

# 基于 TPF-ESPRIT 的雷达超分辨成像方法研究

马传令 朱玉鹏 付耀文

( 国防科技大学电子科学与工程学院, 空间电子信息技术研究所, 湖南长沙 410073 )

**摘要:** 超分辨雷达成像方法不受瑞利限的限制, 可以极大地提高雷达距离维分辨率, 利于目标识别。针对传统方法不具有频率选择性, 研究了一种基于时域预滤波旋转不变参数估计技术( ESPRIT: Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques )的超分辨谱估计新方法, 并成功应用于雷达距离维成像中。该算法把具有频率选择性的时域预滤波器 and 拓展旋转不变参数估计技术相结合。首先对雷达信号进行粗谱分析, 获得信号频率分布的先验信息, 然后针对性地设计频率选择时域滤波器对原始回波进行预处理, 提高 ESPRIT 方法在目标信号所处频段的谱估计精度, 改善距离维成像质量。仿真实验和暗室数据成像结果表明该方法具有频率选择特性和更好的频谱估计精度。

**关键词:** 距离维成像; 超分辨; 时域预滤波; 频率选择性; 拓展旋转不变参数估计技术

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)01-0151-06

## Super-resolution Radar Imaging based on TPF-ESPRIT

MA Chuan-ling ZHU Yu-peng FU Yao-wen

( Research Institute of Space Electronics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China )

**Abstract:** Super-resolution radar imaging methods break out of Rayleigh Limit, and consequently a remarkable improvement in resolution of radar range profiles favors target recognition. Because conventional schemes lack frequency selectivity, a new super-resolution spectral estimating method based on time-domain pre-filtered ESPRIT technique is studied and successfully applied to radar range imaging. This algorithm combines a frequency-selective time-domain pre-filtered filter with the extension of ESPRIT. Firstly, the prior knowledge of frequency distribution is obtained through a rough estimation of radar echoes, and then an TPF filter designed pertinently is used to pre-filter radar echoes to enhance ESPRIT's estimating precision and imaging quality at frequency band of radar target around. Imaging results of simulation experiments and darkroom measuring data show excellent frequency selectivity and validity of TPF-ESPRIT.

**Key words:** range imaging; super-resolution; time-domain prefiltration; frequency selectivity; extension of ESPRIT

## 1 引言

雷达目标在光学区的电磁散射可以等效为多个孤立散射中心的电磁散射的合成, 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。一维距离像反映了目标的一维结构特征, 是光学区雷达目标识别的重要特征。根据等效多散射中心理论<sup>[1]</sup>, 目标的宽带回波实际上可以由一个一维或二维的谐波模型来描述, 因此雷达成像问题又可以看成一个谱估计问题。基于谱估计的距离维成像方法主要有两类: 一类是非参数化方法, 如傅里叶变换, Capon 方法等。FFT 的分辨

率受到瑞利限的限制, 精度较低, 难以获得满意的雷达图像; Capon 法是广为应用的一种自适应滤波算法, 对于给定的信号, Capon 法能够在期望信号上得到固定的增益, 而在干扰信号上形成零陷以抑制干扰; Jian. Li 和 P. Stoica 提出了一种类似 Capon 方法的幅度相位估计方法( APES: Amplitude and Phase Estimation )<sup>[12]</sup>, APES 方法旁瓣比较低, 对信号幅度的估计较 Capon 法更好些。另一类是基于参数估计的超分辨方法。这类方法突破了瑞利限的限制, 分辨率不受带宽的约束, 而且超分辨方法受数据长度的限制比非参数化方法要小, 如果模型足够准确, 其成像精度和动态范围均优于非参

数字化方法。超分辨方法主要有 MUSIC( Multiple Signal Classification )方法, Prony 方法, MP( Matrix Pencil )方法, RELAX( Relaxation )方法, ESPRIT( Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique )方法等<sup>[2][3]</sup>。总之, 从 FFT $\Rightarrow$ APES $\Rightarrow$ MUSIC $\Rightarrow$ ESPRIT, 分辨率越来越高。因而对接收的雷达回波信号用超分辨算法进行处理能在一定程度上提高目标距离维成像质量。

在基于参数估计的超分辨方法中, ESPRIT 是谐波恢复的一种主要特征分解法, 广泛应用于 DOA( Direction of Arrival )中。ESPTIT 和 MUSIC 都利用特征值分解的方法实现超分辨, 但是 ESPRIT 避免了在整个频域上对方位矢量进行搜索, 其广义特征值直接提供信号参数估计, 得到散射点径向分布; 为防止求解广义特征值出现病态解, 可以结合奇异值分解( SVD )和总体最小二乘方法( TLS )改进, 即 TLS-ESPRIT 算法<sup>[2]</sup>。但是, 以上 ESPRIT 及其改进算法只能一定程度地改善整个频域的估计精度, 不具有频率选择性<sup>[3]</sup>, 不能有针对性地调节和提高感兴趣的目标信号所处预定频段的估计精度。

针对这个问题, 研究了一种基于时域预滤波( Time-domain Pre-Filtered filter, TPF )和拓展 ESPRIT 相结合的 TPF-ESPRIT( Time-domain Pre-Filtered ESPRIT )超分辨新算法并应用于雷达距离维成像中。首先对雷达回波进行粗谱分析( FFT, APES 等 )得到信号的频率分布先验信息, 确定感兴趣的目标信号分布频带; 然后有针对性地设计 TPF 滤波器对回波数据预处理, 以滤波器输出状态的协方差矩阵来代替传统的回波数据协方差矩阵; 拓展 ESPRIT 对状态协方差矩阵进行子空间方法处理后可得到修正后的信号频率分布, 即散射点径向位置分布。TPF 滤波器的时域预处理在提高目标信号所处的预定频带内的信噪比的同时降低了带外的信噪比, 使预定频带内的估计精度得到改善, 预定频带外的干扰能量得到抑制。较之传统及改进 ESPRIT, TPF-ESPRIT 方法选择性地提高了目标的距离维成像质量。

## 2 雷达距离维信号模型

雷达目标散射中心的数学描述主要包括三类: 几何绕射理论模型( Geometrical Theory of Diffraction, GTD )、衰减指数和模型( Damped Exponential, DE )以及指数和模型。GTD 模型准确地描述了电磁散射中非点散射体所表现出的绕射现象和散射场随频率的变化, 是一种最全面精度最高的参数化模型, 由于描述模型的参数较多, 因而其参数估计过程复杂。后两模型可以看做 GTD 模型在某种情况下的近似, 其中在指数和模型中, 目标的散射中心几何类型全为点散射中心, 该模型是雷达成像和目标识别领域中最常用的近似模型之一, 由于该模型忽略了频率和散射中心类型对目标

后向散射场的影响, 其模型精度略低于 DE 模型和 GTD 模型。本文采用指数和模型描述雷达目标散射场回波, 散射中心指数和模型为:

$$f(k) = \sum_{i=1}^m b_i e^{j\omega_i k} \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

上式中  $N$  为回波数据长度;  $m$  为模型阶数, 反映目标点散射中心的个数;  $b_i$  表示模型复幅度系数, 反映目标第  $i$  个(  $i=1, 2, \dots, m$  )散射中心的复散射强度;  $\omega_i$  表示模型谐振频率, 与第  $i$  散射中心的相对位置有确定关系。因此, 根据雷达基频回波数据  $f(k)$  估计出模型(1)的参数  $\{b_i, \omega_i\}_{i=1}^m$  就可以较完整地描述目标点散射中心的散射强度和相对位置在雷达视线方向上的一维分布情况, 即目标的一维距离像<sup>[4]</sup>。

基于以上模型, 可以对实际雷达距离维回波进行建模。假定雷达回波数据  $y(k)$  中包含加性平稳噪声  $v(k)$ , 无噪声信号  $f(k)$  由  $m$  个复正弦谐波  $\{s_i(k)\}_{i=1}^m$  组成:

$$y(k) = \sum_{i=1}^m s_i(k) + v(k) \quad (2)$$

$$s_i(k) = b_i e^{j\omega_i k} = \rho_i e^{j(\omega_i k + \phi_i)} \quad (3)$$

其中  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ , 散射点个数  $m$  已知,  $v(k)$  是均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声, 复散射强度  $b_i = |b_i| e^{j\phi_i} = \rho_i e^{j\phi_i}$ , 令  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ , 初相位  $\phi_i$  是在  $[-\pi, \pi]$  上均匀分布的随机变量, 则  $y(k)$  是一个平稳随机过程。如果能够估计得到  $\Omega$ , 其他散射点参数(如幅度和相位)的估计可以通过最小二乘方法实现<sup>[2][3]</sup>。

## 3 TPF-ESPRIT 算法原理及步骤

### 3.1 基于时域滤波的拓展 ESPRIT 方法

为提高 ESPRIT 方法在目标散射点频谱分量  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$  处的估计精度, 首先对雷达回波信号  $y(k)$  进行时域滤波, 以提高其在信号频谱能量较大处  $\Omega$  的信噪比。为此设计如下线性滤波器, 其输入和输出关系为:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}y(k) \quad k \in Z \quad (4)$$

其中输入变量  $y(k)$  为标量, 状态输出  $\mathbf{x}(k)$  是矢量。特别地, 如果  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$  和  $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$  是可控的矩阵对,  $\mathbf{A}$  是稳定矩阵(特征值在单位圆内), 并满足

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^H + \mathbf{B}\mathbf{B}^H = \mathbf{E} \quad (5)$$

则该线性滤波器称为 TPF 滤波器。其频率响应为

$$\mathbf{G}(\omega) = (\mathbf{E} - e^{-j\omega} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \quad (6)$$

$\mathbf{A}$  的特征值称为 TPF 滤波器的模式。

令 TPF 输入为(2)中  $y(k)$ , 则 TPF 滤波器的稳态状态输出  $\mathbf{x}(k)$  为

$$\mathbf{x}(k) = \sum_{i=1}^m \mathbf{G}(\omega) s_i(k) + \xi(k) \quad (7)$$

$\xi(k)$  为  $v(k)$  通过系统  $\mathbf{G}(\omega)$  的输出响应, 令

$$\mathbf{\Gamma}(\Omega) = [\mathbf{G}(\omega_1), \mathbf{G}(\omega_2), \dots, \mathbf{G}(\omega_m)] \quad (8)$$

$$\mathbf{s}(k) = \{s_1(k), s_2(k), \dots, s_m(k)\}^T \quad (9)$$

则(7)式可改写为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{\Omega})\mathbf{s}(k) + \xi(k) \quad (10)$$

因为  $y(k)$  是广义平稳的, 滤波器状态输出矢量  $\mathbf{x}(k)$  也是广义平稳的。一方面, 状态输出协方差  $\mathbf{P} = \mathbf{E}\{\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)\}$  可表示为

$$\mathbf{P} = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{\Omega})\mathbf{R}\mathbf{\Gamma}^H(\mathbf{\Omega}) + \sigma^2\mathbf{E} \quad (11)$$

其中  $\mathbf{R} = \text{diag}(\rho_1^2, \rho_2^2, \dots, \rho_m^2)$ ,  $\mathbf{E}$  为单位矩阵。上式成立的条件是  $\xi(k)$  和  $\mathbf{s}(k)$  是相互独立的随机矢量<sup>[217]</sup>,  $\xi(k)$  均值为零, 且由式(5)可导出  $\mathbf{E}\{\xi(k)\xi^H(k)\} = \sigma^2\mathbf{E}$ 。另一方面, 对  $\mathbf{P}$  进行 SVD 分解, 得到

$$\mathbf{P} = \mathbf{U}_s\mathbf{\Lambda}_s\mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n\mathbf{\Lambda}_n\mathbf{U}_n^H \quad (12)$$

在(12)中  $\mathbf{\Lambda}_s$  和  $\mathbf{U}_s$  为  $m$  个较大特征值构成的对角矩阵及其相应的奇异向量矩阵分别称为信号特征值和信号子空间;  $\mathbf{\Lambda}_n$  和  $\mathbf{U}_n$  为  $n-m$  较小奇异值部分构成的对角矩阵及其相应的奇异向量矩阵, 称为噪声特征值和噪声子空间。  $\mathbf{P}$  的全部奇异值用  $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_n^2$  表示, 相应的奇异向量用  $[\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n]$  表示。理论上<sup>[21]</sup>与噪声相对应的奇异值大小等于噪声能量, 即

$$\lambda_{m+1} = \dots = \lambda_n = \sigma \quad (13)$$

通过比较式(11)和式(12), 得到

$$\mathbf{\Gamma}(\mathbf{\Omega})\mathbf{R}\mathbf{\Gamma}^H(\mathbf{\Omega}) = \mathbf{U}_s\mathbf{\Lambda}_s\mathbf{U}_s^H \quad (14)$$

根据子空间参数估计理论<sup>[21]</sup>, 可知

$$\text{span}\{\mathbf{G}(\omega_1), \mathbf{G}(\omega_2), \dots, \mathbf{G}(\omega_m)\} = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m\} \quad (15)$$

因此, 估计  $\mathbf{\Omega}$  等价于估计  $\mathbf{U}_s$ 。实际中,  $\mathbf{P}$  是由回波数据估计得到。由(4)式和零初始条件可求出状态输出过程  $\hat{\mathbf{x}}(k)$ , 即  $\{\hat{\mathbf{x}}(0), \hat{\mathbf{x}}(1), \hat{\mathbf{x}}(2), \dots, \hat{\mathbf{x}}(N-1)\}$ 。假定的零初始条件会对  $\hat{\mathbf{x}}(k)$  存在暂态影响。在经过一定的时间  $N_s$  之后, 影响可以忽略不计。因而, 估计的状态协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{P}} = \frac{1}{N - N_s} \sum_{k=N_s}^{N-1} \hat{\mathbf{x}}(k)\hat{\mathbf{x}}^H(k) \quad (16)$$

$N_s$  界定参考文献[5], 且可以证明  $\hat{\mathbf{P}}$  是  $\mathbf{P}$  的一致估计。对于回波数据  $y(k)$  的协方差矩阵  $\mathbf{T}$ , 通常用 MUSIC、ESPRIT 等逼近方法提取  $\mathbf{\Omega}$ ; 对于状态输出协方差矩阵  $\mathbf{P}$ , 也需要类似的逼近方法使其与  $\mathbf{\Omega}$  建立联系。本文采用一种拓展 ESPRIT 方法提取  $\mathbf{\Omega}$ 。

假设  $\boldsymbol{\mu}$  为  $1 \times m$  的行向量且  $\Phi$  为  $m \times m$  矩阵, 使得

$$\mathbf{U}_s = [\mathbf{B}, \mathbf{A}\mathbf{U}_s] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu} \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (17)$$

则  $\boldsymbol{\mu}$  和  $\Phi$  是唯一的, 且  $\Phi$  的特征值正好是  $e^{j\omega_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。信号子空间的频谱分布正是  $\Phi$  的特征值。实际中, 如果信号子空间的估计  $\hat{\mathbf{U}}_s$  可用, 则  $\Phi$  的估计通过对

$$[\mathbf{B}, \mathbf{A}\hat{\mathbf{U}}_s] \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\mu}} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{U}}_s \quad (18)$$

求最小二乘解<sup>[317]</sup>得到, 进而求出点散射中心的谐波频率。

### 3.2 TPF 时域滤波器参数(A, B)设计方法

时域滤波器(A, B)参数对于该方法的应用十分重要, 假设滤波器有  $l$  个模式在指定位置:  $\{a_k\}_{k=1}^l, p_k$  表示  $a_k$  的重数且  $\sum_k p_k = n$ , 构造 Jordan 块矩阵  $\mathbf{J}_k^{p_k \times p_k}$  如下:

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} a_k & 0 & \dots & 0 \\ 1 & a_k & 0 & \dots \\ 0 & 1 & a_k & \dots \\ \vdots & & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & & 1 & a_k \end{bmatrix}, \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$\mathbf{J} = \text{diag}(\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \dots, \mathbf{J}_l)$ ,  $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_1; \mathbf{b}_2; \dots; \mathbf{b}_l]$ 。  $\mathbf{J}$  为特征值在预定位置的 Jordan 标准型。(  $\mathbf{J}, \mathbf{b}$  ) 不满足(5)式, 需要进行相似变换得到(A, B)。  $\mathbf{M}$  为离散 Lyapunov

方程  $\mathbf{J}\mathbf{M}\mathbf{J}^H + \mathbf{b}\mathbf{b}^H = \mathbf{M}$  的解, 则有  $\left( \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{J}\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}, \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{b} \right)$

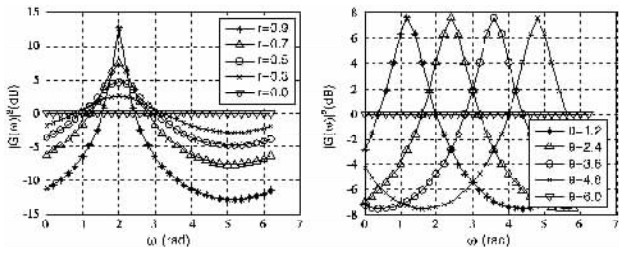
满足(5)式, 该矩阵对即为所求(A, B)。

### 3.3 TPF 滤波器的频率选择特性分析

由于式(5)条件的限定,  $v(k)$  滤波后输出  $\xi(k)$  能量是常量, 与(A, B)的具体选取无关。理论上信噪比越高,  $\mathbf{\Omega}$  的估计均方误差越小, 精度越高, 因此在噪声输出响应  $\xi(k)$  能量恒定前提下, 可以通过增大  $\|\mathbf{G}(\omega)\mathbf{G}(\omega)^H\|$  来提高预定频带内信噪比, 抑制带外干扰噪声能量, 以提高带内估计精度。根据式(6)计算得到  $\|\mathbf{G}(\omega)\mathbf{G}^H(\omega)\|$  的表达式为

$$\|\mathbf{G}(\omega)\|^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1 - r_i^2}{1 + r_i^2 - 2r_i \cos(\omega - \theta_i)} \quad (20)$$

其中  $\{a_i = r_i e^{j\theta_i}\}_{i=1}^n$  为滤波器的模式。理论上若  $r_i > 0$ , 则上式中与  $r_i$  对应的第  $i$  分式在中心频率  $\theta_i$  具有带通特性且  $Q$  因子由  $r_i$  决定。由于  $\int_{-\pi}^{\pi} \|\mathbf{G}(\omega)\|^2 d\omega = n$ , 该积分等式体现了估计性能在不同频段之间的折衷; 换言之, 增大某些预定频段的增益  $\|\mathbf{G}(\omega)\|$  会使这些频段内信噪比增加, 相应地预定频段外  $\|\mathbf{G}(\omega)\|$  减小, 信噪比下降。因此, 如果将 TPF 滤波器模式设定为  $re^{j\omega_i}$ , 那么  $\omega_i$  附近频带内的频率估计精度将随信噪比提高而得到改善, 而其他频段频率分量的干扰也因带外能量和信噪比的降低而减小。



(a)  $\|G(\omega)\|^2$  与模式幅度  $r_i$  关系 (b)  $\|G(\omega)\|^2$  与模式中心频率  $\theta_i$  关系

图1 TPF滤波器参数的影响

若定义  $SNR(\omega_i) = \frac{b_i^2}{\sigma^2}$  为谐波频率  $\omega_i$  处的信噪比,

在  $\omega_i$  附近的信噪比  $SNR(\omega_i)$  的改善程度与模式  $a_i$  的幅值  $r_i$  和中心频率  $\theta_i$  选择有关。具体地,经过 TPF 对原始数据预处理,可以将  $\theta_i$  处的信噪比提高  $\|G(\omega_i)\|^2$  倍。图1给出了模式  $a_i$  的参数对于  $\|G(\omega_i)\|^2$  的影响分析结果:可见模式  $a_i$  的幅值  $r_i$  越大,在  $\theta_i$  附近的信噪比改善程度越好,但改善的频谱范围却相应减小;同时  $\theta_i$  决定了信噪比改善的频谱范围的中心位置,为此需要合理的选择  $a_i$  和  $\theta_i$ ,以适应感兴趣的谐波中心频率范围的参数估计要求。

下面给出一个实例,验证以上 TPF-ESPRIT 算法的频率选择特性。构造如下形式的信号:  $y(k) = e^{j\omega_0 k} + v(k)$   $k=0,1,2,\dots,N-1$ ,其中  $\sigma^2$  为零均值高斯白噪声  $v(i)$  的方差,信噪比为  $SNR = 10\lg(1/\sigma^2)$ 。TPF 滤波器模式设定为  $a = 0.7e^{j^2}$ ,  $n = 10$ ,  $N = 100$ ,  $SNR = 0\text{dB}$ ,对 ESPRIT 估计器和 TPF-ESPRIT 估计器,进行 1000 次蒙特卡洛实验,在信噪比为  $0\text{dB}$  时不同  $\omega_0 \in [0, 2\pi)$  处的估计性能如图2所示。由图2分析得到,ESPRIT 算法对整个频域  $[0, 2\pi)$  的估计性能基本一致,不具频率估计选择性。而在 TPF-ESPRIT 算法中,由于时域预滤波器模式为  $0.7e^{j^2}$ ,使得在  $\omega_0 \in [1.3, 2.7]$  的范围上频率估计的 RMSE 优于 ESPRIT 算法,特别在  $\omega_0$  处估计精度最佳,接近  $0\text{dB}$  条件下 CRLB 界<sup>[3]</sup>。可见 TPF-ESPRIT 算法由于时域滤波器对原始数据在预定频段的信噪比增强效应,可以提高模式中心频率  $\theta_i$  两侧较大频段内的频率估计精度,

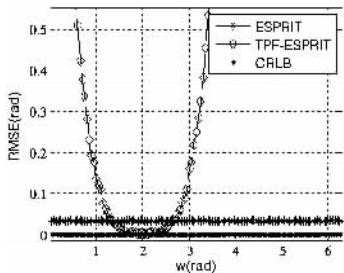


图2 TPF-ESPRIT 频率选择特性曲线

用于雷达距离维超分辨成像可以改善特定区域成像质量,在此将单一模式下频谱估计精度得到改善的区间长度记为  $\Delta\bar{\omega}$ 。

在单位圆内所有模式  $\{a_i\}_{i=1}^l$  空间上寻找最优的 TPF 滤波器是  $\{a_k = re^{j\theta}; l=1; p_k = n\}$  的次最优设计。对于距离维成像,若目标

散射点距离向位置所处频段为  $[\omega_L, \omega_R]$ ,且该区间长度小于  $\Delta\bar{\omega}$ ,则可以选取模式中心  $\{\theta = (\omega_L + \omega_R)/2; 0 \leq r < 1\}$ 。特别地,如果  $r=0$ ,也就是  $a_i = 0$ ,这时 TPF-ESPRIT 即是标准的 ESPRIT 算法,不具有频率选择特性。但是如果散射点径向分布区间  $[\omega_L, \omega_R]$  长度大于  $\Delta\bar{\omega}$ ,则需要利用中心频率间隔分布的几个模式组合构成  $n$  阶的 TPF 滤波器,以覆盖  $[\omega_L, \omega_R]$  的全部,提高目标所在位置的谱估计精度。需要指出的是,区间  $[\omega_L, \omega_R]$  一般可以通过 FFT( IFFT) 粗成像予以估计。

3.4 TPF-ESPRIT 超分辨成像算法步骤

### 3.4 TPF-ESPRIT 超分辨成像算法步骤

实际距离维成像时,点散射中心个数  $m$  未知,本文采用新改进盖氏圆盘法( NMGDE)<sup>[6]</sup>,能够较为准确地估计点散射中心数目,算法效率和精度较好。对于 TPF-ESPRIT 算法,不同之处在于原始回波信号的协方差矩阵被 TPF 滤波器状态输出协方差矩阵代替。

综上,本文研究的基于 TPF-ESPRIT 的雷达超分辨成像算法步骤归结如下:

步骤1:对某次雷达回波  $\{y(k)\}_{k=0}^{N-1}$  做 IFFT(或 APES 等),得到目标距离维粗成像结果,通过该原始回波数据频谱分布的先验信息,确定目标散射中心径向位置所在频带范围  $[\omega_L, \omega_R]$ 。

步骤2:按照 3.3 节的分析,选定  $l$  个中心频率  $\theta_i$  相互间隔的模式:

$$\left\{ a_i = r_i e^{j\theta_i}; \sum_{i=1}^l p_i = n; i = 1, 2, \dots, l; m < n \leq 0.3N; 0 \leq r_i < 1 \right\} \quad (21)$$

且满足  $[\omega_L, \omega_R] \subset [\theta_1 - \Delta\bar{\omega}/2, \theta_l + \Delta\bar{\omega}/2]$ ;

步骤3:在(21)限定的参数空间内选取  $\{a_i, n\}$  确定 TPF 滤波器参数  $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ ,某次雷达回波  $\{y(k)\}_{k=0}^{N-1}$  经过如(4)式 TPF 滤波器后得到状态输出  $\{\hat{\mathbf{x}}(k)\}_{k=0}^{N-1}$ ,然后由式(16)计算出状态输出协方差矩阵  $\hat{\mathbf{P}}$ ;

步骤4:对  $\hat{\mathbf{P}}$  根据 NMGDE 准则判定散射源数,计算出点散射中心数目估计  $\hat{K}$ ;

步骤5:对  $\hat{\mathbf{P}}$  进行 SVD 分解,确定主奇异值个数  $m = \hat{K}$ ,构造信号子空间  $\hat{\mathbf{U}}_s$ ;

步骤6:通过式(18)计算出最小二乘解  $\hat{\Phi}$ ,对  $\hat{\Phi}$  进行特征值分解,得到信号子空间  $\hat{\mathbf{U}}_s$  的频谱分布  $\hat{\Omega}$ ,进而得到点散射中心的径向位置分布;

步骤7:采用最小二乘方法估计出各点散射中心的实幅度和相位  $\{\hat{\rho}_i, \hat{\phi}_i\}_{i=1}^m$ ,得到复散射强度  $\{\hat{b}_i\}_{i=1}^m$ ,完成目标距离维成像。

## 4 实验验证

### 4.1 仿真数据成像结果与分析

假设单散射中心雷达回波复信号模型为

$$y(k) = e^{j\omega_0 k} + v(k) \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (22)$$

$\sigma^2$  为零均值高斯白噪声  $v(k)$  的方差,信噪比为  $SNR = 10\lg(1/\sigma^2)$ 。

### 4.1.1 噪声对算法频率估计性能的影响

在不同信噪比下 (-5dB ~ 25dB)对标准 ESPRIT<sup>[2]</sup>和 TPF-ESPRIT 算法的估计性能进行对比,假设  $\omega_0 = 2, N = 100$ , TPF 滤波器采用单模式,且  $a = re^{j2}$  ( $r = 0.5, 0.7$ ),重数  $n = 10$ 。在给定信噪比下,进行 1000 次蒙特卡洛实验,图 3 列出了不同信噪比下两种算法估计点散射中心的频率  $\hat{\omega}_0$  的 RMSE( Root of Mean Square Error)。由图 3 看出对两种算法,SNR 越高, RMSE 越小,估计精度越高;在相同的信噪比下 TPF-ESPRIT 的频谱估计精度要高于

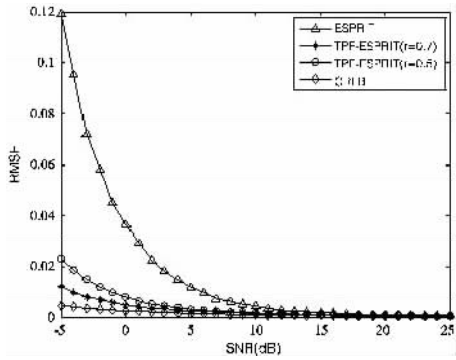


图 3 噪声对两种算法的频谱估计 RMSE 影响

ESPRIT,尤其在信噪比低于 5dB 时, TPF-ESPRIT 算法的估计优越性更加突出;同时当  $a$  的模值较大时, TPF-ESPRIT 算法的频谱估计更好,这与图 1 的分析是一

致的。可见,在抗噪性能方面, TPF-ESPRIT 算法明显优于 ESPRIT 算法。

### 4.1.2 采样点数目对算法性能影响分析

信号模型和 TPF-ESPRIT 估计器参数设定同上。采样点数目  $N$  对频谱估计性能影响如图 4 所示,对每组采样点数目(间隔为 10)进行 1000 次蒙特卡罗仿真实验。在图 4(a)中给出了分别当采样点数目  $N = 50, 100, 250$  时, TPF-ESPRIT 算法谐波参数估计的 RMSE,可见各种情况下随着信噪比的提高,谐波频率的估计精度都不断提高,且随着采样点数目的增加,谐波频率的估计精度也不断提高。在图 4(b)中给出了 ESPRIT 和 TPF-ESPRIT 算法在  $N \in [50, 250]$ ,  $SNR = 0\text{dB}$  时,谐波频率估计的 RMSE 与采样点数目的关系曲线,可见随着数据采样点数目的增加,ESPRIT 和 TPF-ESPRIT 算

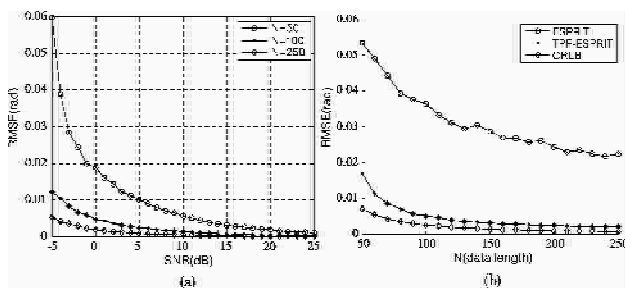


图 4 采样点数目对频谱估计性能影响

法的估计精度不断提高;在采样点数目相同时, TPF-ESPRIT 方法的估计精度高于 ESPRIT 算法。

### 4.1.3 邻近散射点的分辨能力

设双点散射中心雷达回波复信号为  $y(k) = e^{j2k} + e^{j1.99k} + v(k), k = 0, 1, \dots, N-1$ , 其中  $N = 400$ , 信噪比  $SNR = 20\text{dB}$ 。分别利用 FFT、APES(仿真条件见文献[13])、ESPRIT 和 TPF-ESPRIT ( TPF 滤波器参数设定同上)对仿真雷达回波进行谱分析,结果如图 5。

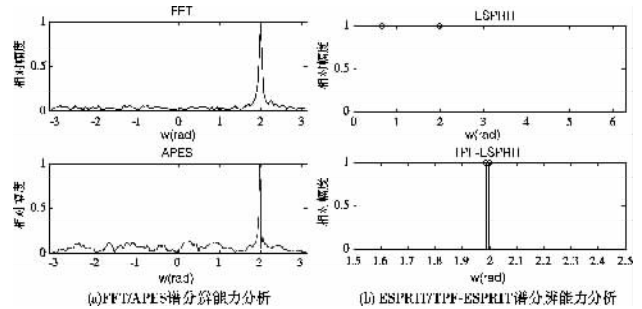


图 5 几种方法分辨力对照

由图 5(a)看出,对仿真雷达回波距离维成像时,若使用 FFT 估计频率旁瓣较高,相比之下 APES 的旁瓣较低,但两种非参数化方法相邻较近谱峰均无法区分,邻近点散射中心相互重叠,会丢失散射点致使图像失真,而且, APES 在数据量较大时谱峰搜索运算量特别大,成像实时性远低于 FFT;由图 5(b)可见,ESPRIT 虽理论分辨率无穷大,但会将噪声点误认为散射中心,出现伪峰;而 TPF-ESPRIT 算法对两个点散射中心完全可以区分,且估计精度比较高。可见, TPF-ESPRIT 算法在频率估计精度和分辨能力方面较之 FFT 和 ESPRIT 算法都有提高。

### 4.2 暗室实测数据仿真实验成像结果与分析

利用航天部 207 所提供的缩比模型暗室实测数据进行了仿真实验。测量系统为阶梯变频雷达,工作频率为 34.7GHz ~ 35.7GHz( Ka 波段),步进频率间隔为 2MHz,理论距离分辨力 0.15m,缩比模型尺寸为 1.5 ~ 2m,测量数据信噪比为 25dB。图 6(a)为方位角分别为 1°和 8°时采用 IFFT 算法得到的幻影 2000 飞机缩比模型的距离维成像结果,图 6(b)为方位角分别为 1°和 8°时采用 TPF-ESPRIT 算法得到的幻影 2000 飞机缩比模型的距离维成像结果。数据长度为 500,横坐标表示目标散射中心的相对位置,纵坐标表示散射中心相对幅度(与最大幅度值的比值)。

由图 6 可知,IFFT 算法因受瑞利限的限制,分辨率(0.15m)较低,散射中心频率估计精度较差,且由于能量泄漏,谱峰旁瓣不可避免,不利于进行目标特征提取和识别; TPF-ESPRIT 算法估计精度明显优于 IFFT 方法,其所成距离像基本上保持了与 3 个强散射中心之间的对应关系,能够较好地抑制噪声点干扰和剔除弱散射点。

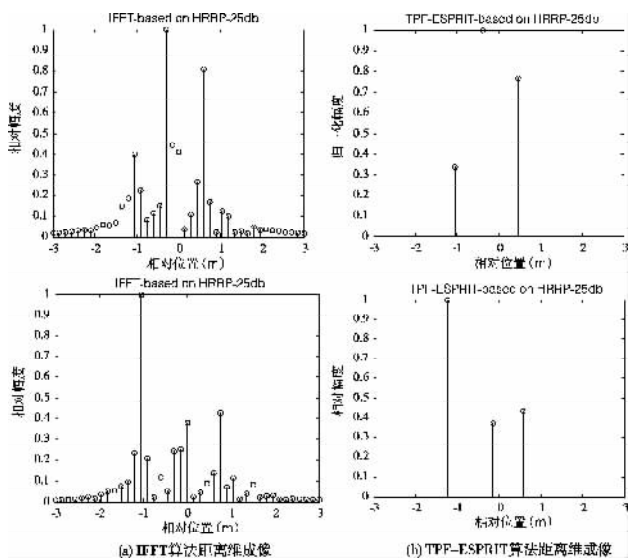


图6 暗室数据成像结果

一维距离像随视角变化具有峰值位置缓变性和峰值幅度快变性<sup>[11]</sup>。总之,关于散射中心的描述(包括散射中心的谐振频率,幅度等),对于目标识别而言,散射中心的谐振频率(位置)矢量相对于散射中心的幅度等其他特征更加稳定<sup>[8,9]</sup>,对目标的姿态变化不敏感;TPF-ESPRIT能够更加精确地估计散射中心的特征矢量:谐振频率,基于谐振频率通过最小二乘方法得到的散射中心幅度估计误差较之ESPRIT也有减小,有利于目标特征提取和识别。

## 5 结论

雷达超分辨成像的本质是散射点模型的参数估计问题。传统ESPRIT超分辨算法虽然比FFT算法性能优越,但仍有改进的空间,针对其不具有频域选择性这一不足,本文研究了基于散射点指数和模型参数估计的TPF-ESPRIT算法:较之常规ESPRIT算法直接对原始雷达回波数据协方差矩阵进行子空间方法处理,TPF-ESPRIT首先利用TPF滤波器对原始回波预滤波,然后再对滤波器状态输出协方差矩阵进行扩展ESPRIT处理。基于原始回波频谱分布先验信息针对性地设计TPF滤波器,使得TPF-ESPRIT算法在距离维成像时不同频段的估计性能可以调控,这种调控归根结底是通过TPF滤波器调控不同频段的信噪比来实现的。仿真数据对比实验和暗室实测数据成像结果表明TPF-ESPRIT相对于IFFT、APES和ESPRIT,其在预定频段的频率估计性能有明显提高,尤其在信噪比较低的情形下优越性更加显著。由于TPF-ESPRIT算法仍采用最小二乘方法在频率估计值基础上获得散射中心幅度估计,因此其幅度的估计误差也要小于ESPRIT方法。本文将该算法应用于雷达距离维超分辨成像,在实际中也可用于雷达方位维成像,这将进一步提高二维成像精度和质量。

## 参考文献

- [1] 黄培康等. 雷达目标特征信号[M]. 北京:宇航出版社, 1993.
- [2] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [3] Petre Stoica, Randolph Moses. Spectral Analysis of Signals [M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
- [4] 付耀文. 雷达目标融合识别研究. 国防科技大学博士学位论文[D], 长沙, 2003.
- [5] Ali Nasiri Amini, Tryphon T. Georgiou. Tunable Line Spectral Estimators Based on State-Covariance Subspace Analysis[J]. IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, 2006, 54(7):2662-2671.
- [6] H T Wu, C L Chen. A new Gerschgorin radii based method for source number detection[A]. Proc 10th Workshop on Statistical Signal and Array Processing[C]. Pennsylvania: IEEE, 2000, 104-107.
- [7] Tryphon T. Georgiou. Spectral Estimation via Selective Harmonic Amplification[J]. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, 2001, 46(1):29-42.
- [8] 付耀文, 贾宇平, 庄钊文. 基于一维散射中心匹配的雷达目标识别[J]. 电子学报, 34(3), 2006.
- [9] Kim K T, Seo D K, Kim H T. Radar target identification using one-dimensional scatter centres[C]. IEE Proc Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(5):285-296.
- [10] Jian Li, Petre Stoica. An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1996, 44:1469-1484.
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤等. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [12] Jian Li, Petre Stoica. Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction[J], IEEE Trans SP, 1996, 44(2):281-295.
- [13] Su Fulin, Jiao Yun. ISAR Super-resolution Imaging Algorithm Based on APES Method[C], The Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA'2005). Sydney, Australia. 2005.

## 作者简介



马传令,男,1986年生,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为雷达目标识别、ISAR成像。

E-mail:machuanling@gmail.com

朱玉鹏,男,1981年生,天津人,博士研究生,研究方向为信息融合、雷达目标识别。

付耀文,男,1976年生,江西进贤人,博士,副教授,研究方向为信息融合、雷达目标识别。