

基于窄带高分辨特征的锥体目标参数估计<sup>\*</sup>

韩 勋 郑 佳 冯 鑫 匡 银 文 伟

(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

**摘要:** 利用参数特征对空间进动锥体进行识别可有效区分真假目标。为获取准确的参数特征,现阶段研究一般围绕宽带雷达所输出的目标高分辨距离像序列开展,但也存在着对雷达带宽要求高、不利用实际工程应用的局限。针对这一问题,提出了一种基于窄带雷达提取目标高分辨特征并完成参数估计的方法。首先建立了目标运动模型,对窄带观测下目标回波调制特性进行分析;在此基础上定义目标伪距离像序列,并利用目标回波中所包含散射中心微多普勒频率与相位信息变化完成了伪距离像序列的提取,根据不同视角观测到的伪距离像序列差异对锥体高度、底面半径及质心位置等目标参数进行估计,并设计了二级剔除结构选出了正确的估计结果;最后开展了基于电磁计算数据的仿真实验。实验结果表明该算法在高信噪比条件下估计精度优于97%,相比传统方法提高超过5%,且在5 dB的信噪比条件下平均参数估计精度仍然优于80%,应用门限较传统算法提高9 dB,说明了所提算法的有效性和稳健性。

**关键词:** 微多普勒;窄带雷达;锥体目标;高分辨特征;参数估计。

**中图分类号:** TN957.52      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Cone-shaped target parameter estimation based on narrow-band  
high resolution feature

Han Xun Zheng Jia Feng Xin Kuang Yin Wen Wei

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The recognition of space precession cone by using parameter characteristics can effectively distinguish true and decoy targets. In order to obtain accurate parameter characteristics, the current research generally focuses on the high resolution range profile sequences of the target output by wideband radar, but there are also limitations of high radar bandwidth requirements and no practical engineering applications. To solve this problem, a method based on narrow band radar is proposed to extract high resolution features and complete parameter estimation. Firstly, a target motion model is established to analyze the modulation characteristics of target echo in narrow band observation, and the pseudo-range resolution profile is defined and extracted using the scattering centers' micro-Doppler and phase information, then the micro-motion and structure parameters are estimated using the pseudo-range resolution profile, and the correct estimation result is selected by a two-level pick-out structure. Finally, a simulation experiment based on electromagnetic calculation data is carried out. The implementation results show that the estimation accuracy of the proposed algorithm is better than 97% under the condition of high signal-to-noise ratio, which is 5% higher than that of the traditional method, and the average parameter estimation accuracy is still better than 80% under the condition of 5 dB signal-to-noise ratio, and the application threshold is 9 dB higher than that of the traditional algorithm, indicating the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

**Keywords:** micro-Doppler; narrow-band radar; cone-shaped target; high resolution feature; parameter estimation

## 0 引 言

弹道导弹具有威力大,精度高,射程远等特点,是发达国家进行战略威慑的“撒手锏”武器,因此发展导弹防御系

统对确保我国战略安全具有重要意义。近年来,真假弹头目标识别作为防御系统的核心技术之一受到了广泛的关注,多特征综合提取利用已经成为该技术的发展趋势。进动特征便是常用的关键特征之一,它属于微动的一种<sup>[1]</sup>,具

体表现为弹头在释放后,为保证自身飞行和再入的稳定,会绕空间定向轴进行旋转。进动会对雷达回波产生特殊形式的调制<sup>[2-3]</sup>,可反应出多种目标参数如尺寸大小,质量分布等,而真假目标这类参数分布往往具有较大差异,因此基于进动特征的目标参数估计得到了越来越多的研究<sup>[4]</sup>。

文献[5]及文献[6]针对弹头和诱饵目标的不同特性,建立了散射中心模型,并推导和分析了两类目标在进动情况下的微动特征理论差异。上述研究为基于进动特征的参数估计奠定了基础,而目前研究工作也多围绕此展开,取得了一定的成果:文献[7]针对进动目标在多种姿态下的一维距离像变化,通过建立理论观测模型,基于最大似然的方式实现了目标尺寸的估计;文献[8]利用弹头目标在宽带高分辨雷达观测下散射中心所产生径向距离变化,提取不同散射中心的分布,进而获取目标的各项微动参数;文献[9]基于多站雷达对光滑对称锥体距离像序列进行自适应融合,联合解得了目标进动和结构参数;文献[10]和文献[11]同样利用了多视角观测条件下的一维距离像序列提取了进动目标的进动角和真实长度特征等。从这些文献可以看出,现阶段工作一般基于高分辨雷达所获取进动目标距离像序列的变化完成参数估计,在获取较高估计精度的同时也存在如下问题:首先,为获得较为精确的散射中心距离像序列变化,所需雷达信号带宽较宽,前述工作多假设雷达带宽为 2~4 GHz,这在现阶段工程实现难度较高,且雷达带宽的增加也使得系统对目标检测的难度增大,不利于对高速弹道目标的跟踪和捕获,缩短了系统的有效探测距离和反应时间,这些问题限制了上述方法在实际中的应用范围。而现阶段窄带雷达的应用还比较广泛,且宽带雷达也多需要发射窄带信号进行搜索和引导跟踪,因此研究窄带雷达观测下的特征提取方法是十分必要的。目前对于窄带信号来说,进动所引发的调制表现为散射中心的微多普勒频率变化,若能从中提取出对应于宽带回波中所包含的微距调制变化序列,则可以增加上述识别算法的应用范围,提升系统反应时间。但现阶段基于窄带观测的研究工作主要围绕于对目标平动的补偿或多普勒频率的开展<sup>[12-13]</sup>,部分基于多普勒频率的参数估计工作也存在估计精度受限,体制上无法与现有研究体系相融合的缺陷<sup>[14-15]</sup>。综合上述考虑,本文提出一种窄带雷达观测下的目标高分辨特征提取方法,定义了伪距离像变化序列这一窄带高分辨特征,并利用散射中心多普勒频率获取目标伪距离像变化序列,在此基础上完成了目标结构和微动参数的高精度估计。

本文首先对目标散射中心的进动特性进行了推导和验证,并提出了散射中心微多普勒频率,根据频率提取结果对各散射中心实时相位进行估计,结合相驱测距技术获取了目标散射中心伪距离像序列变化;随后在前述研究工作的基础上提出了基于伪距离像序列的高分辨特征提取算法,完成了目标关键参数的估计;最后采用电磁计算数据进行了仿真实验,实验结果表明所提方法可对目标尺寸及结构

特征进行高精度的估计。

## 1 进动目标散射中心微多普勒分析

以图 1 所示的钝头圆底锥作为研究对象,目标高度为  $H$ , 底面半径为  $r$ , 目标质心  $o$  位于中轴线上,距底面中心距离为  $h$ ,  $\alpha$  为半锥角,雷达来波方向与目标中轴夹角为  $\beta$ 。当被雷达照射时,目标表面上存在 3 个散射中心  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , 其中  $P_1$  位于头部球冠处,根据入射角  $\beta$  的不同在球冠处作小范围滑动,  $P_2$  和  $P_3$  分别为雷达射线和目标中轴组成的平面与底面圆周的交点。

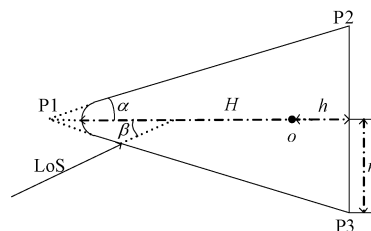


图 1 锥体目标示意图

Fig. 1 Cone-shaped target

图 2 为目标进动示意,其中  $oz$  为目标自身对称轴,  $oC$  为空间进动轴,进动即目标在绕  $oz$  自旋的同时还在绕  $oC$  作锥旋,锥旋中心点为目标质心位置,两轴之间的夹角为进动角  $\theta$ 。由于目标旋转对称,仅分析锥旋引发的微多普勒频率变化。设锥旋频率为  $\omega$ , 雷达视线与  $oC$  的夹角为  $\gamma$ , 目标一般距离雷达较远,该角度在短时间内可认为是常数,进动导致的  $\beta(t)$  变化如式(1),由于目标自身的遮挡效应,当  $\beta(t)$  处在  $[\alpha, \pi/2]$  之间时,散射中心  $P_2$  将被遮挡。对于防御方来说,对目标的观测一般都是迎头照射,大部分情况下  $P_2$  被遮挡不可见,因此主要分析这种情况下的特征提取问题。

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

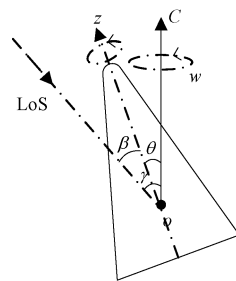


图 2 目标进动示意图

Fig. 2 Diagram of a precession cone-shaped target

设雷达距目标的初始距离为  $R_0$ , 不考虑平动带来的影响,将目标散射中心往雷达视线方向上投影,可得进动情况下  $P_1$  与  $P_3$  往雷达视线方向上投影距离的变化:

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

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

假设窄带雷达载频为  $f$ , 对应波长为  $\lambda$ , 根据公式

$f(t) = (2dr(t)/dt)/\lambda$ , 对上式求导可得散射中心 P1 和 P3 的微多普勒频率变化  $f_1(t)$  和  $f_3(t)$ , 其中  $a = \cos\gamma\cos\theta$ ,  $b = \sin\gamma\sin\theta$ 。

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

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

散射中心瞬时频率及投影距离变化包含特征有目标高度  $H$ , 底面半径  $r$ , 质心位置  $h$ , 进动角  $\theta$ , 进动频率  $\omega$  等。现阶段研究多基于宽带雷达所获取投影距离变化来完成上述特征的提取, 接下来本文将提出一种仅有窄带雷达观测的情况下获取目标高分辨特征, 在此基础上完成参数估计的方法。

## 2 目标高分辨特征提取方法

### 2.1 基于距离像序列的目标微动特征提取算法

当目标进动时, 雷达视线与目标中轴夹角在  $[\gamma - \theta, \gamma + \theta]$  之间变动, 当处于最大值  $\gamma + \theta$  时, 两个散射中心在 RLOS 上的投影距离差最小, 记为  $l_{\min}$ , 反之则投影距离差为最大, 记为  $l_{\max}$ , 根据式(2)和(3)可得下式, 其中  $l = \sqrt{H^2 + r^2}$ , 代表锥体母线长度:

$$l_{\max} = l\cos(\gamma - \theta + \alpha) \quad (6)$$

$$l_{\min} = l\cos(\gamma + \theta + \alpha) \quad (7)$$

当存在两个不同的 RLOS 俯仰角  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  时, 由式(6)和(7)可以得到两组最大、最小值, 分别记为  $l_{\max1}$  和  $l_{\min1}$ ,  $l_{\max2}$  和  $l_{\min2}$ , 利用两组最大、最小值建立如下方程组即可完成对进动角  $\theta$  和母线长度  $l$  的估计:

$$\begin{cases} l_{\max1} + l_{\min1} = a_{11} \\ l_{\max1} - l_{\min1} = a_{12} \\ l_{\max2} + l_{\min2} = a_{21} \\ l_{\max2} - l_{\min2} = a_{22} \\ \theta = \arctan(\sqrt{a_{22}^2 - a_{11}^2/a_{12}^2 - a_{21}^2}) \end{cases} \quad (8)$$

根据尺寸关系可进一步获取锥体高度, 底面半径, 质心位置等感兴趣参数。

### 2.2 窄带观测下伪距离像序列获取

当雷达仅发射窄带信号时, 受分辨率影响无法获取距离像序列, 但从本质而言, 窄带回波中的相位以及多普勒变化也包含了目标的距离信息, 且根据信号估计理论, 基于相位信息的距离估计理论精度一般高于回波延时所得距离估计精度, 限制其应用的主要因素在于相位以  $2\pi$  为周期发生模糊, 解模糊较为困难。然而在本文应用场景下, 结合所提取散射中心多普勒频率变化, 可完成部分相位解模糊, 进而获得伪距离像序列, 接下来对其进行分析。

忽略目标的脉内运动, 单次窄带雷达回波可以表示为:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n a\left(t - \frac{2R_n(t)}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2R_n(t)}{c}\right) \quad (9)$$

其中,  $N$  是目标散射中心个数,  $A_n$  是第  $n$  个散射中心的回波幅度,  $R_n(t)$  是散射中心径向距离变化,  $c$  是光速,  $f_c$  是雷达载频,  $a(t)$  是雷达发射波形经脉压后的包络。由式(9)可知, 目标回波的包络延时和相位中都包含了目标的径向距离信息, 忽略包络延时所带来的影响, 可得回波相位变化  $\varphi_i(t) = 4\pi R_n(t)/\lambda$ , 考虑模糊效应, 实际所测得相位变化  $\hat{\varphi}_i(t)$  为:

$$\hat{\varphi}_i(t) = b \bmod(-4\pi R_n(t)/\lambda, 2\pi) \quad (10)$$

将式(4)代入式(10), 可以将模糊相位分为两部分, 第 1 部分为距离  $R_n(0)$  所引发的初始相位模糊, 第 2 部分为进动  $r_n(t)$  引发的变化相位模糊, 实测相位是两者共同作用的结果。以散射中心 P1 为例, 给出组成相位模糊的两部分示意如图 3 所示, 其中初始距离设置为 1 500 km。

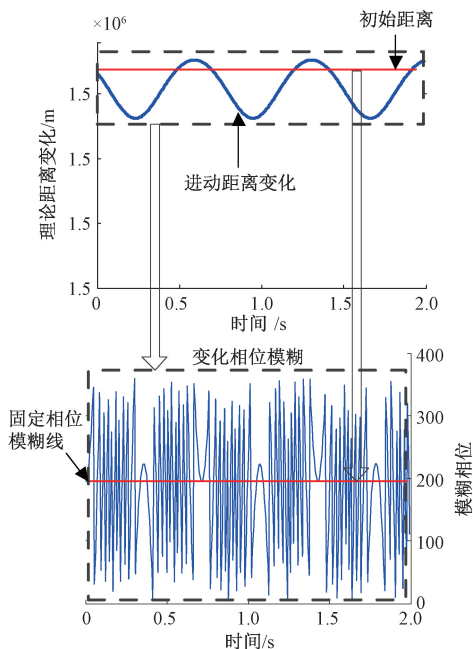


图 3 相位模糊示意

Fig. 3 Diagram of phase ambiguity

从结果可以看出, 在没有第三方信息的情况下, 无法消除由初始距离引发的固定相位模糊, 但结合所获取多普勒频率可对变化相位模糊进行求解, 从而得出进动引发的距离变化。将相位与频率关系式  $f(t) = \dot{\varphi}(t)/2\pi$  离散化可得:

$$\frac{\hat{\varphi}_n(m) + k \cdot 2\pi - \varphi_n(m-1)}{T} = \frac{f_n(m) + f_n(m-1)}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (11)$$

式中:  $\varphi_n(m-1)$  为  $m-1$  时刻已被正确解模糊的相位值,

$\hat{\varphi}_n(m)$  为  $m$  时刻模糊相位,  $k$  为待求模糊数,  $T$  为采样间隔,  $f_n(m)$  为  $m$  时刻频率估计值, 根据上式计算出  $k$  后即可完成模糊相位的求解。假设  $\varphi_n(0)$  仅存在初始模糊, 则根据式(11)可计算出  $1 \sim N$  时刻对应的无模糊变化相位值, 结合  $\varphi_n(t) = 4\pi R_n(t)/\lambda$  即完成  $R_n(t)$  的计算, 但此时的  $R_n(t)$  中不包括初始距离, 因此将其表述为伪距离像序列, 记作  $\hat{R}_n(t)$  以示区别。为保证后续对比实验的一致性, 本文选择文献[16]中的 APES 算法完成各散射中心的原始相位提取。

基于上述分析, 伪距离像序列获取的原理如图 4 所示。

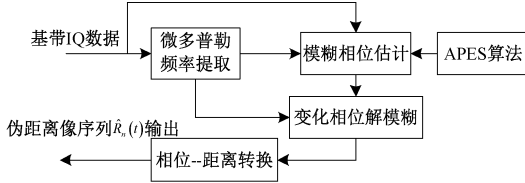


图 4 伪距离像序列获取原理

Fig. 4 Diagram of purchasing pseudo-range profile sequences

### 2.3 基于伪距离像序列的参数提取

完成伪距离像序列的获取后, 无法直接使用 2.1 节所述算法对参数进行提取。主要原因在于不同散射中心的初始距离不同, 但在 2.2 节的求解过程中均将由初始距离引发的相位变化折叠到  $[0, 2\pi]$  内, 因此相比真实距离像序列差  $[l_{\min}, l_{\max}]$ , 此时获取的序列差  $[\hat{l}_{\min}, \hat{l}_{\max}]$  存在偏差, 如图 5(a)、(b) 所示。

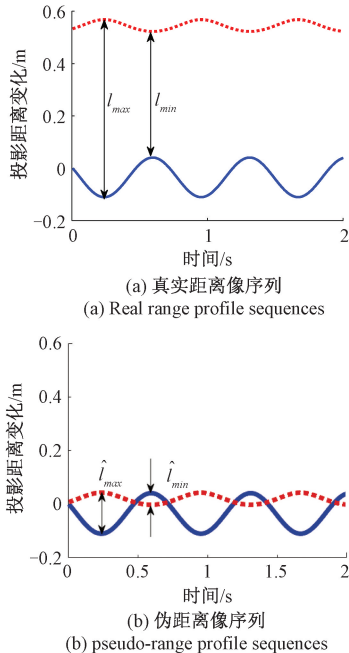


图 5 真实距离像序列与伪距离像序列

Fig. 5 Real range profile and pseudo-range profile sequences

根据前文分析可得式(12):

$$\begin{cases} l_{\max} = R_2(0) + r_2(t_{\max}) - R_1(0) - r_1(t_{\max}) \\ l_{\min} = R_2(0) + r_2(t_{\min}) - R_1(0) - r_1(t_{\min}) \\ \hat{l}_{\max} = R_2(0) + 2k_2\lambda - r_2(t_{\max}) - (R_1(0) + 2k_1\lambda) - r_1(t_{\max}) \\ \hat{l}_{\min} = R_2(0) + 2k_2\lambda + r_2(t_{\min}) - (R_1(0) + 2k_1\lambda) - r_1(t_{\min}) \end{cases} \quad (12)$$

因此可得  $l_{\max} - \hat{l}_{\max} = l_{\min} - \hat{l}_{\min} = 2(k_1 - k_2)\lambda = N\lambda$ , 该式中:  $k_1, k_2 \in \{0, -1, -2, -3, \dots\}$ , 即两者之间的差为雷达发射波长的整数倍, 其中整数  $N$  的大小等于两个由散射中心初始距离差引发的相位模糊度。可见利用伪距离像序列差进行参数估计的关键在于模糊数  $N$  的求解。

考虑现有主流弹头尺寸信息, 结合文献[16]对典型弹道过程中雷达视线与弹轴夹角变化仿真结果可得, 中段飞行过程中两散射中心往雷达视线上投影距离一般不超过 0.75 m。假设雷达载频为 10 GHz, 则最大模糊数  $N_{\max}$  不大于 50, 而最小模糊数  $N_{\min}$  对应于雷达视线垂直于锥体母线, 为 0。当采用两个位于不同视角的雷达进行联合观测时, 将其各自模糊数从  $N_{\min}$  变化到  $N_{\max}$ , 则根据 3.1 节所述可获取图 6 所示参数估计矩阵  $P$ :

		视角2			
视角1		0	1	...	$N_{\max}$
	0	$\{\hat{\theta}_{00}, \hat{l}_{00}, \hat{r}_{00}, \dots\}$	$\{\hat{\theta}_{01}, \hat{l}_{01}, \hat{r}_{01}, \dots\}$	...	$\{\hat{\theta}_{0N}, \hat{l}_{0N}, \hat{r}_{0N}, \dots\}$
	1	$\{\hat{\theta}_{10}, \hat{l}_{10}, \hat{r}_{10}, \dots\}$	$\{\hat{\theta}_{11}, \hat{l}_{11}, \hat{r}_{11}, \dots\}$	...	$\{\hat{\theta}_{1N}, \hat{l}_{1N}, \hat{r}_{1N}, \dots\}$
	2	$\{\hat{\theta}_{20}, \hat{l}_{20}, \hat{r}_{20}, \dots\}$	$\{\hat{\theta}_{21}, \hat{l}_{21}, \hat{r}_{21}, \dots\}$	...	$\{\hat{\theta}_{2N}, \hat{l}_{2N}, \hat{r}_{2N}, \dots\}$
	...	...	...	...	...
	$N_{\max}$	$\{\hat{\theta}_{N0}, \hat{l}_{N0}, \hat{r}_{N0}, \dots\}$	$\{\hat{\theta}_{N1}, \hat{l}_{N1}, \hat{r}_{N1}, \dots\}$	...	$\{\hat{\theta}_{NN}, \hat{l}_{NN}, \hat{r}_{NN}, \dots\}$

图 6 参数估计矩阵  $P$

Fig. 6 Parameter estimation matrix  $P$

参数估计矩阵  $P$  中行代表视角 1, 列代表视角 2, 元素  $P_{ij}$  的意义在于将视角 1 下所获取伪距离像序列按第  $i$  个模糊数进行解模糊, 将视角 2 下所获取伪距离像序列按第  $j$  个模糊数进行解模糊后, 按 3.1 节中方法所得参数估计结果。需要注意的一点是, 由于不同视角下的模糊数存在固定的大小关系, 因此矩阵  $P$  的上三角(视角 2 < 视角 1)或下三角(视角 1 < 视角 2)的元素实际中并不存在。模糊数的大小关系可以通过锥顶散射中心的多普勒频率幅度来判定, 根据式(2), 多普勒频率变化幅度大的对应视角较大, 模糊数较小。

在剔除上三角元素或下三角元素后, 仍然存在  $N_{\max}(N_{\max} - 1)/2$  个待选择的参数估计结果, 假设为  $P_{ij}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N_{\max}, j = i + 1, i + 2, \dots, N_{\max}$ 。从估计结果集中选择正确估计结果可以采用如下二级剔除的方式:

1) 一级剔除: 剔除不符合物理规律的参数估计结果。由于模糊数为任意设定, 因此可能存在明显不符合物理规律的估计结果, 如进动角大于  $15^\circ$ , 目标高度小于底面半径甚至某参数为负的情况, 这些估计结果应首先被剔除;



2) 二级剔除: 利用各参数估计结果生成理论多普勒频率, 评估与所提取多普勒频率的吻合度。2.1 节中的估计方法一般只利用了距离像序列中特定的特征点, 如变化的最大值点, 最小值点, 过零点等。这就导致了当模糊数错误时, 根据估计结果反演的理论多普勒频率在特征点以外的时刻吻合度较差, 而正确的模糊数对应的估计结果在整个观测周期内吻合度均较好。因此可利用下式挑选出最符合实际多普勒频率的估计结果, 其中  $\hat{f}_n$  为利用参数估计结果所生成的频率估计值,  $m$  为采样时刻,  $f_n(m)$  为  $m$  时刻频率估计值。

$$\operatorname{argmin}_{i,j} \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} |\hat{f}_n(m | P_{ij}) - f_n(m)| \quad (13)$$

实际使用中, 可能存在结果全部被一级剔除或二级剔除中发现所有估计结果的吻合度均较差, 该类情况一般为模糊度设定不合理所导致, 应重新对模糊度进行设定, 在新模糊度区间内执行上述算法。

综上所述, 基于伪距离像序列的参数估计算法流程如图 7 所示。

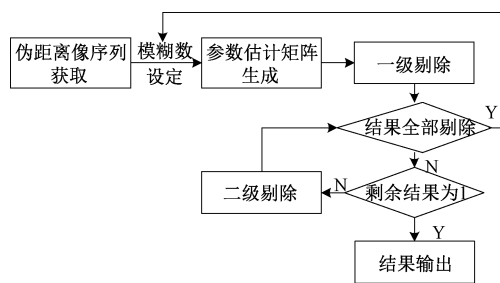


图 7 参数估计流程

Fig. 7 Diagram of parameter estimation

### 3 仿真实验

为了验证所提算法的有效性, 基于电磁计算数据构建仿真验证系统进行性能评估, 系统由计算数据库, 目标运动场景模拟及参数估计模块 3 个部分组成, 如图 8 所示。

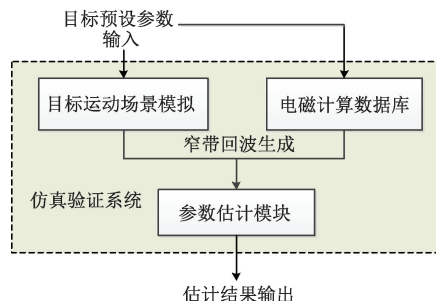


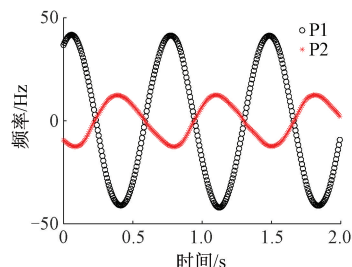
图 8 验证系统组成

Fig. 8 Components of the system

系统工作时, 首先根据预设目标及雷达参数, 通过电磁计算获取锥体目标全入射角度的目标理论回波, 电磁计算采用 MoM 法; 随后结合运动场景模拟出的目标角度从库

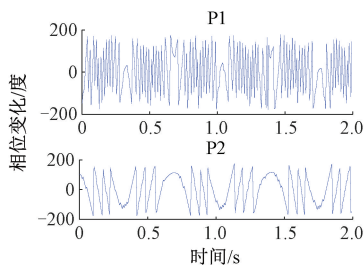
中提取相应窄带回波序列, 进行预处理如脉压、人工加噪后送入参数估计模块; 参数估计模块即本文算法的软件实现, 开发软件平台为 MATLAB R2021a, 硬件运行平台 CPU 配置为 I7-4790K, 32 GB 内存; 最终由参数估计模块输出估计结果, 并与预设结果进行对比完成性能的评估。

首先对伪距离像序列提取结果进行仿真。目标及雷达参数设置与第 2 节中相同:  $H = 0.97 \text{ m}$ ,  $r = 0.25 \text{ m}$ ,  $h = 0.15 \text{ m}$ ,  $\theta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ , 锥旋频率 1.4 Hz, 雷达重复频率为 300 Hz, 信号带宽为 5 MHz, 积累时间 2 s, 信噪比设定为 15 dB。对散射中心频率进行提取, 并结合文献[16]中 APES 算法估计两散射中心对应的相位变化, 所得结果如图 9 所示。



(a) 瞬时频率提取结果

(a) Results of instantaneous frequency extraction



(b) 散射中心相位提取结果

(b) Phase extraction results of scattering points

图 9 散射中心特性

Fig. 9 Characteristics of scattering centers

利用式(11)对上述相位估计结果进行解模糊处理, 所得结果如图 10(a)所示。其中解模糊结果在两个相位变化的峰值附近出现了错误, 这主要是因为该处对应频率交叉区, 相位估计误差较大。采用频率估计值对该段相位变化进行预测和替换, 并按式(10)转换为伪距离像序列, 与理论距离像序列对比如图 10(b)所示, 点线为估计结果, 虚线为理论结果, 两者均以散射中心 P1 为参考点, 并将散射中心 P2 与 P1 的初始距离也折叠到一个波长内以方便对比, 两者误差如图 10(c)所示。

不考虑初始距离模糊, 图 10(c)中两个散射中心平均提取误差分别为 0.003 7 m 和 0.000 9 m, 最大和最小投影距离差和平均提取误差分别为 0.006 3 m 和 0.000 2 m。根据参数设计, 理论最大和最小投影距离差分别为 0.610 5 m 和 0.400 2 m, 在正确解模糊的前提下, 距离差投影精度分别为 98.9% 和 99.7%, 可见伪距离像序列的提取可以达到较

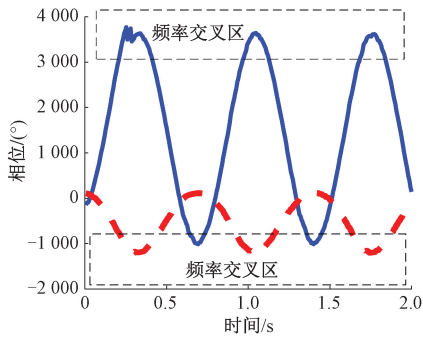
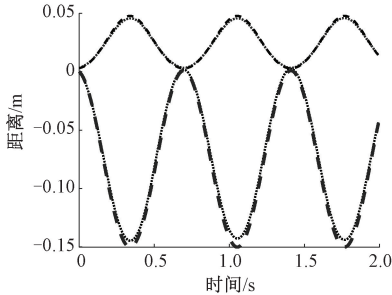
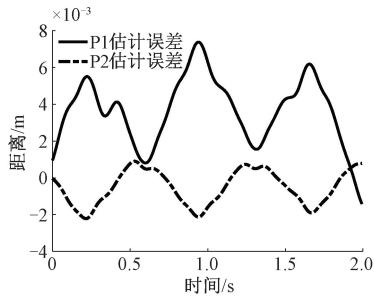

 (a) 相位解模糊结果  
(a) Results of deblurred phase

 (b) 提取结果对比  
(b) Comparison results

 (c) 伪距离像序列提取误差  
(c) Extraction error of pseudo-range profile sequences

图 10 伪距离像序列提取

Fig. 10 Extraction of pseudo-range profile sequences

高精度。

在上述实验的基础上,采用前述方法对目标参数进行估计。假设另一观测视角  $\gamma_2 = 40^\circ$ , 利用同样的方法生成回波并对其中包含伪距离像序列进行提取,设定模糊度变化为 0 ~ 50。对每个模糊度组合进行参数估计,对各组合下参数估计结果首先进行一级剔除,根据实际情况设定剔除规则为:进动角大于  $15^\circ$ ;半锥角大于  $25^\circ$ ;某项参数不为正。剔除后共得参数组合 362 个,其直方分布如图 11 所示,此处选取了 3 个典型参数:进动角,底面半径及锥体高度:

图 11 的结果显示了真实结果是包含在剔除后参数组合中的,但由于一级剔除所用规则较为松散,因此还有较多明显不符合真实情况的参数组合出现,如锥体高度达到了 3 m 以上,底面半径达到 2 m 以上等,实际使用中可根据先验知识对一级剔除规则做进一步的约束。

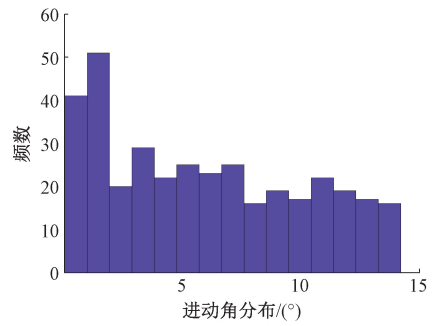
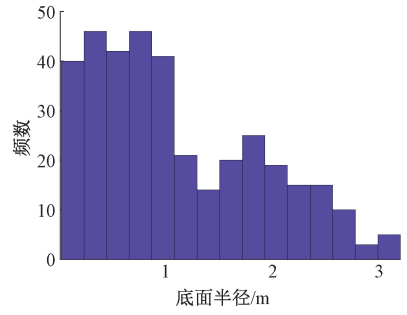
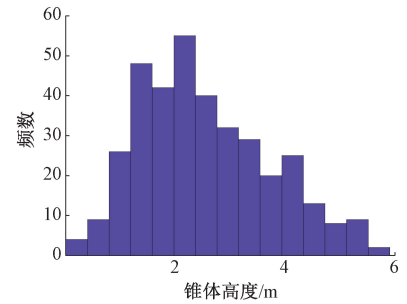

 (a) 进动角  
(a) Results of deblurred phase

 (b) 底面半径  
(b) Bottom radius

 (c) 锥体高度  
(c) Target height

图 11 参数直方分布

Fig. 11 Histogram of parameter estimation results

根据式(13)进行二级剔除,根据每一个参数组合生成的理论多普勒频率,并与所提取理论多普勒频率进行对比,并利用下式计算对比精度,其中  $IF_r$  为估计结果,  $IF_e$  为根据参数组合生成理论频率,对比精度分布如图 12 所示。

$$A = \left( 1 - \frac{\sum_k |IF_r(k) - IF_e(k)|}{\sum_k |IF_r(k)|} \right) \times 100\% \quad (14)$$

结果显示第 170 号样本的吻合度最好,取该参数组合作为估计结果,估计结果如表 1。

该组样本对应的模糊度分别为 27 和 32,与理论参数设置吻合,上述实验说明了该算法的有效性。

为了验证算法的稳健性,将信噪比从 6 dB 变化到 20 dB,每个信噪比条件下进行 100 次实验,将底面半径  $r$  与目标高度  $H$  转换为锥体母线  $l$  与半锥角  $\alpha$ ,所得参数估计均方根误差变化及与文献[16]提取结果对比如图 13 及

表 2 所示,其中信噪比的定义与之相同,均为较弱散射中心的信噪比。

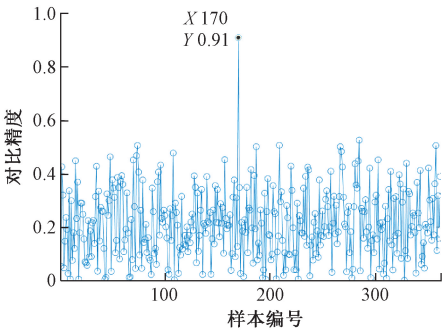


图 12 样本对比精度

Fig. 12 Accuracy of different samples

表 1 参数估计结果

Table 1 Parameter estimation results

值	进动角 $\theta$	底面半径 $r$	质心位置 $h$	目标高度 $H$
计算值	$6.724^{\circ}$	0.252 m	0.152 1 m	0.978 8 m
真实值	$7.000^{\circ}$	0.250 m	0.150 0 m	0.970 0 m

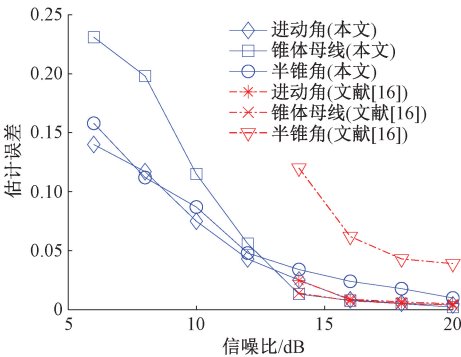


图 13 估计误差随信噪比变化

Fig. 13 The estimation error varies with the SNR

表 2 估计误差随信噪比变化

Table 2 The estimation error varies with the SNR

信噪比/ dB	进动角 $\theta / \%$		锥体母线 $l / \%$		半锥角 $\alpha / \%$	
	本文 方法	文献[16]	本文 方法	文献[16]	本文 方法	文献[16]
6	14.00	失效	23.10	失效	15.80	失效
8	11.70	失效	19.80	失效	11.20	失效
10	7.50	失效	11.50	失效	8.70	失效
12	4.30	失效	5.60	失效	4.80	失效
14	2.51	2.47	1.32	1.40	3.40	12.0
16	0.83	0.88	0.77	0.75	2.40	6.2
18	0.55	0.66	0.50	0.52	1.78	4.3
20	0.40	0.49	0.21	0.38	0.99	3.9

从结果可以看出,在 14 dB 到 20 dB 区间,本文算法的各项参数平均估计精度达到了 97.8%,与文献[16]相比有明显提升,其中半锥角参数的平均估计精度提高超过 5%,这与本文中较高的伪距离像序列提取精度有关;同时,相比文献[16]的 14 dB 应用门限,本文算法在 6 dB 左右的信噪比条件下仍然可以得到较为可信的结果,平均估计精度超过 80%,这是由于本文采用了频率估计值对散射中心断续时相位变化进行预测和替换,有效避免了距离序列的失效问题,提升了稳健性。因此仿真实验进一步说明了本算法可将当前基于宽带距离像序列的估计方式扩展到窄带雷达中去,从而提升算法的使用范围和精度,达到提升雷达目标识别范围的目的。

最后对算法耗时进行统计,在当前平台条件下(CPU: I7-4790K,主频 4 GHz,内存 32 GB, MATLAB 版本 R2021a),每种信噪比条件下的 100 次实验的算法运行平均总耗时及各分模块平均耗时如表 3 所示。

表 3 算法耗时统计

Table 3 Time consumption of algorithm

信噪比/ dB	伪距离像 提取模块 耗时/ms	参数估计 矩阵生成 模块耗时/ms	二级剔除 模块耗时/ ms	总耗时/ ms
6	83.56	35.35	19.70	138.60
8	76.74	35.76	13.10	125.60
10	79.44	33.28	15.54	128.26
12	75.46	30.83	18.41	124.70
14	81.26	30.90	21.87	134.03
16	75.81	31.55	21.77	129.12
18	78.57	35.04	23.74	137.35
20	80.69	31.53	13.23	125.45

从表中结果可以看出,对于 2 s 长度的回波数据,当前平台条件下可保证在 150 ms 内处理完成,且算法耗时与信噪比无关,说明了算法具有良好的时效性。其中主要耗时在于伪距离像提取模块,这是因为其中用到了 APES 谱估计算法,复杂度较高;参数估计矩阵生成及二级剔除模块主要为常规方程求解及普通四则运算,因此耗时相对较低,后续可针对高耗时模块进行针对性优化,进一步提升算法时效性。

4 结 论

为了发掘窄带雷达在导弹防御系统中的识别潜力,同时提升现有基于宽带特征的识别算法的适用范围。本文提出一种窄带雷达观测下的微动目标高分辨特征提取方法。首先提取了窄带回波信号中所包含微多普勒频率,结合回波相位估计获取了目标散射中心变化的伪距离像序列,在此基础上对解模糊的方式进行了研究,提出了基于伪距离

像序列的参数估计算法。仿真实验显示,本算法估计精度较高,且可在较低信噪比情况下获取理想参数估计结果,有助于扩展现有算法使用范围,提升防御系统识别作用距离。接下来将重点研究观测数据缺失情况下的算法推广问题。

## 参考文献

- [1] ROJHANI N, PASSAFIUME M, SADEGHIBAKHI M, et al. Model-based data augmentation applied to deep learning networks for classification of micro-Doppler signatures using FMCW radar [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(5): 2222-2236.
- [2] WANG S R, DAI J Y, KE J C, et al. Radar micro-Doppler signature generation based on time-domain digital coding metasurface [J]. Advanced Science, 2024, 11(19): 230-250.
- [3] 尚智宇,唐波,张龙斌,等. 海上风电机雷达回波及其微多普勒特征[J]. 电子测量技术, 2023, 46(11):49-56.  
SHANG ZH Y, TANG B, ZHANG L B, et al. Radar echoes simulation and micro-Doppler characterization of offshore wind turbine[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11):49-56.
- [4] 赵锋,徐志明,刘蕾,等. 弹道目标特征提取研究现状与展望[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(3):15-32.  
ZHAO F, XU ZH M, LIU L, et al. Review and prospects of ballistic target feature extraction [J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(3): 15-32.
- [5] CHOI I O, PARK S H, KANG K B, et al. Modeling method of receiving radar signals from warhead and decoy with micro-motion[J]. The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 2019, 30(3): 243-251.
- [6] PERSICO A R, ILIOUDIS C V, CLEMENTE C, et al. Novel classification algorithm for ballistic target based on HRRP frame [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3168-3189.
- [7] 孙清潭,赵涛,董纯柱,等. 基于散射中心极化比的锥体目标姿态反演[J]. 电波科学学报, 2023, 34(6): 716-722.  
SUN Q T, ZHAO T, DONG CH ZH, et al. Attitude inversion of cone targets based on polarization ratio of scattering center[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 34(6): 716-722.
- [8] 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.  
SU N, DAI F ZH, LIU H W. Micro-motion characteristic analysis and parameters estimation for blunted chamfered cone based on HRRP sequence [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(7): 1751-1757.
- [9] 许丹,田波,冯存前,等. 基于多站雷达自适应融合的光滑对称锥体三维重构与参数估计[J]. 信号处理, 2017, 33(4):627-634.  
XU D, TIAN B, FENG C Q, et al. Three-dimensional reconstruction and parameter estimation of smooth symmetric cone based on multistatic radar adaptive fusion[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(4): 627-634.
- [10] NING Y, ZHOU F, BAI X R, et al. A method for 3D ISAR imaging of space debris [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 55(2): 864-876.
- [11] QU Q, GUO K, SHENG X. Scattering centers induced by creeping waves on streamlined cone-shaped targets in bistatic mode [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14:462-465.
- [12] XU D, DU H L, FENG C Q, et al. Translational motion compensation of ballistic target based on radon transform [C]. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2017: 1707-1710.
- [13] 禄晓飞,靳硕静,洪灵,等. 基于聚类求解 TVAR 模型的目标微多普勒分析[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(3): 660-668.  
LU X F, JIN SH J, H L, et al. Target Micro-Doppler analysis of TVAR model based on clustering [J]. Systems Engineering & Electronics, 2023, 45(3): 660-668.
- [14] 韩勋,杜兰,刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4):961-968.  
HAN X, DU L, LIU H W. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-doppler modulation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(4):961-968.
- [15] 侯艳斐. 一种复合微动空间目标窄带成像方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3):225-231.  
HOU Y F. Narrow-band imaging method for compound micro-motion space target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3):225-231.
- [16] 邵长宇,杜兰,韩勋,等. 基于双视角距离像序列的空间锥体目标参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11):2735-2741.  
SHAO CH Y, DU L, HAN X, et al. Estimation method for space coning target parameters based on two-aspect range profile sequences [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2735-2741.

## 作者简介

韩勋(通信作者),博士,高级工程师,主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号处理等。

E-mail:andyhanxun@126.com

郑佳,硕士,工程师,主要研究方向为非合作信号处理、硬件系统设计等。

E-mail:jiazheng\_163@126.com

冯鑫,硕士,工程师,主要研究方向为非合作信号处理、硬件系统设计等。

E-mail:fengxin56@126.com

匡银,硕士,高级工程师,主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号检测与测量、高速数据传输等。

E-mail:kuang\_5312@163.com

文伟,博士,高级工程师,主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号处理等。

E-mail:wenwei\_8114@126.com