

基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取方法

韩勋 杜兰* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 进动引发的微多普勒调制可作为空间锥体目标识别的重要依据, 针对此该文提出一种基于窄带雷达组网的进动锥体目标特征提取方法。该文首先根据目标散射特性推导了进动引发的散射点理论瞬时频率变化, 并根据频谱熵实现了多个雷达视角观测下的散射点瞬时频率变化的匹配; 然后依据不同视角下锥顶与锥底散射点瞬时频率变化关系, 提出一种目标进动与尺寸特征联合提取的新方法, 实现了目标高度、底面半径、质心位置、进动角等参数的高精度估计。基于电磁计算数据的实验结果验证了该文所提方法的有效性和精确性。

关键词: 目标识别; 微多普勒; 特征提取; 雷达组网; 空间锥体目标

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-2956-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.02037

Feature Extraction of Space Cone-shaped Target Based on Narrow-band Radar Networks

Han Xun Du Lan Liu Hong-wei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The micro-Doppler modulation caused by precession is considered as an important signature for the discrimination of space cone-shaped target. A novel feature extraction method for precessing cone-shaped target with narrow-band radar networks is proposed in this paper. Based on analysis of the scattering properties of the cone-shaped target, this paper first derives the scattering centers' theoretical Instantaneous Frequency (IF) variations induced by precession, and the IF variations obtained from multiple radar aspects are matched according to their spectrum entropy. Then according to the properties of IF variations of the top and bottom scattering centers under different radar aspects, the precession and geometry feature extraction method is proposed for estimating the target's parameters, such as height, bottom radius, location of barycentric, precession angle *etc.* Experiments based on the electromagnetic computation data verify the validness and accuracy of the proposed method.

Key words: Target recognition; Micro-Doppler; Feature extraction; Radar networks; Space cone-shaped target

1 引言

真假弹头目标的识别对于导弹防御系统来说十分重要, 而多种特征的提取与综合利用已经成为导弹目标识别的发展趋势。弹头目标在释放后, 出于保持自身稳定的要求会产生进动, 由此引发的雷达回波调制被称为微多普勒(micro-Doppler)调制^[1], 微多普勒调制信息中包含了目标的尺寸, 纵横惯量比, 质量分布等多种特征, 因此微多普勒调制已经成为锥体目标分类、识别中的重要特征^[2-4]。

文献[5]系统地对微多普勒调制的成因进行了分析, 并对进动引发的微多普勒调制进行了理论推导; 文献[6]基于回波时频分布对有翼进动目标的自旋频

率, 锥旋频率, 进动角等特征进行了提取; 文献[7,8]利用进动引起的高分辨距离像序列变化, 实现了目标的进动特征和结构特征的提取; 而基于雷达组网的特征提取也得到了越来越多的研究, 相比单基雷达, 雷达组网可以提供多个视角下的微动信息, 有利于目标的特征提取和识别。文献[9]以锥形弹头为研究对象, 提出了一种利用多视角下时间-距离像分布对目标进动及结构特征进行估计的算法; 文献[10]提出了一种基于分布式组网雷达的有翼弹头的3维特征提取方法, 并对目标运动特征与结构特征进行重构; 文献[11]利用三站1维距离像重构了锥体弹头上散射点的空间相对位置, 并对锥体弹头的各个参数进行了估计, 这些工作体现了雷达组网在目标特征提取中的特点所在。需要指出的是, 现有工作多是在高分辨雷达的基础上利用目标距离像完成的, 对于低分辨雷达, 由于带宽的限制, 难以从目标距

2013-12-26 收到, 2014-05-09 改回

国家自然科学基金(61271024, 61201296, 61322103)和全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)资助课题

*通信作者: 杜兰 dulan@mail.xidian.edu.cn

离像中获得微动信息，而此时回波多普勒谱中包含的散射点微多普勒频率变化同样可以反应目标特性^[12,13]，可供实现目标特征提取，因此研究基于窄带微多普勒调制的特征提取是有必要的。综合上述考虑，本文提出一种基于窄带雷达组网的无翼锥体目标的特征提取方法，利用不同视角下目标散射点瞬时频率变化关系，提取出了目标的进动与结构特征。

本文的第 2 部节分对目标散射点进动微多普勒特性进行了分析，然后分析了不同视角下散射点的瞬时频率变化关系；在此基础上根据 3 个视角下目标雷达回波，提出了基于瞬时频率变化的目标特征提取新方法，对目标高度，底面半径，质心位置，进动角等特征进行了提取；最后采用电磁计算数据进行了仿真实验，实验结果验证了本方法的有效性与精确性。

2 进动目标微多普勒特性分析

如图 1 所示的锥体目标，目标高度为 H ，底面半径为 r ，质心位置为 o ，质心位置距底面距离为 h ， α 为半锥角，雷达视角(Line-of-Sight, LoS)与目标中轴的夹角为 β 。当被雷达照射时，目标表面上会出现 3 个散射点 P_1, P_2, P_3 ，其中 P_1 为球冠散射中心， P_2, P_3 为雷达视角入射面与底面的交点^[14]，由雷达视角方向与目标相对位置共同决定。

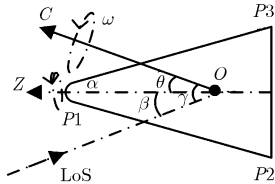


图 1 锥体目标示意图

当目标进动时，进动引发的雷达视线与对称轴夹角 $\beta(t)$ 随时间变化如式(1)，其中锥旋频率为 ω ，进动角为 θ ，雷达视线与进动轴夹角为 γ ， φ_0 为初相。根据文献[9]，目标在中段飞行时大部分情况下只有 P_1 与 P_3 可见，因此本文将主要针对这种情况进行研究。

$$\beta(t) = \arccos(\cos \gamma \cos \theta + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \varphi_0)) \quad (1)$$

设雷达距目标质心位置初始距离为 R_0 ，假定平动已补偿，将目标散射点位置往雷达视角方向上投影，根据 $\beta(t)$ 变化可得进动引发的 P_1, P_3 距雷达投影距离变化为

$$r_1(t) = R_0 - H \cos \beta(t) + h \cos \beta(t) \quad (2)$$

$$r_3(t) = R_0 - r \sin \beta(t) + h \cos \beta(t) \quad (3)$$

假设雷达发射信号波长为 λ ，则相应的各散射点微多普勒频率变化如式(4)与式(5)，其中 $a = \cos \gamma \cos \theta$ ， $b = \sin \gamma \sin \theta$ 。

$$f_1(t) = \frac{2}{\lambda} \omega H b \sin(\omega t + \varphi_0) - \frac{2}{\lambda} \omega h b \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

$$f_3(t) = -\frac{2}{\lambda} r (a + b \cos(\omega t + \varphi_0)) \times \frac{\omega \sin(\omega t + \varphi_0) b}{\sqrt{1 - (a + b \cos(\omega t + \varphi_0))^2}} - \frac{2}{\lambda} \omega h b \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

根据理论模型，散射点瞬时频率变化中包含目标特征有目标高度 H ，底面半径 r ，质心位置 h ，进动角 θ ，锥旋频率 ω ，雷达视线角 γ 等，接下来本文将根据瞬时频率变化性质，利用不同视角下散射点瞬时频率对这些参数进行估计。其中散射点瞬时频率变化可以用基于曲线跟踪的瞬时频率估计算法得到，该算法具有良好的抗噪性能及估计精度，可以有效地估计得到各散射点瞬时频率变化^[15]。

3 组网条件下目标尺寸与进动特征提取

3.1 散射点瞬时频率变化匹配

每部雷达回波包含两个散射点的瞬时频率变化，因此首先要对估计得到的不同雷达回波中瞬时频率变化进行匹配。由于回波中只包含锥顶与锥底散射点频率变化，只要判别估计得到的瞬时频率变化为锥顶或锥底频率分量即可。

根据锥顶瞬时频率分量为标准正弦信号，而锥底瞬时频率分量包含 ω 的无穷级倍频分量这一性质，本文采用计算频谱熵的方法对瞬时频率变化进行判别，频谱熵大的判别为锥底频率分量，小的为锥顶频率分量，频谱熵的计算公式如式(6)，其中 $E(f)$ 为能量值归一化后的频谱。

$$SEn = -\sum_f E(f) \lg E(f) \quad (6)$$

3.2 目标进动与尺寸特征提取

从式(4)与式(5)可以看出，由于质心位置 h 的影响，锥顶与锥底瞬时频率分量被叠加了一个完全相同的正弦信号 $f_h(t) = 2\omega h b \sin(\omega t + \varphi_0)/\lambda$ 。本文首先假设 $f_h(t)$ 已被完全补偿，并利用补偿后的瞬时频率变化进行特征提取。

$f_h(t)$ 被完全补偿后，根据式(4)与式(5)，当锥顶瞬时频率变化到极值 $f_1(t_{\text{ext}})$ 时，有 $\sin(\omega t_{\text{ext}} + \varphi_0) = \pm 1$ ，此时锥底瞬时频率值为

$$f_3(t_{\text{ext}}) = \pm \frac{2}{\lambda} \frac{r \omega a b}{\sqrt{1 - a^2}} \quad (7)$$

若利用两部雷达同时观测，则可获得两个视角下的

锥底瞬时频率极值 $f_3(t_{\text{ext}}|\gamma_1)$ 与 $f_3(t_{\text{ext}}|\gamma_2)$ ，以及各自锥顶瞬时频率极值 $f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_1)$ 与 $f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_2)$ ，令 $A = f_3(t_{\text{ext}}|\gamma_1)/f_3(t_{\text{ext}}|\gamma_2)$ ， $B = f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_1)/f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_2)$ ，可得到方程组：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\cos \gamma_1 \sin \gamma_1 \sqrt{1 - (\cos \gamma_2 \cos \theta)^2}}{\cos \gamma_2 \sin \gamma_2 \sqrt{1 - (\cos \gamma_1 \cos \theta)^2}} &= A \\ \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2} &= B \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中含有3个未知变量，分别为 $\gamma_1, \gamma_2, \theta$ ，但只有两个方程，不能用一般的方法求解，这里采用循环迭代的方式对其求解。

为了保证飞行稳定，式(8)中的进动角 θ 较小，其范围一般在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 之间^[6]，这导致 $\cos^2 \theta$ 的取值范围也较小，位于 0.99 到 0.94 之间，在这样一个范围内，进动角的取值对方程组求解的影响不大，因此本文首先令进动角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 之间变化，计算各个取值时的 γ_1, γ_2 ，并对结果取平均做为粗估计的结果 $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2$ 。

为了得到更精确的 (γ_1, γ_2) ，利用 $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2$ 与 $f_3(t|\gamma_i)$ 根据式(9)估计 (r, θ) ，其中 $a_i = \cos \hat{\gamma}_i \cos \theta$ ， $b_i = \sin \hat{\gamma}_i \sin \theta$ ， ω 可以利用锥顶或锥底瞬时频率分量利用自相关法获得^[17]。

$$(\hat{r}, \hat{\theta}) = \arg \min_{(r, \theta)} \left\{ \sum_i \sum_j \left| f_3(t|\gamma_i) + \frac{2}{\lambda} r(a_i + b_i \cos(\omega t + \varphi_0)) \times \frac{\omega \sin(\omega t + \varphi_0) b_i}{\sqrt{1 - (a_i + b_i \cos(\omega t + \varphi_0))^2}} \right| \right\} \quad (9)$$

在得到 $\hat{\theta}$ 后，根据 $\hat{\theta}$ 缩小进动角取值范围，利用前文所述方法对 (γ_1, γ_2) 进行重新估计，由于此时 θ 更加接近真实值，因此 (γ_1, γ_2) 的估计精度也会提高，然后再利用新的 $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2$ 估计 θ 。循环 2~3 次后，即可得到高精度的 $(\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\theta})$ 。

估计得到 $(\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\theta})$ 后，根据式(10)计算 \hat{r} ，其中 $\text{mean}(\bullet)$ 代表取均值。

$$\hat{r} = \text{mean} \left(\left| f_3(t_{\text{ext}}|\gamma_i) \right| \lambda \sqrt{1 - a_i} / 2\omega a_i b_i \right) \quad (10)$$

同理根据式(11)可得 \hat{H} 为

$$\hat{H} = \text{mean} \left(\left| f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_i) \right| \lambda / 2\omega b_i \right) \quad (11)$$

在上述分析的基础，当采用 3 部雷达组网观测时，设各自得到的瞬时频率分量为 $f(t|\gamma_i)$ ，其中 $f(t|\gamma_i)$ 包含 $f_1(t|\gamma_i)$ 与 $f_3(t|\gamma_i)$ ， $i = 1, 2, 3$ 。从式(4)可以看出， $f_3(t|\gamma_i)$ 与 $f_1(t|\gamma_i)$ 存在固定比值 $R_{\text{at}} = h/(H-h)$ ， R_{at} 仅与目标自身特性有关，与雷达视角无关，故得到不同视角下回波瞬时频率变化分量后，可利用各自锥顶瞬时频率分量乘以相同的比例系数

R_{at} 来补偿 $f(t|\gamma_i)$ 。由于 R_{at} 未知，本文基于视线角方差最小的准则来对其进行搜索。

$$f^n(t|\gamma_i) = f(t|\gamma_i) + f_1(t|\gamma_i)R_x, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

设比例系数为 R_x ，利用式(12)补偿 $f(t|\gamma_i)$ ， $f^n(t|\gamma_i)$ 为补偿后的瞬时频率分量。将 $f^n(t|\gamma_i)$ 两组组合，共可得到 3 种组合，分别为 $\{f^n(t|\gamma_1), f^n(t|\gamma_2)\}$ ， $\{f^n(t|\gamma_1), f^n(t|\gamma_3)\}$ ， $\{f^n(t|\gamma_2), f^n(t|\gamma_3)\}$ 。根据前文所述方法对每种组合中的 γ 角进行估计，则每个 γ 角可得到两个估计值，计为 $\hat{\gamma}_{i1}, \hat{\gamma}_{i2}$ ，定义视线角方差 $\sigma_x = \text{mean}(\text{var}(\hat{\gamma}_{ij}))$ ， $i = 1, 2, 3$ ， $j = 1, 2$ 。当 $R_x = R_{\text{at}}$ 时， $f_h(t|\gamma_i)$ 被完全补偿，不同组合间估计得到的同一雷达视线角 $\hat{\gamma}_{i1}, \hat{\gamma}_{i2}$ 是相同或者十分接近的，因此 σ_x 最小。根据这一性质，令 R_x 在一定范围内变化，通过不同 R_x 值下的 σ_x 来判断补偿效果， σ_x 越小则说明 $f_h(t|\gamma_i)$ 被补偿得越彻底，即 R_x 越接近 R_{at} 。

对于质量分布均匀的锥体来说，其质心位置位于距底面 $H/4$ 处，即 $R_x = 0.333$ ；根据文献[18]，弹头目标的顶部质量密度较小而底部质量密度较大，因此其质心位置更加靠近底面，故限定 R_x 的变化范围为 $[0, 0.333]$ 。在得到使 σ_x 最小的 R_x 后，根据 R_x 对原始频率分量进行补偿，并利用前文方法提取除质心位置 h 外的所有特征，而后 h 可以通过式(13)得到

$$h = \text{mean} \left(\left| f_1(t_{\text{ext}}|\gamma_i) \right| R_x \lambda / 2\omega b_i \right) \quad (13)$$

综上所述，基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取流程如图 2 所示。

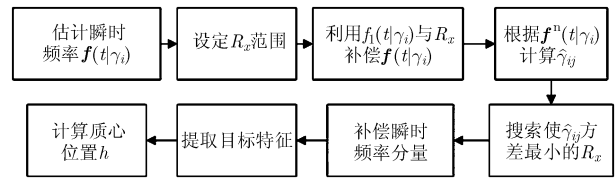


图 2 空间锥体目标特征提取流程

需要说明的一点是，当组网雷达数为 $N(N > 3)$ 时，本文方法同样适用。此时通过两两组合的方式，每个雷达视线角 γ_i ， $i = 1, 2, \dots, N$ 均可得到 $N-1$ 个估计值，利用相同方式计算 $\hat{\gamma}_{ij}$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ ， $j = 1, 2, \dots, N-1$ 的方差 σ_x 并搜索 R_x ，对各视角下瞬时频率分量进行补偿后即可完成目标特征提取。

4 仿真实验

为了验证本文所提方法，利用电磁计算数据生成窄带回波进行仿真实验。目标及雷达参数设置为： $H = 0.97 \text{ m}$ ， $r = 0.25 \text{ m}$ ， $h = 0.15 \text{ m}$ ， $\theta = 7^\circ$ ，雷达 1 视线角 $\gamma_1 = 35^\circ$ ，雷达 2 视线角 $\gamma_2 = 45^\circ$ ，雷达

3 视线角 $\gamma_3 = 55^\circ$ ，目标锥旋频率为 1.4 Hz，雷达重复频率为 300 Hz，积累时间 2 s，信噪比设定为 15 dB。信噪比的定义为

$$R_{SN} = 10 \times \lg\left(\frac{\bar{P}_s}{P_{\text{Noise}}}\right) \quad (14)$$

其中： \bar{P}_s 为信号平均功率， P_{Noise} 为噪声功率。图 3 为提取出的相应的瞬时频率变化。

两两组合提取得到的瞬时频率分量，利用自相关法对锥旋频率进行估计，不同组合得到的锥旋频率估计值均为 $\hat{\omega} = 1.4044$ Hz。此时虽然 $f_h(t)$ 未被补偿，本文仍然直接利用补偿后的算法计算每种组合中的雷达视线角。将进动角 θ 从 5° 变化到 15° ，图 4(a)~图 4(c)显示了当 $f_h(t)$ 未被补偿时各组合雷达视线角随 θ 的变化。

经过两次循环迭代后得到的各组合最终雷达视线角估计值如表 1 所示。

从图 4(a)~图 4(c)中估计结果可以看出，当 $f_h(t)$ 未被补偿时，由于模型失配，不仅不同组合间对应视线角的估计值出现较大差别，组合内的两个

雷达视线角的估计值随进动角变化也较为剧烈，方差较大，图 4(a)中当进动角取值为 $13^\circ \sim 15^\circ$ 时，雷达视线角估计值出现复数，因此图 4(a)中未画出 $13^\circ \sim 15^\circ$ 时的估计值；同时表 1 中的最终估计结果显示，当瞬时频率变化含有 $f_h(t)$ 时，最终对应视线角估计值间差别较大，且与真值相差较远。这说明了雷达视线角估计方差可以作为判断补偿及估计结果好坏的依据。

利用式(12)对得到的回波瞬时频率进行补偿， R_x 取值范围为 $[0, 0.3333]$ ，取值步长设定为 0.0033，利用补偿后的回波瞬时频率分量组合对雷达视线角进行估计，并计算雷达视线角方差 σ_x ，得到 σ_x 随 R_x 变化如图 5 所示。

图 5 中当 $R_x = 0.1798$ 时， σ_x 达到最小值，根据参数设置， $R_{\text{at}} = 0.1829$ ，可以看出得到的 R_x 与真实值十分接近，利用 R_x 补偿所得各视角下目标瞬时频率变化，计算每种组合中的雷达视线角，图 6 显示了雷达视线角随 θ 的变化。

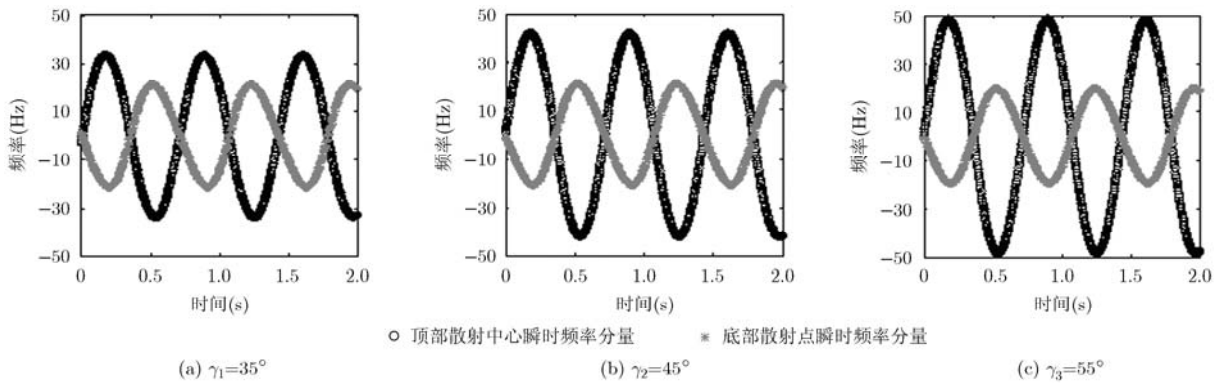


图 3 不同视角下回波瞬时频率分量

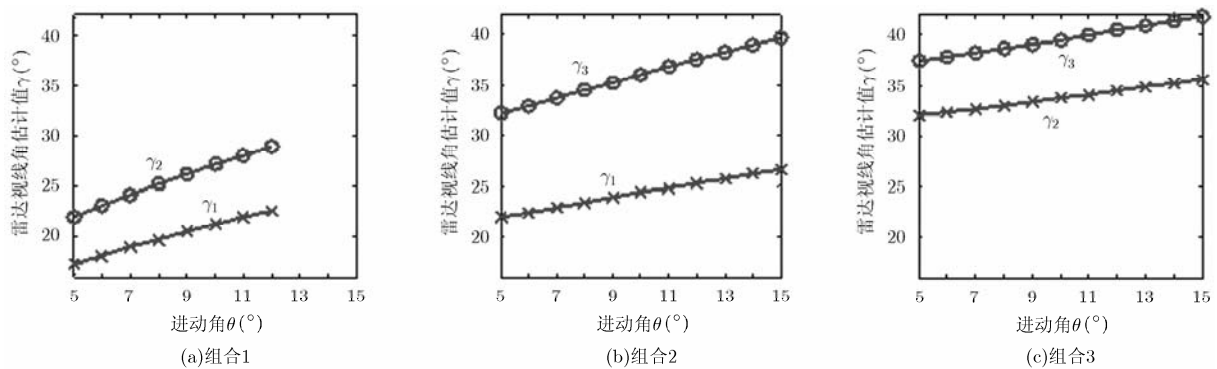


图 4 未被补偿时不同组合雷达视线角估计值随进动角变化

表 1 各组合雷达视线角最终估计值

	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2 \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_3 \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3 \rangle$
估计值	$\langle 17.2530^\circ, 21.9854^\circ \rangle$	$\langle 21.8997^\circ, 32.1864^\circ \rangle$	$\langle 32.0809^\circ, 37.5007^\circ \rangle$

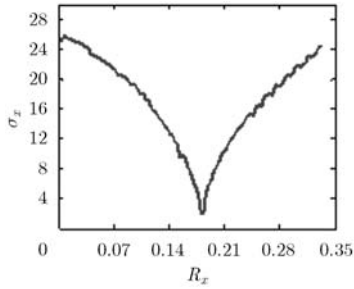


图 5 σ_x 随 R_x 的变化

图 6 与图 4 对比显示, 利用补偿后的瞬时频率变化估计得到的雷达视线角随进动角变化较小且均在真值附近, 对图 6 中雷达视线估计结果取均值,

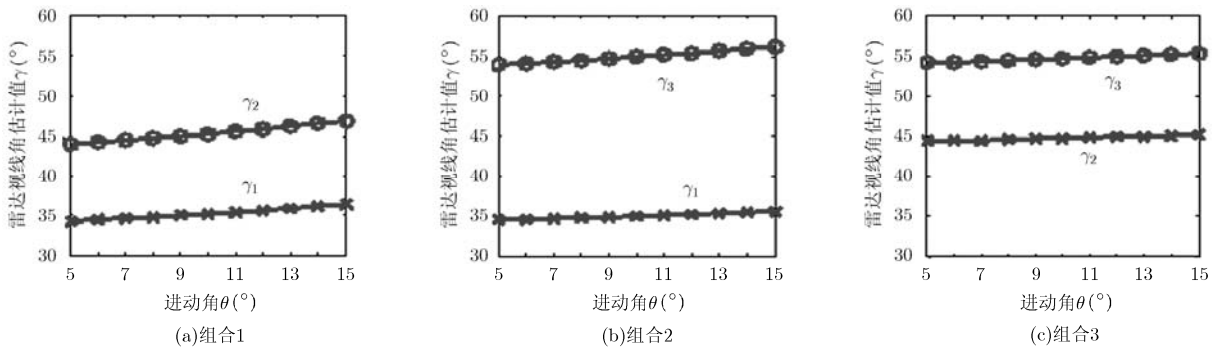


图 6 补偿后雷达视线角估计值随进动角变化

得到每种组合下雷达视线角粗估计值如表 2, 可以看出其与真值差距并不大。

在得到上述粗估计值后, 利用式(9)对 θ 角进行估计, 其中设定底面半径搜索范围为 $[0.1 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$, 搜索间隔为 0.02 m , 进动角的初次搜索范围为 $[5^\circ, 15^\circ]$, 搜索间隔为 0.02° , 根据参数误差分布得到各组合下进动角的估计值分别为: $\hat{\theta}_1 = 6.86^\circ$, $\hat{\theta}_2 = 6.84^\circ$, $\hat{\theta}_3 = 6.84^\circ$, 根据估计得到的 $\hat{\theta}_i$, 减小进动角的取值范围并重新对雷达视线角进行估计, 经过两次循环迭代后, 最终的雷达视线角与进动角的估计值如表 3 所示。

根据最终的雷达视线角与进动角, 利用式(10),

表 2 各组合雷达视线角粗估计值

	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2 \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_3 \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3 \rangle$
粗估计值	$\langle 35.9637^\circ, 45.8500^\circ \rangle$	$\langle 35.7362^\circ, 56.1581^\circ \rangle$	$\langle 45.9749^\circ, 55.8071^\circ \rangle$

表 3 两次循环迭代后的估计结果

	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\theta} \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_3, \hat{\theta} \rangle$	$\langle \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3, \hat{\theta} \rangle$
估计值	$\langle 34.5517^\circ, 44.5315^\circ, 6.92^\circ \rangle$	$\langle 34.6458^\circ, 54.4823^\circ, 6.94^\circ \rangle$	$\langle 44.5647^\circ, 54.4807^\circ, 6.92^\circ \rangle$

式(11)和式(13)计算目标底面半径 r , 高度 H 及质心位置 h , 最终得到的提取结果如表 4 所示。

表 4 各组合特征提取结果(m)

	组合 1	组合 2	组合 3	平均结果
H	0.9797	0.9878	0.9907	0.9848
r	0.2587	0.2688	0.2595	0.2588
h	0.1462	0.1475	0.1473	0.1470

为了检验算法的抗噪性能, 按式(14)中定义往数据中加入噪声, 使回波信噪比由 5 dB 变化到 25 dB , 不同信噪比均进行 10 次实验, 所得目标参数平均估计精度随信噪比变化情况如图 7, 其中估计

精度定义为: 估计精度 = $1 - (|\text{真实值} - \text{估计值}|) / \text{真实值}$ 。

图 7 显示了本文算法在估计精度在 10 dB 到 15 dB 时增加较快, 而在 15 dB 后基本保持不变, 这主要是由于 15 dB 以上时频图受噪声影响较小, 信噪比上升带来的微多普勒提取精度变化不大, 因此算法的估计精度增加也不明显。而当信噪比低于 10 dB 时, 由于锥底对应极值点的估计误差增大, 因此参数估计误差也相应增大。同时也可以看出, 在 10 dB 时算法平均估计精度已经超过 85% , 这说明本文算法具有一定的抗噪性能。

接下来对雷达视线角分布间隔对特征提取精度的影响进行讨论。固定雷达 2 的视线角 γ_2 为 45° ,

变化 γ_1 与 γ_3 使它们向 γ_2 靠近，每次变化步长均为 1° ，用雷达视线角平均间隔衡量其接近程度，其余参数保持不变，图 8 给出目标特征平均提取精度随间隔变化。

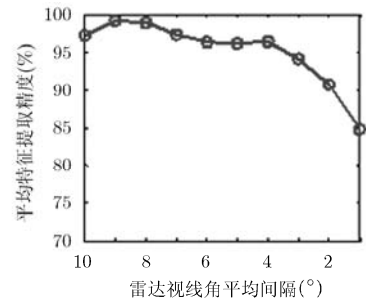
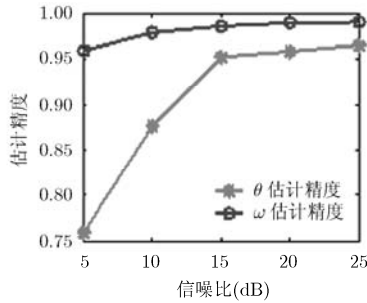
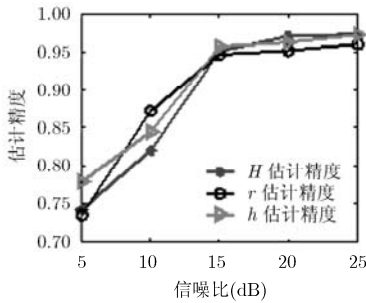
图 8 结果显示，当 3 部雷达视线角分布间隔大于 4° 时，平均特征提取精度变化不大，而当视线角分布间隔进一步减小时，目标特征提取精度有所下降，而这主要是受到了瞬时频率估计精度的限制。同时也可以看出，当雷达视线角间隔大于 3° 时，利用本方法即可获得高于 94% 的特征提取精度，实际应用中可以参考此对雷达布站问题进行研究。

最后本文给出对不同参数目标进行特征提取的结果，由于电磁计算数据所用目标高度与底面半径固定，因此主要给出不同进动角及质心位置下特征提取结果。其中进动角变化范围为 $[5^\circ, 15^\circ]$ ，变化步长为 2° ，质心位置变化范围为 $[0.05 \text{ m}, 0.20 \text{ m}]$ ，变

化步长为 0.03 m ，其余参数设置与前文相同，信噪比设定为 15 dB 。图 9 给出了目标特征提取精度分布。从图中可以看出不同的参数组合下均获得了较高的特征提取精度，验证了本文方法的具有较好的适用范围。

5 结束语

为了进一步挖掘窄带雷达在空间锥体目标识别中的潜力，本文提出一种基于窄带雷达组网的锥体目标进动与尺寸特征提取方法。首先利用频谱熵的概念完成了多视角下锥顶与锥底瞬时频率分量的匹配，随后根据锥顶与锥底瞬时频率变化性质对提出了目标进动与尺寸特征联合提取的新方法。仿真实验显示本算法在一定信噪比条件下具有较高的特征提取精度。

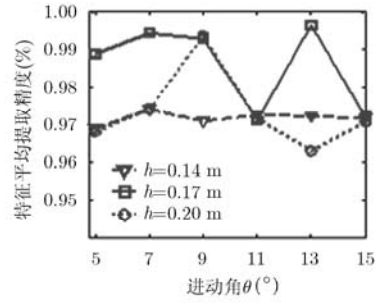
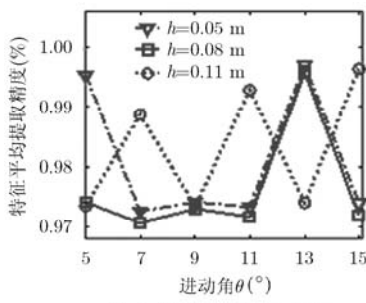


(a)尺寸参数估计精度

(b)微动参数估计精度

图 7 目标参数估计精度

图 8 平均提取精度随视线角间隔变化



(a) $h=0.05 \text{ m}, 0.08 \text{ m}, 0.11 \text{ m}$

(b) $h=0.14 \text{ m}, 0.17 \text{ m}, 0.20 \text{ m}$

图 9 特征提取精度图

参考文献

[1] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3): 291-300.

[2] 关永胜, 左群声, 刘宏伟. 基于微多普勒特征的空间锥体目标识别[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(2): 209-215.

Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, and Liu Hong-wei. Micro-Doppler signature based cone-shaped target recognition[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(2): 209-215.

[3] 王璐, 刘宏伟. 基于时频图的微动目标运动参数提取和特征识别的方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(8): 1812-1817.

Wang Lu and Liu Hong-wei. Method for micro-motion target recognition and motion parameter extraction based on time-frequency analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1812-1817.

[4] 罗迎, 张群, 王国正, 等. 基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取方法[J]. *雷达学报*, 2012, 1(4): 361-369.

Luo Ying, Zhang Qun, Wang Guo-zheng, et al.. Micro-moti

- on signature extraction method for wideband radar based on complex image OMP decomposition[J]. *Journal of Radar*, 2012, 1(4): 361-369.
- [5] Chen V C, Li Fa-yin, Ho Shen-shyang, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [6] Peng Lei, Sun Jin-ping, Wang Jun, *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.
- [7] 姚汉英, 孙文峰, 马晓岩. 基于高分辨距离像序列的锥柱体目标进动和结构参数估计[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(3): 537-544.
- Yao Han-ying, Sun Wen-feng, and Ma Xiao-yan. Precession and structure parameters estimation of cone-cylinder target based on the HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 537-544.
- [8] 朱玉鹏, 王宏强, 黎湘, 等. 基于一维距离像序列的空间弹道目标微动特征提取[J]. *宇航学报*, 2009, 30(3): 1133-1140.
- Zhu Yu-peng, Wang Hong-qiang, Li Xiang, *et al.* Micro-motion feature extraction of spatial ballistic target based on HRRP dynamic sequence[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1133-1140.
- [9] 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): 1027-1034.
- He Si-san, Zhao Hui-ning, and Feng Cun-qian. Precession parameter estimation for ballistic targets based on multi-aspect range-profile sequence[J]. *Signal Processing*, 2013, 29(8): 1027-1034.
- [10] 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): 1079-1085.
- 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): 1079-1085.
- [11] 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.
- [12] Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, *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.
- [13] 牛杰, 刘永祥, 秦玉亮. 一种基于经验模态分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法[J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1712-1715.
- Niu Jie, Liu Yong-xiang, and Qin Yu-liang. A new method of radar Micro-motion feature extraction of cone target based on Empirical Mode Decomposition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1712-1715.
- [14] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 86-92.
- Huang Pei-kang, Yin Hong-cheng, and Xu Xiao-jian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 86-92.
- [15] 李飞, 纠博, 邵长宇, 等. 目标微动参数的曲线跟踪算法[J]. *电波科学学报*, 2012, 28(2): 278-284.
- Li Fei, Jiu Bo, Shao Chang-yu, *et al.* Curve tracking based parameter estimation of micro-motion[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 28(2): 278-284.
- [16] 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 Xiao-hai, Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, *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.
- [17] 刘维建, 陈建文. 弹道类目标进动周期特征提取方法研究[J]. *现代雷达*, 2009, 31(7): 62-68.
- Liu Wei-jian and Chen Jian-wen. A study on precession period extraction method of ballistic target[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(7): 62-68.
- [18] 马梁. 弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D]. [博士学位文], 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- Ma Liang. The micro-motion characteristic and combining classification of ballistic target[D]. [Ph.D. dissertation], Changsha: The National University of Defense Technology, 2011.
- 韩 勋: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别、空间目标参数估计.
- 杜 兰: 女, 1980年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为统计信号处理、雷达信号处理、机器学习及其在雷达目标检测与识别方面的应用.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、MIMO雷达、雷达目标识别.