

基于双视角距离像序列的空间锥体目标参数估计方法

邵长宇 杜兰* 韩勋 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: 空间锥体目标在自由段是典型的微动目标。该文研究了基于双视角距离像的空间锥体目标参数估计方法,估计的目标参数包括进动参数和结构参数。首先分析了雷达俯仰角在空间锥体目标自由段的变化情况,并且利用建立的目标进动模型,得到了目标散射中心在雷达视线(RLOS)上的投影方程。然后基于双视角下的距离像序列推导出目标参数的解析解,并引入弹道信息来解决半锥角的估计对信噪比(SNR)要求较高的问题。最后利用电磁计算数据验证了方法的有效性。

关键词: 目标识别; 空间锥体目标; 高分辨距离像; 参数估计; 微动

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)11-2735-07

DOI: 10.11999/JEIT150561

Estimation Method for Space Coning Target Parameters Based on Two-aspect Range Profile Sequences

Shao Chang-yu Du Lan Han Xun Liu Hong-wei

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

Abstract: A space coning target has the typical micro-motion. A novel parameters estimation method for space coning target based on two-aspect range profile sequences is proposed in this paper. The parameters of space coning target include precession parameters and structure parameters. First, this paper analyzes the trace of the radar elevation angle when the target is in free phase. Using the established precession model, the equation for the projections of the target's scatters onto the Radar Line Of Sight (RLOS) is derived. Then, analytical solutions of the parameters are obtained based on the two-aspect range profile sequences. Ballistic curve is introduced to solve the problem that the estimation of half cone angle requires high Signal-to-Noise Rate (SNR). Finally, the experiments verify the effectiveness of the proposed method by using electromagnetic data.

Key words: Target recognition; Space coning target; High Range Resolution Profile (HRRP); Parameters estimation; Micro-motion

1 引言

微动特征通常被认为是目标的独特特征,包含了目标的许多细节信息,近年来利用微动特征进行目标识别受到广泛关注^[1-7]。文献[1]首先将微动的概念引入到雷达中来,并分析了理想点散射模型的振动、旋转、锥旋、摆动等基本微动的运动方程。目标微动反映到1维距离像上是其微动散射中心在雷达视线上的投影距离变化,而随着高分辨雷达的出现,基于1维距离像序列进行目标微动参数估计技术得到了快速发展,从而进一步提高了微动目标

的识别性能。

空间锥体目标由于要保持再入大气层时的稳定性,因此在自由段具有显著的进动特征,该微动特征成为空间锥体目标识别的重要特征。为了对空间锥体目标进行实时的属性识别,对雷达的带宽提出了较高要求,现在越来越多的高分辨雷达被用于弹道导弹防御体系。由于受到空间锥体目标的进动影响,其1维距离像序列反映了目标的结构信息和进动信息,而如何利用1维距离像提取目标的这些参数是空间锥体目标识别领域的一个难题。

文献[5]首先对空间锥体在各种微动情况下进行了较完整的建模,并分析了其高分辨雷达的回波特性。对于空间锥体目标,目前已有一些基于1维距离像序列进行参数估计的方法,但通常需要已知一些目标结构参数,如文献[6,7]。针对这一问题,文献[8]提出的方法可以在不需要结构参数的情况下,近似估计目标进动和结构参数,但该方法基于的模

收稿日期: 2015-05-11; 改回日期: 2015-07-20; 网络出版: 2015-08-27

*通信作者: 杜兰 dulan@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61271024, 61201296, 61322103); 中央高校基本科研业务费专项资金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271024, 61201296, 61322103); The Fundamental Research Funds for the Central Universities

型为锥柱体目标, 等于是增加了散射中心数量。文献[9]虽然实现了在不需已知结构参数的条件下对空间锥体目标进动和结构参数的联合提取, 但是要求宽带回波的平动已经精确补偿, 且锥体的 3 个散射中心能够同时观测到, 比较难以实现。由于无法在结构参数未知的情况下, 利用单视角 1 维距离像对空间锥体目标进行有效的参数估计, 近年来已有许多在多视角下进行参数估计的方法, 例如文献[10]研究了基于多视角距离像的目标进动和结构参数提取, 可以得到较高的估计精度, 但是算法要求最少要 3 组雷达, 雷达回波已精确包络对齐, 且锥体目标的 3 个散射中心需要同时观测到, 因此对雷达部署的位置要求较高。文献[11]将空间锥体目标近似为目标轴线线状目标, 在双视角下估计了目标的微动参数, 但是在空间锥体目标识别中, 锥体目标的半锥角也是一个重要的识别特征。通常情况下, 雷达部署在空间锥体落点方向, 即雷达视线迎向锥体方向, 在此雷达视角下, 仅能观测到两个散射中心, 而目前还没有方法可以在此条件下进行雷达俯仰角和半锥角估计。针对此情况, 本文提出了一种新的参数估计方法, 可以有效估计目标的半锥角和雷达俯仰角。

本文首先利用目标的“零攻角”特性, 分析了空间锥体目标进动轴在自由段与雷达视线(Radar Line Of Sight, RLOS)的夹角变化, 并基于等效散射中心模型推导出空间锥体目标进动时在 RLOS 上的投影方程。然后利用双视角下的 1 维距离像序列, 根据得到的投影方程得到了目标的进动参数和结构参数的解析解, 为了解决目标半锥角的估计对信噪比(SNR)要求较高的问题, 引入弹道信息进行辅助求解。最后利用电磁计算数据验证了提出算法的有效性。

2 锥体目标微动距离变化

2.1 坐标系模型

建立如图 1 所示的坐标系模型。目标坐标系用 $oxyz$ 表示, 其中 o 为锥体底面中心, 雷达视线 No 在坐标系 $oxyz$ 中的俯仰角和方位角记为 (α, β) 。由于目标为轴对称结构, 因此自旋不会对目标的雷达回波产生影响, 从而不予考虑。若目标进动, 则目标的对称轴绕 z 轴以角速度 ω_c 做锥旋运动, 锥旋角记为 θ 。在目标进动过程中建立参考坐标系 $ox'y'z'$, z' 为锥体对称轴, x' 轴垂直于雷达视线与锥体对称轴所构成的平面, 即 Noz' 平面, y' 轴可以由右手定则确定。

由于目标为光滑圆顶锥体, 因此采用等效散射中心模型。由文献[12]知, 光滑圆顶锥体只有 3 个等效散射中心: 锥顶 A 和由 RLOS 与锥轴所构成的平面 NoA 与锥底边缘的交点 B 和 C , 其中底部散射

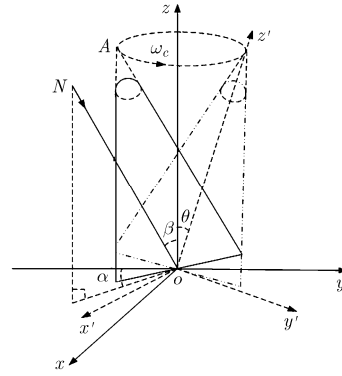


图 1 目标微动模型

中心 B 距雷达较近。RLOS 由 oN 表示, 假设其与锥体对称轴 oA 夹角大于锥体半锥角且小于 90° , 则由于遮挡, 仅锥顶 A 和底部散射中心 B 两个等效散射中心起作用。在等效散射中心模型下, 锥体进动时, 我们可以先求得锥体对称轴与 oN 的夹角 γ , 然后根据得到的 γ , 计算等效散射中心到锥底 o 的距离在 oN 上的投影, 从而得到目标等效散射中心到雷达的距离。

由于锥体的轴对称结构, 为了方便推导, 可以假设 oN 的方位角 $\alpha = 0^\circ$, 则 oN 在坐标系 $oxyz$ 的单位矢量可以表示为: $\mathbf{n} = [0 \ \sin\beta \ -\cos\beta]^T$ 。

2.2 弹道模型

主动段结束后, 在得知关机点参数, 即关机点到惯性坐标系中心距离 r_k , 关机点速度 v_k 和关机点的速度倾角 θ_k , 可以构造弹道导弹在自由段的弹道, 其中根据主动关机点的弹道倾角 θ_k 的不同, 弹道可以分为高弹道、最小能量弹道和低弹道。

本文采用高弹道来仿真锥体在自由段的目标平动情况, 弹道的具体构造方法可以参考文献[13]。对于地基反导预警雷达, 通常部署在重要防卫目的地附近, 而其正是空间锥体目标的打击对象, 因此地基反导预警雷达通常位于目标的落点附近, 基于此, 做出如下仿真: 构造的弹道如图 2 所示, 弹道射程 4000 km, 目标从 4000 km 远处飞往坐标原点, 图中标“★”处为雷达位置, 坐标为(100, 400, 0) km。图 2(b)为利用“零攻角”特性得到的 RLOS 在目标坐标系中的俯仰角随时间变化情况, 在 1000 s 以前, 雷达视线俯仰角在 30° 到 55° 之间, 而一般目标的进动角不会超过 10° , 因此在该视线范围内, 目标的 1 维距离像序列中将仅出现 2 个散射中心, 即锥顶散射中心 A 和底部散射中心 B 。从图 2(b)中还可以看到, 在 1000 s 以前, 俯仰角的变化都比较缓慢, 在 2 s 内的变化不超过 0.1° , 因此在估计目标参数的过程中, 可以近似认为俯仰角在 2 s 内不变。

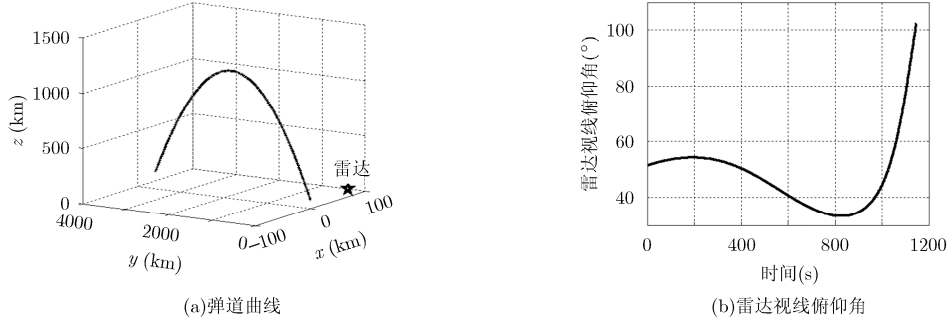


图 2 弹道模型

2.3 进动模型

进动是由自旋加锥旋而形成的^[14]，而空间锥体目标具有轴对称性，其自旋不对雷达回波产生影响，从而只考虑锥旋。假设目标进动频率为 ω_c ，进动角为 θ ，初始时刻锥体对称轴在 $oxyz$ 坐标系中的单位

$$\mathbf{R}_c(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t) & -\cos\theta \sin(\omega_c t) & \sin\theta \sin(\omega_c t) \\ \cos\theta \sin(\omega_c t) & 1 - \cos^2\theta [1 - \cos(\omega_c t)] & \sin\theta \cos\theta [1 - \cos(\omega_c t)] \\ -\sin\theta \sin(\omega_c t) & \sin\theta \cos\theta [1 - \cos(\omega_c t)] & 1 - \sin^2\theta [1 - \cos(\omega_c t)] \end{bmatrix} \quad (2)$$

则在时刻 t ，可以求得锥体轴线与雷达视线夹角的余弦为

$$\begin{aligned} \cos\gamma(t) &= \cos(\mathbf{p}_{\text{pre}}(t), \mathbf{n}) = \mathbf{p}_{\text{pre}}^T(t) \mathbf{n} \\ &= \cos\beta \cos\theta + \sin\beta \sin\theta \cos(\omega_c t + \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 φ 为初始相位。则 RLOS 在坐标系 $ox'y'z'$ 中的单位矢量为 $\mathbf{n}' = [0, \sin\gamma(t), -\cos\gamma(t)]^T$ ，假设锥体母线长度为 b ，半锥角为 η 。由 2.2 节可以知道，在目标处于自由段时，雷达只能观测到两个散射中心，可观测到的两个散射中心锥顶 A 和底部 B 之间的向量在坐标系 $ox'y'z'$ 中可表示为 $\mathbf{m} = [0, b \sin\eta, b \cos\eta]^T$ ，则两个散射中心的距离在 RLOS 上的投影为

$$l(t) = \mathbf{m}^T \mathbf{n}' = b \cos(\gamma(t) + \eta) \quad (4)$$

由式(4)可知，受空间锥体目标进动的影响，锥体的顶部散射中心 A 和底部散射中心 B 之间的距离在 RLOS 上的投影 $l(t)$ 将周期性变化，变化频率为进动频率 ω_c 。

3 目标进动参数和结构参数估计方法

结合目标的锥体结构以及其进动形式，由雷达的宽带回波信息可以进行目标的进动参数和结构参数估计，空间锥体目标的进动参数包括进动频率为 ω_c 、进动角为 θ 和 RLOS 的俯仰角 β ，结构参数包括锥体的母线长度和半锥角。本文将分两步具体讨论这些参数估计的估计方法。

向量为 $\mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 1]$ ，则在任意时刻 t ，锥体对称轴单位向量可以写成

$$\mathbf{p}_{\text{pre}}(t) = \mathbf{R}_c(t) \mathbf{p}_0 \quad (1)$$

其中， $\mathbf{R}_c(t)$ 为锥体旋转矩阵，由文献[14]，可知

3.1 进动角和锥体母线长度估计

由第 2 小节中的式(4)知，当 $\cos(\omega_c t + \varphi) = 1$ 时， $l(t)$ 达到最大值，记为 l_{\max} ；当 $\cos(\omega_c t + \varphi) = -1$ 时， $l(t)$ 达到最小值，记为 l_{\min} ，即

$$l_{\max} = b \cos(\beta + \eta - \theta) \quad (5)$$

$$l_{\min} = b \cos(\beta + \eta + \theta) \quad (6)$$

在两个不同的 RLOS 俯仰角下，即在 RLOS 俯仰角 β_1 和 β_2 下，可以得到两组最大、最小值，记为 $(l_{\max 1}, l_{\min 1})$ 和 $(l_{\max 2}, l_{\min 2})$ 。由这两组最大、最小值可以估计出目标的进动角和锥体母线长度。

为方便书写，设

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= l_{\max 1} + l_{\min 1} \\ a_{12} &= l_{\max 1} - l_{\min 1} \\ a_{21} &= l_{\max 2} + l_{\min 2} \\ a_{22} &= l_{\max 2} - l_{\min 2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则进动角估计为

$$\hat{\theta} = \arctan \left(\sqrt{\frac{a_{22}^2 - a_{11}^2}{a_{12}^2 - a_{21}^2}} \right) \quad (8)$$

在得到进动角后，进一步可以估计出锥体母线长度为

$$\hat{b} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{a_{11}^2}{\cos^2\theta} + \frac{a_{12}^2}{\sin^2\theta}} + \sqrt{\frac{a_{21}^2}{\cos^2\theta} + \frac{a_{22}^2}{\sin^2\theta}} \right) \quad (9)$$

如果雷达回波已经精确平动补偿，根据文献[11]，可以利用广义 Hough 变换来近似提取 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 和 a_{22} 。在这种情况下，即使出现散射中心存在

断续时,也可以进行进动角和锥体母线估计。但如果雷达回波间非相干,则要求散射中心在出现极值处不能断续。

3.2 雷达俯仰角和锥体半锥角估计

利用 3.1 的估计结果,将式(8)和式(9)代入到式(5)和式(6),还可以估计出两个 RLOS 俯仰角与锥体半锥角的和 $\hat{\kappa}_1$ 和 $\hat{\kappa}_2$, 即

$$\hat{\kappa}_1 = \beta_1 + \eta = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{a_{11}}{2b \cos \theta}\right) + \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{a_{12}}{2b \sin \theta}\right) \quad (10)$$

$$\hat{\kappa}_2 = \beta_2 + \eta = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{a_{21}}{2b \cos \theta}\right) + \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{a_{22}}{2b \sin \theta}\right) \quad (11)$$

为求得锥体的半锥角,对式(4)作如式(12)的变化

$$\gamma(t) + \eta = \arccos(l(t)/b) \quad (12)$$

对式(12)求导,可得

$$f(t) = \frac{d(\arccos(l(t)/b))}{dt} = -\frac{\omega_c \sin \beta \sin \theta \sin(\omega_c t + \varphi)}{\sqrt{1 - g^2(t)}} \quad (13)$$

其中 $g(t) = \cos \beta \cos \theta + \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_c t + \varphi)$, 进动频率 ω_c 可以由 1 维距离像最大相关的方法获得^[15]。由上面分析知,在时刻 t_1 , $l(t)$ 取最大值 l_{\max} 时, $\cos(\omega_c t_1 + \varphi) = 1$; 在时刻 t_2 , $l(t)$ 取最小值 l_{\min} 时, $\cos(\omega_c t_2 + \varphi) = -1$, 因此可以求得初始相位 φ 。当 $f(t)$ 在 t_{\max} 时刻取得最大值 f_{\max} 时,由式(13)可以得到

$$\cos(\omega_c t_{\max} + \varphi) = \frac{f_{\max}^2 \cot \beta \cot \theta}{1 - f_{\max}^2} \quad (14)$$

当 $f(t)$ 在 t_{\min} 时刻取得最小值 f_{\min} 时,式(15)成立。

$$\cos(\omega_c t_{\min} + \varphi) = \frac{f_{\min}^2 \cot \beta \cot \theta}{1 - f_{\min}^2} \quad (15)$$

从而可以利用式(14)或式(15)估计出 RLOS 的俯仰角。

$$\hat{\beta} = 0.5 \left[\arctan\left(\frac{f_{\max}^2 \cot \theta}{(1 - f_{\max}^2) \cos(\omega_c t_{\max} + \varphi)}\right) + \arctan\left(\frac{f_{\min}^2 \cot \theta}{(1 - f_{\min}^2) \cos(\omega_c t_{\min} + \varphi)}\right) \right] \quad (16)$$

利用式(16)再联合式(10)和式(11),即可求出对应的 RLOS 俯仰角 β_1, β_2 和半锥角 η 。但是由于求解过程中利用到了对式(12)的求导运算,因此精确求解 β_1 和 β_2 需要较高的雷达回波 SNR。

在回波 SNR 较低时,估计出的 RLOS 的俯仰

角误差比较大,有时甚至不能进行有效估计,为此我们提出了利用弹道信息以及弹道的“零攻角”特性估计 β_1 和 β_2 。目标在自由段由于没有动力,其弹道在得到一段观测数据后是可以预测出来。同时为了保持目标再入大气层时的稳定性,要求此时的目标进动轴在其平动速度方向,即“零攻角”特性。而释放后的锥体目标在自由段没有姿态调整,因此其进动轴都与再入大气时的速度方向保持平行,利用这一特性,并结合弹道信息,可以估计出目标进动轴各时刻与 RLOS 的夹角,即 2.1 节中在 $oxyz$ 坐标系下的定义的 RLOS 俯仰角 β 。假设再入大气时目标的速度方向矢量为 \mathbf{v} , t 时刻目标坐标位置到雷达坐标位置的向量为 $\mathbf{d}(t)$, 则各时 RLOS 俯仰角 $\beta(t)$ 的估计为

$$\hat{\beta}(t) = \arccos\left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{d}(t)}{|\mathbf{v}| |\mathbf{d}(t)|}\right) \quad (17)$$

图 2(b)为利用式(17)计算的空间锥体目标从关机点开始,到再入大气前自由段的 $\beta(t)$ 的变化情况,这里假设大气层高度为 80 m,即当目标高度到达 80 km 时就认为目标进入再入段。在估计出目标在自由段时 RLOS 的俯仰角 $\beta(t)$ 以后,联合式(10)和式(11),即可求得目标的半锥角 η 。到此,我们就估计出了锥体目标的所有结构参数和进动参数。本文方法利用两个散射中心在 RLOS 上投影的距离差进行估计,因此应用算法前不需要对宽带回波进行包络对齐,而对于空间锥体,目标存在微动且散射中心较少,宽带回波的包络对齐将是一个难题。需要说明的是,由于算法需要利用两个散射中心在 RLOS 方向投影的最大值和最小值进行计算,因此观测时间必须大于目标的进动周期,而本文选择较长的 2 s 观测时间就是为了保证满足算法要求。

随着弹道参数和进动参数的变化,会出现 1 维距离像序列中出现 3 个散射中心片段,此时可以求得每一次距离像中散射中心的距离差,并利用距离差曲线的连续性进行关联,如果得到一条连续的距离差曲线,则利用该曲线进行参数估计,如果得到多条连续的距离差曲线,则对曲线进行正弦拟合,误差小且散射中心距雷达较近的距离差曲线可以用来进行参数估计。

4 实验仿真结果

为了验证算法的有效性,我们利用电磁计算数据,仿真数据带宽 2 GHz,为从 9 GHz 到 11 GHz 间隔 0.02 GHz 的点频信号,回波重复频率 600 Hz;目标模型如图 1 所示圆顶锥体,锥体高 1.86 m,圆顶半径为 0.02 m,底面半径 0.25 m;锥体作进动,

进动角 8° ，进动频率 3 Hz，目标的弹道以及雷达位置如图 1(a)所示。我们利用两次观测来进行目标进动参数和结构参数估计，两次观测的时间分别为 256~258 s 以及 384~386 s，对应的 RLOS 俯仰角分别为 54° 和 51° ，利用电磁仿真数据得到的两个观测视角下的雷达回波 1 维距离像如图 3 所示。虽然雷达带宽已经达到 2 GHz，但是对于精确的参数估计来说分辨率还是不够高，因此本文采用多重信号分类(MUSIC)超分辨方法估计并提取距离像散射中心的距离变化，提取结果如图 4 所示。

利用提取的距离像散射中心距离变化，进行目标结构和进动参数估计。从图 4 知，在 2 s 的观测时间内， $l(t)$ 多次出现最大值和最小值，由于噪声的存在，为了提高估计精度，可以在将最大值和最小值代入式(8)~式(11)前做如下预处理：首先剔除掉提取的最大值和最小值序列中的奇异值，实验表明奇异值的出现对估计结果的精度影响较大，然后计算剔除奇异值后的最大值和最小值序列的均值，最后将得到的均值代入到式(8)~式(11)估计目标参数。

100 次实验估计结果的均方根误差随 SNR 的变化如图 5 所示，SNR 的定义为回波中较弱散射中心的 SNR，这样定义 SNR 可以保证目标回波中的两个散射中心都能够被检测到。从图 5(a)可以看出，参数估计的误差随 SNR 的提高而降低，SNR 在 14 dB 以上时，进动角和锥体母线等参数的估计误差很小，同时可以较高精度地估计出 RLOS 俯仰角与锥体半锥角的和。即使 SNR 小于 14 dB，参数的估计精度依然可能很高，但是此时不能够保证每次回波中的两个散射中心都能检测到，从而算法不再适用。由图 5(b)可知，RLOS 俯仰角的估计误差对 SNR 的要求较高，从而影响到锥体半锥角的估计误差。在 SNR 低于 18 dB 的情况下，RLOS 俯仰角的估计误差已经大于锥体半锥角的一半，因此半锥角的估计结果将不可信，验证了第 3 节中对 RLOS 俯仰角估计误差的分析。

如果目标的弹道信息已经得到，则通过弹道信息可以高精度地估计出 RLOS 的俯仰角。自由段弹道的预测方法可以参考文献[16,17]，由于弹道信息的估计误差与雷达参数以及预测算法有关，而目前的预测算法对弹道的预测精度很高，本文不考虑由其引起的 RLOS 俯仰角的估计误差。假设弹道信息已知时，可以看作 RLOS 俯仰角已知，即 β_1 和 β_2 确定已知，在此情况下，估计出锥体半锥角误差随 SNR 的变化如图 6 所示。由于半锥角 η 仅有 7.125° ，相比 β_1 和 β_2 较小，因此虽然图 5(a)中 $(\beta_1 + \eta)$ 和 $(\beta_2 + \eta)$ 的估计误差较小， η 的估计误差要偏大，但是 SNR 在 14 dB 时的估计精度依然可以接受。

实验中两次观测的时间间隔为 128 s，两次观测的俯仰角的角度差为 3° ，如果增加俯仰角的角度差，即增加观测时间间隔，目标的参数估计均方根误差也将随之减小，在 SNR 为 15 dB 的情况下，目标的结构和进动参数估计均方根误差随两次观测的俯仰角角度差的变化如图 7 所示。实验表明，虽然进动角以及锥体母线长度在角度差 1° 时就能够得到较好的估计结果，但半锥角的估计要求较高，需要 2° 以上时才能得到可以接受的估计结果。考虑到利用弹道估计俯仰角也会存在一定误差，因此两视角角度差在 3° 以上时，算法能够保持较好的估计精度。从实验中可以看出，半锥角的估计误差要大于其它参数的估计误差，这主要是由模型误差带来的，在实验中采用圆顶锥体模型，而算法模型为锥体模型。

5 结束语

空间锥体目标在自由段的进动参数和结构参数是目标识别的重要特征，这些参数的提取有助于提高空间锥体目标的识别性能。本文利用了双视角下的 1 维距离像序列进行自由段下空间锥体目标的进动参数和结构参数估计，解决了对目标半锥角和雷达视线俯仰角估计的难题。并利用弹道信息估计 RLOS 的俯仰角，减小了估计目标半锥角时对 SNR 的要求。实验结果表明在 SNR 能够保证散射中心完

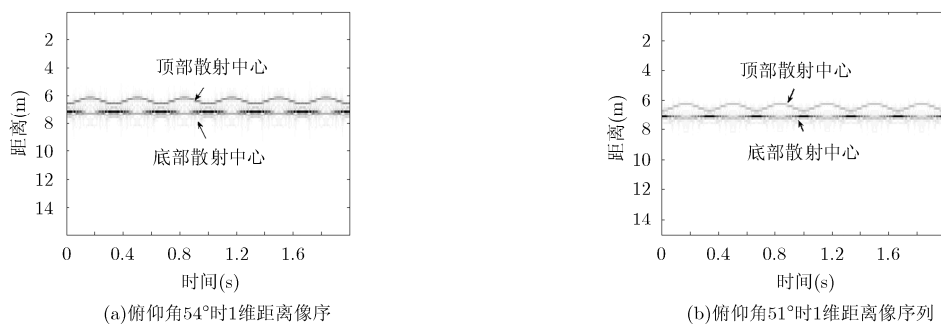


图 3 1 维距离像序列

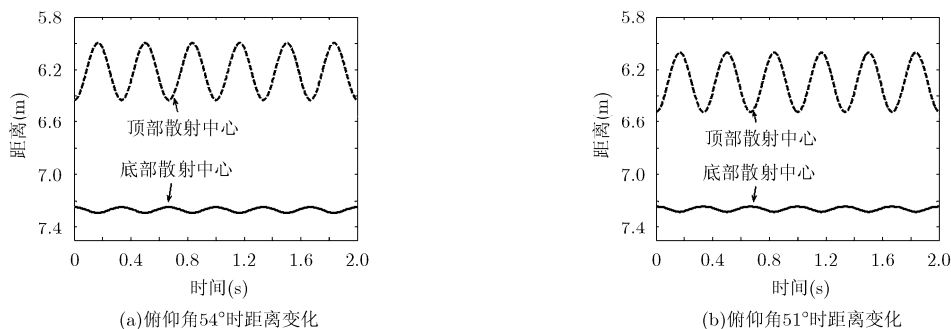


图4 MUSIC方法结果

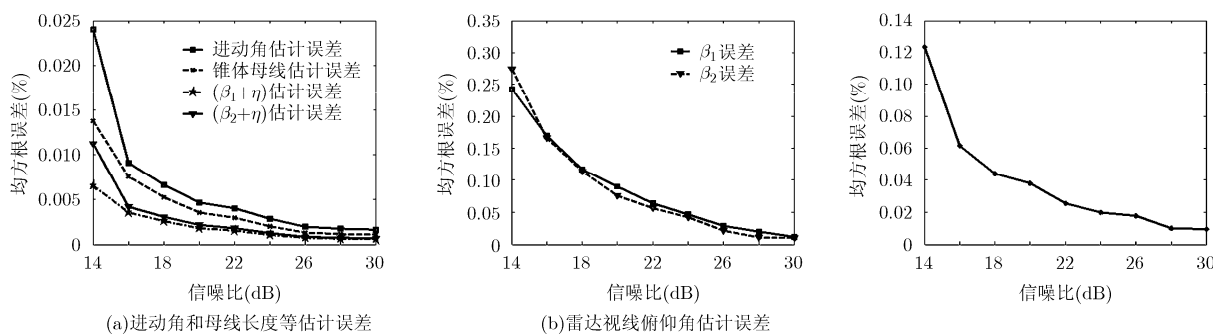


图5 参数估计误差

图6 锥体半锥角估计误差

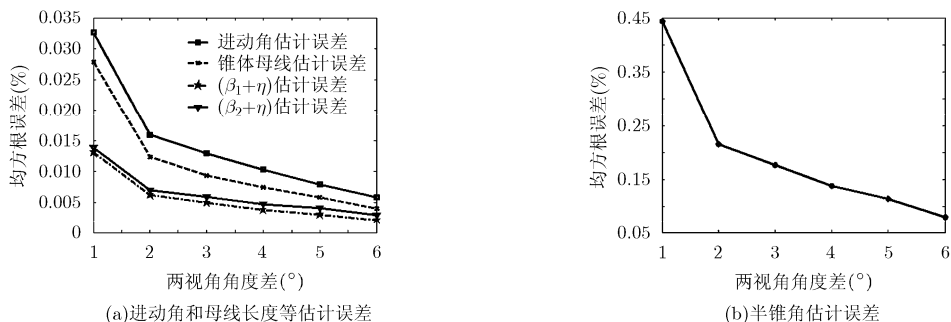


图7 估计误差随角度差的变化

整提取的情况下, 本文提出的算法具有较高的估计精度。但是当目标回波 SNR 较低时, 会出现散射中心断续现象, 在雷达回波间非相干的情况下可能无法提取极值, 导致算法失效, 因此如何在较低 SNR 中估计散射中心的位置将成为下一步的研究内容。

参考文献

- [1] Chen V C, Li F Y, and Ho S S. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 梁必帅, 张群, 姜昊, 等. 基于微动特征关联的空间非对称自旋目标雷达三维成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1381-1388.
- Liang Bi-shuai, Zhang Qun, Lou Hao, et al. A method of

- three-dimensional imaging based on micro-motion feature association for spatial asymmetrical spinning targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1381-1388.
- [3] 张帅钦, 张荣杰, 张申涛, 等. 基于宽带雷达的弹道目标微动分析[J]. *现代雷达*, 2014, 36(9): 30-33.
- Zhang Shuai-qin, Zhang Rong-jie, Zhang Shen-tao, et al. Micro-motion analysis of ballistic target based on wide-band radar[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(9): 30-33.
- [4] 邓冬虎, 张群, 李宏伟, 等. 基于高阶矩函数的宽带雷达微动特征提取[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(9): 2126-2132.
- Deng Dong-hu, Zhang Qun, Li Hong-wei, et al. Micro-motion signature extraction for wideband radar based on high-order moment function[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2126-2132.

- [5] 马梁. 弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D]. [博士论文], 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], National University of Defense Technology, 2011.
- [6] 贺思三, 周剑雄, 付强. 利用一维距离像序列估计弹道中段目标进动参数[J]. 信号处理, 2009, 25(6): 925-929.
He Si-san, Zhou Jian-xiong, and Fu Qiang. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 925-929.
- [7] 颜维, 孙文峰, 钱李昌, 等. 基于一维像序列的弹道中段目标进动特征提取[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 87-90.
Yan Wei, Sun Wen-feng, Qian Li-chang, et al. Precession feature extraction of ballistic mid-course target based on HRRP sequences[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(2): 87-90.
- [8] 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.
- [9] 艾小锋, 邹小海, 李永祯, 等. 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 Xiao-feng, Zou Xiao-hai, Li Yong-zhen, 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.
- [10] 李婧卿, 冯存前, 童宁宁, 等. 基于多视角距离像的弹道目标三维微动特征提取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(5): 34-37.
Li Jing-qing, Feng Cun-qian, Tong Ning-ning, et al. Three-dimensional micro-motion feature extraction of ballistic target based on the multi-view range profile[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2014, 15(5): 34-37.
- [11] 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的特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2846-2851.
Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, 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.
- [12] 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: 229-234.
Huang Pei-kang, Yin Hong-cheng, and Xu Xiao-jian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 229-234.
- [13] 张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 173-199.
Zhang Yi, Xiao Long-xu, and Wang Shun-hong. Ballistics of Ballistic Missile[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1999: 173-199.
- [14] 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.
- [15] 王洋, 桑玉杰. 利用一维距离像序列提取导弹目标微动特征[J]. 现代雷达, 2014, 36(5): 40-43.
Wang Yang and Sang Yu-jie. Micro-motion feature extraction of ballistic missile based on HRRP Sequence[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(5): 40-43.
- [16] 赵锋. 弹道导弹防御跟踪制雷达探测技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
Zhao Feng. Study on detection techniques of tracking and guiding radars in ballistic missile defenses[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [17] 刘永兰, 贺正洪, 李振兴, 等. 基于距离信息修正的自由段弹道预测法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 274-279.
Liu Yong-lan, He Zheng-hong, Li Zhen-xing, et al. Algorithm of trajectory prediction in free phase based on range adjusting[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(2): 274-279.
- 邵长宇: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为雷达空间目标识别.
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、自适应信号处理、认知雷达等.