

# 采用双混频实现扩展目标运动参数估计和散射中心重构

冯德军<sup>1</sup>,王雪松<sup>1</sup>,刘佳琪<sup>2</sup>,刘 义<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073;2. 航天科技集团第一研究院,北京 100076)

**摘 要:** 推导了运动扩展目标在全去斜率体制下的回波信号形式,指出其为多分量多项式相位信号(mc-pps). 分析了时频分析方法和多项式相位变换方法对该信号处理的不足,提出一种采用双混频实现扩展目标运动参数估计和散射中心重构的新方法:通过对回波的双混频处理避免自相关处理带来的能量损失及分辨率降低;根据相关函数的功率谱特点,在频域抑制由多分量带来的交叉项干扰;通过循环估计减小参数估计误差的传播影响,最后利用 ESPRIT 超分辨估计方法提高参数估计精度. 仿真结果表明该方法能有效提取目标的运动特征并能重构目标的一维散射中心.

**关键词:** 多分量多项式相位信号;交叉项干扰;运动目标;参数估计

**中图分类号:** TN959, TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)08-1768-05

## Movement Parameter Estimation and Scattering Centers Reconstruction of Extend Target Using Double-Dechirping

FENG De-jun<sup>1</sup>, WANG Xue-song<sup>1</sup>, LIU Jia-qi<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>

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

2. The First Academy, Aerospace of Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The echo's mathematic model of movement target for wideband linear frequency modulated signal in STRETCH processing is deduced, which is demonstrated to be a muticomponent polynomial phase signals (mc-pps). The defect of processing mc-pps using time-frequency analysis and polynomial phase transform (PPT) are pointed out. And then, a new algorithm of estimation movement parameter and reconstruction scattering centers of extend radar target is proposed, which can avoid loss of energy and frequency resolution of auto-correlation by using double-dechirp. According to the characteristic of power spectrum, the proposed algorithm adopts power maxima criterion suppressing crossterms and improves performance of parameter estimation by using iterative algorithm. Furthermore, the ESPRIT algorithm supersedes FFT algorithm for improving estimation accuracy. Simulation results show that the proposed method can extract movement feature and reconstruct scattering centers effectively, even when SNR is low.

**Key words:** muticomponent polynomial phase signals; interference-term; moving target; parameter estimation

### 1 引言

运动信息和结构特征是目标识别的重要依据,尤其在空间目标识别中受到了广泛的重视<sup>[1-5]</sup>. Elwin 等人通过目标运动分辨(TMR)处理,提取空间目标的飞行姿态、轨道特征、速度与加速度等特征<sup>[1]</sup>;文献[2]通过拟合目标的多普勒时间曲线,获得导弹的自旋频率特征; Mats 等采用空时处理方法从宽带 SAR 回波中探测运动目标的方法<sup>[3]</sup>; John 等采用空间自适应滤波方法对运动目标分类<sup>[4]</sup>;文献[5]的作者根据线性调频连续波雷达的特点从宽带回波中提取目标的速度和加速度特征,获

得了良好的效果.在目标识别雷达中,应用更广泛的信号形式是线性调频(LFM)信号.文献[6]和[7]针对采用 LFM 的去斜处理(STRETCH)体制雷达<sup>[8]</sup>,分别采用多项式相位变换方法和快速解线性调频方法,获取了目标的运动特征,但未考虑目标为复杂散射体的情形.实际上,在大带宽信号照射下,扩展目标被离析为多个散射中心,采用文献[6]和[7]的方法会产生所谓的交叉项干扰,严重影响运动参数的估计.针对这一不足,本文提出了采用双混频实现扩展目标运动参数估计的新方法,该方法能有效消除交叉项干扰,具有优良的参数估计精度,并能重构扩展目标的一维散射中心.

收稿日期:2007-09-22;修回日期:2009-05-19

基金项目:国家自然科学基金(No.60672033, No.60736006)

## 2 运动目标回波特点

为增强信息获取能力,目标识别雷达通常采用大带宽的 LFM 信号,同时采用 STRETCH 处理以降低对硬件的要求.对于具有单元散射强度的静止单散射点,当回波延时为  $\tau$  时,回波信号  $S_R(t)$  为:

$$S_R(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp\left\{2j\pi\left[f_0(t-\tau) + \frac{1}{2}\gamma(t-\tau)^2\right]\right\} \quad (1)$$

式中  $\text{rect}(t)$  为矩形包络,  $f_0$  为起始频率,  $T$  为时宽,  $\gamma$  为调频斜率.参考信号  $S_L(t)$  是进行距离跟踪所获得的参考延时信号.当雷达和目标相距  $R$  时,采用距离参考延时为  $\tau_0$ ,进行混频后,输出  $S_f(t)$  为:

$$S_f(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{C}\gamma(t-\tau_0)R_\Delta\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{C}f_0R_\Delta\right\} \exp\left\{j\frac{4\pi\gamma}{C^2}R_\Delta^2\right\} \quad (2)$$

式中  $R_\Delta = R - R_0$ ,  $R_0 = \frac{1}{2}C\tau_0$ ,  $C$  为光速.由上式可见,去斜率混频器输出为一单频信号,其频率和目标与参考信号间的距离  $R_\Delta$  成比例.当参考时延选定后,对式(2)进行 FFT 变换,即可获得目标的一维像  $S(L)$ .当雷达和目标的径向速度和加速度很小时,可以认为在脉冲持续时间内雷达与目标的距离近似不变,但对于高速运动的导弹目标,该假设通常不成立.不妨设目标和雷达的径向速度和加速度分别为  $v$  和  $a$ ,仍采用  $\tau_0$  作为参考混频时延,并进行混频后,令  $\tilde{t} = t - \tau_0$ ,  $|\tilde{t}| < T/2$ ,  $\tau_\Delta = 2R_\Delta/C$  可以得到:

$$S_f(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\tilde{t}-\tau_\Delta}{T}\right) \left(\frac{C-2v}{C} - \frac{a}{C}\tilde{t}\right) \cdot \exp\left\{2j\pi\left[\frac{1}{2}\gamma\frac{a^2}{C^2}\tilde{t}^4\right]\right\} \times \exp\left\{2j\pi\frac{\lambda a}{C}\left[\frac{C-2v}{C} + \frac{2\tau_\Delta a}{C}\right]\tilde{t}^3\right\} \times \exp\left\{2j\pi\left[\frac{3\gamma a^2}{C^2}\tau_\Delta^2 + \frac{3\gamma a(C-2v)\tau_\Delta - 2\gamma v(C-v)}{C^2} - \frac{f_0 a}{C}\right]\tilde{t}^2\right\} \times \exp\left\{-2j\pi\left[\frac{2\gamma a^2}{C^2}\tau_\Delta^3 + \frac{3\gamma a(C-2v)}{C^2}\tau_\Delta^2 + \left(\frac{\gamma(C-2v)^2}{C^2} - \frac{2f_0 a}{C}\right)\tau_\Delta + \frac{2vf_0}{C}\right]\tilde{t}\right\} \times \exp\left\{2j\pi\left[\frac{\gamma a^2}{2C^2}\tau_\Delta^4 + \frac{\gamma(C-2v)a}{C^2}\tau_\Delta^3 + \left(\frac{\gamma(C-2v)^2}{2C^2} - \frac{af_0}{C}\right)\tau_\Delta^2 - \frac{f_0(C-2v)}{C}\tau_\Delta\right]\right\} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,当目标具有速度和加速度时,混频后的回波为多项式相位信号(pps),相位参数与混频时延、运动参数相关.如果  $v$  和  $a$  均为 0,则式(3)退化为式(2).若以  $b_i$  表示式(3)中的第  $i$  阶相位参数,并忽略由于散射点距离延时造成的包络移动,则式(3)可以写成

$$S'_f(\tilde{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\tilde{t}-\tau_\Delta}{T}\right) \exp\left(2j\pi\sum_{i=0}^4 b_i \tilde{t}^i\right) \quad (4)$$

式(4)是单散射点情形.当目标由多个散射中心构成时,令  $L$  为散射中心数目,第  $l$  个散射中心强度为  $\sigma_l$ ,回波可写成

$$S_f^*(\tilde{t}, t_m) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \exp\left(2j\pi\sum_{i=0}^4 b_{l,i} \tilde{t}^i\right) \quad (5)$$

式(5)为典型的 mc-pps 形式,通过 mc-pps 参数估计方法,可以得到各分量的相位参数  $b_{l,i}$ ,由此可反推出目标的运动参数  $v$ 、 $a$  和  $R$ .对于空间自由段飞行目标而言,大多数情形下  $a=0$ ,因此本文仅讨论  $a=0$  的情形.若目标为刚体,各散射中心相对雷达有相同的径向速度  $v$ ,考虑到  $v \ll C$ ,  $a=0$  时式(5)可写为

$$S_f^*(\tilde{t}) \cong \sum_{l=1}^L \sigma_l \exp\left[2j\pi(b_{l,1}\tilde{t} + b_{l,2}\tilde{t}^2 + b_{l,0})\right] \quad (6)$$

其中:  $b_{l,2} = -\frac{2\gamma v}{C}$ ,  $b_{l,1} = -\left(\gamma\tau_{\Delta,l} + \frac{2vf_0}{C}\right)$ ,  $b_{l,0} = \frac{\gamma}{2}\tau_{\Delta,l}^2 - f_0\tau_{\Delta,l}$ ,  $|\tilde{t}| < T/2$

式(6)中  $\tau_{\Delta,l} = 2(R_l - R_0)/C$ ,  $R_l$  为第  $l$  个散射中心距离雷达的距离.可见由于多散射中心的存在,信号回波为散射强度不同的多个线性调频信号的叠加,各个线性调频信号的参数取决于散射中心的分布和强度.若估计出第  $l$  个散射中心的  $\hat{b}_{l,2}$  和  $\hat{b}_{l,1}$ ,则由式(6)不难得出

$$\hat{v} = -\frac{\hat{b}_{l,2}C}{2\gamma} \quad (7)$$

$$\hat{R}_l = -\frac{\hat{b}_{l,1}}{2\gamma}C + \frac{\hat{b}_{l,2}f_0}{2\gamma^2}C + R_0$$

因此,只要估计出线性调频参数  $\hat{b}_{l,2}$  和  $\hat{b}_{l,1}$ ,则可得目标的运动特征,并能得到其散射中心的分布,因此运动特征提取问题变成了一个参数估计问题.

## 3 扩展目标运动参数估计和散射中心重构的新方法

对于式(6)的多分量线性调频信号,理论上的最优估计方法是采用最大似然估计,但该方法需进行二维搜索,计算量巨大,因此在实际中采用较少.常见的参数估计方法有两类:第一类是非参数方法,如采用 Wigner-Ville 变换等时频分析方法<sup>[10]</sup>;第二类是参数化的方法,如采用高阶模糊度函数(HAF)方法、高阶模糊度函数积(PHAF)方法等.以上两类方法存在的共同局限是难以克服由于交叉干扰带来的虚假峰值问题.

Peleg 在文献[9]中提出了对线性调频信号的快速参数估计方法,该方法的基本思想与 HAF 方法类似,其实质都是将参数估计的高维搜索转变为低维搜索,从而实现参数的快速估计.虽然它带来了计算上的简便,但与 HAF 方法一样,存在一个显著的缺点:相关运算和瞬时矩运算都将使运算后的信号长度大大缩短,信号

能量受到损失,也使频谱分辨力降低.举例来说,若相关延迟时间为  $T/2$ ,则相关函数的信号长度仅为原信号长度的一半(若为高阶矩,则信其时长更短).根据频谱分析的基本理论可知,频率分辨率取决于信号时长,因此相关后的信号分辨率将降低一半,这不利于后续的参数估计.因此,从信号能量和分辨率角度而言,以上方法均不理想.

STRETCH 处理的特点之一是所采用的参考回波的时长一般都比信号回波长,以使回波能量不受损失.基于此,我们提出所谓的双混频相关处理方法:采用两组混频时延分别对回波进行 STRETCH 处理,然后再进行相关运算.由于两组 STRETCH 处理后的回波时长相同,相关处理后时长将不受损失.仍以前面分析的运动目标为例,不妨设第一组时延仍为  $\tau_0$ ,第二组时延滞后  $\Delta T$ ,即为  $\tau_0 + \Delta T$ .  $\Delta T$  的选取按如下准则:即  $\Delta T$  应小于参考回波的脉冲宽度  $T_{ref}$  与发射脉冲宽度  $T$  之差,这样才能使第二组混频后的信号具有与第一组同样的时长.第二组 STRETCH 处理后的信号为

$$S_{f_2}^*(\tilde{t}') \cong \sum_{i=1}^L \sigma_i \exp[2j\pi(b'_{l,1}\tilde{t}' + b'_{l,2}(\tilde{t}')^2 + b'_{l,0})]$$

$$\text{其中: } b'_{l,2} = -\frac{2\gamma v}{C}, b_{l,1} = -\left(\gamma\tau'_{\Delta,l} + \frac{2v_0}{C}\right), b'_{l,0} = \frac{\gamma}{2}\tau'_{\Delta,l}{}^2 - f_0\tau'_{\Delta,l}, \tilde{t}' = \tilde{t}\Delta T, |\tilde{t}'| < T/2 \quad (8)$$

上式中  $\tau'_{\Delta,l} = 2(R_l - R_0)/C - \Delta T$ , 对式(6)和式(8)和两组信号进行相关运算,考虑到  $b_{i,2}$ 、 $b'_{l,2}$  与散射点的位置无关,得到

$$\begin{aligned} R_{\Delta T,i} &= S_f^*(\tilde{t}) \cdot \text{conj}(S_{f_2}^*(\tilde{t}')) \\ &= \sum_{i=1}^L \sum_{l=1}^L \sigma_i \sigma_l \exp\left\{2j\pi\left[\gamma\left(2\frac{R_l - R_i}{C} - \Delta T + \frac{4v\Delta T}{C}\right)\tilde{t} - b'_{l,2}\Delta T^2 - b'_{l,1}\Delta T + b_{i,0} - b'_{l,0}\right]\right\}, -T/2 \leq \tilde{t} \leq T/2 \end{aligned} \quad (9)$$

上式中  $\text{conj}(\cdot)$  表示取共轭.从式(9)中可以看出,  $R_{\Delta T,i}$  体现为多个单频分量的叠加,在  $l=i$  时,离析出的信号分量为自项,它与  $b_{i,2}$  成正比;在  $l \neq i$  时离析出的信号分量为交叉分量.考虑到自项和交叉项均存在固定频率项  $\exp(-2j\pi\gamma\Delta T\tilde{t})$ ,将式(9)乘  $\exp(2j\pi\gamma\Delta T\tilde{t})$ . 将自项和交叉项分开,可得:

$$\begin{aligned} R'_{\Delta T,i} &= \sum_{i=1}^L \sigma_i^2 \exp\left(2j\pi\left(\gamma\frac{4v\Delta T}{C}\tilde{t} + \theta_i\right)\right) \\ &\quad + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^L \sum_{i=1}^L \sigma_i \sigma_l \exp\left(2j\pi\left[\gamma\left(\frac{4v\Delta T}{C} + 2\Delta\tau_{l,i}\right)\tilde{t} + \theta_{i,j}\right]\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{式中: } \theta_i = -b'_{i,2}\Delta T^2 - b'_{i,1}\Delta T + b_{i,0} - b'_{i,0}, \theta_{i,j} = -b'_{i,2}\Delta T^2 - b'_{l,1}\Delta T + b_{i,0} - b'_{l,0}, \tilde{t} \leq |T/2|$$

上式中  $\Delta\tau_{l,i} = 2(R_l - R_i)/C$ . 观察式(10),可以得到一个重要的结论:即双混频后相关函数自项的频谱只取

决于目标的运动速度,而与它们的位置无关,而交叉项频谱取决于各散射点的相对位置和速度.要从式(10)的频谱中直接分辨出信号的自项和交叉项仍然是困难的.分析  $R_{\Delta T,i}$  中各单频信号的幅度特点,将有如下推论:

**推论:**式(10)所示的信号其自项信号具有最大功率谱,不小于任一交叉分量的功率谱.

下面作简要证明.分析式(10),可知它由许多单频信号组成,其中自项只有一项,其频率为  $\gamma\frac{4v\Delta T}{C}$ ,幅度为  $\sum_{i=1}^L \sigma_i^2$ . 而交叉项的数目由各散射点的相对位置决定,如果  $\Delta\tau_{l,i} \neq \Delta\tau_{k,m}$  (这里  $l, i, k, m$  均表示散射点的序号),则交叉项频谱不重叠,根据不等式性质显然有  $\sum_{i=1}^L \sigma_i^2 \geq \sigma_i \sigma_j$ , 即自项信号的幅度大于任一交叉项的幅度,变换到频域后,尽管信号时长有限,但其相对强弱不会改变,自项将具有最大的功率谱.如果  $\Delta\tau_{l,i} \neq \Delta\tau_{k,m}$  的条件不满足,则交叉项频谱重叠.式(10)中,最极端的情况是共有  $L-1$  项频谱重叠(因为散射点位置不同,  $\Delta\tau_{l,i} \neq \Delta\tau_{l,m}$ , 因此不会出现  $L$  项以上的重叠),此时重叠后交叉项的幅度为  $\sum_{i=1}^{L-1} \sigma_i \sigma_{i+1}$ , 根据不等式性质也会有  $\sum_{i=1}^L \sigma_i^2 \geq \sum_{i=1}^{L-1} \sigma_i \sigma_{i+1}$ . 故自项信号的幅度总会大于交叉项的幅度.在频域,自项信号具有比交叉项更强的功率谱.另外,分析式(10)还可知,交叉项的频谱将在自项频谱的两侧呈对称分布.因此,对式(10)进行频谱分析,提取最强、且居于其它谱线中央的谱线,即可得到自项频谱.

若得到的最强谱线频率为  $f_s$ ,从式(10)中可看出,  $f_s$  仅是目标速度  $v$  的函数(其余参量均为已知),因此可得到目标速度的估值  $\hat{v}$ ,并可估计出式(6)中  $b_{i,2}$  的估值  $\hat{b}_{i,2}$ . 得到  $\hat{b}_{i,2}$  后,对式(6)乘以  $\exp(-2j\pi\hat{b}_{i,2}\tilde{t}^2)$ , 得到

$$S_c(\tilde{t}) \cong \sum_{i=1}^L \sigma_i \exp[2j\pi(b_{i,1}\tilde{t} + (b_{i,2} - \hat{b}_{i,2})\tilde{t}^2 + b_{i,0})], \quad |\tilde{t}| < T/2 \quad (11)$$

若  $\hat{b}_{i,2}$  与  $b_{i,2}$  足够接近,则  $S_c(\tilde{t})$  近似为多个单频信号的叠加,通过进一步的频谱分析,不难估计出各分量的一次项系数  $b_{i,1}$ ,并由此估计出各个散射中心的位置  $\hat{R}_i$ . 由于噪声、谱分析误差等多种因素的影响,所得到的  $f_s$  与真实值可能存在一定的误差,此误差将直接影响目标速度的估值  $\hat{v}$  并使得  $\hat{b}_{i,2}$  与  $b_{i,2}$  不够接近,进而影响到  $\hat{R}_i$  的估计,因此必须减小该项误差.令  $\Delta b_{i,2} = b_{i,2} - \hat{b}_{i,2}$ ,从式(11)中可以看出,若  $\Delta b_{i,2} \neq 0$ ,则  $S_c(\tilde{t})$  依然为 mc-pps, 即该信号形式与式(6)一致,因此

可以采取循环解调频算法来估计  $\Delta b_{i,2}$ . 基本方法是:对式(11)进行自相关运算,采用解调频处理方法估计出式(11)的调频斜率  $\Delta \hat{b}_{i,2}$ ,由此得到  $b_{i,2}$  的递进估计  $\hat{b}_{i,2} = \hat{b}_{i,2} + \Delta \hat{b}_{i,2}$ ,与此类似,还可进一步估计出  $\Delta \hat{b}_{i,2}$  的估计误差,直至最后得到的估计误差  $\{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_k$  小于设定的门限,这里下标  $k$  表示第  $k$  次迭代. 这样的循环迭代算法将大大减小传播误差,显著提高运动参数的估计精度. 最后,在进行频谱分析时,采用超分辨谱分析方法 ESPRIT 方法<sup>[11]</sup>取代传统的 FFT 方法,进一步提高参数估计精度. 当目标各个散射中心的位置和强度均被估计出来后,就可进行散射中心的重构.

综上所述,将本文所提出的扩展目标运动参数估计和散射中心重构方法归纳如下:

**Step1** 确定双混频延迟时间  $\Delta T$ ,对宽带回波进行两个通道的双时延的 STRETCH 处理,然后进行两通道信号的相关运算,得到相关函数  $R_{\Delta T,t}$ .

**Step2** 将  $R_{\Delta T,t}$  乘以  $\exp(-2j\pi\gamma\Delta Tt)$ ,得到  $R'_{\Delta T,t}$ . 对  $R'_{\Delta T,t}$  进行频谱分析,提取其自项功率谱线  $\hat{f}_s$ ,并由它得到  $b_{i,2}$  初始估计  $\{\hat{b}_{i,2}\}_0$ .

**Step3** 记  $\{S_c(\bar{t})\}_0 = S_f^*(\bar{t})$ ,  $\{S_c(\bar{t})\}_k = \{S_c(\bar{t})\}_{k-1} \exp(-2j\pi\{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_{k-1}\bar{t})$ ,  $k \geq 1$ , 这里  $\{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_{k-1}$  为对  $\{S_c(\bar{t})\}_{k-1}$  的调频斜率的估计,采用快速解调频处理方法估计  $\{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_k$ .

**Step4** 若  $|\{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_k| < \epsilon$ ,则迭代中止,否则返回步骤三. 这里  $\epsilon$  为给定阈值.

**Step5** 记  $b_{i,2}$  的最终估计  $\hat{b}_{i,2} = \{\hat{b}_{i,2}\}_0 + \sum_{k=1}^N \{\Delta \hat{b}_{i,2}\}_k$ , 这里  $N$  为迭代次数,由式(7)估计目标飞行速度  $v$ ,同时将  $\hat{b}_{i,2}$  代入式(11),采用 ESPRIT 超分辨算法对  $S_c(\bar{t})$  作频谱分析,得到各分量频谱估计,采用最小二乘算法估计各频谱分量的幅度;

**Step6** 将估计出的各频谱分量代入式(7),得到各散射中心的位置和幅度估计,重构目标的一维散射中心.

#### 4 仿真实验

设定的仿真场景为空间扩展目标运动参数估计和散射中心重构. 雷达参数设置为:中心频率 10GHz,带宽为 1GHz,脉宽为 100 $\mu$ s,中频采样带宽 10M. 为考虑目标散射结构的影响,仿真两种目标结构. 第一种目标为两个散射点构成的简单目标,两个散射中心间的距离为 0.6m,散射点的 RCS 均为 1m<sup>2</sup>;第二种目标为由四个散射点构成的复杂目标,散射中心之间的距离分别为 0.6、0.9、1.5m,散射强度分别为 1m<sup>2</sup>、2m<sup>2</sup>、4m<sup>2</sup>、6m<sup>2</sup>. 目标质心距离雷达距离为 121km,目标速度为 3km/s.  $\Delta T$

设置为半个脉冲宽度,图 1 画出了在信噪比 20dB 下两类目标相关函数能中自项和相关项的频谱分布(图中最强谱峰点为自项,其它频谱分量为交叉项).

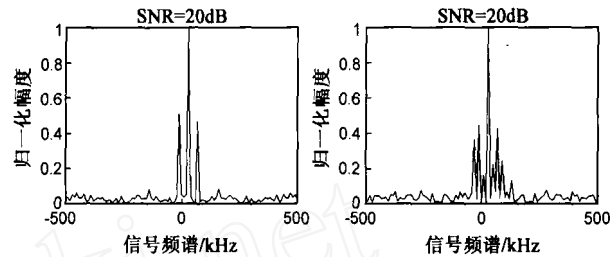


图1 自项和交叉项的频谱

从图 1 可以清楚地看出,只有 2 个散射中心的简单扩展目标,经双混频相关处理后,也会产生两项交叉干扰项. 但自项功率频谱强度明显高于交叉项强度,而且交叉项分布于自项的两侧,因此根据自项和交叉项的功率谱的强度特征和结构分布不难区分自项和交叉项. 从图 1 中还可以看出,如果目标散射中心增多,则交叉项会增加多项,它们分布于自项的两侧,但其功率谱强度明显小于弱于自项. 多次仿真实验表明,目标结构越复杂,自项相对于交叉项的功率谱强度优势越明显,自项提取越容易. 甚至在很低的信噪比(-10dB)下,提取自项也是成功的.

图 2 显示了在不同迭代次数不同信噪比下目标的速度和 3 个散射点的平均位置估计的均方误差(0 阶迭代表示未曾进行迭代,1 阶迭代表示进行 1 次迭代,其它类推,设置参数  $\epsilon = 0.1$ ).

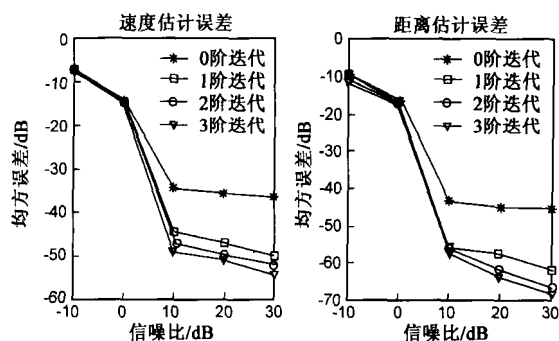


图2 迭代次数对参数估计精度的改善

从图 2 看出本文所提出的方法能达到较满意的参数估计精度,通过循环迭代算法能有效提高参数估计精度,其中 1 阶迭代效果十分显著. 仿真实验表明,一般通过两次迭代就可达到较为理想的效果. 和文献[5]对比,可以发现本文的方法和参考文献中的速度估计精度相当,二者均能精确地提取出目标的飞行速度.

为直观地反映散射中心重构效果,我们采用两种弹头类目标微波暗室数据. 测量采用中心频率为 10GHz,带宽 1GHz 的步进频信号. 首先画出其在 HH 极化、方位角为 0 度时的一维距离像,提取其散射中心(分

别提取 4 个和 6 个散射中心),由此产生双混频通道的多分量多项式信号(其余参数同前),然后采用本文的方法估计散射中心的位置和幅度,在信噪比 20dB 下,重构的目标一维散射中心如下(为便于比较,将原始的目标一维像画在一起).

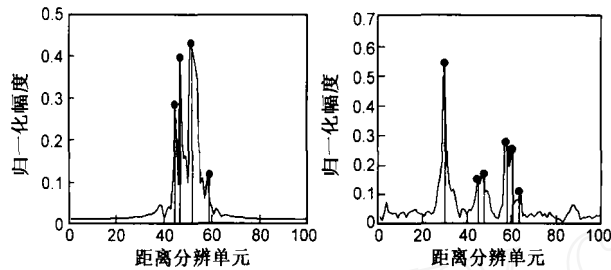


图3 两类实测目标散射中心重构结果

从图 3 可以看出,通过本文方法重构出的目标散射中心较好地反映了原目标散射中心的分布.多次仿真实验表明,由于采用了 ESPRIT 超分辨方法,使得本文提出的主法具有良好的距离分辨率,而且不敏感于信噪比的变化,当信噪比低至 10dB 时,依然可以获得良好的重构结果.

## 5 结束语

运动特征和目标电磁散射特征从不同角度表现目标的本质属性,它们均是特征提取研究的重要内容.本文针对扩展刚体目标在 STRETCH 处理下的回波特点,提出了采用双混频实现扩展目标的运动参数估计和散射中心重构的新方法:根据相关函数功率谱的特点在频域抑制交叉项干扰,有效克服了交叉项对参数估计的影响;通过循环迭代算法和 ESPRIT 超分辨算法显著提高了参数估计的精度并抑制了噪声的影响.仿真实验表明该方法具有良好的运动特征提取能力而且能重构目标的一维散射中心.因此,本文提出的方法丰富了目标识别雷达的信息量,有利于雷达识别性能的提高.

## 参考文献:

- [1] Elwin C, Nunn. The US army white sands missile range development of target motion resolution [A]. EASCON'80 Record [C]. Arlington, VA, IEEE, 1980, 346 - 352.
- [2] 陈建文, 李士国. 基于目标运动分辨技术提取导弹目标运动特征[J]. 现代雷达, 2003, 25(6): 5 - 7.  
Chen Jian-wen, Li Shi-guo. Missile motion feature extraction based on target motion resolution [J]. Modern Radar, 2003, 25(6): 5 - 7. (in Chinese)
- [3] Mats Pettersson. Detection of moving target in wideband SAR [J]. IEEE Trans on AES, 2004, 40(3): 780 - 795.
- [4] John Malas, Krishna Pasala, John Ewaterkamp. Automatic target classification of slow moving ground target in clutter [J]. IEEE

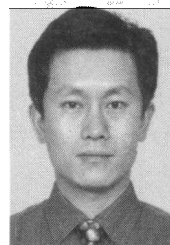
Trans. on AES, 2004, 40(1): 190 - 203.

- [5] 张容权, 杨建宇, 熊金涛. 基于多项相位变换的线性 FM-CW 雷达目标加速度和速度估计方法 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 452 - 455.  
Zhang Rong-quan, Yang Jian-yu, Xiong Jin-ta. Method for acceleration and velocity estimation of linear FMCW radar's target based on polynomial phase transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 452 - 455. (in Chinese)
- [6] 黄小红, 陈曾平, 庄钊文, 等. 空间目标高分辨距离像运动参数估计 [J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 269 - 272.  
Huang Xiao-hong, Chen Zeng-ping, Zhuang Zhao-wen, et al [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(3): 269 - 272. (in Chinese)
- [7] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于单个宽带脉冲的空间目标测距和测速方法 [J]. 信号处理, 2006, 22(1): 73 - 77.  
Feng De-jun, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. Method of measuring range and velocity of space target based on single wideband pulse [J]. Signal Processing, 2006, 22(1): 73 - 77. (in Chinese)
- [8] Caputi W J. Stretch: a time-transformation technique [J]. IEEE Trans on AES, 1971, 7(2): 269 - 278.
- [9] Peleg S, Porat B. Linear FM signal parameter estimation from discrete-time observations [J]. IEEE Trans on AES, 1991, 27(4): 607 - 615.
- [10] S Barbarossa. Analyses of multicomponent LFM signals by a combined Wigner - Hough transform [J]. IEEE Trans. on SP, 1995, 43(6): 1511 - 1515.
- [11] R Roy, A Paulraj, T Kailath. ESPRIT-A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise [J]. IEEE Trans on ASSP, 1986, 34(6): 1340 - 1342.

## 作者简介:



冯德军 男, 1972 年生于湖南湘潭, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 已发表论文三十余篇. 主要研究兴趣为雷达信号处理与目标识别.  
E-mail: fdj117@sina.com



王雪松 男, 1972 年生于内蒙古包头, 国防科技大学研究生院培养处处长, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 全国百优博士学位论文获得者. 主要研究兴趣为雷达信号处理、综合电子战等.  
E-mail: WXS1019@vip.sina.com