

# 多视角微多普勒融合的进动目标特征提取

赵 双 鲁卫红 冯存前 贺思三 李靖卿

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安 710051)

**摘 要:** 微动特征是弹道目标识别的重要特征之一。针对锥体目标模型, 提出了一种基于多视角窄带雷达网的微动参数提取方法。在详细分析锥体目标等效散射中心微多普勒变化规律的基础上, 利用各散射中心之间的微多普勒相关性, 结合频率补偿的方法, 实现了回波多普勒谱中各散射中心对应的微多普勒曲线的匹配识别。在此基础上, 构建多视角联合方程组, 提取出锥体目标的进动角、底面半径、锥体高度等参数。仿真结果证明了该方法的有效性与适应性。

**关键词:** 进动特征; 窄带雷达; 频率补偿; 多视角

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.03.006

## Feature Extraction of Precession Targets Based on Multi-aspect Micro-Doppler Fusion

ZHAO Shuang LU Wei-hong FENG Cun-qian HE Si-san LI Jing-qing

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

**Abstract:** Micro-motion feature is one of the crucial features used for ballistic target recognition. Aiming at the model of cone-shaped target, a novel algorithm based on the multi-aspect narrowband radar network is proposed to extract the micro-motion parameters in this paper. Firstly, on the basis of analyzing the micro-Doppler change rule of the equivalent scattering centers on the precession cone-shaped target in detail, the micro-Doppler curve of each scattering center in echo Doppler spectrum is matched and identified by utilizing the correlation of the micro-Doppler among three scattering centers combined with the frequency compensation method. Then based on this, the multi-aspect associated systems of equations are established, and parameters including the precession angle, radius of undersurface and height of the cone-shaped target are extracted jointly. Finally, the simulation results are given for validating the effectiveness and adaptability of the proposed algorithms.

**Key words:** precession feature; narrowband radars; frequency compensation; multi-aspect

## 1 引言

弹道导弹防御的关键是对目标参数的有效提取和真假弹头的准确识别,且目标的长度信息和进动特性往往作为区分弹头和诱饵的重要依据。由于进动会对雷达回波产生微多普勒调制,因此可以通过对雷达回波微多普勒进行分析,进而得到目标的特征参数用于识别<sup>[1-4]</sup>。此外,多视角观测信息

融合能有效地解决单视角观测时目标进动角与观测角相耦合的问题,在观测角未知的情况下也能实现对目标参数的求解,因而备受关注<sup>[5-8]</sup>。

但是,目前关于多视角观测提取目标特征参数的研究报道大多是基于高分辨距离像提出来的,文献[7,8]提出利用多视角距离像序列对目标的长度和进动角进行联合估计,但该方法要求所有参与观测雷达都具有足够高的距离分辨率,真实作战时难

以满足。而窄带雷达由于受到带宽的限制,难以从距离像中提取目标的微动信息,因而相关研究较少。文献[9]对锥体目标各散射中心之间的微多普勒相关性进行了详细的分析论证,并提出利用微多普勒相关性进行目标参数求解的思想,但文中缺少精确的微多普勒模型和区分各散射中心所对应微多普勒曲线的方法。而就多视角观测而言,不同视角下散射中心的匹配是参数联合提取的前提,研究如何解决这一问题对目标参数的提取具有重要意义。

本文基于文献[9]提出的散射中心微多普勒相关性,对多视角目标参数联合提取做了进一步分析研究。论文安排如下:第2节建立了进动锥体目标的微多普勒模型,分析了3个散射中心同时可见时的微多普勒关系;第3节采用频率补偿的方法,实现了各散射中心的匹配识别,并着重分析了两部窄带雷达联合提取目标进动和结构特征的新方法;第4节计算仿真分析了本文方法的准确性,并对目标参数提取精度随进动角变化的关系做了比较研究。

## 2 进动模型分析

以进动锥体为例,建立如图1所示的组网雷达系统模型, $O'-X'Y'Z'$ 为全局坐标系, $R_{i'}, i'=1, 2, \dots, N$ 为雷达网中的第*i'*部单基雷达, $\mathbf{n}_{i'}, i'=1, 2, \dots, N$ 为第*i'*部雷达的单位视线方向。假设其中的各部雷达均已达到时间同步。任取雷达网中一部雷达进行分析, $O-XYZ$ 为参考坐标系:以目标对称轴与锥旋轴的交点 $O$ 为坐标原点,以目标锥旋轴为 $Y$ 轴,其锥顶方向为 $Y$ 轴正方向,雷达视线与锥旋轴确定的平面为 $XOY$ 平面, $Z$ 轴方向符合右手螺旋准则。定义雷达视线方向与对称轴构成的平面为底面圆环的电磁波入射平面,该平面与圆环交于 $p, q$ 两点。设目标的锥旋角速度为 $\omega_c$ ,雷达视线与锥旋轴的夹角为 $\alpha$ ,与对称轴夹角为 $\beta$ ,进动角为 $\theta$ ,锥体自身的半锥角为 $\varepsilon$ ,锥体高度为 $h$ ,底面半径为 $r$ ,锥顶与进动中心的距离为 $h_1$ ,底面中心与进动中心的距离为 $h_2$ ,且目标满足远场条件,雷达与进动中心的距离为 $R_0$ 。

根据散射中心理论,对于旋转对称目标,其高频散射特性主要由锥顶 $D$ 及底面边缘两个散射中心 $p, q$ 确定<sup>[1,5]</sup>。且对于单部雷达而言,三个散射点同时可见的雷达观测视角范围为 $\beta \in (0, \varepsilon) \cup (\pi/2, \pi - \varepsilon)$ ,而通常情况下,半锥角 $\varepsilon$ 较小<sup>[9-10]</sup>,本

文主要就 $\beta \in (\pi/2, \pi - \varepsilon)$ 这一范围内的目标微动特征进行分析提取。

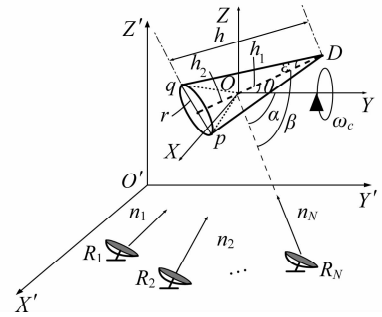


图1 组网雷达示意图

Fig. 1 The sketch map of netted radar

$t$ 时刻,取锥体对称轴上的单位方向向量为:

$$\mathbf{OD} = [\sin\theta\sin(\omega_c t + \varphi_0), \cos\theta, \sin\theta\cos(\omega_c t + \varphi_0)]^T \quad (1)$$

式中, $\varphi_0$ 为初始相位角。雷达网中,第*N*部雷达的视线方向向量记为 $\mathbf{OR}_N$

$$\mathbf{OR}_N = [\sin\alpha_N, \cos\alpha_N, 0]^T \quad (2)$$

式(2)中 $\alpha_N$ 为第*N*部雷达视线与锥旋轴的夹角。

由式(1)、(2)可得雷达视线与对称轴的夹角 $\beta$ 满足:

$$\cos\beta(t) = \mathbf{OD} \cdot \mathbf{OR}_N / (|\mathbf{OD}| |\mathbf{OR}_N|) = \cos\theta\cos\alpha_N + \sin\theta\sin\alpha_N\sin(\omega_c t + \varphi_0) \quad (3)$$

对各散射中心在雷达视线上的投影关系分析可知,锥体3个散射中心到雷达的距离分别为:

$$\begin{cases} R_D = R_0 + h_1\cos\beta(t) \\ R_p = R_0 - h_2\cos\beta(t) + r\sin\beta(t) \\ R_q = R_0 - h_2\cos\beta(t) - r\sin\beta(t) \end{cases} \quad (4)$$

假设雷达波长为 $\lambda$ ,由式(3)和式(4)可得,进动引发的锥顶 $D$ 及底面边缘两个散射中心 $p, q$ 的微多普勒调制为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} f_{d-D} = 2\omega_c h_1 \sin\theta \sin\alpha_N \cos(\omega_c t + \varphi_0) / \lambda \\ f_{d-p} = 2\omega_c (-h_2 - r/\tan\beta(t)) \sin\theta \sin\alpha_N \cos(\omega_c t + \varphi_0) / \lambda \\ f_{d-q} = 2\omega_c (-h_2 + r/\tan\beta(t)) \sin\theta \sin\alpha_N \cos(\omega_c t + \varphi_0) / \lambda \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, $f_{d-D}$ 服从标准的正弦分布,而 $f_{d-p}$ 、 $f_{d-q}$ 的包络还受到 $r/\tan\beta(t)$ 项的调制,且形式较为复杂,难以直接利用式(5)进行目标参数求解。观察发现, $f_{d-p}$ 、 $f_{d-q}$ 表达式存在对称性,两者均可表示为正弦项和非正弦项两部分之和组成,正弦

项部分同为  $f_{d1} = -2w_c h_2 \sin \theta \sin \alpha \cos(w_c t + \varphi_0) / \lambda$ , 而非正弦项部分则仅存在符号差异, 可考虑利用这一性质, 来简化参数求解过程。

式(5)中包含了7个未知量  $w_c, h_1, h_2, r, \theta, \alpha, \varphi_0$ , 在对式(5)进行简化的基础上, 本文考虑采用多视角观测来实现目标参数融合求解。

### 3 多视角进动特征与结构参数融合提取

#### 3.1 散射中心匹配

由于在每部雷达回波中均包含3个微多普勒分量, 因此在进行多视角融合前, 首先要对3个散射中心的微多普勒进行匹配识别。利用 Gabor 变换得到回波信号的时频信息, 然后根据文献[12]中提出的基于曲线跟踪(Curve Tracking, CT)的 IFE 算法分别提取出3个散射中心对应的微多普勒曲线。进一步分析式(5)可知, 3条微多普勒曲线中任意两条曲线之和与剩余一条曲线的比值存在3种组合形式, 即  $(f_{d-p} + f_{d-q}) / f_{d-D}, (f_{d-p} + f_{d-D}) / f_{d-q}$  以及  $(f_{d-q} + f_{d-D}) / f_{d-p}$ , 且满足:

$$\begin{aligned} \frac{f_{d-p} + f_{d-q}}{f_{d-D}} &= -2h_2/h_1 \\ \frac{f_{d-p} + f_{d-D}}{f_{d-q}} &= \frac{h_1 - h_2 - r/\tan\beta(t)}{-h_2 + r/\tan\beta(t)} \\ \frac{f_{d-q} + f_{d-D}}{f_{d-p}} &= \frac{h_1 - h_2 + r/\tan\beta(t)}{-h_2 - r/\tan\beta(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,  $(f_{d-p} + f_{d-q}) / f_{d-D}$  不受观测时间及雷达观测视角的影响, 仅与目标的结构参数  $h_1, h_2$  有关; 而  $(f_{d-p} + f_{d-D}) / f_{d-q}, (f_{d-q} + f_{d-D}) / f_{d-p}$  与观测时间及雷达观测视角有关。因此, 可以通过此关系预先判别出锥顶  $D$  对应的微多普勒曲线, 即为组合1分母对应曲线。令  $k = (f_{d-p} + f_{d-q}) / f_{d-D}$ , 由式(6)可知,  $h_2 = -kh_1/2$ 。将  $h_2 = -kh_1/2$  代入  $f_{d1}$  中, 则  $f_{d1}$  可以变为  $f_{d1} = kf_{d-D}/2$ 。将  $f_{d1}$  代入式(5)中, 经频率补偿后, 即可得到  $p, q$  两点补偿后的微多普勒频率可以分别表示为  $f_{d-p} - kf_{d-D}/2, f_{d-q} - kf_{d-D}/2$ 。此时, 在同一时刻分别选取三个散射中心对应的一组微多普勒值, 代入式(6)即可得到  $k$  值。为了实现频率维的精确补偿, 可对观测时间内的瞬时频率曲线进行等间隔采样, 并利用求和取平均的方法进行估计。

对  $p, q$  两点补偿后的微多普勒频率代入式(5), 可以求得  $p, q$  两点补偿后的微多普勒频率与

锥顶  $D$  的微多普勒频率比值  $\mu$  分别为:

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{f_{d-p} - \frac{k}{2}f_{d-D}}{f_{d-D}} = \frac{-r}{h_1 \tan\beta(t)} \\ \mu_2 = \frac{f_{d-q} - \frac{k}{2}f_{d-D}}{f_{d-D}} = \frac{r}{h_1 \tan\beta(t)} \end{cases} \quad (7)$$

由于本文选取的  $\beta \in (\pi/2, \pi - \varepsilon)$ , 于是  $\tan\beta(t) < 0$ , 而  $r, h_1$  均为目标结构参数大于零。因此, 在式(7)中, 若比值  $\mu > 0$ , 则  $\mu = \mu_1$ , 该补偿后的曲线对应散射点  $p$ ; 反之, 则  $\mu = \mu_2$ , 该曲线对应散射点  $q$ 。反映在图上, 则可以理解为: 在同一时刻, 当散射点补偿后的瞬时频率与锥顶  $D$  的瞬时频率同号, 该散射点为  $p$ , 反之, 为散射点  $q$ 。

综上所述, 基于微多普勒相关性的散射点匹配算法步骤为:

**步骤1** 利用 Gabor 变换得到回波信号的时频信息, 采用曲线跟踪算法提取出3个散射中心对应的微多普勒曲线;

**步骤2** 求解三条微多普勒曲线中任意两条曲线之和与剩余一条曲线的比值, 根据式(6)识别出锥顶  $D$  对应的微多普勒曲线;

**步骤3** 将式(6)组合1中求得的  $h_1$  和  $h_2$  的比值代入式(5)中, 利用  $f_{d-D}$  与  $f_{d1}$  的比例关系, 对  $f_{d-p}, f_{d-q}$  中的正弦频率分量  $f_{d1}$  进行精确补偿;

**步骤4** 根据式(7)求得  $p, q$  两点补偿后的微多普勒频率与锥顶  $D$  的微多普勒频率比值  $\mu$ , 由  $\mu$  的大小对  $p, q$  两点的微多普勒曲线进一步细分。

#### 3.2 目标进动与结构参数提取

在3.1节散射中心匹配的基础上, 现对目标的进动和结构特征参数进行多视角联合提取。由第2节分析可知, 式(5)形式复杂, 难以直接进行变视角联合求解, 可充分利用锥底散射中心的对称性进行必要的化简。令  $f_{dk} = (f_{d-p} + f_{d-q}) / (f_{d-q} - f_{d-p})$ , 由式(5)推导可得:

$$f_{dk} = -\frac{h_2 \tan\beta(t)}{r} \quad (8)$$

为进一步简化计算过程, 选取时刻  $t = t_d$  对应的散射中心瞬时频率进行计算, 此时存在  $\cos(w_c t_d + \varphi_0) = \pm 1$ , 根据式(5)、(8), 锥顶散射点瞬时频率取得极值  $f_{d-D}(t_d)$  为:

$$f_{d-D}(t_d) = \pm 2w_c h_1 \sin \theta \sin \alpha \quad (9)$$

且此时 $f_{dk}$ 的瞬时值 $f_{dk}(t_d)$ 为:

$$f_{dk}(t_d) = -\frac{h_2 \sqrt{1 - (\cos^2 \theta \cos^2 \alpha)}}{r \cos \theta \cos \alpha} \quad (10)$$

将式(9)、(10)与式(5)进行比较,可以发现化简后的表达式组成更加单一,更适合采用变视角观测的方法对目标参数进行联合求解。

若利用两部窄带雷达同时进行观测,由式(9)、(10)可得雷达观测视角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别对应的瞬时值为 $f_{d-D}(t_d | \alpha_1)$ 、 $f_{d-D}(t_d | \alpha_2)$ 、 $f_{dk}(t_d | \alpha_1)$ 、 $f_{dk}(t_d | \alpha_2)$ ,令 $m_1 = f_{d-D}(t_d | \alpha_1) / f_{d-D}(t_d | \alpha_2)$ , $m_2 = f_{dk}(t_d | \alpha_1) / f_{dk}(t_d | \alpha_2)$ ,于是:

$$\begin{cases} m_1 = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \\ m_2 = \frac{\cos \alpha_2 \sqrt{1 - (\cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1)}}{\cos \alpha_1 \sqrt{1 - (\cos^2 \theta \cos^2 \alpha_2)}} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中包含 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\theta$ 三个未知量,但只有两个方程,常规条件下难以实现这几个参数的求解,文献[13]提出可以利用 $\theta$ 在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 变化时, $\cos^2 \theta$ 的取值区间为0.99到0.94,对方程组求解影响不大这一先验信息进行参数估计,具体算法如下:

**步骤1** 对 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 进行粗估计。令 $\theta$ 在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 范围内取值,步长为 $0.5^\circ$ ,由式(11)计算得到每一 $\theta$ 取值所对应的 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ,并对所有求解结果取平均分别得到粗估计值 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 。

**步骤2** 对 $r$ 、 $\theta$ 进行粗估计。将粗估计值 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 分别代入 $f_{d-p}$ 、 $f_{d-q}$ 中,求得 $r$ 、 $\theta$ 的估计值 $\hat{r}$ 、 $\hat{\theta}$ ,由此得到的 $\hat{\theta}$ 更接近真实值。 $\hat{r}$ 、 $\hat{\theta}$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} (\hat{r}, \hat{\theta}) = \arg \min & \left\{ \sum_{j=1,2} \sum_i |(f_{d-q}(t_i | \hat{\alpha}_j) - f_{d-p}(t_i | \hat{\alpha}_j)) \right. \\ & \left. - 4w_c r \sin \theta \sin \alpha_j \cos(w_c t_i + \varphi_0) / \lambda \tan \beta(t_i | \hat{\alpha}_j) | \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中, $w_c$ 可通过对锥顶 $D$ 的微多普勒曲线 $f_{d-D}$ 估计得到, $t_i$ 的取值步长为 $0.05s$ , $\tan \beta(t_i | \hat{\alpha}_j)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} \tan \beta(t_i | \hat{\alpha}_j) = \\ \frac{\sqrt{1 - [\cos \theta \cos \hat{\alpha}_j + \sin \theta \sin \hat{\alpha}_j \sin(w_c t_i + \varphi_0)]^2}}{\cos \theta \cos \hat{\alpha}_j + \sin \theta \sin \hat{\alpha}_j \sin(w_c t_i + \varphi_0)} \end{aligned} \quad (13)$$

**步骤3** 采用循环迭代的方法对 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $r$ 、 $\theta$ 进行精估计。根据步骤2中求得的 $\hat{\theta}$ 缩小 $\theta$ 取值范围,并将取值步长减小为 $0.05^\circ$ ,返回步骤1中,从而进一步提高 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 的估计精度。重复步骤2,即可实现 $r$ 、 $\theta$ 的高精度估计。

**步骤4** 对 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h$ 进行估计。将 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 、 $\hat{r}$ 、 $\hat{\theta}$ 代入式(10)中,可以得到不同观测视角下的两组 $h_2$ 的估计值,对其取平均,则 $\hat{h}_2$ 的表达式为:

$$\hat{h}_2 = -\frac{1}{2} \sum_{j=1,2} \frac{\hat{r} \cos \hat{\theta} \cos \hat{\alpha}_j f_{dk}(t_d | \hat{\alpha}_j)}{\sqrt{1 - (\cos^2 \hat{\theta} \cos^2 \hat{\alpha}_j)}} \quad (14)$$

根据式(6)可以求得 $\hat{h}_1 = -2\hat{h}_2/k$ ,进一步得到 $h$ 的估计值 $\hat{h}$ 为:

$$\hat{h} = \hat{h}_2 - 2\hat{h}_2/k \quad (15)$$

至此,本文便实现了对目标进动和结构参数的求解。在参数求解过程中,文献[13]同样考虑到锥顶和锥底瞬时频率叠加了相同的正弦分量,并基于视线角方差最小准则实现了频率的搜索补偿,与文献[13]相比,本文则充分利用了锥底散射中心的微多普勒对称性,从而简化频率补偿过程,且雷达网中雷达数量越多时该优势越明显,更有利于数据的实时处理。当利用三部及以上窄带雷达同时进行观测时,由于得到的目标信息更丰富,在前文对目标散射点微多普勒精确配准的基础上,利用式(11)可构建多部雷达不同观测视角下的目标参数联合估计公式,更易实现目标进动及结构参数的求解,在此不做详细推导。

## 4 仿真分析

### 4.1 散射点匹配识别仿真实验

在下述仿真中设定目标为锥体,目标参数设置为: $h_1 = 2$  m,  $h_2 = 0.5$  m,  $r = 0.5$  m,  $h = 2.5$  m,  $\theta = 13^\circ$ ,目标的锥旋频率为 $f_c = 4$  Hz。雷达参数设置为:载频 $f = 8 \times 10^9$  Hz,信号带宽为5 MHz,雷达脉冲重复频率为2000 Hz,积累时间1 s。雷达1视线与旋转轴的夹角 $\alpha_1 = 120^\circ$ ,雷达2视线与旋转轴的夹角 $\alpha_2 = 135^\circ$ 。图2分别为该两部雷达获得的目标回波时频分布,三个散射中心均在可见范围内。

本文采用文献[12]中提出的基于曲线跟踪(Curve Tracking, CT)的瞬时频率估计(Instantane-

ous Frequency Estimation, IFE)算法对锥体目标的三个散射中心的瞬时频率进行提取,该算法首先依据最近邻数据关联准则在时频域分离各散射中心对应微多普勒曲线,然后采用扩展 Kalman 滤波器对分离结果作平滑滤波处理。实验证明,在  $\text{SNR} \geq 10$  dB 时,该算法能准确提取各微多普勒分量的微动参数。图 3 给出了在加性高斯白噪声背景下,  $\text{SNR} = 10$  dB 时的 IFE 结果,得到的 3 个散射中心瞬时频率与理论值基本吻合,可用于散射中心匹配及参数求解。

下面以雷达 1 为例,对目标散射中心匹配过程进行分析,图 4(a)为按照 3.1 节中散射中心匹配算法步骤 2 求得的 3 种组合的瞬时频率比值曲线,由式(6)可知组合  $(f_{p_2} + f_{p_3})/f_{p_1}$  理论上对应的是一条直线,然而图 4(a)中该直线在对应时频图中微多普勒曲线相交处却出现了多个突起,由此可知文献[12]中基于 CT 的 IFE 算法用于本文非正弦时频曲线关

联分离时将在交点处产生一定形变,而由于图中另外两种组合均随时间起伏波动较大,因此在曲线相交处关联存在一定偏差的情况下也能很好区分出组合 1。于是,  $p_1$  点即为锥顶散射点,且根据直线位置分析可得  $h_2/h_1 = 0.2507$ ,与理论值基本吻合,从而更进一步说明了本文所用曲线关联分离方法在除交点外其他位置的准确性。图 5(a)为按照算法步骤 3 中方法进行补偿,得到的  $p_2$ 、 $p_3$  两个散射中心补偿后的瞬时频率曲线与  $p_1$  的比较结果,从图中可以看出,  $p_2$ 、 $p_3$  补偿后的瞬时频率大小几乎相等,只是符号相反,与理论推导相符,且  $p_2$  补偿后的瞬时频率与  $p_1$  时刻同号,由步骤 4 分析可知,  $p_2$  为锥底近散射点,  $p_3$  为锥底远散射点。图 4(b)、图 5(b)为雷达 2 获得的匹配结果,同理分析可知  $q_1$  点为锥顶散射点,  $q_2$  为锥底近散射点,  $q_3$  为锥底远散射点。

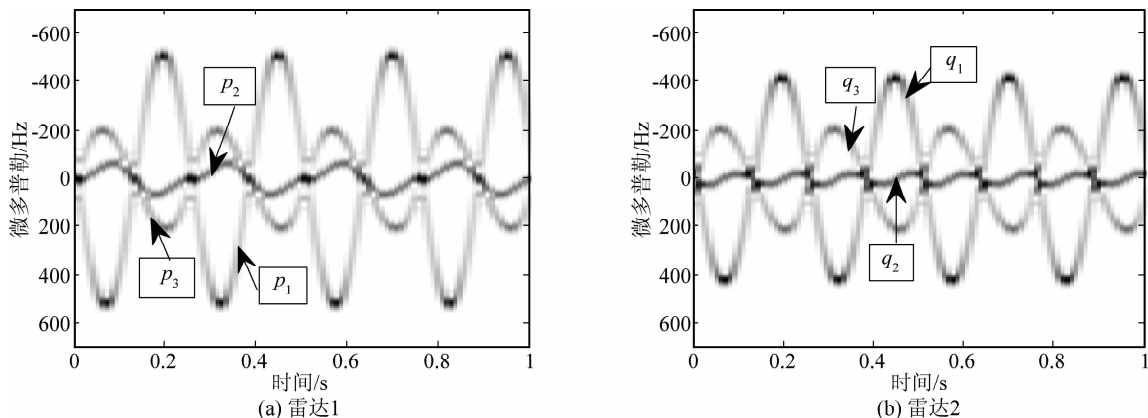


图 2 不同视角获得的时频分析结果

Fig. 2 The analysis result of time-frequency in different visual angle

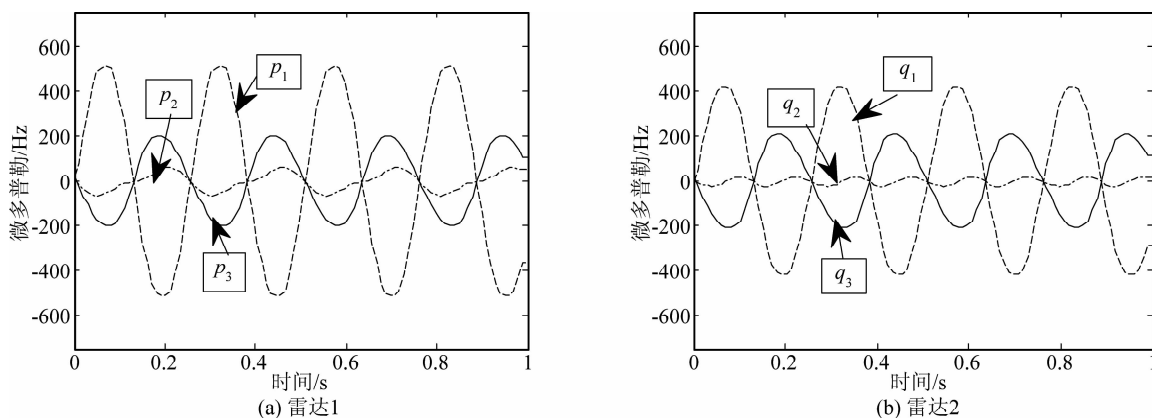


图 3 CT 算法瞬时频率分离平滑结果

Fig. 3 The separation result of instantaneous frequency by CT algorithm

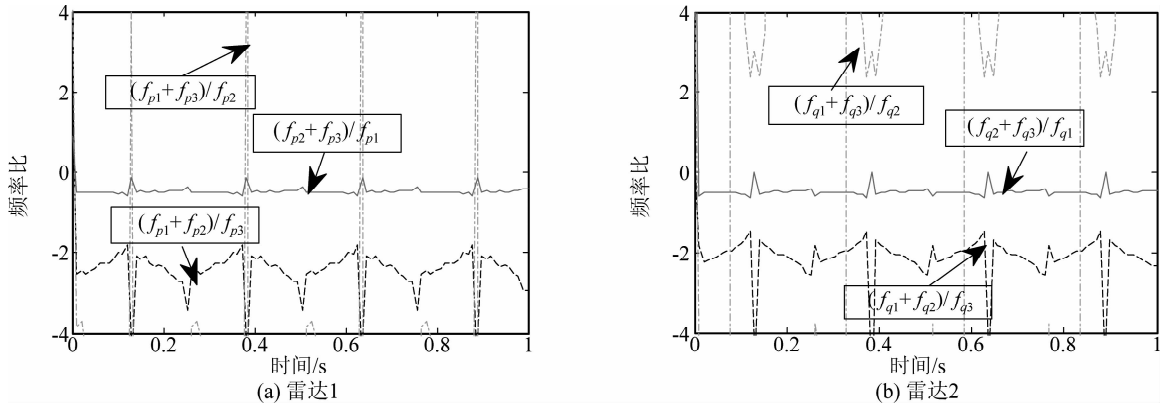


图 4 散射点不同瞬时频率组合比值结果

Fig. 4 The ratio result of different instantaneous frequency' combinations

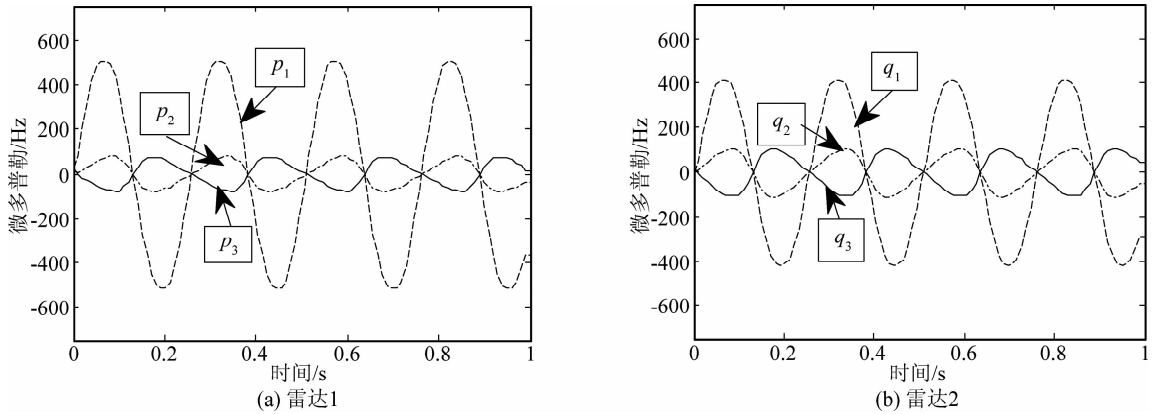


图 5 散射点频率补偿后的对比图

Fig. 5 The comparison of scattering centers' frequency after compensation

### 4.2 目标进动与结构参数提取算法仿真验证

在 4.1 节散射点配准的基础上,可依据 3.2 节提出的目标参数估计算法实现两个不同视角下参数的联合求解。首先由图 3 估计得到目标的锥旋频率  $\hat{f}_c=4.011$  Hz,与设定值基本吻合,然后分别提取图 3(a)、(b)中锥顶散射点瞬时频率取得极值这一时刻所对应的三个散射点瞬时频率值  $f_{d-D} = 522.2193$  Hz,  $426.3903$  Hz、 $f_{d-p} = -58.2013$  Hz,  $-5.8218$  Hz、 $f_{d-q} = -202.9084$  Hz,  $-207.3734$  Hz,代入式(11)计算解得  $m_1=1.2276$ 、 $m_2=0.5880$ 。定义相对误差 = |理论值-估计值|/理论值,进一步按算法流程求得目标参数如表 1 所示,其相对误差均小于 5%,而在相同仿真条件下,文献[13]中的参数估计平均相对误差高达 15%,明显低于本文参数估计精度,分析可知这种精度差异主要来源于频率补偿方式的不同,文献[13]和本文所提算法均对频率补

偿精度要求较高,而文献[13]采用的基于视线角方差最小准则的频率搜索补偿方法难以实现频率的完全补偿,且易受噪声影响,从而导致参数估计精度降低,本文算法则充分利用了锥底散射中心的微多普勒对称性,能实现频率的精确补偿,仿真结果也充分验证了本文算法的有效性。

表 1 锥体弹头进动及结构参数估计结果

Tab. 1 The estimation result of cone-shaped warhead's parameters

参数	理论值	估计值	相对误差
$\alpha_1/(^\circ)$	120	120.3579	0.30%
$\alpha_2/(^\circ)$	135	135.4207	0.31%
$\theta/(^\circ)$	13	12.6810	2.45%
$r/m$	0.5	0.5136	2.71%
$h_1/m$	2	1.9190	4.05%
$h_2/m$	0.5	0.4811	3.81%
$h/m$	2.5	2.4001	4.00%

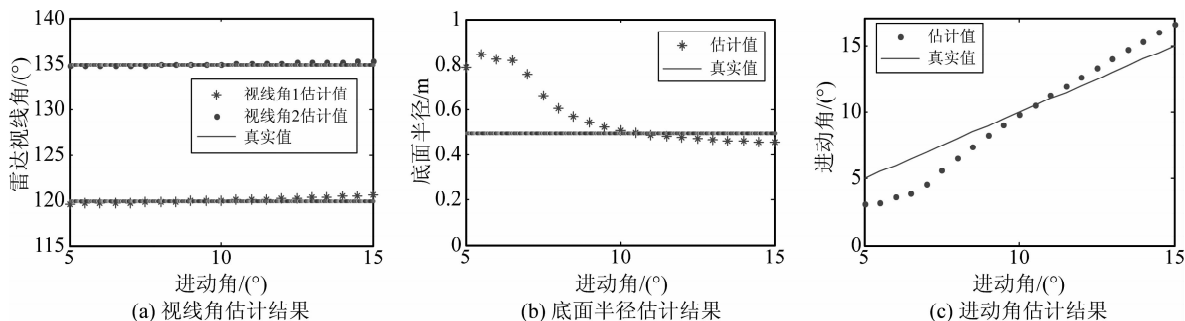


图6 不同进动角下参数粗估计结果

Fig. 6 The estimation result under different precession angle

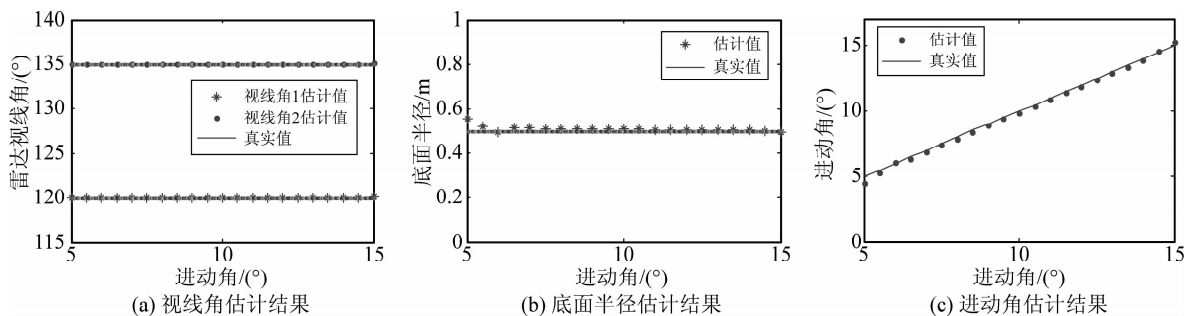


图7 循环迭代后不同进动角下参数估计结果

Fig. 7 The estimation result under different precession angle after iteration

由于3.2节算法是基于进动角一般在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 范围内这一先验信息提出的,于是本文还进一步分析了进动角大小对3.2节参数提取算法估计性能的影响。图6给出了进动角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 范围内变化时,算法步骤1、2对应的参数估计结果,对比发现:进动角大小对视线角粗估计结果影响较小,验证了该算法前提的准确性和适应性,而它对底面半径和进动角估计结果影响相对较大,但从图6(c)中可以看出,估计得到的进动角基本上是在真实值附近波动,由此可减小进动角的搜索范围,实现局部遍历搜索,完成算法步骤3中视线角的精估计。图7为进动角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 范围内变化时,对应算法步骤3得到的参数估计结果,可以看出,经过循环迭代后参数估计性能有了明显提高,且基本不受进动角大小影响,说明本文的参数提取算法对不同的进动角都具有较强的适应性。

## 5 结论

本文对锥体进动目标的窄带雷达多视角参数联合提取问题进行了研究。在3个散射中心同时可见范围内,首先充分利用各散射中心之间的微多普勒相关性,通过频率补偿完成了各散射中心瞬时频

率曲线的匹配,并在仅使用两部窄带雷达观测的条件下实现了对目标进动和结构参数的联合提取。仿真结果表明,本文提出的目标参数联合提取算法估计精度较高,且对不同进动角大小都具适应性,在现有雷达观测水平下,是一种有效、可行的进动特征提取方法。考虑到在实际的导弹防御体系当中,可能会出现窄带雷达和高分辨雷达同时对目标进行观测识别的情况,后继工作将就不同形式雷达对目标参数的融合提取问题展开研究。

## 参考文献

- [1] Peng L, Sun J P, Wang J, et al. Micro-motion parameter estimation of free rigid targets based on radar micro-Doppler [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50 (10): 3776-3786.
- [2] Wang J, Lei P, Sun J P, et al. Spectral characteristics of mixed micro-Doppler time-frequency data sequences in micro-motion and inertial parameter estimation of radar targets [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8 (4): 275-281.
- [3] Chen V C. Advances in application of radar micro-Doppler signatures [C] // Proc. of the 2014 IEEE Inf. on Antenna Measurements & Application (CAMA), Antibes, France, 16-19 Nov, 2014: 1-4.

- [4] 王兆云, 张兴敢, 柏业超. 基于微多普勒的锥体目标进动和结构参数估计[J]. 南京大学学报:自然科学, 2014, 50(2): 148-153.  
Wang Zhaoyun, Zhang Xinggan, Bai Yechao. Precession and structural parameter estimation of cone-shaped target based on the micro-Doppler[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2014, 50(2): 148-153. (in Chinese)
- [5] Ye C M, Xu J, Peng Y N, et al. Key parameter estimation for radar rotating object imaging with multi-aspect observations [J]. Science China: Information Sciences, 2010, 53(8): 1641-1652.
- [6] Smith G E, Woodbridge K, Baker C J, et al. Multistatic micro-Doppler radar signatures of personnel targets [J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3): 224-233.
- [7] 贺思三, 赵会宁, 冯存前. 多视角距离像序列弹道目标的进动参数估计[J]. 信号处理, 2013, 29(8): 1027-1035.  
He Sisan, Zhao Huining, Feng Cunqian. Precession parameter estimation for ballistic targets based on multi-aspect range-profile sequence [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(8): 1027-1035. (in Chinese)
- [8] 艾小锋, 李永祯, 赵锋, 等. 基于多视角一维距离像序列的进动目标特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2846-2851.  
Ai Xiaofeng, Li Yongzhen, Zhao Feng, et al. Feature extraction of precession targets using multi-aspect observed HRRP sequences [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2846-2851. (in Chinese)
- [9] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2413-2419.  
Zou Xiaohai, Ai Xiaofeng, Li Yongzhen, et al. Precession and structural parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-Doppler [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2413-2419. (in Chinese)
- [10] 艾小锋, 邹小海, 李永祯. 基于时间距离像分布的锥体目标进动与结构特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2083-2088.  
Ai Xiaofeng, Zou Xiaohai, Li Yongzhen, et al. Feature extraction of precession and structure of cone-shaped object based on time-HRRP distribution [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2083-2088. (in Chinese)
- [11] 宁超, 黄璟, 黄培康. 基于HRRP的进动锥体目标特征参数求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 650-655.  
Ning Chao, Huang Jin, Huang Peikang. Solution for characteristic parameters of precession cone-shaped target using HRRP [J]. Systems Engineering and Electronics,

2014, 36(4): 650-655. (in Chinese)

- [12] 李飞, 纠博, 邵长宇, 等. 目标微动参数估计的曲线跟踪算法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 278-284.  
Li Fei, Jiu Bo, Shao Changyu, et al. Curve tracking based parameter estimation of micro-motion [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(2): 278-284. (in Chinese)
- [13] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2956-2962.  
Han Xun, Du Lan, Liu Hongwei. Feature extraction of space cone-shaped target based on narrow-band radar networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(12): 2956-2962. (in Chinese)

### 作者简介



赵双 男, 1992年生, 湖南湘潭人. 空军工程大学防空反导学院, 硕士研究生, 主要从事雷达信号处理研究.  
E-mail: zhaoshuanglw@163.com



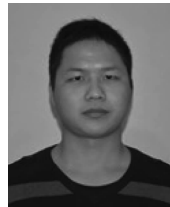
鲁卫红 男, 1968年生, 河北安平人. 空军工程大学副教授, 主要从事雷达对抗、引战配合技术研究.  
E-mail: lwh\_001@126.com



冯存前 男, 1976年生, 陕西富平人. 空军工程大学教授, 主要从事自适应信号处理研究.  
E-mail: fengcunqian@sina.com



贺思三 男, 1981年生, 湖南湘潭人. 空军工程大学讲师, 主要从事复杂运动目标成像研究.  
E-mail: hesisan@163.com



李靖卿 男, 1989年生, 湖北天门人. 空军工程大学防空反导学院, 硕士研究生, 主要从事雷达信号处理研究.  
E-mail: lijingqing\_1025@126.com