散射中心  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}$  配对, 否则认为目标 B 中没有散射中心与目标 A 的散射中心  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}$  配对.

设目标 A 和目标 B 共有 C 对配对散射中心为  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}_{i=1}^C$  和  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}_{j=1}^C$ , 定义配对散射中心  $\{d_{Ai}, p_{Ai}\}_{i=1}^C$  和  $\{d_{Bj}, p_{Bj}\}_{j=1}^C$  的“匹配能量”  $E_{Mk}$  为:

$$E_{Mk} = 2 \left| \frac{c_{ki} c_{bj}^*}{1 - p_{Ai}^* p_{Bj}} \frac{1 - (p_{Ai}^* p_{Bj})^N}{1 - p_{Ai}^* p_{Bj}} \right| \quad (18)$$

在利用参数建模提取目标一维散射中心的时候是按照能量从大到小依次正确提取出目标散射中心, 能量大的散射中心对应的参数精度高, 能量小的散射中心对应的参数精度差, 虚假散射中心的能量比较小, 因此我们定义目标 A 和目标 B 的匹配函数  $f_{AB}$  为所有配对散射中心的“匹配能量”和与两目标所有散射中心能量和的比值:

$$f_{AB} = \frac{\sum_{k=1}^c E_{Mk}}{\sum_{i=1}^{M_A} E_{Ai} + \sum_{j=1}^{M_B} E_{Bj}} \quad (19)$$

4 实验结果与分析

实验中所用数据为五种飞机目标缩比模型的外场测量数据. 频率范围为 34.7~35.7GHz, 带宽 100MHz, 步进频率间隔为 2MHz, 极化状态为垂直发射-水平接收. 目标的俯仰角为 0°, 方位角范围为 0~30°, 方位间隔为 1°.

在方位角 0~30°范围内每 3°取一组目标频域测量数据, 对每组带宽为 100MHz 的 500 点频域测量数据每隔 4 点取一个, 即数据点数为 100, 采用矩阵束法提取目标一维散射中心作为模板. 对方位角 0~30°的原始测量数据加入零均值高斯白噪声, 信噪比 SNR 定义如式 (20):

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |y(k)|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |n(k)|^2} \quad (20)$$

每个方位角下加噪声产生 10 个数据样本, 按同样的步骤提取目标一维散射中心作为测试样本. 信噪比 SNR = 25dB, SNR = 15dB, SNR = 10dB 时, 识别结果如表 1 所示.

表 1 带宽为 100MHz, SNR 分别为 25dB, 15dB, 10dB 时的识别结果

目标 识别率 %	F	J	H	W	Y
25dB	87. 7	96. 5	89. 4	68. 4	78. 1
15dB	75. 9	98. 4	85. 2	62. 6	84. 5
10dB	74. 8	95. 7	88. 1	61. 3	84. 5

由表 1 可得在带宽为 100MHz, 信噪比 SNR = 25dB, SNR = 15dB, SNR = 10dB 时, 五类目标的平均识别率分别为 84%、81.3%、80.9%, 可见噪声对该目标识别方法的性能影响不大. 这主要是因为噪声对能量大的散射中心的估计精度影响不大, 对能量小的散射中心的估计精度影响较大, 由噪声导致的虚假散射中心的能量也较小, 而小能量的散射中心对该方法中定义的目标匹配函数影响不大. 另外, 通过对目标一维散射中心进行距离加窗以剔除目标区域以外的虚假散射中心也有一定的抑制噪声作用.

为了评估雷达带宽对该识别方法性能的影响, 在信噪比 SNR = 25dB 的条件下, 分别取目标 500 点频域测量数

据的前 300 点、200 点 (对应带宽分别为 60MHz, 40MHz) 作为原始测量数据. 同样, 在方位角 0~30°范围内每 3°取一组目标频域测量数据, 采用矩阵束法提取目标一维散射中心作为模板. 对方位角 0~30°的原始测量数据加入零均值高斯白噪声, 每个方位角下加噪声产生 10 个数据样本, 提取目标一维散射中心作为测试样本. 在用矩阵束法提取目标一维散射中心时, 对 300 点的频域测量数据每隔 2 点取一个, 对 200 点的频域测量数据每隔 1 点取一个, 这样对不同带宽的频域测量数据用矩阵束法提取目标一维散射中心时的数据点数都为 100. 识别结果如表 2 所示. 带宽为 100MHz 的识别结果也一起列出.

表 2 SNR 为 25dB, 带宽为 100MHz, 60MHz, 40MHz 时的识别结果

目标 识别率 %	F	J	H	W	Y
100MHz	87. 7	96. 5	89. 4	68. 4	78. 1
60MHz	84. 8	96. 8	91. 3	63. 7	74. 1
40MHz	84. 5	92. 9	81. 6	72. 9	80. 1

由表 2 可得在信噪比 SNR = 25dB, 带宽为 100MHz, 60MHz, 40MHz 时, 五类目标的平均识别率相当, 分别为 84%、82.1%、82.4%. 可见雷达带宽对该目标识别方法的性能影响不大, 这是因为通过参数建模提取目标一维散射中心和通过对目标频域测量数据作逆付立叶变换获取目标一维距离像不一样, 其分辨率不直接受限于雷达带宽.

5 结论

本文提出了一种新的基于目标一维散射中心匹配的目标识别方法. 该方法在计算两目标匹配函数之前, 先根据目标尺寸大小在目标中心附近设定一个距离窗, 将位于此距离窗以外的散射中心剔除以减轻目标区域以外虚假散射中心的影响. 对剩下的目标散射中心, 根据两目标散射中心之间的距离, 对目标之间的散射中心配对, 然后定义两目标的匹配函数为所有配对散射中心的“匹配能量”和与两目标所有散射中心能量和的比值. 对五类目标缩比模型的外场测量数据进行分类识别实验, 结果表明该方法具有良好的目标识别能力, 而且对加性高斯白噪声和雷达带宽不敏感. 需要指出的是该方法中对两目标之间的散射中心配对是根据两目标散射中心之间的距离, 这对两目标散射中心距离对准精度要求很高. 在散射中心距离没有对准的情况如何对两目标之间的散射中心配对是有待进一步研究的问题.

参考文献:

[ 1 ] K T Kin, H T Kin. One-dimensional scattering centre extraction for efficient radar target classification[ J]. EE Proceedings Radar Sonar Navigation, 1999, 146( 3): 147 - 158

- [ 2 ] K T K in, D K Seq, H T K in. Radar target identification using one-dimensional scattering centers[ J]. *EE Proceedings Radar, Sonar Navigation*, **2001**, **148**( 5): **285–296**
- [ 3 ] J M a, H L j, S C A halt. Using support vectorm achines as HRR signature classifiers[ J]. *Proceedings of SPIE*, **2001**, **4379**: **209–215**
- [ 4 ] H J L j, S H Yang. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects[ J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **1993**, **41**( 3): **261–268**
- [ 5 ] S H udson, D Psaltis. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles[ J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **1993**, **29**( 3): **741–748**
- [ 6 ] H J L j, Y D W ang, L H W ang. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets[ J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **1996**, **44**( 4): **444–452**
- [ 7 ] 郭桂蓉, 庄钊文, 陈曾平. 电磁特征抽取与目标识别[ M ]. 长沙: 国防科技大学出版社, **1996**  
Guo Gui-rong, Zhuang Zhao-wen, Chen Zeng-ping. *Electromagnetic feature extraction and target recognition*[ M ]. Changsha: National University of Defense Technology publishing House, **1996** ( in Chinese)
- [ 8 ] Y Hua, T K Sankar. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[ J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, **1990**, **38**( 5): **814–824**
- [ 9 ] M Wax, T Kailath. Detection of signals by information theoretic criteria[ J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, **1995**, **43**( 2): **387–392**
- [ 10 ] M Wax, I Ziskind. Detection of the number of coherent signals by the MDL principle[ J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, **1989**, **37**( 8): **1190–1196**
- [ 11 ] Y Hua, T K Sankar. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise[ J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **1991**, **39**( 4): **892–899**
- [ 12 ] Carrière R, R L Moses. High resolution radar target modeling using a modified prony estimator[ J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **1992**, **40**( 1): **13–18**

#### 作者简介:



付耀文 男, 1976年 5月生于江西省进贤县, 国防科技大学电子科学与工程学院副教授, 主要研究领域包括雷达目标识别、信息融合等. E-mail: fuyaowen76@tom.com



贾宇平 男, 1981年 8月生于北京市, 国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 感兴趣的领域为信息融合、雷达目标识别.