

## 基于窄带雷达网的弹道目标三维进动特征提取

赵双<sup>\*①</sup> 鲁卫红<sup>①</sup> 冯存前<sup>①②</sup> 王义哲<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

<sup>②</sup>(信息感知技术协同创新中心 西安 710077)

**摘要:** 微动特征是弹道目标识别的重要特征之一。针对单一视角观测难以获取目标真实微动参数的问题, 该文提出了一种基于窄带雷达网的3维进动特征提取方法。首先建立了锥体目标进动模型, 在考虑散射中心遮挡的前提下, 详细分析了进动引发的微多普勒频率调制特性。然后基于锥顶微多普勒频率调制系数比, 实现了不同视角下散射中心匹配关联, 通过构建多视角联合方程组获取了目标的3维锥旋矢量, 进而利用各散射中心微多普勒频率相关性, 结合频率补偿的方法对锥体特征参数进行了提取, 在此基础上解算出每一时刻锥顶坐标, 实现了目标空间位置的3维重构。仿真结果证明了该方法的有效性与实用性。

**关键词:** 进动特征; 窄带雷达; 频率补偿; 3维重构

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)01-0098-08

DOI: 10.12000/JR15129

**引用格式:** 赵双, 鲁卫红, 冯存前, 等. 基于窄带雷达网的弹道目标三维进动特征提取[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 98-105. DOI: 10.12000/JR15129.

**Reference format:** Zhao Shuang, Lu Weihong, Feng Cunqian, *et al.*. Three-Dimensional precession feature extraction of ballistic targets based on narrowband radar network[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 98-105. DOI: 10.12000/JR15129.

## Three-Dimensional Precession Feature Extraction of Ballistic Targets Based on Narrowband Radar Network

Zhao Shuang<sup>①</sup> Lu Weihong<sup>①</sup> Feng Cunqian<sup>①②</sup> Wang Yizhe<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(*Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

<sup>②</sup>(*Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China*)

**Abstract:** Micro-motion is a crucial feature used in ballistic target recognition. To address the problem that single-view observations cannot extract true micro-motion parameters, we propose a novel algorithm based on the narrowband radar network to extract three-dimensional precession features. First, we construct a precession model of the cone-shaped target, and as a precondition, we consider the invisible problem of scattering centers. We then analyze in detail the micro-Doppler modulation trait caused by the precession. Then, we match each scattering center in different perspectives based on the ratio of the top scattering center's micro-Doppler frequency modulation coefficient and extract the 3D coning vector of the target by establishing associated multi-aspect equation systems. In addition, we estimate feature parameters by utilizing the correlation of the micro-Doppler frequency modulation coefficient of the three scattering centers combined with the frequency compensation method. We then calculate the coordinates of the conical point in each moment and reconstruct the 3D spatial portion. Finally, we provide simulation results to validate the proposed algorithm.

**Key words:** Precession feature; Narrowband radars; Frequency compensation; 3D reconstruction

收稿日期: 2015-12-23; 改回日期: 2016-03-22; 网络出版: 2016-05-09

\*通信作者: 赵双 zhaoshuanglw@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372166), 陕西省自然科学基金(2014JMS308)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372166), The Project Supported by Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2014JMS308)

## 1 引言

随着诱饵技术和电磁控制技术等的不断发展, 基于传统特征量的弹道目标识别技术已难以满足未来高科技战争的需求, 而微动特征作为弹道目标的固有属性, 难以被模仿, 且弹头和诱饵、碎片等运动形式存在明显差异, 因而被用来区分识别真弹头, 近年来受到国内外研究学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。由于目标微动会对雷达回波产生微多普勒调制, 无论是宽带雷达还是窄带雷达, 均可通过对回波信号参数进行估计来提取目标的微动特征, 进而进行目标的分类识别。然而研究表明<sup>[4-6]</sup>, 单基雷达获取的目标微多普勒信息均具有较强的姿态敏感性, 不同视角获得的微动特征不同, 因而难以准确反映目标的真实空间结构。考虑到组网雷达能获得目标在不同视角上的观测信息, 于是有望利用多部雷达联合观测对目标进行3维微动特征提取, 从而克服单一视角的局限性, 提高目标识别精度。

考虑宽带雷达能得到目标的高分辨距离像, 获取目标更细微的形状结构特征, 目前基于宽带雷达组网的目标微动特征提取研究较多。文献[7]对MIMO雷达中的旋转目标微多普勒效应展开分析, 并基于时间-距离像对目标的3维微动特征进行了提取; 文献[8]利用分布式组网雷达对有翼锥体目标进行联合观测, 并基于不同视角微多普勒特征的相关性, 借助几何分析的方法, 实现了目标的3维进动特征提取; 文献[9]通过三站1维距离像融合实现了锥体目标的3维重构。由此可见, 基于宽带雷达组网的目标微动特征提取技术研究已较为成熟, 然而, 就目前现有雷达实际装备情况来看, 由于宽带高分辨雷达价格昂贵, 一时间仍难以实现对窄带雷达的全面升级和替换, 雷达网仍以窄带体制为主, 因此研究利用窄带雷达网对弹道目标进行特征提取具有更大的实际意义, 能有效解决目前理论与实际脱节的矛盾; 文献[10]在窄带组网体制下推导了不同视角锥体散射中心瞬时频率变化关系, 利用频谱熵实现了散射中心的匹配关联, 并进一步提出了基于散射中心瞬时频率相关性的目标参数提取算法, 但没能获取目标的3维微动特征, 也无法实现空间目标的3维重构。

本文在文献[10]的基础上, 进一步对窄带雷达网中的锥体目标3维进动特征提取展开了研究。在详细分析了锥体进动引发的微多普勒频率调制特性的基础上, 利用锥顶微多普勒频率调制系数比, 实现了不同视角下散射中心匹配关联, 并获取了目标的3维锥旋矢量, 进而利用锥顶和底面边缘散射中心微多普勒频率相关性, 结合频率补偿的方法对锥

体特征参数进行了提取, 在此基础上解算出每一时刻锥顶坐标, 从而实现了目标空间位置的3维重构。最后, 仿真分析了本文方法的有效性。

## 2 进动模型

以无翼锥形弹头为例, 建立进动模型如图1所示, 由于其存在旋转对称性, 因此仅考虑其做锥旋运动。假定目标以角速度 $\omega_c$ 绕锥旋轴旋转, 且锥旋轴与目标对称轴相交于点 $o$ , 两者夹角为 $\theta$ , 以交点为坐标原点建立参考坐标系 $oxyz$ 如下, 目标对称轴初始方位为 $\phi_0$ , LOS表示雷达视线方向, 其在参考坐标系中的方位角和俯仰角分别为 $(\varepsilon, \chi)$ , 与锥旋轴的夹角为 $\alpha$ , 与对称轴夹角为 $\beta$ , 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。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 $R_0$ 。

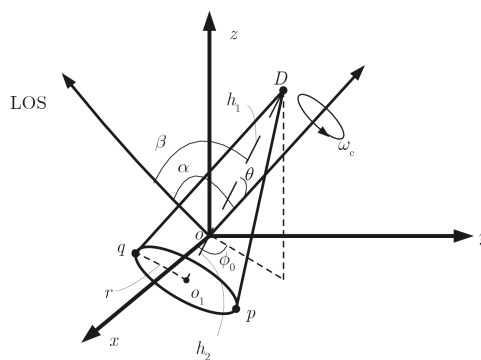


图1 锥形弹头进动模型

Fig. 1 The precession model of conical warhead

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>。由几何关系分析可得雷达视线与对称轴的夹角 $\beta$ 满足:

$$\cos \beta(t) = \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha \sin(\omega_c t + \varphi) \quad (1)$$

式中,  $\varphi$ 为初始相位角, 且由文献[6]可知 $\varphi = \phi_0 - \varepsilon$ 。进一步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:

$$\left. \begin{aligned} R_D &= R_0 + h_1 \cos \beta(t) \\ R_p &= R_0 - h_2 \cos \beta(t) + r \sin \beta(t) \\ R_q &= R_0 - h_2 \cos \beta(t) - r \sin \beta(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

考虑到锥体目标在实际运动中各部分之间存在相互遮挡, 目标上各散射中心不能始终保持同时可

见,使得式(2)的使用范围受到限制。但锥顶 $D$ 和近散射点 $p$ 在大部分情况下都能被观测到<sup>[3]</sup>,并能够获得二者的稳定连续观测信息,因此本文主要利用 $D$ , $p$ 的微动信息展开后继研究。假设雷达波长为 $\lambda$ ,由式(1)和式(2)可得,进动引发的 $D$ , $p$ 两点的微多普勒调制为<sup>[11]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} f_{d-D} &= 2\omega_c h_1 \sin \theta \sin \alpha \cos(\omega_c t + \varphi) / \lambda \\ f_{d-p} &= 2\omega_c (-h_2 - r / \tan \beta(t)) \\ &\quad \cdot \sin \theta \sin \alpha \cos(\omega_c t + \varphi) / \lambda \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, $D$ 点的微多普勒频率变化服从正弦规律,而 $p$ 点的微多普勒频率由两部分之和组成,不再服从简单的正弦调制规律,且两点微多普勒频率均与目标的进动和结构特征有关,共包含 $\omega_c$ , $h_1$ , $h_2$ , $r$ , $\theta$ , $\alpha$ , $\varphi$  7个未知参数,其中 $\omega_c$ , $\varphi$ 可通过提取正弦曲线特征得到,而 $\theta$ , $\alpha$ 两者之间存在耦合,仅通过单部雷达,仍无法实现对目标进动角及尺寸大小的求解。考虑到多视角观测能获得更加丰富的目标信息,具有较好的解耦合性能,因此本文将采用雷达组网方式对目标特征进行提取,并进一步实现3维重构。

### 3 散射中心匹配关联

首先建立窄带雷达网系统观测模型如图2所示,图中 $OXYZ$ 为全局坐标系,与参考坐标系 $oxyz$ 平行,假定系统中共有 $N$ 部窄带雷达同时进行观测,并都已满足时空同步要求,各雷达视线在 $OXYZ$ 坐标系中的方位角和俯仰角为 $(\varepsilon_i, \chi_i)$ , $\mathbf{n}_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )为雷达视线方向,满足:

$$\mathbf{n}_i = [\cos \chi_i \cos \varepsilon_i, \cos \chi_i \sin \varepsilon_i, \sin \chi_i]^T \quad (4)$$

由第2节分析可知,当采用多部雷达同时进行观测时,由于各雷达观测视角不同,同一时刻目标各散射中心在雷达视线上的投影位置排列顺序将存在差异,相对应地,同一时刻各散射中心的微多普勒频率也会不同。因此,在利用组网雷达进行特征

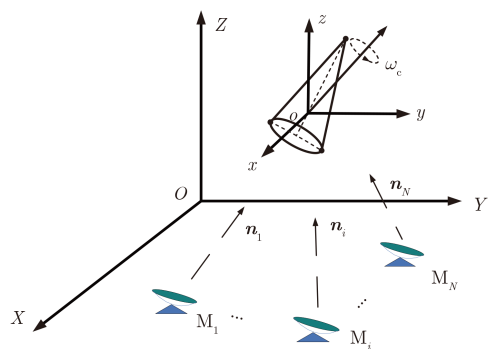


图 2 组网雷达示意图

Fig. 2 The sketch map of netted radar

提取之前,首先得实现不同视角散射中心的匹配关联。

由式(3)可以看出,对于同一观测目标而言,锥顶 $D$ 的微多普勒频率调制系数 $A$ 仅与雷达观测视角有关,任取雷达网中两部雷达,其调制系数比满足:

$$k_{ij} = \frac{A_i}{A_j} = \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_j} \quad (5)$$

而 $p$ 点调制规律更为复杂,不具备上述比例关系,因此,通过比较观察不同雷达间的调制系数比即可实现散射中心的匹配关联。文献[10]采用频谱分析的方法,通过计算不同散射中心的频谱熵来实现散射中心的匹配关联,然而在两个散射中心回波信号无法分离的情况下,散射中心无法与各自频谱一一对应起来,因此该方法存在较大的局限性。相比而言,本文方法则更加简单实用。

## 4 3维重构

### 4.1 3维锥旋矢量提取

为更好地实现对锥体目标的3维重构,首先对锥旋轴方向进行估计。采用Viterbi算法提取锥顶微多普勒曲线振幅得到:

$$A_i = 2\omega_c h_1 \sin \theta \sin \alpha_i / \lambda \quad (6)$$

Viterbi算法<sup>[12-14]</sup>作为信号隐状态估计的有效手段之一,能够依据各信号成分强度对信号进行逐次分离,因此常被用来对多目标信号瞬时频率进行估计。与逆Randon变换、Hough变换等曲线参数提取方法相比,Viterbi算法对各信号分量形式依赖性不高,即使是非正弦信号,同样能实现瞬时频率的准确估计。

此外,雷达观测视角 $\alpha_i$ 还满足:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha_i &= \left\| \frac{\widehat{\omega}}{\omega_c} \times \mathbf{n}_i \right\| \\ \omega_c &= \left\| \widehat{\omega} \right\| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中, $\widehat{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ ,联立式(4)、式(6)、式(7),令 $B = h_1 \sin \theta$ ,此时方程组中共包含 $B$ , $\omega_x$ , $\omega_y$ , $\omega_z$  4个未知参数,因此,至少需要3部雷达同时进行观测才能实现对上述参数的求解。进一步将求得的参数回代到方程组,还可以确定 $\sin \alpha_i$ 的大小。文献[10]采用基于视线角方差最小准则的频率搜索补偿方法对雷达视线角进行估计,需要经过多次循环迭代才能得到准确估计值,计算复杂,且易受噪声影响,而本文所提方法用到的只是锥顶微多普勒频率曲线的振幅和周期,且这两个曲线参数均可由Viterbi算法准确提取得到,在求得锥旋矢量的

同时也能估计出各雷达视线角的大小，计算更为简单，算法稳定性更好。

#### 4.2 锥体弹头参数提取

在上述分析的基础上，若要提取锥体弹头参数，还需 $p$ 对点的微多普勒频率进行充分利用，观察式(3)可知， $f_{d-p}$ 由正弦部分和非正弦部分之和组成，且正弦部分 $f_k = -2\omega_c h_2 \sin \theta \sin \alpha \cos(\omega_c t + \varphi) / \lambda$ 满足 $f_k = (-h_2/h_1) f_{d-D}$ ，而非正弦部分此时仅包含 $(r, \theta)$ 两个未知参数。若能将正弦部分完全补偿，便可利用多视角观测对 $(r, \theta)$ 联立求解。考虑到锥体目标尺寸信息仍然未知，先假设补偿系数为 $\eta$ ，且 $\eta_0 = h_2/h_1$ ，当 $\eta = \eta_0$ 时，便可实现完全补偿，于是 $p$ 点补偿后的微多普勒频率满足：

$$f_{d-B}(\alpha_i | \eta) = f_{d-p}(\alpha_i) + \eta f_{d-D}(\alpha_i) \quad (8)$$

对 $\eta$ 进行遍历，利用补偿后的频率两两联立方程可求得：

$$\begin{aligned} & (\hat{r}_\xi, \hat{\theta}_\xi) | \eta \\ & = \arg \min \sum_{i=\tau, \kappa} \left| f_{d-B}(\alpha_i | \eta) - f_{d-B}(\alpha_i | \eta_0) \right|, \\ & \quad \tau, \kappa \in 1, 2, \dots, N, \quad \tau \neq \kappa, \\ & \quad \xi = 1, 2, \dots, C_N^2 \end{aligned} \quad (9)$$

对每个 $\eta$ 取值所对应求得的所有结果 $(\hat{r}_\xi | \eta, \hat{\theta}_\xi | \eta)$ 做进一步处理，并定义归一化标准差 $\sigma$ 为：

$$\sigma = \frac{1}{C_N^2} \left( \frac{\|\Delta \mathbf{r}\|}{\bar{r}} + \frac{\|\Delta \theta\|}{\bar{\theta}} \right) \quad (10)$$

式中， $\Delta \mathbf{r} = [\hat{r}_1 - \bar{r} \quad \hat{r}_2 - \bar{r} \quad \dots \quad \hat{r}_{C_N^2} - \bar{r}]$ ， $\Delta \theta = [\hat{\theta}_1 - \bar{\theta} \quad \hat{\theta}_2 - \bar{\theta} \quad \dots \quad \hat{\theta}_{C_N^2} - \bar{\theta}]$ ， $\bar{r}$ ， $\bar{\theta}$ 为平均值，按照上述归一化标准差定义，对于每一个 $\eta$ 取值均能得到对应的 $\sigma$ 。若 $\eta = \eta_1$ 时， $\sigma$ 取得最小值，则说明此时 $f_k$ 被补偿得最完全，补偿系数 $\eta_1$ 也越接近 $\eta_0$ ，由此可求得：

$$\left. \begin{aligned} \hat{r} &= \bar{r} | \eta_1 \\ \hat{\theta} &= \bar{\theta} | \eta_1 \\ \frac{h_2}{h_1} &= \eta_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

结合4.1节分析，将 $\hat{\theta}$ 代入 $B = h_1 \sin \theta$ 中，于是求得 $h_1 = B \sin \hat{\theta}$ ， $h_2 = h_1 \cdot \eta_1$ 。

#### 4.3 锥顶空间位置估计

在求得锥体目标结构参数及旋转轴方向的基础上，为实现对目标空间位置的3维重构，还需确定各散射中心的相对位置，由于底面边缘两个散射中心会随雷达视线方向改变产生滑动，位置坐标不易

确定，因而本文从锥顶散射中心入手，在锥体目标结构参数已知的条件下，只要能够求得每一时刻锥顶坐标，同样能实现对目标空间位置的3维重构。由于窄带雷达距离分辨力较低，难以直接从目标回波中获得各散射中心的径向距离变化规律，因此本文考虑在已知各散射中心运动形式和参数基础上，通过微多普勒频率反推每一时刻各散射中心相对应的径向距离变化。

令 $d = R_D - R_0$ ，由式(2)可得：

$$d_i = h_1 \cos \theta \cos \alpha_i + h_1 \sin \theta \sin \alpha_i \sin(\omega_c t + \varphi_i) \quad (12)$$

式中， $\varphi_i = \phi_0 - \chi_i$ ，由于每一时刻 $D$ 点的微多普勒频率 $f_{d-D}$ 均已获得，且 $f_{d-D}$ 与 $R_D$ 满足导数关系，因而 $d_i$ 在每一时刻的值也能求解得到。此外，结合图1可知， $d_i$ 为 $\mathbf{oD}$ 在第 $i$ 部雷达视线上的投影，同时还应满足：

$$d_i = \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{oD} \quad (13)$$

若令 $\mathbf{oD} = (D_x, D_y, D_z)^T$ ，通过3部雷达同时进行观测可以解算出 $\mathbf{oD}$ 为：

$$\mathbf{oD} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1^T \\ \mathbf{n}_2^T \\ \mathbf{n}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

综上所述，基于窄带雷达组网的弹道目标3维微动特征提取及重构步骤为：

步骤1 建立弹道目标进动模型，分析各散射中心微多普勒调制规律；

步骤2 对目标回波进行时频分析，采用Viterbi算法提取各散射中心微多普勒曲线；

步骤3 基于锥顶微多普勒频率调制系数比，实现不同视角下散射中心匹配关联；

步骤4 提取3维锥旋矢量和目标结构参数，在此基础上解算出每一时刻锥顶坐标，从而实现锥体目标空间3维重构。

## 5 仿真分析

### 5.1 目标参数估计

在下述仿真中设定目标为锥体，目标参数设置为： $h_1 = 2.0$  m， $h_2 = 0.5$  m， $r = 0.5$  m， $h = 2.5$  m， $\theta = 13^\circ$ ，目标对称轴初始方位角 $\phi_0 = 60^\circ$ ，目标的锥旋频率为 $f_c = 4$  Hz，锥旋矢量为 $(2\sqrt{3}\pi, 4\sqrt{3}\pi, 2\pi)$ 。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，信噪比为10 dB。在全局坐标系中3部雷达 $M_1$ ， $M_2$ ， $M_3$ 测得的目标方位角和俯仰角 $(\varepsilon_i, \chi_i)$ 分别为 $(40^\circ, 84^\circ)$ ， $(45^\circ, 48^\circ)$ ， $(30^\circ, 17^\circ)$ 。图3分别为该3部雷达获得的同一时间段内目标回波Cohen类时频分

布重排结果,可以看出重排后的谱图不仅具有更好的时频聚集性,同时还有效抑制了各分量之间的交叉项<sup>[15,16]</sup>,有利于提高各散射中心瞬时频率的估计精度。

在上述谱图重排的基础上,进一步采用Viterbi算法对各散射中心瞬时频率进行提取,并通过拟合更好地削减了交叉项所带来的不利影响,得到各雷达散射中心瞬时频率估计结果如图4所示。然后依据第3节匹配关联准则,对各散射中心曲线

幅度做进一步处理,区分出锥顶和锥底边缘散射中心。此时提取到各雷达锥顶正弦曲线的频率为 $\|\hat{\omega}\| = 25.14 \text{ rad/s}$ ,振幅分别为567.6 Hz, 361.8 Hz, 307.8 Hz,而由式(6)计算得到的振幅理论值分别为569.2636 Hz, 362.0643 Hz, 309.5390 Hz,两者相当接近,代入方程组式(7)可以求解得到3维锥旋矢量 $\hat{\omega} = (10.8598, 21.7937, 6.2545)^T$ ,与理论值基本吻合,同时可以求得各雷达视线角分别为 $\hat{\alpha}_1 = 70.7025, \hat{\alpha}_2 = 36.9851, \hat{\alpha}_3 = 30.7848$ 。

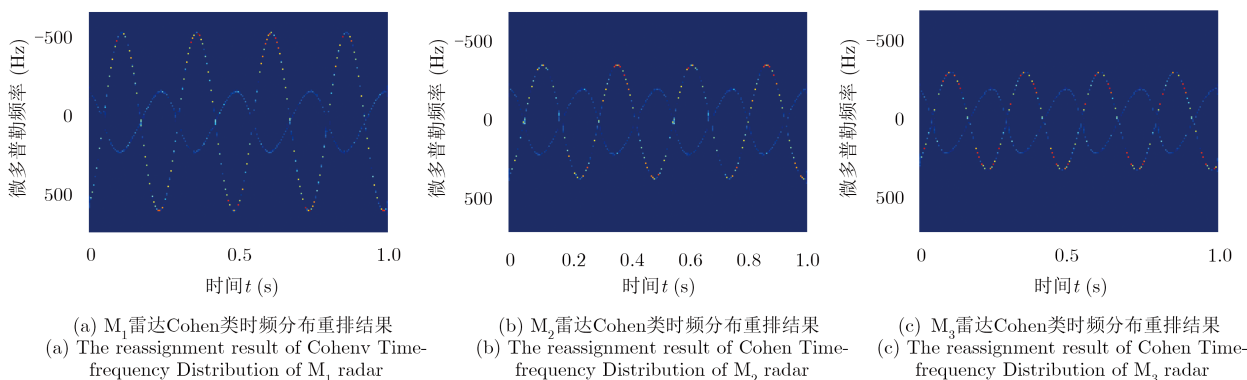


图 3 3部雷达时频分布图

Fig. 3 The Time-frequency Distribution figure of three radars

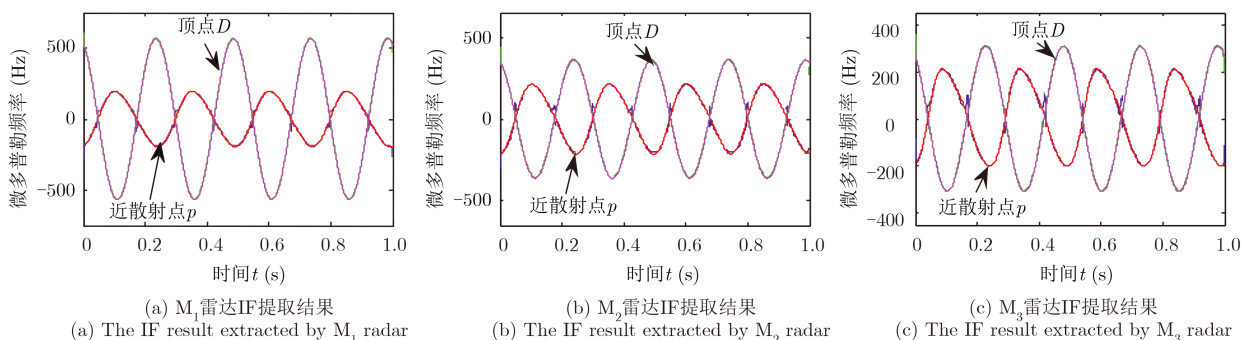


图 4 3部雷达IF提取结果

Fig. 4 The IF result extracted by three radars

依据4.2节中锥体弹头参数提取算法,由求得的 $\hat{\alpha}_i$ 和各散射中心瞬时频率对 $(r, \theta)$ 进行估计,可以得到遍历 $\eta$ 归一化标准差 $\sigma$ 随之变化的结果如图5所示,当 $\eta = 0.253$ 时, $\sigma$ 取得最小值,接近于理论分析值 $\eta_0 = 0.25$ ,进一步将该 $\eta$ 值代到方程式(11),从而求得参数 $r, \theta, h_1, h_2$ 估计值。定义相对误差=|理论值-估计值|/理论值,各参数估计结果如表1所示,其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 估计精度相对较高, $r, \theta, h_1, h_2$ 由于受到各散射中心瞬时频率提取误差的影响,估计精度则相对较低,通过进一步提高时频分辨率或者增加雷达网中雷达观测数量可实现上述参数估计精度的提升。但总的来说,各参数估计相对误差

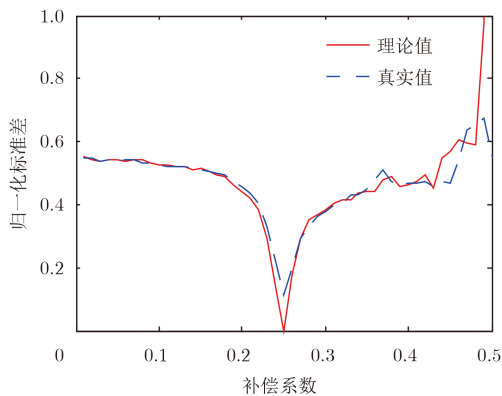


图 5 补偿系数求解结果

Fig. 5 The solving results of compensation coefficient

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(%)
$\alpha_1(^{\circ})$	70.7288	70.7025	0.30
$\alpha_2(^{\circ})$	36.8974	36.9851	0.037
$\alpha_3(^{\circ})$	30.8829	30.7848	0.32
$\theta(^{\circ})$	13	13.5579	4.29
$r(\text{m})$	0.5	0.5237	4.74
$h_1(\text{m})$	2.0	1.9132	4.43
$h_2(\text{m})$	0.5	0.4811	3.20

均小于5%，满足目标识别的精度要求，可用于下一步对锥顶坐标的求解。而在相同仿真条件下，文献[10]中的目标参数平均估计相对误差则接近于15%，明显高于本文误差，这也从侧面反映出本文参数提取算法的稳定性。

在上述目标特征参数提取的基础上，进一步按照4.3节所提算法对锥顶坐标进行求解。当时 $t=0.25\text{ s}$ ，求得锥顶坐标 $(\hat{D}_x, \hat{D}_y, \hat{D}_z)=(1.1739, 1.1888, 0.5895)$ ，与理论值 $(D_x, D_y, D_z)=(1.2050, 1.2495, 0.6093)$ 基本相符，并最终得到在观测时间内 $0\sim 0.25\text{ s}$ 锥顶散射中心的实际轨迹如图6所示，与其理论轨迹近乎重合，从而更加充分地说明了本文重构方法的准确性和有效性。

5.2 算法鲁棒性分析

为了充分验证本文所提算法的鲁棒性，仿真分析了曲线参数估计误差对目标参数提取及重构精度的影响。由于在4.1节中3维锥旋矢量的求解精度主要受到锥顶微多普勒幅度和微动周期的影响，而微动周期通常都能被准确估计，因而在此主要分析微

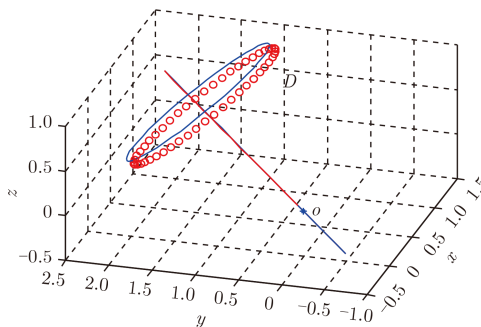


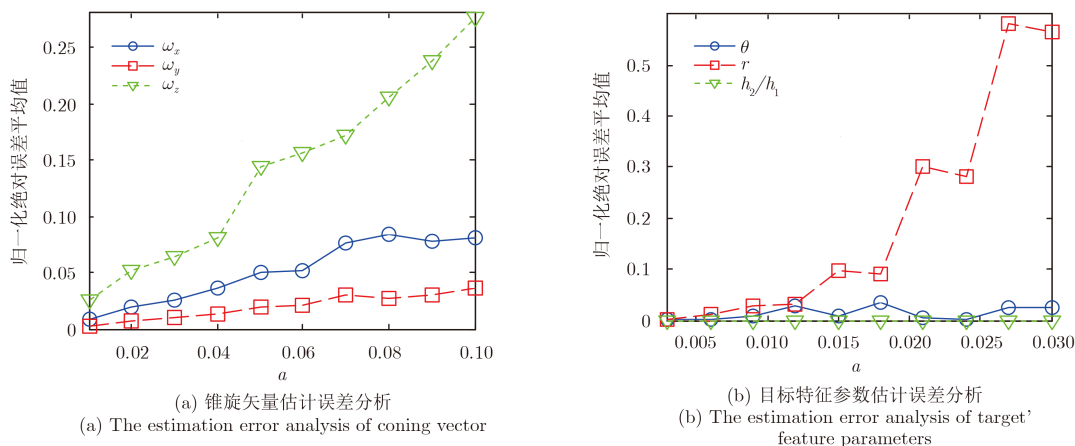
图 6 锥顶散射中心的轨迹

Fig. 6 The trajectory of the top scattering center

多普勒幅度的影响。在4.2节中，目标参数的准确提取关键在于式(9)的求解，且求解精度主要受瞬时频率提取误差制约，因此也有必要对瞬时频率提取误差带来的影响进行分析。为便于分析，定义归一化误差如下：

$$\eta = \frac{\hat{X} - X}{X} \tag{15}$$

上式中 $\hat{X}$ 为估计值， $X$ 为真实值，进一步定义 $|\eta|$ 为归一化绝对误差。假设锥顶微多普勒曲线幅度 $A_D$ 提取值以及各散射中心瞬时频率的提取值归一化误差服从 $[-a, a]$ 上的均匀分布，采用蒙特卡洛方法进行分析，仿真100次，可以得到目标特征参数归一化绝对误差平均值的变化如图7所示。从图7(a)中可以看出，当 $a$ 在区间 $[0, 0.1]$ 变化时，锥旋矢量各方向分量估计误差均呈线性增加趋势，但总的来说，各方向分量估计精度仍然较高。而在图7(b)中，当 $a$ 在区间 $[0, 0.03]$ 变化时，进动角 $\theta$ 变化较为平和， $h_2/h_1$ 则几乎不受影响，只有底面半径 $r$ 值的估计精度变化最为敏感，随着各种高性能时



(a) 锥旋矢量估计误差分析  
(a) The estimation error analysis of coning vector

(b) 目标特征参数估计误差分析  
(b) The estimation error analysis of target feature parameters

图 7 鲁棒性分析

Fig. 7 Robustness analysis

频分析工具的发展, 完全可以将瞬时频率提取精度进一步提高, 从而满足目标参数的高精度提取。

综上所述可知, 本文所提锥体目标参数提取及重构算法在一定程度上受到微多普勒曲线参数提取精度的影响, 但由于文中所采用的基于Cohen类时频重排的Viterbi算法较好地实现瞬时频率曲线的提取, 因此本文算法能保证目标参数提取及重构的可靠性, 可用于目标识别。

## 6 结束语

本文对基于窄带雷达网的锥体目标3维进动特征提取问题展开了研究。依据目标的多视角微多普勒频率调制特性, 利用3部雷达获取了目标的3维锥旋矢量及特征参数, 并进一步解算出每一时刻锥顶坐标, 实现了目标空间位置的3维重构。仿真结果表明, 本文所提方法目标参数估计精度高, 重构性能好, 能够有效克服目标散射中心遮挡和姿态敏感性的不利影响, 为基于窄带雷达的空间目标准确识别提供了解决方案。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宽带雷达同时对目标进行观测识别的情况, 后继工作将就不同体制雷达对目标3维特征参数的融合提取问题展开研究。

## 参 考 文 献

- [1] Victoria S. American Missile Defense[M]. California: United States of America, 2010: 44-78.
- [2] Chen V C. Advances in applications of radar micro-Doppler signatures[C]. 2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Application, Antibes, Juan-les-pins, 2014: 1-4.
- [3] Wang Jun, Lei Peng, Sun Jin-ping, *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.
- [4] 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.
- [5] 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 Si-san, Zhao Hui-ning, and Feng Cun-qian. Precession parameter estimation for ballistic targets based on multi-aspect range-profile sequence[J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(8): 1027-1035.
- [6] Liu L H, McLernon D, Ghogho M, *et al.*. Ballistic missile detection via micro-Doppler frequency estimation from radar return[J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(1): 87-95.
- [7] 罗迎, 张群, 封同安, 等. OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析与三维微动特征提取[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 8-13.  
Luo Ying, Zhang Qun, Feng Tong-an, *et al.*. Micro-Doppler effect analysis of rotating target and three-dimensional micro-motion feature extraction in OFD-LFM MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 8-13.
- [8] 罗迎, 张群, 李松, 等. 基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取[J]. *电子学报*, 2012, 40(6): 1080-1085.  
Luo Ying, Zhang Qun, Li Song, *et al.*. Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1080-1085.
- [9] 雷腾, 刘进忙, 杨少春, 等. 基于三站一维距离像融合的弹道目标特征提取方法研究[J]. *宇航学报*, 2012, 33(2): 228-234.  
Lei Teng, Liu Jin-mang, Yang Shao-chun, *et al.*. Study on feature extraction method of ballistic target based on three-station range profiles[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(2): 228-234.
- [10] 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, and Liu Hong-wei. Feature extraction of space cone-shaped target based on narrow-band radar networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 2956-2962.
- [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 Jing, and Huang Pei-kang. Solution for characteristic parameters of precession cone-shaped target using HRRP[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(4): 650-655.
- [12] Fang Hong-qing, Chen Long, and Raghavendiran Srinivasan. Influence of time and length size feature selections for human activity sequences recognition[J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(1): 134-140.
- [13] Li Po, Wang De-chun, and Wang Lu. Separation of micro-Doppler signals based on time frequency filter and Viterbi algorithm[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2013, 7(3): 593-605.
- [14] 关永胜, 左群声, 刘宏伟. 高噪声环境下微动多目标分辨[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(11): 2630-2635.  
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, and Liu Hong-wei. Micro-motion targets resolution in a high noise environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2630-2635.
- [15] 王辉, 黄成军, 姚林朋, 等. 重排Cohen类时频分布用于GIS局部放电声信号时频分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(11): 2724-2730.  
Wang Hui, Huang Chen-jun, Yao Lin-peng, *et al.*. Application of reassigned cohen class time-frequency

distribution to the analysis of acoustic emission partial discharge signal for GIS[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(11): 2724-2730.

[16] 葛哲生, 陈仲生. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人

民邮电出版社, 2006: 107-112.

Ge Zhe-sheng and Chen Zhong-sheng. Time-Frequency Analysis Techniques of Matlab and Its Application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 107-112.

### 作者简介



赵 双(1992-), 男, 湖南湘潭人。现为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



冯存前(1976-), 男, 陕西富平人。现为空军工程大学教授, 主要从事自适应信号处理研究。

E-mail: fengcunqian@sina.com



鲁卫红(1968-), 男, 河北安平人。现为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

王义哲(1992-), 男, 河南驻马店人。现为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: wangyizhe813@163.com