

## 弹道中段不同平动多目标的平动参数估计方法

冯存前 李江 黄大荣\* 胡晓伟 韩立珣

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

**摘要:** 弹道中段多目标具有不同的平动参数, 以往针对单目标和同一平动参数的群目标的平动补偿方法不再适用。针对此问题, 该文提出了基于高阶模糊函数、延迟共轭相乘及时频分布处理相结合的多目标平动参数和微动周期估计方法。首先, 该方法利用高阶模糊函数估计出平动2阶加速度和微动周期; 然后, 通过对1次补偿后的回波进行延迟共轭相乘估计出平动1阶加速度; 最后, 利用2次补偿后目标回波时频图的差异, 对时间轴进行加权累加估计出剩余平动速度。仿真结果验证了所提算法对于多目标不同平动参数估计的有效性。

**关键词:** 微多普勒; 弹道目标; 平动补偿; 高阶模糊函数; 延迟共轭相乘

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0564-08

DOI: 10.11999/JEIT200075

## Estimation Method of Translational Parameters for Different Translational of Ballistic Targets in Midcourse

FENG Cunqian LI Jiang HUANG Darong HU Xiaowei HAN Lixun

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Multi-ballistic targets have different translational parameters in midcourse. The former translational compensation methods for single target and group targets with the same translational parameters are no longer applicable. In order to solve this problem, a new method of multi-target translation parameters and micro-motion period estimation is proposed based on high-order ambiguity, delayed conjugate multiplication and time-frequency distribution processing. First, the second-order translational acceleration and micro-motion period are estimated by using the high-order ambiguity. Then, the first-order translational acceleration is estimated by the delayed conjugate multiplication of the echo after the first compensation. Finally, the residual translational velocity is estimated by the weighted accumulation of the time axis based on the difference of the time-frequency image of the echo after the second compensation. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm for multi-target estimation of different translational parameters.

**Key words:** Micro-Doppler; Ballistic targets; Translation compensation; High-order ambiguity; Delayed conjugate multiplication

### 1 引言

近年来随着分导式多弹头及诱饵干扰等突防技术的发展<sup>[1]</sup>, 基于传统特征的识别技术失效, 战略预警和反导作战面临严峻考验, 而微动特征作为目标固有运动属性为弹道目标识别提供了一种有效途径<sup>[2]</sup>。现有许多微动特征提取、参数估计及微动分类<sup>[3-7]</sup>的文献都是基于平动已得到较好补偿的前提

下进行的, 但群目标技术的发展使得弹道目标的平动补偿更为复杂, 有待进行更深入的研究。

对于弹道中段目标的平动补偿方法国内外学者进行了广泛研究, 大致可分为以下3种: (1)基于多普勒频谱信息。文献[8]提出了频谱重排法, 对平动1阶加速度进行了估计, 但此方法易受噪声影响; 文献[9]提出一种分段平动补偿方法, 通过使回波频谱熵最小化, 在时频混叠的情况下有效地估计了加速度和速度。(2)基于时频分析。文献[10]利用目标的整体信息, 采用Radon变换检测时频曲线倾斜度, 结合最小熵准则和高斯模板函数对变换域进行峰值搜索实现平动参数估计。文献[11]通过改进的Harris角点检测算法提取出时频曲线的交点信息, 完成平动参数估计进而实现平动补偿。但是此类方

收稿日期: 2020-01-17; 改回日期: 2020-09-29; 网络出版: 2020-11-17

\*通信作者: 黄大荣 rsphdr@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701526, 61701528), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-336)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701526, 61701528), The Shaanxi Natural Science Basic Research Project (2019JQ-336)

法在受到噪声严重污染时因无法进行图像特征的有效提取而性能急剧下降。(3)基于信号处理。文献[12]利用微多普勒信号的周期性进行延迟共轭相乘消除微动信号,然后等效为多项式相位信号参数估计问题实现平动2阶加速度和1阶加速度的估计;文献[13,14]则利用进动目标微多普勒信号的对称性,通过对称共轭相乘消除微动分量后进行傅里叶变换,搜索频谱峰值信息估计平动加速度和速度。此外还可通过构造冗余的微动原子集来估计平动速度和微动参数[15],但仅适用于具有正弦形式的微动信号。

以上分析中,所采用的2阶多项式等效平动[8-11,13-15]的方法将会影响最后的补偿效果。此外,目前所进行的研究都是基于单目标或同一平动的群目标的情况,但对于更贴近实际的具有不同平动参数的多目标情况还没有相关方面的报道,因此有必要开展相关研究。

针对处理多目标问题,传统的思路都是先进行分离预处理,然后再进行参数估计,但此类方法过程繁琐且运算量大。本文考虑到弹道目标的平动补偿问题实际上是一个多项式参数估计过程,而高阶模糊函具有运算量小、估计阶数高及精度高等优势[16],因此可应用于多目标平动补偿问题中;此外,考虑到周期信号进行延迟共轭相乘处理后,可在其频谱处出现峰值,而弹头目标的微动正是周期运动;最后,利用时频分布的差异进行时间维度的加权累加可实现速度估计。仿真结果验证了所提方法的有效性和低噪声条件下的鲁棒性。

## 2 复合运动模型

弹道群目标中,主要包括弹头、轻重诱饵、弹体碎片及燃料箱等,其中:燃料箱和碎片等可利用形态加以区别,因此本文将针对真假弹头组成的多目标进行平动分析研究。

### 2.1 回波模型分析

假设雷达发射波长为 $\lambda$ 的单频信号,则雷达接收到多目标的基频回波信号为

$$s_r(t) = \sum_{i,j} \sigma_{ij} \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_{ij}(t) \right], 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中, $T$ 为观察时间, $\sigma_{ij}$ 为多目标中的第 $i$ 个目标上第 $j$ 个散射点的散射系数, $r_{ij}(t)$ 为 $t$ 时刻该散射点与雷达的径向距离。

弹道中段目标运动比较平稳,其目标运动可分解为质心平动和绕目标质心的微动两部分。故第 $i$ 个目标上第 $j$ 个散射点的径向距离可表示为

$$r_{ij}(t) = r_{Ti}(t) + r_{mij}(t) \quad (2)$$

其中, $r_{Ti}(t)$ 为平动分量, $r_{mij}(t)$ 为微动分量。

### 2.2 平动距离分析

首先利用观察时间内的某个脉冲测得速度 $v_i$ 对速度进行粗补偿[14],可解决微多普勒时频图的折叠现象,补偿后的平动速度为 $\Delta v_i$ 。同时在较短的观察时间内,平动分量可近似为3阶多项式[12],则 $t$ 时刻粗补偿后的平动距离为

$$r_{Ti}(t) = R_{i0} + \Delta v_i t + a_{i1} t^2 / 2 + a_{i2} t^3 / 6 \quad (3)$$

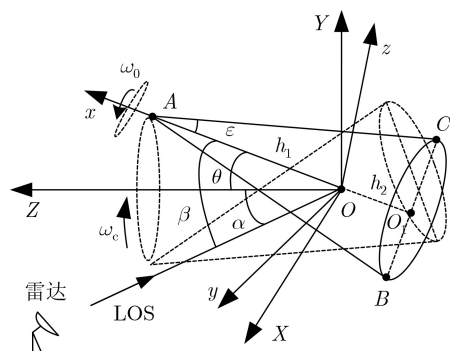
其中, $R_{i0}$ ,  $a_{i1}$ ,  $a_{i2}$ 分别为第 $i$ 个目标的初始径向距离、1阶加速度、2阶加速度。

### 2.3 微动距离分析

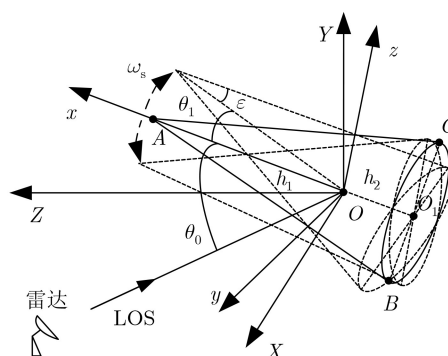
由暗室测量实验知,弹道进动锥体目标其后向散射主要由锥顶 $A$ 和锥底滑动散射中心 $B$ ,  $C$ 决定,如图1所示,其中: $O-XYZ$ 是与雷达坐标系平行的参考坐标, $O-xyz$ 为目标本地坐标系,原点 $O$ 为目标质心, $Ox$ 为目标对称轴。在图1(a)的锥体弹头进动模型中,对称轴 $Ox$ 与锥旋轴 $OZ$ 的夹角为进动角 $\theta$ ,且 $Ox$ 轴初始时刻在 $Oxy$ 平面的投影与 $OX$ 轴的夹角为初始锥旋角 $\varphi_0$ ,记初始时刻雷达视线方向 $LOS$ 与 $OYZ$ 共面,且与锥旋轴 $OZ$ 、对称轴 $Ox$ 的夹角分别为 $\alpha$ ,  $\beta$ 。

由图1(a)可知,进动目标各散射点的微动距离为

$$\left. \begin{aligned} r_{m-A} &= h_1 \cos \beta(t) \\ r_{m-B/C} &= h_2 \cos \beta(t) \pm r \sin \beta(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



(a) 弹头进动模型



(b) 诱饵摆动模型

图1 微动模型

其中,  $h_1, h_2$  分别为质心  $O$  到锥顶、锥底面的距离,  $r$  为锥体底面半径。

$$\beta(t) = \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha \cos(\omega_c t + \varphi_0) \quad (5)$$

其中,  $\omega_c, \varphi_0$  分别为锥旋角速度、对称轴  $Ox$  的初始方位角。

图1(b)为锥体诱饵摆动模型, 记初始时刻对称轴  $Ox$  位于摆动中心, 与雷达视线方向  $LOS$  夹角为  $\theta_0$ , 摆动幅度为  $\theta_1$ , 摆动角速度为  $\omega_s$ 。则  $t$  时刻  $LOS$  与  $Ox$  的夹角可表示为

$$\beta'(t) = \theta_0 + \theta_1 \sin \omega_s t \quad (6)$$

摆动时诱饵不存在滑动散射点, 故直接将等效散射中心  $(A, B, C)$  代入式(4)即可。远场条件下, 在较短的观察时间内, 可认为  $\alpha, \theta_0$  保持不变。从式(5), 式(6)可看出, 锥体弹头和诱饵的微动具有周期性。

### 3 多目标平动参数估计方法

#### 3.1 基于高阶模糊函数的2阶加速度及微动周期估计

信号  $x(t)$  的高阶矩函数定义<sup>[16]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} F_3(t, \tau) &= \exp \left[ -j \frac{2}{\lambda} (2\pi a_2 \tau^2 t + a_1 \tau^2 + a_2 \tau^2) \right] \\ G_3(t, \tau) &= \sum_{i=1}^3 \sigma_i^4 \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [r_{mi}(t) - 2r_{mi}(t + \tau) + r_{mi}(t + 2\tau)] \right\} \\ H_3(t, \tau) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1, k \neq j}^3 \sigma_i^2 \sigma_j \sigma_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [r_{mi}(t) - 2r_{mi}(t + \tau) + r_{mi}(t + 2\tau)] \right\} \\ Q_3(t, \tau) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1, l \neq k}^3 2\sigma_i \sigma_j \sigma_k^* \sigma_l^* \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [r_{mi}(t) - 2r_{mi}(t + \tau) + r_{mi}(t + 2\tau)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在式(11)中,  $G_3(t, \tau)$  为自项,  $Q_3(t, \tau)$  和  $H_3(t, \tau)$  为交叉项。当延迟时间为微动周期时, 散射点自项为常数, 交叉项能量相互分散, 其能量和在频域很小。因此模糊函数将在延迟时间为微动周期处出现峰值。

同理, 当雷达回波中含有多个目标时, 虽然相互之间存在干扰, 但其回波3阶模糊函数  $X_3(f, \tau)$  仍会在相应的目标微动周期处出现峰值。因此可以通过  $i$  次“峰值搜索-去除峰值”操作估计出第  $i$  个目标的微动周期  $\hat{T}_i$  及平动2阶加速度  $\hat{a}_{i2}$

$$\left. \begin{aligned} (f_{ci}, \tau_i) &= \arg \max \{|X_3(f, \tau)|\} \\ \hat{T}_i &= \tau_i \\ \hat{a}_{i2} &= \lambda f_{ci} / 2\tau_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中,  $f_{ci}$  和  $\tau_i$  分别表示搜索到的第  $i$  个峰值的频率和延迟时间。

$$P_M(t, \tau) = \prod_{q=0}^{M-1} [x^{(*q)}(t + q\tau)]^{C_{M-1}^q} \quad (7)$$

其中,

$$x^{(*q)}(t) = \begin{cases} x(t), & q \text{ 为偶数} \\ x^*(t), & q \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (8)$$

对  $P_M(t, \tau)$  进行傅里叶变换得到高阶模糊函数

$$X_M(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_M(t, \tau) \exp(-j2\pi f t) dt \quad (9)$$

为便于分析, 不妨假设雷达回波只含有一个目标, 此时

$$s_r(t) = \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_T(t) \right] \sum_{i=1}^3 \sigma_i \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_{mi}(t) \right] \quad (10)$$

回波的3阶矩函数可表示为

$$\begin{aligned} P_3(t, \tau) &= s_r(t) \times [s_r^*(t + \tau)]^2 \times s_r(t + 2\tau) \\ &= F_3(t, \tau) \times [G_3(t, \tau) + H_3(t, \tau) + Q_3(t, \tau)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中,

#### 3.2 基于延迟共轭相乘的1阶加速度估计

利用  $\hat{a}_{i2}$  对目标回波分别进行“1次补偿”, 第  $i$  个2阶加速度补偿后的目标雷达回波为

$$\tilde{s}_{ri}^1(t) = s_r(t) \exp \left( j \frac{2\pi}{3\lambda} \hat{a}_{i2} t^3 \right) = H_i(t) + G_i(t) \quad (14)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} H_i(t) &= \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ R_{i0} + \Delta v_i t + \frac{1}{2} a_{i1} t^2 + \frac{1}{6} (a_{i2} - \hat{a}_{i2}) t^3 + r_{mij}(t) \right] \right\} \\ G_i(t) &= \sum_{k=1, k \neq i}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{kj} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ r_{kj}(t) - \frac{1}{6} \hat{a}_{i2} t^3 \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

利用第*i*个目标微动周期 $\hat{T}_i$ 对其 $\tilde{s}_{ri}(t)$ 进行延迟共轭相乘处理

$$\begin{aligned}\tilde{s}_{ri}(t) \tilde{s}_{ri}^*(t + \hat{T}_i) &= H_i(t) H_i^*(t + \hat{T}_i) \\ &\quad + H_i(t) G_i^*(t + \hat{T}_i) \\ &\quad + G_i(t) H_i^*(t + \hat{T}_i) \\ &\quad + G_i(t) G_i^*(t + \hat{T}_i)\end{aligned}\quad (16)$$

当2阶加速度估计误差很小即 $a_{i2} - \hat{a}_{i2} \approx 0$ 时, 式(16)中的第1项为

$$\begin{aligned}H_i(t) H_i^*(t + \hat{T}_i) &= \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \Delta v_i \hat{T}_i + a_{i1} \hat{T}_i t + \frac{1}{2} a_{i1} \hat{T}_i^2 \right) \right] \\ &\quad \cdot \left( \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sigma_{ij} \sigma_{ik}^* \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ r_{mij}(t) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - r_{mik}(t + \hat{T}_i) \right] \right\} \right)\end{aligned}\quad (17)$$

因为 $\hat{T}_i \approx T_i$ , 所以式(17)中的自项为

$$H'_i(t) = \sum_{j=1}^3 \sigma_j^2 \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \Delta v_i \hat{T}_i + a_{i1} \hat{T}_i t + \frac{1}{2} a_{i1} \hat{T}_i^2 \right) \right] \quad (18)$$

观察知,  $H'_i(t)$ 是一个单频函数, 对其进行傅里叶变换得

$$\begin{aligned}H_i(f) &= \text{FFT}[H'_i(t)] \\ &= \sum_{j=1}^3 \sigma_j^2 \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \Delta v_i \hat{T}_i + \frac{1}{2} a_{i1} \hat{T}_i^2 \right) \right] \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left( f - \frac{2a_{i1} \hat{T}_i}{\lambda} \right)\end{aligned}\quad (19)$$

由其频谱峰值位置 $f_i$ 可估计出1阶加速度

$$\hat{a}_{i1} = f_i \lambda / 2 \hat{T}_i \quad (20)$$

交叉项在频域能量分散, 对局部峰值位置影响不大。同理, 对式(16)进行傅里叶变换, 其余项频域能量分散, 频谱峰值保持位置不变, 即在多目标多散射点的情况下, 其频谱仅是对应噪声基底增加, 但局部峰值仍然明显。

### 3.3 基于时频分布的平动速度补偿

利用估计的 $(\hat{a}_{i1}, \hat{a}_{i2})$ 对目标回波进行“2次补偿”, 补偿后的目标回波为

$$\tilde{s}_{ri}^2(t) = s_r(t) \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{2} \hat{a}_{i1} t^2 + \frac{1}{6} \hat{a}_{i2} t^3 \right) \right] \quad (21)$$

在补偿后的*i* × *j*条目标回波时频图曲线中, 将

会表现为某一目标散射点对应的*j*条曲线被“拉平”, 而其它目标散射点对应的曲线将会有不同程度的倾斜; 被“拉平”的*j*条曲线一个周期内存在两个能量较大的交点, 且交点处曲线趋势变化快。

基于以上分析, 我们将补偿后的回波时频曲线沿着时间横坐标进行累加处理。但由于时频曲线中存在其它能量强点, 如: 该*j*条曲线的极值点位置附近的点、其它时频曲线的交点, 这些点的存在将会对直接累加后的效果产生干扰。在整个观察周期内: 该*j*条曲线交点处所对应的这一行时频矩阵, 具有多个能量强点, 且交点处曲线斜率更大, 使得能量强点的持续时间短。相比之下, 其它曲线交点仅是个别强点; 单曲线极值点位置附近的点能量相对较低, 且曲线平缓, 强点持续时间更长。即*j*条曲线交点所对应位置处的时频矩阵数据, 因具有多个持续时间短的能量强点, 将会在其频谱上表现为: 在更多的分频通道上分布能量较大的点。因此, 将不同分频通道上的能量进行累加, 该交点所对应的纵坐标处会出现最大值, 从而实现对第*i*个目标的平动速度的估计。具体操作如下:

$$\begin{aligned}S'_{ri}(\varepsilon, f) &= \text{FFT}_2[|\text{STFT}(\tilde{s}_{ri}^2(t))|] \\ S_{ri}(f) &= \sum_{\varepsilon} S'_{ri}(\varepsilon, f)\end{aligned}\quad (22)$$

其中,  $\text{FFT}_2$ 表示对第2维度进行快速傅里叶变换,  $\text{STFT}$ 表示短时傅里叶变换。

然后对多通道能量累加后的值进行最大值搜索

$$\begin{aligned}f'_i &= \arg \max \{S_{ri}(f)\} \\ \Delta \hat{v}_i &= \lambda f'_i / 2\end{aligned}\quad (23)$$

根据上述分析, 本文弹道中段多目标平动参数估计步骤如下:

步骤 1 计算雷达回波 $s_r(t)$ 的3阶模糊函数 $X_3(f, \tau)$ , 并根据明显的独立峰值数量判断目标数目*N*, 进行*i* ( $1 \leq i \leq N$ )次“峰值搜索-去除峰值”估计出*N*个目标的平动2阶加速度 $\hat{a}_{i2}$ 、微动周期 $\hat{T}_i$ 。令*i* = 1;

步骤 2 利用 $\hat{a}_{i2}$ 进行回波“1次补偿”得到 $\tilde{s}_{ri}^1(t)$ , 然后利用 $\hat{T}_i$ 对 $\tilde{s}_{ri}^1(t)$ 进行延迟共轭相乘, 并通过频谱峰值搜索估计出第*i*目标的平动1阶加速度 $\hat{a}_{i1}$ ;

步骤 3 利用 $(\hat{a}_{i1}, \hat{a}_{i2})$ 进行回波“2次补偿”得到 $\tilde{s}_{ri}^2(t)$ , 对其进行STFT得到时频图, 通过1次 $\text{FFT}_2$ 后累加多通道的能量, 并搜索峰值, 估计出第*i*目标的平动速度 $\Delta \hat{v}_i$ ;

步骤 4 令*i* = *i* + 1, 重复步骤2和步骤3, 估计下一个目标的平动参数, 直到*i* = *N* + 1。

#### 4 仿真分析

为验证本文方法的有效性,进行如下仿真。设锥体参数为:质心到锥顶、锥底的距离分别为 $h_1 = 1.125$  m,  $h_2 = 0.375$  m, 底面半径 $r = 0.252$  m, 目标散射数据由物理光学法获得。微动参数为:进动时,进动角 $\theta = 10^\circ$ , 锥旋角速度 $\omega_c = 6$  rad/s, 初始锥旋角 $\varphi_0 = 10^\circ$ , 雷达视线与锥旋轴 $\alpha = 45^\circ$ ;摆动时,摆动角幅度 $\theta_1 = 10^\circ$ , 初始摆动角 $\theta_0 = 30^\circ$ , 摆动角速度 $\omega_s = 8$  rad/s。雷达参数:发射载频 $f_0 = 10$  GHz, 脉冲重复频率PRF = 1 kHz, 观察时间 $T = 4$  s, 信噪比为5 dB, 考虑遮挡效应。

设雷达目标回波中包含1个锥体弹头和1个锥体诱饵, 目标平动参数为:弹头,  $\Delta v_1 = -4$  m/s,  $a_{11} = 1.5$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{12} = 0.5$  m/s<sup>3</sup>; 诱饵 $\Delta v_2 = -1.5$  m/s,  $a_{21} = 0.8$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{22} = 0.25$  m/s<sup>3</sup>。图2(a)为雷达目标回波的时频图, 图2(b)为目标回波的3阶模糊函数, 可得到明显的两个独立峰值。考虑到弹头的进动周期明显比诱饵的摆动周期长, 因此可在“峰值搜索-去除峰值”过程中, 以第1个目标“主峰值”为圆心, 以 $\Delta r'$ 为半径, 将此圆范围内的点进行置零处理。设置搜索的时间步长为 $\Delta t' = 2/\text{PRF}$ ,  $\Delta r' = 50$  (局部峰值数量)。

由图2(b)可知回波3阶模糊函数中两个峰值位

置, 代入式(13)可得 $\hat{a}_{12} = 0.5001$  m/s<sup>3</sup>,  $\hat{T}_1 = 1.0480$  s,  $\hat{a}_{22} = 0.2490$  m/s<sup>3</sup>,  $\hat{T}_2 = 0.7860$  s, 与实际值相差无几。

将 $\hat{a}_{12}$ ,  $\hat{a}_{22}$ 分别代入式(14)得“1次补偿”后的 $\tilde{s}_{r1}^1(t)$ ,  $\tilde{s}_{r2}^1(t)$ (混合信号1, 2), 然后利用 $\hat{T}_1$ ,  $\hat{T}_2$ 分别代入式(16)对 $\tilde{s}_{r1}^1(t)$ ,  $\tilde{s}_{r2}^1(t)$ 进行延迟共轭相乘, 频谱如图3。峰值坐标分别为 $f_1 = 41.99$ ,  $f_2 = 105$ , 最后代入式(20)计算得 $\hat{a}_{11} = 1.5026$  m/s<sup>2</sup>,  $\hat{a}_{21} = 0.8014$  m/s<sup>2</sup>。

利用 $(\hat{a}_{12}, \hat{a}_{11})$ ,  $(\hat{a}_{22}, \hat{a}_{21})$ 结合式(21), 式(22), 加权累加处理后的结果如图4所示。结合式(23)得 $\Delta \hat{v}_1 = -4.1250$  m/s,  $\Delta \hat{v}_2 = -1.4063$  m/s。最后利用 $(\hat{a}_{12}, \hat{a}_{11}, \Delta \hat{v}_1)$ ,  $(\hat{a}_{22}, \hat{a}_{21}, \Delta \hat{v}_2)$ 分别补偿目标回波, 从而完成目标1, 2的平动补偿。

需要说明的是, 模糊函数的时间搜索步长 $\Delta \tau$ 对参数的估计影响较大, 原因在于当被估计周期不是 $\Delta \tau$ 的整数倍时, 该周期处的峰值将会被搜索“跳过”, 从而产生较大误差。本文经过多次仿真实验表明: 仿真时间相差不大的前提下只要保持 $\Delta \tau \leq 0.004$  s, 估计参数仍然有效。因此可以选择较小的 $\Delta \tau$ 来减小估计误差, 本文选取 $\Delta \tau = 2/\text{PRF}$ 。

接下来, 我们对不同信噪比条件下参数估计的效果进行100次蒙特卡洛仿真。定义其归一化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMES)为

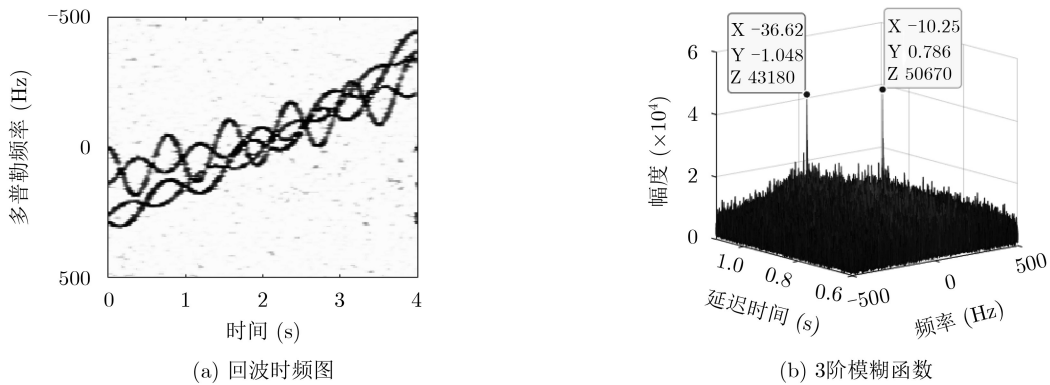


图2 目标混合回波

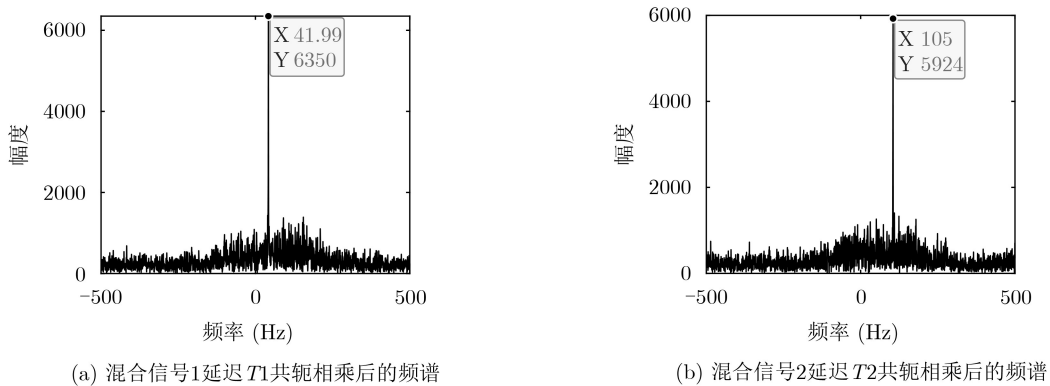


图3 延迟共轭相乘后的频谱图

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left[ \left( \hat{X}(d) - X(d) \right)^2 / X(d)^2 \right]} \quad (24)$$

其中， $D$ 为蒙特卡罗仿真次数， $\hat{X}(d)$ ,  $X(d)$ 分别为第 $d$ 次仿真的估计值、真实值。

不同参数在不同信噪比条件下的NRMES如图5

所示。分析知，当信噪比不低于3 dB时，平动参数能够实现有效估计；当信噪比低于3 dB时，由于噪声干扰增大，一个目标的峰值搜索出现较大误差，但另一个目标仍能实现有效估计；由于其它时频曲线交点的干扰，目标的平动速度估计误差相对较大。

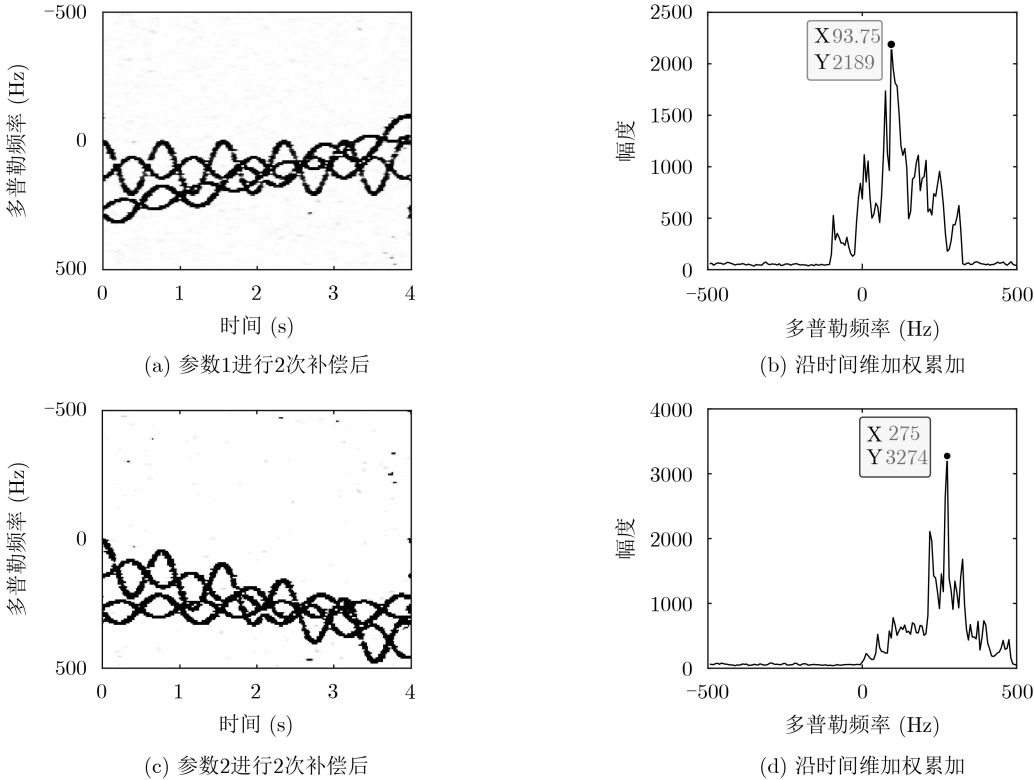


图4 剩余平动速度估计

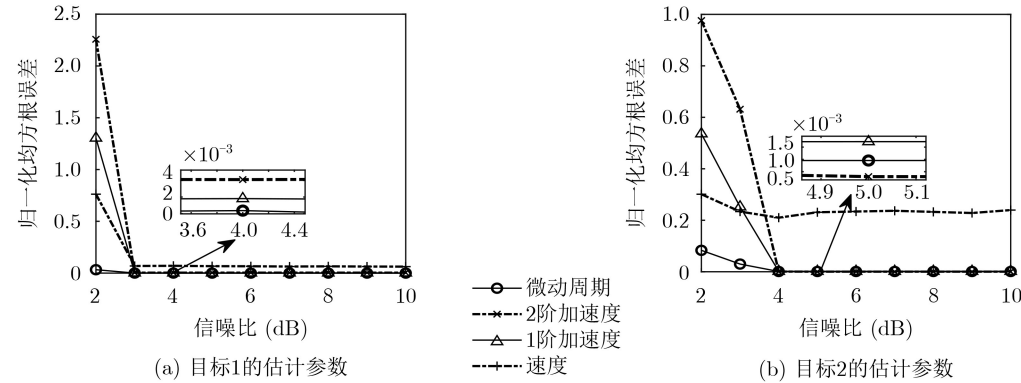


图5 参数估计值的蒙特卡洛仿真

表1 多目标同平动参数的估计性能

| 信噪比(dB) | 1阶加速度估计的NRMES |        | 速度估计的NRMES |        |
|---------|---------------|--------|------------|--------|
|         | 本文方法          | 文献[10] | 本文方法       | 文献[10] |
| 7       | 0.0010        | 0.3623 | 0.1173     | 0.8714 |
| 6       | 0.0333        | 0.3619 | 0.1097     | 0.6768 |
| 5       | 0.1770        | 0.3598 | 0.1112     | 1.0582 |

为进一步验证本文方法的有效性，分别与文献[10,11]进行多目标、单目标同平动参数估计对比，表1，表2给出100次蒙特卡罗仿真的对比结果，图6—图8为其使用方法。

由表1，表2知，与文献[10,11]相比本文方法精度更高，分析如下：(1)与文献[10]相比，Radon变

表2 单目标平动参数的估计性能

| 信噪比(dB) | 2阶加速度估计的NRMES |        | 1阶加速度估计的NRMES |        | 速度估计的NRMES |        |
|---------|---------------|--------|---------------|--------|------------|--------|
|         | 本文方法          | 文献[11] | 本文方法          | 文献[11] | 本文方法       | 文献[11] |
| 1       | 0.0039        | 1.8364 | 0.0010        | 0.5536 | 0.0658     | 0.1380 |
| 0       | 0.0038        | 2.0779 | 0.0010        | 0.6453 | 0.0837     | 0.1952 |
| -1      | 0.0039        | 3.4399 | 0.0012        | 1.3139 | 0.0855     | 0.5301 |
| -2      | 0.0042        | 4.2443 | 0.0025        | 1.4386 | 0.0901     | 0.4458 |
| -3      | 3.1124        | 5.4506 | 0.7631        | 1.7945 | 0.2575     | 0.6589 |

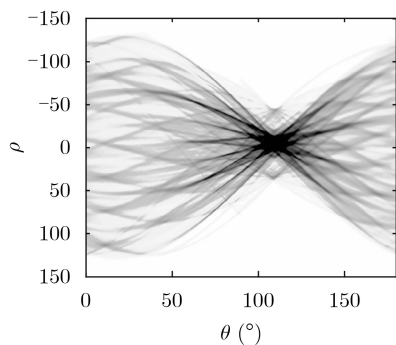


图6 文献[10]采用的Radon变换

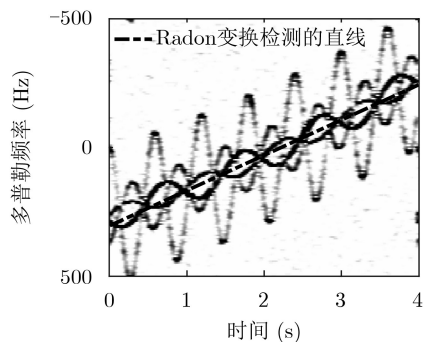


图7 文献[10]检测到的平动直线

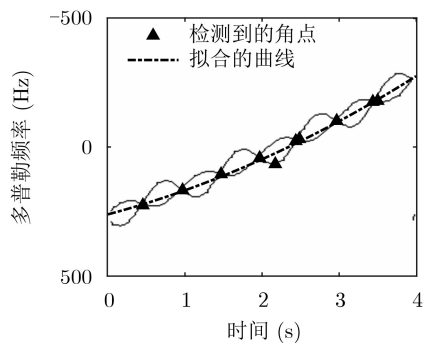


图8 文献[11]检测到的角点和拟合曲线

化仅能对整体时频图趋势进行直线拟合,这与实际曲线产生较大误差,而本文方法采用高阶多项式进行估计,因此精度更高;(2)与文献[11]比较,角点检测存在个别错误角点影响最终的拟合效果,并且当信噪比降低时角点检测错误率更高,而本文是利

用信号延迟共轭相乘后自项能量高的特性,能更好地降低信噪比的影响,鲁棒性更强。

## 5 结束语

多目标雷达回波信号是多个分量的叠加,想要直接分离比较困难。本文采用高阶模糊函数通过峰值搜索完成逐次估计,并结合时频分析,可在不分离信号的前提下直接实现平动参数和微动周期的高精度估计,为弹道目标的参数估计和识别提供重要基础。

本文方法实质上是利用了微动信号的周期性,通过延迟共轭相乘消除或降低微动的影响来估计平动参数,因此可用于分析两个以上的目标,为弹道群目标的平动补偿提供一种思路。但是,多目标回波信号的延迟共轭将会导致处理后的回波信噪比降低,致使噪声鲁棒性变弱,且更多的时频曲线交点也会影响平动速度估计的效果,这也将是下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] SAMSON V. American Missile Defense: A Guide to the Issues[M]. Santa Barbarn: Praeger Security International, 2010: 44–78.
- [2] CHEN V C, LI F, HO S S, *et al.* Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 271–276. doi: [10.1049/ip-rsn:20030743](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20030743).
- [3] WANG Yizhe, FENG Cunqian, ZHANG Yongshun, *et al.* Classification of space targets with micro-motion based on deep CNN[C]. The 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology, Harbin, China, 2019: 557–561.
- [4] LEI Peng, SUN Jinping, WANG Jun, *et al.* Micromotion parameter estimation of free rigid targets based on radar micro-Doppler[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3776–3786. doi: [10.1109/TGRS.2012.2185244](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2185244).
- [5] HONG Ling, DAI Fengzhou, and WANG Xili. Micro-Doppler analysis of rigid-body targets via block-sparse

- forward-backward time-varying autoregressive model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1349–1353. doi: [10.1109/LGRS.2016.2585583](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2585583).
- [6] 苏楠, 戴奉周, 刘宏伟. 基于HRRP序列的钝头倒角锥目标微动特性分析及参数估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1751–1757. doi: [10.11999/JEIT180520](https://doi.org/10.11999/JEIT180520).
- SU Nan, DAI Fengzhou, and LIU Hongwei. Micro-motion characteristic analysis and parameters estimation for blunt-nosed chamfered cone based on HRRP sequence[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1751–1757. doi: [10.11999/JEIT180520](https://doi.org/10.11999/JEIT180520).
- [7] 魏嘉琪, 张磊, 刘宏伟. 宽带雷达三维干涉测量弹道目标微动参数估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 787–794. doi: [10.11999/JEIT180452](https://doi.org/10.11999/JEIT180452).
- WEI Jiaqi, ZHANG Lei, and LIU Hongwei. Micro-motion parameters estimation of ballistic targets based on wide-band radar three dimensional interferometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 787–794. doi: [10.11999/JEIT180452](https://doi.org/10.11999/JEIT180452).
- [8] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 加速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 705–711. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.02.053](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.02.053).
- GAO Hongwei, XIE Lianggui, WEN Shuliang, et al. Research on the influence of acceleration on micro-Doppler and its compensation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 705–711. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.02.053](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.02.053).
- [9] ZHANG Wenpeng, LI Kangle, and JIANG Weidong. Micro-motion frequency estimation of radar targets with complicated translations[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(6): 903–914. doi: [10.1016/j.aeue.2015.02.011](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.02.011).
- [10] 胡晓伟, 童宁宁, 董会旭, 等. 弹道中段群目标平动补偿与分离方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 291–296. doi: [10.11999/JEIT140494](https://doi.org/10.11999/JEIT140494).
- HU Xiaowei, TONG Ningning, DONG Huixu, et al. Translation compensation and resolution of multi-ballistic targets in midcourse[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 291–296. doi: [10.11999/JEIT140494](https://doi.org/10.11999/JEIT140494).
- [11] 韩立珣, 田波, 冯存前, 等. 进动弹道目标平动补偿与分离[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1459–1466. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0641](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0641).
- HAN Lixun, TIAN Bo, FENG Cunqian, et al. Translation compensation and resolution of ballistic target with precession[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(7): 1459–1466. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0641](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0641).
- [12] 贺思三, 赵会宁, 张永顺. 基于延迟共轭相乘的弹道目标平动补偿[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 505–510. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14087](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14087).
- HE Sisan, ZHAO Huining, and ZHANG Yongshun. Translational motion compensation for ballistic targets based on delayed conjugated multiplication[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 505–510. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14087](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14087).
- [13] LI Jingqing, HE Sisan, FENG Cunqian, et al. Method for compensating translational motion of rotationally symmetric target based on local symmetry cancellation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(1): 36–39. doi: [10.21629/JSEE.2017.01.05](https://doi.org/10.21629/JSEE.2017.01.05).
- [14] 贺思三, 赵会宁, 张永顺. 弹道中段进动目标高精度平动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 1962–1968. doi: [10.11999/JEIT151231](https://doi.org/10.11999/JEIT151231).
- HE Sisan, ZHAO Huining, and ZHANG Yongshun. Translation motion high accuracy compensation for procession ballistic target in midcourse[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1962–1968. doi: [10.11999/JEIT151231](https://doi.org/10.11999/JEIT151231).
- [15] GU Fufei, FU Minhui, LIANG Bishuai, et al. Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of space spinning targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(10): 1550–1554. doi: [10.1109/LGRS.2018.2849869](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2849869).
- [16] WANG Yong, ABDELKADER A C, ZHAO Bin, et al. Imaging of high-speed manoeuvring target via improved version of product high-order ambiguity function[J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(4): 385–394. doi: [10.1049/iet-spr.2015.0120](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2015.0120).
- 冯存前: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为目标探测与识别、雷达信号处理及雷达电子战系统。
- 李江: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为目标探测与识别。
- 黄大荣: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为雷达系统总体、雷达成像及运动补偿。
- 胡晓伟: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为目标探测与识别。
- 韩立珣: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为目标探测与识别。

责任编辑: 陈倩