

# 进动锥体目标平动补偿及微多普勒提取

束长勇, 黄沛霖, 姬金祖

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对平动调制下的进动锥体锥顶及锥底滑动型散射源微多普勒提取问题, 提出一种利用微多普勒曲线交叉点频移信息完成平动补偿并利用正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)提取微多普勒的方法。根据进动锥体散射源微多普勒变化规律建立回波模型, 引入二次型平动速度调制项, 发现微多普勒曲线交叉点处的瞬时频移是由剩余平动引起的。利用 Harris-Laplace 角点检测获取时频图中微多普勒曲线交叉点信息, 通过最小二乘参数辨识得到剩余平动参数; 针对平动补偿后锥体散射源微动特性构建回波信号原子集, 利用 OMP 稀疏分解提取各散射源的微动信息。仿真验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 进动锥体目标; 滑动型强散射源; Harris-Laplace; 正交匹配追踪; 平动补偿; 微多普勒

**中图分类号:** TN 957

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.02.03

## Translation compensation and micro-Doppler extraction of the precessional cone target

SHU Chang-yong, HUANG Pei-lin, JI Jin-zu

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to extract the micro-Doppler of conic nodes and slip-type cone bottom scattering sources modulated by the translation, a method is proposed which compensates the translation by the instantaneous frequency of the cross-point among the micro-Doppler curves, and extracts the micro-Doppler of conic node and slip-type cone bottom scattering sources by orthogonal matching pursuit (OMP). The scattering model is established by the micro-doppler characteristics of the conic nodes and slip-type cone bottom scattering sources of the precessional cone-target, and the quadratic form velocity modulation is brought in, the analysis finds that the micro-Doppler of the cross point in time-frequency distribution is induced by the remaining translation. The Doppler of the cross point is extracted by the Harris-Laplace corner detection method, the translation parameter is estimated by the least square method and the translation is compensated. The atomic set, which is used to extract the signal of different scattering sources, is built according to the echo signal compensated by remaining translation. Finally, the simulation results show that the proposed algorithm is effective.

**Keywords:** precessional cone target; slip-type strong scattering source; Harris-Laplace; orthogonal matching pursuit(OMP); translation compensation; micro-Doppler

## 0 引言

弹道目标在中段飞行时通过进动维稳, 由此引起的弹头及诱饵的微多普勒差异是识别弹道目标的有效特征<sup>[1]</sup>, 所以正确提取微多普勒特征是弹道目标成功识别的关键。锥体目标微多普勒参数化提取方法主要可分为锥体目标回波信号时频分布获取、平动补偿及各散射源微多普勒分离提取。文献[1]中将平动近似为多项式描述, 将微动等效为锥旋运动, 推导了瞬时多普勒极值点与微动参数的关

系。在此基础上, 利用最小二乘参数辨识方法估计了平动参数, 实现了平动补偿和微多普勒的高精度实时提取, 该方法较适用于单散射源或不同散射源散射强度差异较明显的情况。文献[2]中利用 viterbi 算法提取最强散射点瞬时多普勒来提取最强散射点的平动多普勒, 通过平动多普勒的多项式回归得到平动参数, 进而对回波信号进行平动补偿; 再对补偿后的时频面进行 Hough 变换正弦检查来提取各散射点的微多普勒参数。但该方法不太适用于检测非正弦分布的锥底滑动型散射源的微多普勒。文献[3]中

采用形态学中的骨架提取法抑制 1 维距离像旁瓣,再在快时间频率(距离)-慢时间平面上搜索分离各散射点的微多普勒特征曲线,然后对其进行经验模式分解,得到平动项及目标的微动参数,该方法可用于分离锥底滑动型散射源的微多普勒,但其在骨架提取时对图像噪点滤除要求较高,且  $m-D$  曲线存在间断或消隐都会影响各  $m-D$  曲线的有效分离,但随着图像处理方法的改进,经验模式分解(empirical-mode decomposition, EMD)算法还是具有很大的应用价值。针对受平动调制的锥顶及锥底滑动型散射源微多普勒的平动补偿及提取问题,提出了一种先利用微多普勒曲线交叉点瞬时频移信息完成平动补偿,再利用正交匹配追踪稀疏分解提取锥顶及锥底滑动型散射源微多普勒的方法。将目标实际微多普勒频移分为模糊项和剩余项,分析发现锥体目标回波时频分布中微多普勒曲线交叉点处的瞬时频移是由剩余平动项引起的,利用 Harris-Laplace 角点检测算法提取出交叉点瞬时频移信息,利用最小二乘参数回归得到剩余平动参数,进而实现剩余平动补偿;再对剩余平动补偿后锥体目标回波用信号自相关法获得进动角速率,并将锥顶及锥底滑动型散射源的散射回波统一简化为一阶正弦分量和二阶余弦分量的合成,从而构建回波各散射源回波信号原子集,对离散采样信号而言,模糊平动项对目标回波没有影响,剩余平动补偿与平动补偿是一致的,利用正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)稀疏分解获得各散射源的微动信息。仿真验证了所提方法的有效性,可为弹道目标识别及参数提取提供参考。

## 1 进动锥体目标微动特性分析

### 1.1 等效散射点模型

由高频散射理论知,当电磁波照射静止锥体目标时,其后向散射主要由锥顶 A 及锥底边缘处散射中心 B、C(入射面与锥底边缘的交点)组成,如图 1 所示,但由于弹道锥体目标做进动运动,入射面与锥底边缘的交点是滑动的,称其为滑动型散射中心<sup>[4]</sup>。故进动锥体目标回波散射主要由锥顶及锥底滑动型散射源构成。文献[4]对锥体目标微动特性进行建模,分析得到了锥顶及锥底滑动型散射中心微多普勒的理论表达式。对锥顶散射源 A 有

$$f_{Ad} = \frac{2\omega l_1 \sin \theta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_0)}{\lambda} \quad (1)$$

对锥底滑移型散射源 B、C 有

$$f_{BCd} = 2\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \times \sin \theta \sin \alpha \{ (l_2 \pm a \cos \theta \cos \alpha / \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \alpha}) \times (1 \pm 2a \sin \alpha (3 - \cos \theta \cos \alpha) \sin(\omega t + \varphi_0)) \times \sin \theta / (8 \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \alpha} (1 - \cos \theta \cos \alpha)) \} / \lambda \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为锥旋角频率;  $\theta$  为目标进动角;  $\alpha$  为雷达视向与锥旋轴之间的夹角;  $\lambda$  为波长;  $l_1$  为锥体质心至锥顶的距离;  $l_2$  为锥体质心至锥底中心的距离;  $a$  为锥底圆盘半径;  $\varphi_0$  为目标的初始旋进角。

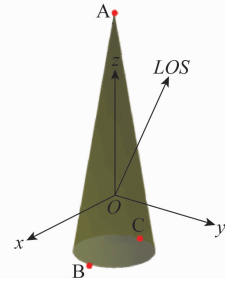


图 1 锥体目标强散射源

### 1.2 回波信号模型及微多普勒分析

锥体目标的运动可分为平动与微动,文献[1]中表明将弹道运动引起的平动速度函数近似为二阶多项式有足够精度,故在观测时间内,平动速度分量  $v_{tran}$  可用二阶多项式近似为

$$v_{tran} = \sum_{k=0,1,2} a_k t^k / k! \quad (3)$$

若雷达发射载频为  $f$ 、脉冲重复频率为 PRF 的单频信号,考虑遮挡的回波基带信号可表示为

$$s_b(t) = \exp(-j \frac{4\pi f}{c} \int v_{tran}(t) dt) \times \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp(-j2\pi \int f_{id}(t) dt \cdot \delta_i(t)) \quad (4)$$

式中,  $c$  为光速;  $f$  为载频;  $\sigma_i$  为第  $i$  个散射源的强度幅值;  $\delta_i(t)$  为第  $i$  个散射源  $t$  时刻的遮挡系数。分析不同散射源的  $\delta_i(t)$  函数,锥顶散射源 A 在雷达坐标系下的坐标为

$$OA(t) = R_{com}(t) R_{mit}(t) r_A =$$

$$(l_1 \sin \theta \cos(\omega t + \varphi_0), l_1 \sin \theta \sin(\omega t + \varphi_0), l_1 \cos \theta) \quad (5)$$

式中,  $R_{mit}$  为初始欧拉旋转矩阵;  $R_{com}$  为  $t$  时刻的进动旋转矩阵<sup>[5]</sup>, 设雷达坐标系下的  $x$  轴在入射平面内,则雷达视向与锥体极轴 OA 的夹角  $\beta$  可表示为

$$\beta = \arccos(l_1 \sin \theta \cos(\omega t + \varphi_0) \sin \alpha, 0, l_1 \cos \theta \cos \alpha) \quad (6)$$

那么不同散射源的  $\delta_i(t)$  函数可表示为

$$\delta_A(t) = \begin{cases} 0, & \gamma < \beta < \pi \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta_B(t) = 1 \quad (8)$$

$$\delta_C(t) = \begin{cases} 0, & \pi/2 < \beta < \pi - \gamma \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\gamma$  为锥体目标的半锥角。由式(4)知考虑平动及遮挡后各散射源的微多普勒频率可表示为

$$f_i = -(\frac{2f}{c} v_{tran} + f_{id}(t)) \cdot \delta_i(t), i = A, B, C \quad (10)$$

现实中弹道目标平动速度较大,在 X 波段产生的多普勒接近兆赫兹,而雷达脉冲重复频率通常只有几千赫兹<sup>[1]</sup>,在对信号进行时频分析时,回波频率远大于观察频谱的基带 $[-PRF/2, PRF/2]$ ,目标微多普勒将会发生模糊或者折叠,选择合适的基带可以避免折叠。在没有多普勒折叠的情况下,若将目标实际微多普勒频移  $f_i(i=A, B, C)$  分为

模糊项  $\omega \cdot PRF$  和剩余项  $f_{ir}(i=A,B,C)$ , 则有

$$f_i = (\omega \cdot PRF + f_{ir}) \cdot \delta_i(t), i = A, B, C \quad (11)$$

式中, 模糊系数  $\omega = \text{round}(f_i/PRF)$ , 剩余项  $f_{ir}$  为时频分布中观察到的频移, 由式(10)和式(11)有

$$f_{ir} = -\left(\frac{2f}{c}v_{tran} + f_{id}(t) + \omega \cdot PRF\right), i = A, B, C \quad (12)$$

不难发现, 当  $\omega t + \varphi_0 = \pi/2 + n\pi(n=0, 1, 2, \dots)$  时, 由式(1)及式(2)知,  $f_{id}(t) = 0$ , 此时式(12)变为

$$f_{ir} = -\left(\frac{2f}{c}v_{tran} + \omega \cdot PRF\right), i = A, B, C \quad (13)$$

即此时锥顶及锥底滑动型散射源具有相同的微多普勒频移值, 在时频分布中表现为微多普勒曲线的交点, 称该点为微多普勒曲线交叉点, 且由式(13)发现此时的微多普勒频移与目标自身微动无关, 均由剩余平动项引起, 据此可对目标回波进行平动补偿。

## 2 平动补偿及微多普勒特征提取

### 2.1 利用 Harris-Laplace 角点检测提取交叉点

提取微多普勒曲线交叉点的瞬时多普勒频移可以反演出剩余平动参数, 进而实现剩余平动补偿。微多普勒曲线脊线的交叉点可以视为图像处理中的角点, 在此可以引入 Harris-Laplace 角点检测算法<sup>[6]</sup>来提取交叉点瞬时多普勒频率信息。为了避免多分量信号双线性时频分布中交叉点<sup>[7]</sup>对微多普勒曲线交叉点提取的影响, 采用短时傅里叶变换<sup>[8-9]</sup>(short time Fourier transform, STFT)获取目标时频分布。时频分布图中的微多普勒曲线具有一定厚度, 直接对其进行角点检测会在交叉点处提取出多个角点, 为了避免多余角点信息对交叉点提取判断的影响, 可先设置合适的阈值将其二值化, 然后用 Gaussian 算子对二值图像进行平滑处理, 再由“腐蚀”和“开”运算<sup>[10]</sup>细化微多普勒曲线, 从而得到微多普勒曲线脊线, 最后在利用 Harris-Laplace 角点检测提取交叉点信息。Harris-Laplace 角点检测算法具有对图像灰度变化不变性、旋转不变性及尺度不变性, 该算法具体流程如下<sup>[11-13]</sup>:

- (1) 利用尺度自相关 Harris 算子进行角点检测  
尺度自相关矩阵定义为

$$M(x, y, \sigma_l, \sigma_D) =$$

$$\sigma_D^2 G(\sigma_l) * \begin{bmatrix} L_x^2(x, \sigma_D) & L_x L_y(x, \sigma_D) \\ L_x L_y(x, \sigma_D) & L_y^2(x, \sigma_D) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $\sigma_l$  和  $\sigma_D$  分别表示积分尺度和微分尺度;  $L_\alpha$  表示  $L$  在  $\alpha$  方向上的偏导数;  $L$  为图像的高斯尺度空间, 表示为

$$L(x, \sigma_D) = G(\sigma_D) * I \quad (15)$$

式中,  $G(\sigma_D)$  表示均值为  $D$  方差为  $\sigma$  的高斯函数;  $*$  表示线性卷积运算;  $I$  为数字影像。给定  $\sigma_l$  和  $\sigma_D$  可以得到像素点  $(x, y)$  的 Harris 角点量为

$$R(x, y, \sigma_l, \sigma_D) = \det(M(x, y, \sigma_l, \sigma_D)) - k(\text{tr}(M(x, y, \sigma_l, \sigma_D)))^2 \quad (16)$$

式中,  $k$  为角点参数, 通常取  $0.04 \sim 0.06$ 。根据计算得到的 Harris 角点量, 以某像素点为中心圈定一个局部区域, 如果该点的 Harris 角点量局域最大, 且大于给定阈值, 则提取该点为 Harris 角点。

- (2) 利用 LOG 算子筛选角点

Harris 角点易受尺度变化的影响, 利用 LOG 算子计算特征尺度可提取出具有尺度不变的角点, 定义 LOG 算子为  $|\text{LOG}(x, \sigma_n)| = \sigma_n^2 |L_{xx}(x, \sigma_n) + L_{yy}(x, \sigma_n)|$  (17) 式中,  $L_\alpha$  表示  $L$  在  $\alpha$  方向上的二阶偏导数;  $\sigma_n$  为  $n$  层的尺度。对每个 Harris 角点, 通过检查 LOG 算子在整个尺度搜索范围内是否为局部极值来确定是否为稳定点。

### 2.2 基于交叉点的剩余平动参数估计及剩余平动补偿

由式(13)知, 从微多普勒曲线脊线图中提取的交叉点瞬时频移值为剩余平动多普勒项, 表示为

$$f_{ir} = -\frac{2v_{tran}}{c} - \omega \cdot PRF \quad (18)$$

令  $a'_0 = a_0 + c \cdot \omega \cdot PRF/2$ , 结合式(3), 则式(18)简化为

$$f_{ir} = -\frac{2}{c}(a'_0 + a_1 t + a_2 t^2/2) \quad (19)$$

由角点检测得到交叉点的平动瞬时多普勒后, 剩余平动参数估计问题就转化为剩余平动多普勒的二阶多项式回归问题, 可利用最小二乘参数辨识获得目标的剩余平动参数。由文献[1]知剩余平动参数的最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} a'_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (f'_1, f'_2, \dots, f'_n) c/2f \quad (20)$$

式中,  $f'_i (i=1, 2, \dots, n)$  为第  $i$  个交叉点的微多普勒频移值;  $\mathbf{H}$  为时间矩阵, 表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2/2 \\ 1 & t_2 & t_2^2/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & t_n^2/2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中,  $t_i (i=1, 2, \dots, n)$  为第  $i$  个交叉点出现的时间。由估算出的剩余平动参数可实现对原来回波的剩余平动补偿, 补偿后的回波可表为

$$s'_b(t) = S_b(t) \cdot \exp(j \frac{4\pi f}{c}(a'_0 t + a_1 t^2/2 + a_2 t^3/6)) \quad (22)$$

### 2.3 基于 OMP 稀疏分解的散射源微多普勒曲线提取

剩余平动补偿后目标回波模型变为受平动模糊项调制的等效散射点模型回波, 由式(1)及式(2)不难发现, 锥顶及锥底滑动型散射源的散射回波可统一简化为一阶正弦分量和二阶余弦分量的合成, 则剩余平动补偿后目标回波模型可简化为

$$s'(t) = \exp(-j2\pi\omega \cdot PRF \cdot t) \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \delta_i(t) \times \exp(j2\pi(q_i \sin(\omega t + \varphi_i) + p_i \cos(2\omega t + 2\varphi_i) + c_0)) \quad (23)$$

设平动补偿后回波信号采样长度为  $E$ , 第  $e$  个采样信号为  $s'_e$ , 则采样信号可表示为  $S=(s'_1, s'_2, \dots, s'_E)$ , 其中:

$$s'_e(t_e) = \exp(-j2\pi\omega \cdot PRF \cdot t_e) \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \delta_i(t_e) \times \exp(j2\pi(q_i \sin(\omega t_e + \varphi_i) + p_i \cos(2\omega t_e + 2\varphi_i) + c_0)) \quad (24)$$

式中,  $t_e$  为第  $e$  个采样时间。由于  $\omega \cdot PRF \cdot t_e$  恒为整数, 故  $\exp(-j2\pi\omega \cdot PRF \cdot t_e)=1$ , 式(24)简化为

$$s'_e = \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp(j2\pi(q_i \sin(\omega t_e + \varphi_i) + p_i \cos(2\omega t_e + 2\varphi_i) + c_0)) \cdot \delta_i(t_e) \quad (25)$$

由式(25)发现, 对离散采样信号而言, 剩余平动补偿就相当于平动补偿了, 其中  $q_i, p_i, \omega, \varphi_i, c_0 (i=A, B, C)$  均为常数, 进动角频率  $\omega$  可由对剩余平动补偿后的目标回波用回波相关法估得的进动周期获得, 剩余未知量可通过 OMP

稀疏分解求得, 而常数  $c_0$  对 OMP 稀疏分解的结果没有影响, 可以忽略。故由式(25)可构建进动锥体目标剩余平动补偿后回波信号的过完备原子库为

$$G_k = (g_k(t_e)) = (\exp(j2\pi(q_{i1} \sin(\omega t_e + \varphi_{i3}) + p_{i2} \cos(2\omega t_e + 2\varphi_{i3})) \cdot \delta_i(t_e))) \quad (26)$$

式中,  $i1=1, 2, \dots, I_1, I_1$  为  $q_{i1}$  的搜索个数;  $i2=1, 2, \dots, I_2, I_2$  为  $p_{i2}$  的搜索个数;  $i3=1, 2, \dots, I_3, I_3$  为  $\varphi_{i3}$  的搜索个数;  $k$  表示原子在原子集中的序号,  $k=1, 2, \dots, I_1 \cdot I_2 \cdot I_3$ 。文献[14-16]中对 OMP 算法流程已有详细介绍, 此处不再累述。

得到各散射源的回波分量后, 对稀疏分解后的各散射源信号进行时频变换即可得到相应的微多普勒曲线。至此, 受平动调制的进动锥体回波平动补偿及各散射源信号微多普勒提取已完成, 具体的估计流程图如图 2 所示。

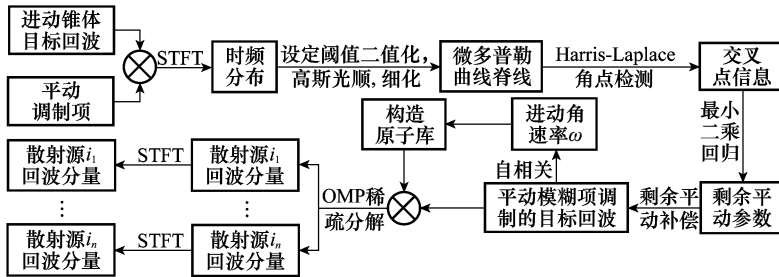


图 2 锥体目标平动补偿及微多普勒提取流程图

### 3 仿真与分析

设雷达发射载频为 10 GHz、脉冲重复频率为 2 kHz 的单频信号, 信噪比 5 dB, 锥体目标锥旋频率 1 Hz, 进动角为  $\theta=20^\circ$ , 初始旋进角  $\varphi_0=45^\circ$ , 质心至锥顶的距离  $l_1=1.125$  m, 质心至锥底中心的距离  $l_2=0.375$  m, 锥底半径  $a=0.252$  m, 锥顶散射源 A 的强度  $\sigma_A=20$ , 锥底滑动型散射源 B 的强度  $\sigma_B=10$ , 锥底滑动型散射源 C 的强度  $\sigma_C=20$ , 则由式(1)和式(2)知  $q_A$  和  $p_A$  的理论值分别为 18.14 及 0.00,  $q_B$  和  $p_B$  的理论值分别为 -9.658 及 0.572 0。观察时间为 4 s, 在观测时间内锥体雷达视向平动速度为

1 100 m/s, 一阶加速度为  $-4 \text{ m}^2/\text{s}$ , 二阶加速度为  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。考虑雷达视向与进动轴夹角  $\alpha$  为  $45^\circ$  的情况。由式(7)~式(9)知, 可观察到的散射源为 A 和 B, 图 3 给出了在给定参数下锥体目标回波的时频分布图, 设置合适的阈值将其二值化, 高斯光滑处理后进行细化处理提取脊线, 在将检测到的脊线交点一并绘于图 4 中, 由提取的交叉点信息得到剩余平动参数  $a'_{0LSR}=-9.980 \text{ m/s}, a_{1LSR}=-4.089 \text{ m}^2/\text{s}, a_{2LSR}=3.028 \text{ m}^3/\text{s}$ , 从图 3 知, 在设定的仿真参数下, 回波微多普勒没有折叠, 那么剩余平动参数的理论值分别为:  $a'_0=-\text{mod}(-1100 \times 2/0.03, 2000) \times 0.03/2=-10 \text{ m/s}, a_1=-4 \text{ m}^2/\text{s}, a_2=3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

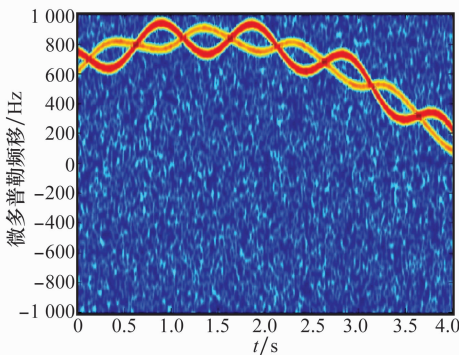
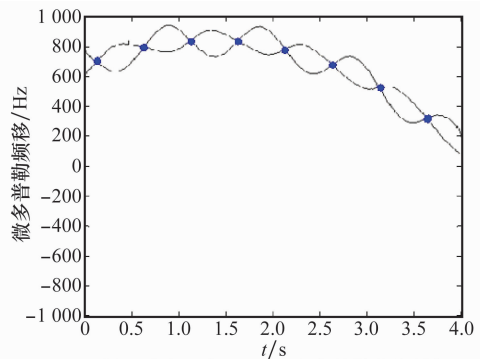


图 3 锥体目标回波时频分布



•: 提取的交叉点; —: 微多普勒曲线骨架。

图 4 微多普勒曲线脊线及交叉点提取

剩余平动补偿后的回波信号的时频分布如图 5 所示, 对补偿剩余平动项的回波用回波相关法求得进动角速度  $\omega=6.2769 \text{ rad/s}$ , 由此构建原子库, 再用 OMP 稀疏分解获得目标各散射源回波信号, 在进行信号分解时, 过多的采样信号将会导致误差的积累, 从而各散射源信号分解可能失

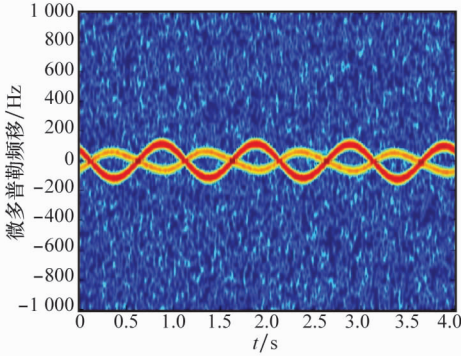


图 5 剩余平动补偿后的时频分布

为验证文中算法性能, 表 1 中列出了上述算例在不同信噪比下参数估计误差。分析发现剩余平动参数对信噪比的敏感度较低, 这是由于高斯平滑以及阈值设置滤去了大量噪声, 多普勒曲线交叉点频移值提取精度较

表 1 不同信噪比下参数估计误差

SNR/dB	$\alpha'_0/\%$	$\alpha_1/\%$	$\alpha_2/\%$	$\omega/\%$	$\sigma_A/\%$	$q_A/\%$	$\Delta p_A$	$\sigma_B/\%$	$q_B/\%$	$p_B/\%$	$\varphi_0/\%$
10	0.47	1.31	-0.62	-0.09	0.85	0.17	-0.06	0.58	-1.50	2.06	0.57
5	0.20	2.23	0.93	-0.11	-1.06	0.24	-0.10	1.39	-2.24	2.97	-0.44
0	0.61	-0.59	-1.09	-0.19	2.36	0.10	0.42	-2.86	-3.19	3.73	0.46
-5	-0.63	1.85	0.87	-0.30	-4.50	0.28	-0.19	4.18	-4.26	5.01	0.87

## 4 结 论

针对受平动调制弹道锥体目标锥顶及锥底滑动型散射源的微多普勒提取问题, 提出了一种利用微多普勒曲线交叉点瞬时频移信息完成剩余平动补偿, 然后利用 OMP 稀疏分解提取各散射源微多普勒的方法。仿真验证了本文所提算法平动补偿及进动角速率估计精度较高, 在信噪比低至 -5 dB 时, 微多普勒曲线参数估计精度仍可控制在  $\pm 6\%$  以内。但需要说明的是, 文中所构建的原子库并未考虑各散射源散射幅值的变化, 后续工作将进一步寻求锥体目标散射源散射强度变化规律。

### 参考文献:

[1] Yang Y C, Tong N N, Feng C Q, et al. Translation compensation and micro-Doppler extraction of ballistic target in midcourse[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(10): 2235-2241. (杨有春, 童宁宁, 冯存前, 等. 弹道目标中段平动补偿与微多普勒提取[J]. 宇航学报, 2011, 32(10): 2235-2241.)

[2] Yang Y C, Tong N N, Feng C Q, et al. Translation compensation and micro-Doppler extraction by using the information on the strongest scatter[J]. *Journal of Xidian University*, 2012,

文中采用一个进动周期内的 2 000 个采样信号作为原始信号来进行分解, 对分解得到各信号分量做时频变换如图 6 所示, 对散射源 A 有  $\sigma_{AOMP}=19.787, q_{AOMP}=18.183, p_{AOMP}=-0.105, \varphi_{0OMP}=44.802$ ; 对散射源 B 有  $\sigma_{BOMP}=10.139, q_{BOMP}=-9.442, p_{BOMP}=0.589, \varphi_{0OMP}=44.802$ 。

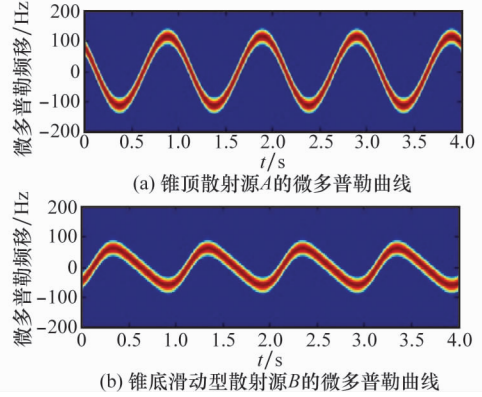


图 6 稀疏分解后各散射源时频分布

高。进动角频率的估计误差也较小, 说明用自相关函数估计信号周期具有较高精度。微多普勒曲线参数的估计误差统一控制在  $\pm 6\%$  以内, 说明了本文所提算法的有效性。

39(6): 147-153. (杨有春, 童宁宁, 冯存前, 等. 利用最强散射点信息的平动补偿与微多普勒提取[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(6): 147-153.)

[3] Luo Y, Bai Y Q, Zhang Q, et al. Translational motion compensation and micro-doppler feature extraction of ballistic targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 602-608. (罗迎, 柏又青, 张群, 等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 602-608.)

[4] Ma L, Liu J, Wang T, et al. Micro-doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(9): 1957-1967.

[5] Xu S K, Liu J H, Wei X Z, et al. Wideband electromagnetic characteristics modeling and analysis of missile targets in ballistic midcourse[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(6): 1655-1666.

[6] Deng C, Gao X B, Li X L, et al. Local histogram based geometric invariant image watermarking[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(12): 3256-3264.

[7] Yang Y, Peng Z K, Dong X J, et al. General parameterized time-frequency transform[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2014, 62(11): 2751-2764.

[8] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Trans. on*

- Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2–21.
- [9] Lovett A, Shen C, Otaguro W. Micro-Doppler; non-cooperative target classification/identification[R]. Maryland, USA: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 2004.
- [10] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing* [M]. USA: Prentice-Hall, 2002: 543–544.
- [11] Martin Z, Radek B, Petr C, et al. Towards an optimal interest point detector for measurements in ultrasound images [J]. *Measurement Science Review*, 2013, 13(6): 329–338.
- [12] Wang X Y, Niu P P, Yang H Y, et al. Affine invariant image watermarking using intensity probability density-based Harris Laplace detector [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(6): 892–907.
- [13] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63–86.
- [14] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666.
- [15] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63–86.
- [16] Bai X R, Sun G C, Wu Q S. Narrow-band radar imaging of Spinning targets [J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 4(6): 806–817.

## 作者简介:

束长勇(1989–),男,博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理及目标识别。

E-mail:drilistbox@163.com

黄沛霖(1975–),男,副教授,博士,主要研究方向为飞行器隐身设计、飞行器总体设计。

E-mail:peilin\_h@126.com

姬金祖(1982–),男,讲师,博士,主要研究方向为飞行器隐身设计、电磁计算和测试。

E-mail:jjinzu@buaa.edu.cn