

# 基于宽窄带微多普勒融合的锥体目标三维重构

陈 蓉, 冯存前<sup>✉</sup>, 李靖卿, 赵 双

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 目标三维特征包含更为精细的结构和微动信息,以锥体弹头为研究对象,提出了一种基于宽、窄带混合体制雷达组网的锥体目标三维重构方法。首先建立锥体目标进动模型,详细分析了目标在不同体制雷达回波中的微多普勒调制特性,然后,使用改进的 viterbi 算法和最小二乘法对各散射中心的幅相信息进行提取和估计,并通过灰色关联度分析实现非理想散射中心的匹配。在此基础上,构建宽、窄带微多普勒信息融合方程组,解算出锥体目标的进动和结构参数,进而确定目标空间位置,实现三维重构。仿真结果表明,在信噪比为 5 dB 情况下,目标的三维重构精度在 91% 左右。

**关键词** 窄带雷达;宽窄带雷达;灰色关联度分析;进动特征提取;三维重构

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.011

**中图分类号** TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0060-07

## A Three-Dimensional Reconstruction Method of Cone Targets Based on Micro-Doppler Fusion of Wideband and Narrowband Netted Radars

CHEN Rong, FENG Cunqian, LI Jingqing, ZHAO Shuang

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

**Abstract:** Three-dimensional features of targets include delicate structure and micro-motion information. Taking cone-shaped warhead as an object of study, this paper proposes a three-dimensional reconstruction method of cone targets based on the mixed netted radars consisting of both narrowband and wideband ones. Firstly a procession model of cone-shaped target is established, and the micro-Doppler modulation characteristic is analyzed for radar echo in different radar systems. Then the paper, by using the improved algorithm and the least-square theory, extracts and estimates the amplitude and phase information of each scattering center. The gray cognate analysis method is used to correlate those corresponding non-ideal scattering centers. Thirdly, the amplitude and phase information fusion equations in different radar systems are set. Based on the equations, procession parameters and configuration parameters of cone target are calculated to identify the position parameters and realize the three-dimensional reconstruction. The simulation results show that the precision of three-dimensional reconstruction is at about 91% when the signal noise ratio (SNR) is under condition of 5dB.

**Key words:** narrowband radar; broadband radar; gray cognate analysis; procession signature extraction;

**收稿日期:** 2016-06-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61372166)

**作者简介:** 陈蓉(1992—),女,山西太原人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究. E-mail: cr\_task@126.com

**通信作者:** 冯存前(1975—),男,陕西富平人,教授,主要从事雷达信号处理和电子对抗研究. E-mail: fengcunqian@sina.com

**引用格式:** 陈蓉,冯存前,李靖卿,等. 基于宽窄带微多普勒融合的锥体目标三维重构[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):60-66. CHEN Rong, FENG Cunqian, LI Jingqing, et al. A Three-Dimensional Reconstruction Method of Cone Targets Based on Micro-Doppler Fusion of Wideband and Narrowband Netted Radars[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 60-66.

## three-dimensional reconstruction

弹道目标的微动特性与三维特征提取是当前学术界研究的热点。弹道导弹在中段的飞行通常伴随着大量的诱饵、碎片等假目标干扰,不同的假目标分别模仿了弹头不同方面的特征,因此,必需提取出目标的多个特征量才能识别出真实弹头<sup>[1-2]</sup>。单一雷达站获得的信息量有限,利用多个雷达站的信息提取目标特征是弹道目标识别的必然趋势。

现有的三维成像技术大多是对目标的进动特征进行分析解算,文献[3]在宽带雷达观测视角下,利用多个散射中心的一维距离历程实现三维重构,从而对目标进动参数进行估计。文献[4]在窄带雷达观测视角下,根据不同视角下锥顶与锥底散射中心的瞬时频率关系,利用频谱熵对窄带雷达网获取的瞬时频率变化进行匹配,从而实现参数的粗估计,再进行精估计处理得到进动参数。文献[5]在宽带雷达观测视角下,根据高分辨一维距离像长度与进动角、几何尺寸以及雷达观测角之间的关系,通过变视角观测进行求解。上述方法均利用了单一体制雷达多视角进行进动参数的求解,但是并未综合运用窄带雷达与宽带雷达获取的微多普勒信息。在实际应用中,窄带雷达具有测量距离远、跟踪范围广的优势,但分辨率较低。而高分辨宽带雷达分辨率高,多用于精确监视与目标识别,但其造价高,信息处理过程较复杂,不利于普及。因此,建立宽、窄带混合的雷达组网体制对降低成本,发挥宽、窄带雷达优势有重要意义<sup>[6]</sup>。

## 1 模型分析

### 1.1 进动模型

图 1 为锥体弹道目标进动模型。 $O-XYZ$  为雷达网坐标系。以目标自旋轴和锥旋轴的交点  $O'$  为坐标原点,建立平行于雷达网坐标系的弹体直角坐标系  $O'-xyz$ 。定义初始时刻,自旋轴与锥旋轴所在平面为  $yO'z$  平面, $x$  轴方向符合右手螺旋准则。自旋轴与锥旋轴夹角为  $\theta$ ,锥旋频率为  $\omega_c$ ,锥体目标高为  $H$ ,底面半径为  $r$ ,旋转中心  $O'$  到底面的距离为  $h$ 。锥体弹头是旋转对称的,锥顶为  $A$ ,雷达视线方向与弹头旋转对称轴构成的平面与弹头底面边缘圆环结构相交于近视点  $p$  和远视点  $q$  两点。

$(\alpha_i, \beta_i)$  为第  $i$  部雷达在  $O'-xyz$  中的视角, $\beta_i$  为雷达视线与锥旋轴的夹角, $\psi_i$  为雷达视线方向与目标自旋轴夹角,则有:

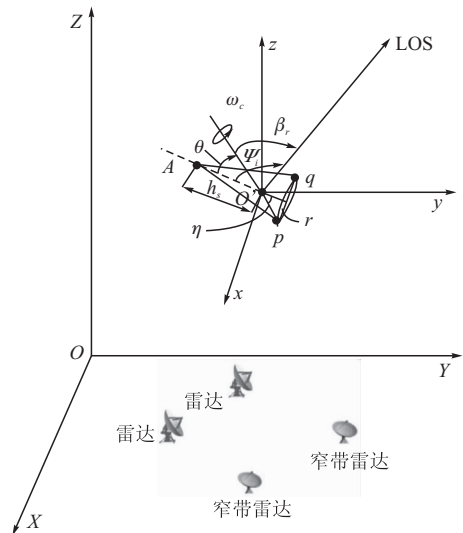


图 1 宽、窄带混合雷达组网示意

Fig. 1 The sketch map of wideband and narrowband netted radar

$$\cos\psi_i(t) = \cos\beta_i \cos\theta + \sin\beta_i \sin\theta \sin(\omega_c t - \alpha_i) \quad (1)$$

散射点在  $t$  时刻的微距离可表示为:

$$\begin{cases} r_A(t) = (H-h)\cos(\psi_i(t)) \\ r_p(t) = -h\cos\psi_i(t) - r\sqrt{1 - (\cos\psi_i(t))^2} \\ r_q(t) = -h\cos\psi_i(t) + r\sqrt{1 - (\cos\psi_i(t))^2} \end{cases} \quad (2)$$

$A, p, q$  3 点在  $t$  时刻的微距离经泰勒展开<sup>[6]</sup>可近似表示为:

$$\begin{cases} r_A(t) = a_A + b_A \sin(\omega_c t - \alpha) \\ r_p(t) \approx a_p + b_p \sin(\omega_c t - \alpha) + c \cos(2\omega_c t - 2\alpha) \\ r_q(t) \approx a_q + b_q \sin(\omega_c t - \alpha) - c \cos(2\omega_c t - 2\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_A, b_A, a_p, b_p, a_q, b_q, c$  均为调制系数,且只与弹道目标的尺寸、进动参数有关,根据锥体目标的散射特性易知<sup>[11]</sup>:

$$a_A = (H-h)\cos\theta\cos\beta, b_A = (H-h)\sin\theta\sin\beta, \quad (4)$$

当雷达视线方向变化时,滑动散射中心  $p, q$  随雷达视线方向的变化,在底面边缘圆环结构上滑动, $p, q$  所在的平面改变,而其在平面内的投影规则不变,因此对于不同的雷达视线入射方向, $p, q$  仍满足式(3)的关系。

### 1.2 信号模型

假设平动分量已补偿,设  $\text{rect}(\cdot)$  为第  $n$  部窄带雷达发射信号的矩形包络,发射载频为  $f_{z_n}$ ,  $T_r$  为脉冲重复周期, $\tau$  为脉冲宽度。在光学区,弹头的回波可以等效为几个强散射中心的回波之和,则接收到的回波信号为<sup>[11]</sup>:

$$s_n(t) = \sum_i \sum_k \sigma_{mi} \text{rect}\left(\frac{t - 2R_m(t)/c - \mu T_r}{\tau}\right).$$

$$\cos\left[2\pi f_{Zn}\left(t - \frac{2R_{mi}(t)}{c}\right)\right] \quad (5)$$

式中:  $c$  为光速;  $\mu$  为脉冲数;  $\sigma_{mi}$  为第  $n$  部窄带雷达的散射中心  $i$  的散射系数;  $R_{mi}(t)$  表示第  $n$  部窄带雷达的散射中心  $i$  对  $O'$  点的径向距离。经正交双通道处理并进行采样后, 得到第  $k$  个脉冲采样后的信号为:

$$s_n(t_k) = \sum_i \sigma_{mi} \exp\left[j \frac{4\pi f_{Zn}}{c} R_{\Delta Zn_i}(t_k)\right] \quad (6)$$

对相位进行求导得到微多普勒信息:

$$f_{dn} = \bigcup_n \frac{2f_{Zn}}{c} \frac{dR_{\Delta Zn_i}(t_k)}{dt} \approx \frac{2f_{Zn}}{c} \bigcup_n N_{pmi}(\omega) N_{mi} \quad (7)$$

式中:  $R_{\Delta Zn_i}(t_k)$  表示第  $n$  部窄带雷达测得的散射中心  $i$  相对于  $O$  点的径向距离;  $c$  为光速;  $\omega = (\omega_c, 2\omega_c)$  为频率信息;  $N_{mi}$ 、 $N_{pm}(\omega)$  分别为第  $n$  部窄带雷达视线下散射中心  $i$  对应的幅度信息和相位信息, 且满足:

$$N_{mi} = \begin{cases} N_{mA} = [\omega_c b_{NnA} \cos(\alpha_{Nn}), 0, \omega_c b_{NnA} \sin(\alpha_{Nn}), 0] \\ N_{mp} = [\omega_c b_{Nnp} \cos(\alpha_{Nn}), 2\omega_c c_{Nn} \sin(2\alpha_{Nn}), \\ \omega_c b_{Nnp} \sin(\alpha_{Nn}), -2\omega_c c_{Nn} \cos(2\alpha_{Nn})] \\ N_{mq} = [\omega_c b_{Nnq} \cos(\alpha_{Nn}), -2\omega_c c_{Nn} \sin(2\alpha_{Nn}), \\ \omega_c b_{Nnq} \sin(\alpha_{Nn}), 2\omega_c c_{Nn} \cos(2\alpha_{Nn})] \end{cases} \quad (8)$$

$$N_{pm} = [\cos\omega_c \Delta t, \cos 2\omega_c \Delta t, \sin\omega_c \Delta t, \sin 2\omega_c \Delta t] \quad (9)$$

式中:  $b_{Nni}$ 、 $c_{Nn}$  均为对应散射中心的调制系数;  $\Delta t$  为采样间隔。

对于高分辨雷达而言, 雷达分辨率高, 目标尺寸远大于雷达的距离分辨单元<sup>[9]</sup>, 可以获得雷达的高分辨距离像。设第  $n$  部宽带雷达载频为  $f_{Bn}$ ,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\gamma$  为调频率,  $m = 0, 1, \dots, M-1$  为发射脉冲的序号,  $T_{ref}$  为宽带雷达测得的参考时间。  $T_r$  为脉冲重复周期,  $t_m = mT_r$  是慢时间。目标的回波信号经快速傅里叶变换后将包络斜置项去除<sup>[9]</sup>, 可得到:

$$s_r(f, t_m) = \sum_{i=1}^L \sigma_{mi} T_p \operatorname{sinc}\left(T_{ref}\left(f + \frac{2\gamma}{c} R_{\Delta Bni}(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi f_{Bn}}{c} R_{\Delta Bni}(t_m)\right\} \quad (10)$$

式中:  $R_{\Delta Bni}$  表示第  $n$  部宽带雷达测得的散射中心  $i$  相对于  $O'$  点的径向距离。

则散射点的微距离可以表示为:

$$r_{mi} \approx \bigcup_m B_{pm}(\omega) B_{mi} \quad (11)$$

式中:  $r_{mi}$  为第  $i$  个散射中心的多普勒信息;  $B_{mi}$ 、 $B_{pm}(\omega)$  分别为散射中心  $i$  对应的幅度信息和相位信息, 且满足:

$$B_{mi} = \begin{cases} B_{mA} = [a_{BnA}, -b_{BnA} \sin(\alpha_{Bn}), \\ 0, b_{BnA} \cos(\alpha_{Bn}), 0] \\ B_{mp} = [a_{Bnp}, -b_{Bnp} \sin(\alpha_{Bn}), \\ c_{Bn} \cos(2\alpha_{Bn}), b_{Bnp} \cos(\alpha_{Bn}), c_{Bn} \sin(2\alpha_{Bn})] \\ B_{mq} = [a_{Bnq}, -b_{Bnq} \sin(\alpha_{Bn}), -c_{Bn} \cos(2\alpha_{Bn}), \\ b_{Bnq} \cos(\alpha_{Bn}), -c_{Bn} \sin(2\alpha_{Bn})] \end{cases} \quad (12)$$

$$B_{pm} = [1, N_{pm}] \quad (13)$$

## 2 散射中心的匹配

### 2.1 微动信息解算

由式(7)、(11)可知, 散射中心在宽、窄带雷达体制下的微多普勒信息满足线性关系。因此, 在缺乏先验信息的条件下, 采用改进的 viterbi 算法分离出多普勒曲线<sup>[10]</sup>, 然后利用最小二乘拟合来估计微多普勒曲线的幅度信息:

$$\begin{cases} f_{dn} \approx \frac{2f_{Zn}}{c} \bigcup_n N_{pm}(\omega) N_{mi} \\ r_{n2} \approx \bigcup_m B_{pm}(\omega) B_{mi} \end{cases} \quad (14)$$

### 2.2 散射中心关联

在雷达站得到的一维高分辨距离像中, 各散射中心对应的微动分量通常相互叠加在一起<sup>[11]</sup>, 其对应峰值的位置、强弱及排列顺序均不相同, 因此, 从不同雷达站的一维距离像中准确获取同一散射点的散射信息成为解决问题的关键。根据文献[12], 对于理想散射中心, 弹头上任意 2 个散射中心的径向距离变化幅值比、均值比和初相差与雷达视线方向无关, 分别提取并计算即可实现散射中心的匹配。然而在滑动散射模型中, 上述方法仅适用于锥体顶点  $A$ , 并不能实现非理想散射中心  $p$ 、 $q$  的匹配。为实现非理想散射中心  $p$ 、 $q$  的匹配, 本文采用灰色关联度分析方法进行处理<sup>[13]</sup>。

灰色关联度分析的基本思想是根据序列曲线的几何特征来判断其联系的紧密程度, 从定量角度对数据序列中的参考数列和比较数列进行量化, 求解二者之间的关联度。灰色关联度分析对数理统计方法分析过程中存在的不足进行修正, 其计算过程简单, 对于初始样本数据的数量及样本数据的规律性均无要求。将各散射中心对应的幅度信息和相位信息作为系统的特征行为序列, 根据散射中心的幅相信息, 按雷达体制分别选取其最优指标集, 计算各散射中心之间的幅相信息的灰色关联度, 按照灰色关联度值由大到小的原则分别匹配出各组散射中心。具体步

骤如下:

**Step1** 确定比较数列。同一体制雷达不同散射中心对应的相位信息  $\mathbf{N}_{pm}(\omega)$ 、 $\mathbf{B}_{pm}(\omega)$  相同,设不同散射中心相同相位所对应的幅度信息为同一种指标。则相关因素行为序列为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_0(1) & x_0(2) & \cdots & x_0(m) \\ x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $x_i(k)$ 为第  $i$  个散射中心的第  $k$  种指标,对原始数据进行规范化处理:

$$\lambda_{ik} = (X_{ik} - \min X_{ik}) / (\max X_{ik} - \min X_{ik}) \quad (16)$$

构成被比较数列  $\{\lambda_{ik}\}$ 。

**Step2** 确定参考数列。选取每种指标中的最优目标值作为最优指标集  $\{\lambda_{0k}\}$ ,并以此作为参考数列。由于此时并不能区分各散射中心,因此,本文在这里选用根据目标散射特性所估计出的幅度信息经规范化处理后的数值,作为最优目标值。在一次比较中,不同指标的最优目标值应当为同一散射中心对应的幅度信息。每一散射中心均有其对应的参考数列。

**Step3** 求关联系数。依次计算比较序列与各散射中心对应的参考序列的关联系数,得到每种指标对应不同散射中心的关联系数。第  $k$  种指标的关联系数求解公式为:

$$\gamma(\lambda_0(k), \lambda_i(k)) = (\min_i \min_k |\lambda_0(k) - \lambda_i(k)| + \xi \min_i \min_k |\lambda_0(k) - \lambda_i(k)|) / (|\lambda_0(k) - \lambda_i(k)| + \xi \min_i \min_k |\lambda_0(k) - \lambda_i(k)|) \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

式中分辨率  $\xi \in [0, 1]$ ,  $\xi$  值越小,分辨能力越大,一般取 0.5。同一部雷达的所有散射中心可求得  $n^2 m$  个关联系数。

**Step4** 求灰色关联度。由于关联序列中数据较多,使得信息过于分散,不便于比较,因此需要采用以下公式将属性相同的关联系数换算为一个值,即第  $i$  个散射中心的关联度为:

$$\gamma_i = \left( \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \right) / m \quad (18)$$

根据灰色关联度值的大小对比较数列进行排序,数值越大则关联程度越大。在这里我们主要关注的是系统行为特征序列与各相关因素行为序列关联度的大小次序,而不完全是关联度在数值上的大小。

## 3 基于雷达组网的三维重构

### 3.1 目标进动参数和结构参数求解

已知雷达视角  $(\alpha_i, \beta_i)$ , 观察宽、窄带体制下散射

中心  $A$  的幅度信息可以得到关系式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{N}}_{mA}(3) = \dot{\omega}_c \sin \alpha_{Nn} (H-h) \sin \theta \sin \beta_{rNn} \\ \dot{\mathbf{B}}_{mA}(2) = \sin \alpha_{Bn} (H-h) \sin \theta \sin \beta_{rBn} \\ \dot{\mathbf{B}}_{mA}(1) = (H-h) \cos \theta \cos \beta_{rBn} \\ \frac{\dot{\mathbf{B}}_{mA}(2)}{\cos \alpha_{Bn}} = (H-h) \sin \theta \sin \beta_{rBn} \end{cases} \quad (19)$$

令  $h_s = (H-h)$ , 此处锥旋频率  $\dot{\omega}_c$  可根据文献[14]的方法,求得式(19)中有 4 个未知参量,选取多部宽带雷达和至少一部窄带雷达构成的混合体制雷达组网可获取丰富的信息<sup>[15-16]</sup>,从而建立非线性方程组求解出未知参量  $\beta_{rNn}, \beta_{rBn}, h_s, \theta$ 。

根据文献[5],一般情况下雷达在顶点散射中心  $A$  附近观测目标,当雷达视线角大于半锥角时散射中心  $q$  被遮挡,则锥体的距离像长度可表示为是:

$$|r_A - r_p| = H \cos \phi_i(t) - r \sin \phi_i(t) \quad (20)$$

对任一时刻  $t_1$ , 设  $L(t_1)$  为锥体弹头在雷达视线方向上的投影长度,取  $t_1$  时刻锥体距离像的参数:

$$L(t_1) = |r_A - r_p| = H \cos \phi_i(t_1) - r \sin \phi_i(t_1) \quad (21)$$

式中有 2 个未知量  $H, r$ , 选取任 2 个时刻的散射中心  $A, p$  的距离像信息可求解出  $H, r$ 。

### 3.2 散射中心位置信息解算

设锥旋轴在弹体坐标系  $O'-xyz$  中的单位方向向量为  $\mathbf{e}_u = (x_u, y_u, z_u)^T$ ,  $\beta_{rNn}, \beta_{rBn}$  分别为窄、宽带雷达视线方向与锥旋轴的夹角,则有:

$$\begin{cases} \cos \beta_{rNn} = \mathbf{e}_{Nn}^T \cdot \mathbf{e}_u \\ \cos \beta_{rBn} = \mathbf{e}_{Bn}^T \cdot \mathbf{e}_u \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{e}_{Nn}^T$  为窄带雷达视线单位方向向量; $\mathbf{e}_{Bn}^T$  为宽带雷达视线单位方向向量,根据雷达组网建立方程组可求解未知参量  $x_u, y_u, z_u$ 。

在滑动散射模型中<sup>[16]</sup>, 近视点  $p$  和远视点  $q$  是雷达视线方向与底面圆环的交点,与每部雷达的视线角有关,因此,近视点与远视点在底面圆环边缘上的位置对于各部雷达各不相同, $p, q$  两点的坐标只对同一部雷达同时有效。又因为两点可确定一条直线的位置,且本文假设弹体参考坐标系的原点  $O'$  为弹体的旋转中心,则求出顶点散射中心  $A$  在弹体坐标系  $O'-xyz$  中的位置即可确定弹体目标在空间中的相对位置。

设顶点散射中心  $A$  在弹体参考坐标系  $O'-xyz$  中的位置为  $(x_A, y_A, z_A)$ , 即顶点  $A$  与旋转中心  $O'$  的连线在弹体参考坐标系中的方向向量为  $\mathbf{n}_A = (x_A, y_A, z_A)^T$ 。取  $t_1$  时刻的幅度信息与相位信息,则有:

$$\begin{cases} h_s \cos \theta = \mathbf{n}_A^T \cdot \mathbf{e}_u \\ h_s \cos \phi_i(t_1) = \mathbf{n}_A^T \cdot \mathbf{e}_{Bn} \\ h_s \cos \phi_i(t_1) = \mathbf{n}_A^T \cdot \mathbf{e}_{Ni} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $e_{B_i}$ 、 $e_{N_i}$  为宽、窄带雷达的雷达视线单位方向向量, 根据雷达组网构建的方程组可求解未知参量  $x_A$ 、 $y_A$ 、 $z_A$ 。

至此, 依据所估计出的锥高  $H$  和底面半径  $r$ , 可以重构锥体目标的三维结构, 结合锥旋轴方向  $e_v$ 、散射中心  $A$  在弹体坐标轴  $O'-xyz$  中的坐标及进动角  $\theta$  的估计值, 可以重构锥体目标的三维空间位置。

## 4 仿真分析

仿真参数设置: 宽窄带混合组网雷达中, 假设有宽带雷达 2 部, 窄带雷达 2 部, 宽带雷达发射线性调频信号, 载频均为 10 GHz, 脉冲重复频率为 2 kHz, 脉宽均为 0.1 ms, 带宽为 4 GHz。在弹体参考坐标系  $(x, y, z)$  中的方位角和高低角分别为  $(-45^\circ, 15^\circ)$ 、 $(-20^\circ, 45^\circ)$ 。窄带雷达发射单频信号, 载频均为 6 GHz, 脉冲重复频率为 600 Hz, 在弹体参考坐标系  $(x, y, z)$  中的方位角和高低角分别为  $(-75^\circ, 15^\circ)$ 、 $(90^\circ, 15^\circ)$ 。信噪比均为 5 dB。锥高  $H=2.5$  m, 底面半径  $r=0.5$  m, 目标质心  $O'$  与顶点的距离为  $h_s=1.5$  m, 进动角为  $15^\circ$ , 锥旋频率  $\omega_c=4\pi$  rad/s。锥旋轴在  $(x, y, z)$  中的方向为  $(0, -\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ , 顶点的旋转中心  $A$  的位置为  $(-0.6925, -0.5923, 1.1858)$ 。经计算可知, 4 部雷达的雷达视线角分别为  $35.7^\circ$ 、 $47.9^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $32.6^\circ$ 。仿真结果见图 2、图 3。

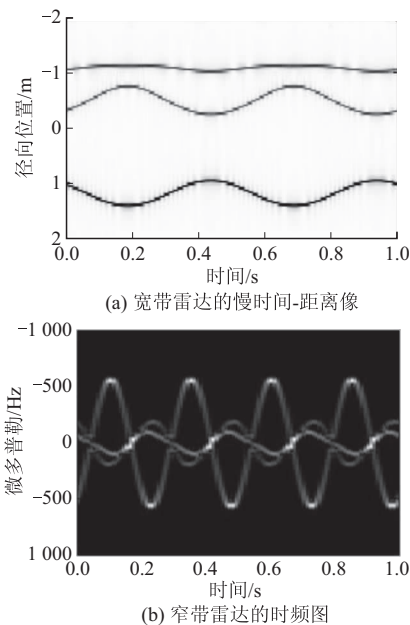


图 2 宽带雷达与窄带雷达对应的多普勒曲线

Fig. 2 Micro-Doppler of wideband and narrowband radars

图 2 为宽、窄带雷达的时间-距离像与时频图, 用改进的 viterbi 进行提取并通过 3.2 节中的散射中心匹配方法实现散射中心的匹配见图 3。

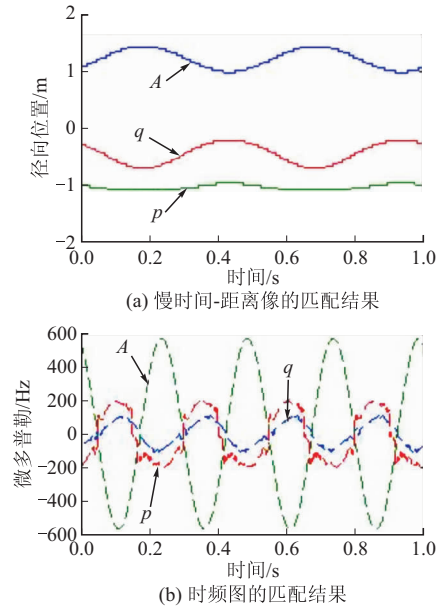


图 3 散射中心的匹配结果

Fig. 3 Scattering centers matching results

文中第 2 节最小二乘拟合可以得到不同体制下多个散射中心的幅度见表 1、表 2。根据提取出的幅度信息中, 若有  $N_m(2)$ 、 $N_m(4)$  或  $B_m(3)$ 、 $B_m(5)$  的数值同趋于零, 则可以判断该幅度信息是属于散射中心  $A$  的幅度信息<sup>[17]</sup>。

表 1 窄带雷达散射中心的幅度信息

Tab. 1 The micro-motion amplitudes of all scattering centers by narrowband radars

散射中心	$N_m(1)$	$N_m(2)$	$N_m(3)$	$N_m(4)$
$A_1$	3.539 3	0.045 7	168.962 2	-0.014 6
$p_1$	-5.303 4	2.370 1	-123.801 3	-15.323 5
$q_1$	2.387 1	-2.352 6	-16.230 4	16.892 5
$A_2$	2.199 9	-0.018 6	105.237 8	-0.051 1
$p_2$	-5.303 3	2.387 1	-123.801 3	-15.323 5
$q_2$	2.370 1	-2.256 7	-16.230 4	15.000 9

表 2 宽带雷达散射中心的幅度信息

Tab. 2 The micro-motion amplitudes of all scattering centers by wideband radars

散射中心	$B_m(1)$	$B_m(2)$	$B_m(3)$	$B_m(4)$	$B_m(5)$
$A_1$	1.213 1	-0.157 1	-0.078 1	0.161 1	0.003 1
$p_1$	-1.046 2	0.039 4	-0.000 3	-0.040 4	-0.013 5
$q_1$	-0.451 4	0.175 1	0.000 4	-0.179 5	0.015 7
$A_2$	1.009 3	-0.202 1	-0.001 9	0.207 2	0.000 7
$p_2$	-0.980 6	0.076 8	-0.002 4	-0.078 7	-0.009 7
$q_2$	-0.240 4	0.194 2	0.002 6	-0.199 2	0.010 3

通过表 1、2 中宽、窄带雷达幅度信息之间的关系可以求得弹道目标的进动特征与结构参数表 3。同时可解得  $t$  时刻散射中心  $A$  的位置信息。取  $t=0.5$ , 散射中心  $A$  在弹体坐标系中的位置为  $(-0.692\ 5, -0.592\ 3, 1.185\ 8)$ 。锥旋轴方向估计为  $(0.212\ 7, -0.725\ 8, 0.654\ 2)$ 。

表 3 弹道目标的进动特征及结构参数

Tab. 3 The procession signature and configuration parameters of ballistic target

参数	$H/m$	$r/m$	$h_s/rad$	$\theta/rad$
估计均值	2.519 6	0.508 4	1.834 4	0.269 9
相对误差/%	0.78	1.68	8.28	3.10
预设值	2.5	0.5	1.5	0.261 6

由于目标回波信号中的噪声及距离像旁瓣的存在,在提取曲线参数时不可避免地会引入误差,最终影响目标各个参数的估计精度。相比于  $H$ 、 $r$ 、 $h_s$ 、 $\theta$  的估计值误差较大,且  $h_s$  的估计误差远高于  $\theta$ ,这是因为  $h_s$  在估计过程中用到了 2 个估计值解算,而  $\theta$  用到一个估计值。从表 3 可以看出,重构的目标高度与半径均大于预设的目标的数据,这与实际相符。

图 4 为信噪比变化时,利用本文方法所估计参数的相对误差。信噪比降低使得微多普勒信息中的背景噪声变大<sup>[18]</sup>,viterbi 处理后的图像中噪声点增多,最终导致计算量和参数空间的旁瓣增益增大。从图中可以看出,信噪比对进动角  $\theta$ 、 $h_s$  的估计影响较大,且随着信噪比的增大迅速减小。当信噪比大于 0 dB 时,信噪比对于  $H$ 、 $r$  的影响不明显。可见,信噪比对于弹道目标的位置重构的影响较大,而对于弹道目标结构重构的精度影响较小。将本文方法与其它三维重构方法进行比较发现,通过宽带雷达组网获取一维距离像,对各散射点对应的时-距离像进行比较实现匹配,进而解算出进动参数与结构参数实现三维重构,当仿真条件相同时,锥体半径估计相对误差为 2.22%,高于本文的 1.68%,底面半径估计精度为 2.22%,低于本文的 3.1%,但该方法将 3 个散射中心均视为理想散射中心,模型简单化与实际不符;文献[4]在雷达视线角间隔大于  $3^\circ$  时可以获得 94% 的估计精度,但其受瞬时频率估计精度较大,平均估计精度仅为 85%,明显低于本文,且只利用了组网雷达的多视角特性,没有发挥数据融合的优势。这也充分说明了本文方法的可行性。

图 5 为顶点  $A$ 、重构点  $A'$ 、质心  $O'$  和锥体目标底面中心的点在  $(x, y, z)$  的三维空间位置重构结果,图中重构位置与原始位置基本吻合,只存在很小的误差。由图 5 可以看出,重构的结果与原始目标基本一致,从而验证了本文方法的正确性。

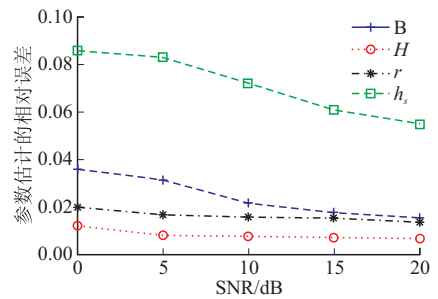


图 4 信噪比对参数估计的影响

Fig. 4 The influence of SNR on parameter estimation

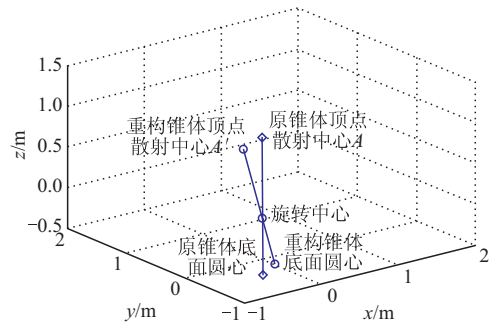


图 5 弹道目标三维重构

Fig. 5 Three-Dimensional reconstruction of ballistic target

## 5 结语

结合当前雷达应用的实际情况,本文通过对宽、窄带雷达构成的雷达组网获得的微多普勒信息进行关联处理,实现了锥体弹道目标的三维重构。本文方法建立在有两部宽带雷达,两部窄带雷达的雷达组网基础之上,针对雷达多普勒信息数据量较少,规律性不明显,数据提取可能有缺失的情况,采用灰色关联度分析对散射中心对应的多普勒曲线进行匹配,克服了非正弦调制项的影响,较好的实现了散射中心的匹配。本文方法运用目标顶点和旋转中心进行目标的位置重构,在实际操作中,目标的平动并不能完全补偿,本文选用坐标原点作为旋转中心而没有考虑旋转中心的偏移,这对目标的位置重构带来一定的误差。相应的工作将是下一步研究的重点。

## 参考文献 (References):

- [1] CHEN V C. Advances in Applications of Radar Micro-Doppler Signatures [C] // Proc IEE Antenna Measurements & Application. Antibes, Juan-les-pins, France, 2014: 1-4.
- [2] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
ZHANG Q, LUO Y. The Micro-Doppler Effect of Radar Targets[M]. Beijing: National Defence Indus-

- try Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 洪灵, 戴奉周, 刘宏伟等. 基于三维重构的空间目标进动参数估计方法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(2): 237-243.  
HONG L, DAI F Z, LIU H W, et al. Precession Parameters Estimation for Space Target Based on 3D Reconstruction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(2): 237-243. (in Chinese)
- [4] 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 X, DU L, LIU H W. Feature Extraction of Space Cone-shaped Target Based on Narrow-band Radar Networks. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(12): 2956-2962. (in Chinese)
- [5] 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 C, HUANG J, HUANG P K. Solution for Characteristic of Precession Cone-Shaped Target using HRRP [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 650-655. (in Chinese)
- [6] 冯存前, 李靖卿, 贺思三, 等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(6): 609-620.  
FENG C Q, LI J Q, HE S S, et al. Micro-Doppler Feature Extraction and Recognition Based on Netted Radar for Ballistic Targets[J]. Journal of Radars, 2015, 4(6): 609-620. (in Chinese)
- [7] GAO H W, XIE L G, WEN S L, et al. Micro-Doppler Signature Extraction from Ballistic Target with Micro-motions [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1969-1981.
- [8] LUO Y, ZHANG Q, YUAN N, et al. Three-Dimensional Precession Feature Extraction of Space Targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 1313-1329.
- [9] WANG Q, XING M D, LUG Y, et al. High-Resolution Three-Dimensional Radar Imaging for Rapidly Spinning Targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 22-30.
- [10] 李靖卿, 冯存前, 张栋. 基于自适应视野聚类匹配的多目标分离与提取[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 1974-1979.  
LI J Q, FENG C Q, ZHANG D. Multi-Target Separation and Extraction Based on Adaptive Vision Cluster Matching [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 1974-1979. (in Chinese).
- [11] 李东伟, 罗迎, 张群, 等. 组网雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3): 45-49.  
LI D W, LUO Y, ZHANG Q, et al. Research on Micro-Doppler Effect and Extraction of Three-dimensional Micro-motion Features of Rotating Targets in Netted Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(3): 45-49. (in Chinese)
- [12] 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 T, LIU J M, YANG S C, 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. (in Chinese).
- [13] 刘明伟, 张晓滨, 杨东山. 改进 RGM 的用户情景状态序列信息预测方法[J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(3): 359-363.  
LIU M W, ZHANG X B, YANG D S. Sequence Information Prediction Method of User Contest States Based on Improved RGM[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2016, 30(3): 359-363. (in Chinese)
- [14] 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 S S, ZHAO H N, FENG C Q. 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)
- [15] AI X F, ZOU X H, LI Y Z, et al. Bistatic Scattering Centres of Cone-Shaped Targets and Target Length Estimation[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(12): 2888-2898.
- [16] HE S S, ZHAO H N, ZHANG Y S. Precession Feature Extraction for Ballistic Target Based on Networked High Resolution Radar [J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10(17): 7349-7358.
- [17] WANG T, CAI Y Z. Precession Parameters Extraction of Conical Target Using Rational Cubic Functions [C] // Proc. of the 33rd Chinese Control Conference (CCC). Nanjing, China, 2014: 7365-7369.
- [18] GUO K Y, SHENG X Q, SHENR H, et al. Influence of Migratory Scattering Phenomenon on Micro-motion Characteristics Contained in Radar Signals [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 7(5): 579-589.