

基于后向投影变换的进动旋转对称目标成像新方法

胡杰民^{*①} 占荣辉^① 牛威^② 欧建平^①

^①(国防科技大学 ATR 实验室 长沙 410073)

^②(宇航动力学国家重点实验室 西安 710043)

摘要: 弹道中段目标成像技术是弹道导弹防御系统的核心技术之一。由于弹道导弹中段飞行过程中具有空间进动形式, 不满足小转角近似, 导致 RD 算法成像模糊。该文提出一种进动旋转对称目标的宽带雷达成像方法, 新方法通过后向投影变换将目标散射中心分布在距离时间域上的复数信号进行相干累加, 实现目标散射中心的 2 维重构, 该方法较广义 Radon 变换方法在抑制旁瓣性能上有较大的改进, 利用暗室测量数据的实验结果验证了算法的有效性。

关键词: 宽带雷达成像; 进动; 后向投影变换; 旋转对称目标

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1847-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01425

A Novel Imaging Method for Precession Targets with Rotational Symmetry Based on Back Projection Transform

Hu Jie-min^① Zhan Rong-hui^① Niu Wei^② Ou Jian-ping^①

^①(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: The imaging method of the mid-course missile is one of the key techniques of the missile defense system. Cause of the special precession character of the ballistic missile warhead, the small rotation angle assumption is not satisfied, which leads to blurring of the image obtained by Range Doppler (RD) algorithm. To solve this problem, a novel wideband imaging method for precession targets with rotational symmetry is proposed in this paper. Using Back Projection Transform (BPT), the echoes of the target in the range-time domain are transformed to reconstruct the scattering centers position in the parameter domain by means of coherent accumulation. The algorithm is verified by the experiment results of the anechoic chamber data, which demonstrates that the algorithm is more efficient than the Generalized Radon Transform (GRT) method.

Key words: Wideband radar imaging; Precession; Back Projection Transform (BPT); Targets with rotational symmetry

1 引言

弹道中段目标通常利用自旋产生的陀螺效应保持空间定向以满足再入段零攻角的要求。由刚体姿态力学知识^[1], 刚体自旋时如果有横向干扰(弹头和诱饵被释放过程中不可避免产生干扰), 刚体将产生进动; 若刚体进动过程中不再受外力矩干扰, 则进动角度值恒定。进动是中段目标最常见的运动形式之一, 由于进动频率较高, 不满足 RD(Range Doppler)成像所假定的小转角条件, 导致 RD 算法成像结果模糊, 给弹道导弹防御系统的目标识别带来极大难题。因此开展进动目标的运动参数估计、

成像研究, 在目标识别、弹道导弹防御系统等领域都有重要的应用价值。

空间目标的成像, 目前主要集中在自旋目标的成像上, 文献[2]基于窄带雷达信号, 利用时频分析和相干积分的方法实现自旋目标运动估计及成像, 当目标存在大量散射点时, 时频变换的交叉项干扰严重。文献[3,4]研究了基于宽带信号的自旋目标成像方法, 文献[3]利用广义 Radon 变换对包络进行检测实现自旋目标成像, 由于该方法仅利用信号幅度分布, 是一种非相干积累的方法, 其分辨率较低, 且旁瓣影响严重。文献[4]利用后向散射变换代替广义 Radon 变换实现自旋目标成像, 由于同时考虑了幅度和相位, 该方法的分辨率更高且旁瓣较低, 但对运动参数估计精度的要求也更严格。在进动目标

2011-12-31 收到, 2012-05-08 改回

国家自然科学基金(61179010)资助课题

*通信作者: 胡杰民 hujiemindawang@126.com

的识别与成像方面,文献[5]研究了空间进动锥体目标进动角的估计方法;文献[6,7]研究了空间进动锥体目标进动周期的估计方法。文献[8]研究了空间进动锥体目标的窄带成像方法。

为确保目标自旋实现空间定向,弹道目标一般采用旋转对称目标。本文将基于旋转对称目标的散射模型的分析,推导进动目标的回波模型。针对GRT算法分辨率低的缺点,提出一种基于后向投影变换的进动目标宽频带成像的新方法,通过分析散射点在距离时间域信号回波中的变化规律与其位置的相应关系,将距离时间域回波信号投影变换到散射点分布平面,从而实现进动目标的2维成像。利用暗室数据对成像方法进行了实验,验证了算法的有效性。

2 空间进动旋转对称目标回波模型

如图1所示,假设雷达位于雷达坐标系 UVW 的原点 Q ,目标位于点 S 处,以轴 SN 进动,进动角速度为 ω ,进动角为 γ 。雷达坐标系 UVW 的方向定义如下: QW 轴方向与雷达视线方向 QS 一致; QV 轴在 QW 和 SN 所确定的平面内,且垂直于 QW ; QU 轴由右手螺旋定则确定。雷达视线的单位矢量为: $\mathbf{n} = [0, 0, 1]^T$ 。为描述目标的姿态变化,引入参考坐标系 XYZ ,参考坐标与雷达坐标系平行,原点位于 S 处。进动轴 SN 在坐标系 XYZ 中的方位角(定义为由 SX 轴顺时针旋转到 SN 在 XYZ 中投影所转过的角度)和俯仰角分别为 $\alpha_0 = \pi/2$ 和 β_0 ,定义进动轴与雷达视线 QW 的夹角为平均视线角,则 β_0 为平均视线角的余角。由上述分析可知,进动轴 SN 的单位矢量为: $\mathbf{e} = [0, \cos \beta_0, \sin \beta_0]^T$ 。

定义目标本体坐标系 xyz 如下: Sz 为目标旋转对称轴方向, Sx 和 Sy 在垂直 Sz 的平面内,且满足右手螺旋定则。由本体坐标 xyz 变换到参考坐标系 XYZ 的欧拉角为 (ϕ, θ, φ) ,其中 ϕ 为绕 z 轴旋转过的角度, θ 为绕 x 轴旋转过的角度, φ 为绕 y 轴旋转过的角度。假设初始时刻目标轴线在平面 ZSY 内,且

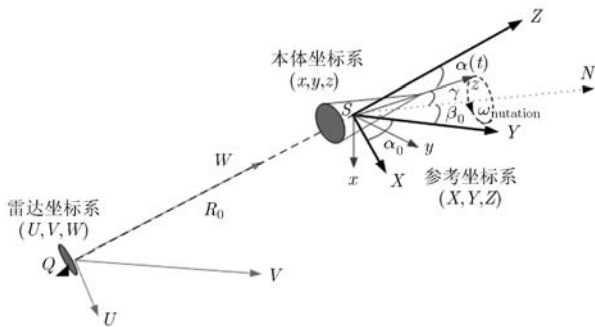


图1 雷达观测空间进动旋转对称目标示意图

x 轴与 X 轴方向一致,则 $\phi = 0$, $\varphi = 0$, $\theta = -(\pi/2 - \gamma - \beta_0)$ 。对于本体坐标系 xyz 中 z 轴上的单位矢量: $\mathbf{r}_0 = [0, 0, 1]^T$,其在参考坐标系 XYZ 中的位置 \mathbf{r}_1 可表示为

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot \mathbf{r}_0 \quad (1)$$

其中 \mathbf{R}_{mit} 为欧拉角转换矩阵^[9],表示式如下:

$$\mathbf{R}_{\text{mit}} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\gamma + \beta_0) & \cos(\gamma + \beta_0) \\ 0 & -\cos(\gamma + \beta_0) & \sin(\gamma + \beta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据 Rodrigues 方程式,目标进动的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{I} + \mathbf{e} \sin \omega t + \mathbf{e}^2 (1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

其中 \mathbf{e} 为斜对称矩阵,其表达式为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \beta_0 & \cos \beta_0 \\ \sin \beta_0 & 0 & 0 \\ -\cos \beta_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此, t 时刻 z 轴上的单位矢量在参考坐标系中的位置为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot \mathbf{r}_0 \quad (5)$$

目标姿态角即雷达视线 QW 与目标轴线 Sz 的夹角,可通过式(6)进行计算。

$$\alpha(t) = \arccos \left(\frac{\mathbf{r}(t) \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{r}(t)\| \|\mathbf{n}\|} \right) = \arccos(\cos \gamma \sin \beta_0 + \sin \gamma \cos \beta_0 \cos \omega t) \quad (6)$$

由式(6)可以看出,姿态角的变化规律与进动角 γ ,雷达视线与进动轴夹角的余角 β_0 ,以及进动角速度 ω 有关系,随时间周期性变化。

一般而言,散射中心位于目标上某一固定的位置,但是这种情况对于旋转对称体是不适用的。散射回波可以近似看作是电磁波照亮的物体表面产生的激励的积分和^[10],对于旋转对称体而言,目标绕旋转对称轴转过一定角度后,其照亮表面的形状、介质等影响回波的关键因素并未发生变化,可以认为散射场基本不变。即散射中心不再是始终处于弹体的某一固定位置,随着弹体的旋转,散射中心也会从原来的位置移动新的雷达视线照亮的相应位置上,换言之,在目标形状确定的情况下,目标散射中心

只与旋转对称目标轴线与雷达视线的夹角(即姿态角)有关。

根据旋转对称目标散射模型的分析,在某平面内以 $\alpha(t)$ 为规律转动的目标回波与上述进动目标回波等效,如图 2 所示,其中 Y_0SX_0 为目标的等效转动平面。

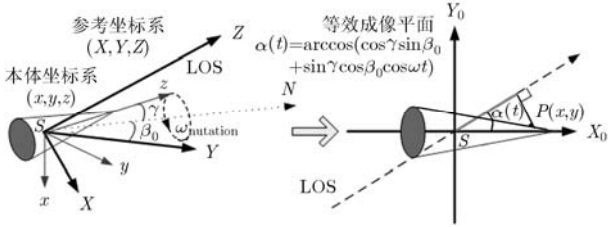


图 2 进动旋转对称目标成像等效为 2 维转动目标成像示意图

雷达发射线性调频信号

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi\left[f_c \hat{t} + \frac{1}{2} \gamma \hat{t}^2\right]\right\} \quad (7)$$

式中 $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$ 为发射信号的矩形包络,

f_c 为载频, $\gamma = B/T_p$ 为调频斜率, B 为带宽, T_p 为脉冲宽度, $\hat{t} = t - mT$ 为快时间, $t_m = mT$ 为慢时间, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为发射脉冲的序号, T 为脉冲周期。

假设等效成像平面内目标上任一点 P 的坐标为 (x, y) , 其散射强度为 $\rho(x, y)$, 则 t 时刻 P 点到雷达的距离为

$$R_p(x, y, t) = R_0(t) + x \cos \alpha(t) + y \sin \alpha(t) \quad (8)$$

其中 $R_0(t)$ 为参考坐标系 XYZ 与雷达坐标系 UVW 之间的距离变化规律, $\alpha(t)$ 为目标姿态角变化规律。则雷达回波可表示为

$$\begin{aligned} s_r(\hat{t}, t_m) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, y) \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \tau(x, y, t_m)}{T_p}\right] \\ &\cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c(\hat{t} - \tau(x, y, t_m)) + \frac{1}{2} \gamma(\hat{t} - \tau(x, y, t_m))^2\right]\right\} dx dy \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\tau(x, y, t_m) = \frac{2R(x, y, t_m)}{c}$ 为点 (x, y) 的回波时延,

设参考信号的基准距离为 $R_{\text{ref}}(t_m)$ 与 $R_0(t_m)$ 完全匹配(若不一致,可通过平动补偿达到同样效果),对回波做解频调处理,并补偿调视频残余项和包络斜置项后可得距离时间域信号为

$$\begin{aligned} S(r, t_m) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, y) T_p \\ &\cdot \text{sinc}\left[\frac{2\gamma T_p}{c}(r - x \cos \alpha(t_m) - y \sin \alpha(t_m))\right] \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi f_c}{c}[x \cos \alpha(t_m) + y \sin \alpha(t_m)]\right\} dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

3 进动旋转对称目标宽频带成像算法

3.1 后向投影变换

后向投影变换(Back Projection Transform, BPT)是图像处理中的曲线检测算法,类似于广义 Radon 变换^[4],将图像空间的曲线转化为参数空间中的参数表示,与广义 Radon 变换不同的是,后向投影变换是针对复数图像的曲线进行转换。假设复数图像为 $f(r_1, r_2)$, 其中 r_1 和 r_2 分别为像素单元的横纵坐标。图像中某条曲线可由 η 维参数表示:

$$\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_\eta) \quad (11)$$

后向投影变换的定义式为

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(\zeta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r_1, r_2) \delta[r_1 - \Phi(r_2, \zeta)] \\ &\cdot \exp[j\psi(r_2, \zeta)] dr_1 dr_2 \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f[\Phi(r_2, \zeta), r_2] \exp[j\psi(r_2, \zeta)] dr_2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\delta(\bullet)$ 为冲击函数, $r_1 = \Phi(r_2, \zeta)$ 为转换曲线, $\psi(r_2, \zeta)$ 为曲线参数决定的相位函数。式(12)表示将曲线上的图像值乘以相位函数后积分,当图像中包含参数为 ζ 的曲线分量 $s(\zeta) = f[\Phi(r_2, \zeta), r_2] \cdot \exp[-j\psi(r_2, \zeta)]$ 时,式(12)相干累加,积分值最大,若图像中不包含该曲线分量,则不同积分变量 r_2 所对应的图像值相位不具有相干性,积分时存在互相抵消的情况,参数空间中对对应点的幅值很小。因此,后向投影变换是将信号从复数图像域的表现形式转换到参数域的表现形式。

3.2 成像算法

由式(10)可以看出,对于处于进动状态的旋转对称目标上任一散射点 P 而言,它在距离时间域的表现形式为

$$\begin{aligned} S_{x,y}(r, t_m) &= \rho(x, y) T_p \\ &\cdot \text{sinc}\left[\frac{2\gamma T_p}{c}(r - x \cos \alpha(t_m) - y \sin \alpha(t_m))\right] \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi f_c}{c}[x \cos \alpha(t_m) + y \sin \alpha(t_m)]\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\text{sinc}(\bullet)$ 函数通常可以认为是 $\delta(\bullet)$ 的近似。可见,式(13)在距离时间域表现为曲线的形式,曲线由 2 维

参数 $\zeta = (x, y)$ 决定, 路径为 $\Phi(t_m, x, y) = x \cos \alpha(t_m) + y \sin \alpha(t_m)$, 相位函数为 $\Psi(t_m, x, y) = [4\pi f_c / c] \Phi(t_m, x, y)$ 。因此, 对式(13)进行后向投影变换后在参数域上坐标为 $\zeta(\zeta_1 = x, \zeta_2 = y)$ 处得到一尖峰, 且幅度与 $\rho(x, y)$ 成正比。

对式(10)作离散形式的后向投影变换可得

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2) &= \sum_{m=0}^{M-1} S[\Phi(t_m, \zeta_1, \zeta_2), t_m] \exp[j\Psi(t_m, \zeta_1, \zeta_2)] \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \rho(x, y) T_p \operatorname{sinc} \cdot \left\{ \frac{2\gamma T_p}{c} \right. \\ &\quad \cdot \left. \left[(\zeta_1 - x) \cos \alpha(t_m) + (\zeta_2 - y) \sin \alpha(t_m) \right] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi f_c}{c} \left[(\zeta_1 - x) \cos \alpha(t_m) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\zeta_2 - y) \sin \alpha(t_m) \right] \right\} dx dy \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可得到信号在参数域的表现形式分布, 在计算 $\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2)$ 时, 由于只有 (ζ_1, ζ_2) 处的回波在作后向投影变换时是相干累加, 其他散射中心的回波在计算 $\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2)$ 时, 相位没有相干性, 会互相抵消, 因此对 $\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2)$ 的作用可以忽略。式(14)通过计算可以得到

$$\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2) = MT_p \rho(\zeta_1, \zeta_2) \quad (15)$$

即参数域的分布 $\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2)$ 与目标散射强度分布 $\rho(\zeta_1, \zeta_2)$ 成正比, 比值为 MT_p , 表明参数域 $\mathcal{H}(\zeta_1, \zeta_2)$ 处的尖峰幅度是 $\rho(\zeta_1, \zeta_2) T_p$ 的 M 次相干累加。因此后向投影变换后的参数域图像即为目标的成像结果。

4 性能分析

由推导过程可知, 后向投影变换是通过图像特定曲线上的复数值相干累加实现宽带成像的, 当确定目标姿态角的参数(即 γ, β_0 和 ω)估计不准确时, 导致相位函数计算不准确, 曲线上的复数相干累加存在干扰甚至无法成像, 因此需要对估计误差进行分析。

由工程应用经验, 假设相干累加所能容忍的最

大相位误差为 $\pi/2$, 则目标姿态角的估计误差 $\Delta\alpha(t)$ 必须满足下式:

$$\left| \frac{4\pi f_c D \Delta\alpha(t)}{c} \right| < \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

其中 D 为目标在等效成像平面内的最大半径。将式(6)代入, 不等式可表述如下:

$$\left| \begin{aligned} &\arccos(\cos \gamma' \sin \beta_0' + \sin \gamma' \cos \beta_0' \cos \omega' t) \\ & - \arccos(\cos \gamma \sin \beta_0 + \sin \gamma \cos \beta_0 \cos \omega t) \end{aligned} \right| < \frac{c}{8f_c D} \quad (17)$$

其中 γ', β_0' 和 ω' 分别为 γ, β_0 和 ω 的估计值。假设目标的最大半径 D 为 1 m, $\gamma = 15^\circ, \beta_0 = 80^\circ, \omega = 2\pi$ rad/s 和 $f_c = 10$ GHz, 通过计算可得不等式右边为 0.215° 。图3分别给出了估计值 γ' 、平均视线角 $\pi/2 - \beta_0'$ 和 ω' 的归一化误差分别为 0.5% 和 1% 时, 姿态角的估计误差。由图可以看出, 当参数估计误差为 0.5%, 姿态角的误差基本上都满足式(17); 而当参数估计误差为 1% 时, 进动角和平均视线角所导致的姿态角误差满足式(17), 进动角速度估计误差所导致的姿态角误差则不满足要求, 可见本文方法成像结果主要受到进动角速度估计精度的制约。

5 成像实验

5.1 暗室数据验证

为验证本文方法在实际应用中的可行性, 采用暗室测量数据进行成像实验, 暗室目标如图4所示, 测量雷达载频 10 GHz, 扫频方式, 扫频间隔 20 MHz, 频域采样点数为 201。然后设定目标进动参数(γ, β_0 和 ω), 计算得到目标姿态角变化规律, 在每个相应姿态角下对目标进行观测, 得到成像原始数据。

假设 $\gamma = 15^\circ, \beta_0 = 80^\circ$ 和 $\omega = 2\pi$ rad/s, 观测时间为 2 s, 观测时间间隔为 0.05 s, 则对回波进行距离压缩后, 回波 1 维距离像序列在距离时间域的分布如图 5(a) 所示, 由于目标姿态角变化存在周期性, 由图 5(a) 可以明显看出 1 维距离像的变换也存在周期性。若直接利用 RD 算法对回波进行成像, 其结果

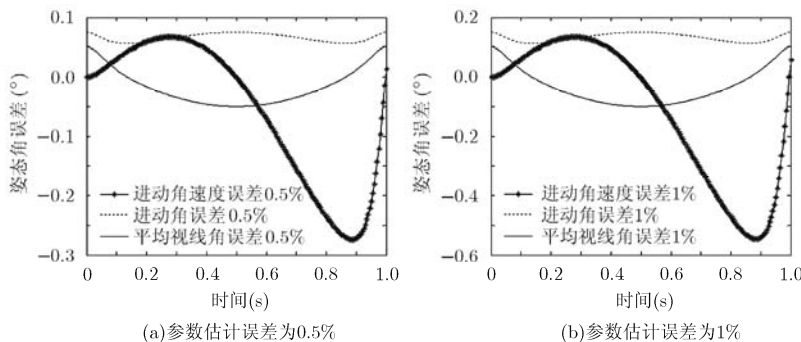


图3 进动参数存在误差时对姿态角估计的影响



图4 暗室测量目标示意图

如图5(b)所示，此时由于目标距离像周期变化导致散射点越距离单元走动，且走动的轨迹为圆圈状，使得目标距离向和方位向均散焦，从成像结果中无法得到目标散射中心位置信息。

采用本文方法对回波进行成像的结果如图6(a)所示，可以看出目标的散射中心主要分布在锥顶、锥面不连续处以及角顶。目标成像结果的径向距离与实际尺寸一致，需要指出的是，由于在进动过程中存在遮挡现象以及各散射中心的散射强度存在姿态敏感性的原因，目标另一边的散射中心在成像结果中幅值很小。为了比较算法的性能，在此对回波也进行了广义Radon变换的成像，结果如图6(b)所示，由于广义Radon变换只考虑了图像幅值而没有考虑相位的相干性，对曲线上的像素进行非相干累加造成了成像结果的旁瓣很高，无法识别图像中大多数散射中心的位置。

5.2 进动角速度存在误差时的成像实验

由上节分析结果可知，成像结果主要受到进动角速度估计精度的制约，因此本文也对进动角速度存在估计误差时的成像进行了实验，图7给出了进动角速度估计误差分别为0.5%和1%时的成像结果，其中估计误差为0.5%和1%分别对应的姿态角误差

满足和不满足误差要求的情况，为比较算法性能，引入图像对比度^[1]对成像结果进行衡量，得到图7(a)和图7(b)的对比度分别为4.0826和2.9882，而没有误差时的成像结果对比度为5.14，可见，当满足式(17)时，图像对比度下降到80%，从图7(a)可以分辨出散射中心的位置，而当估计误差为1%时，图像对比度下降到60%以下，成像结果出现了较大的模糊，散射中心位置的分辨存在困难。

6 结束语

本文以弹道中段锥体进动目标的宽带成像为背景，针对RD算法无法对进动目标成像这一缺陷，分析了旋转对称目标的回波模型与姿态角的关系，推导了进动锥体目标的姿态角变化规律，提出了一种基于后向投影变换的宽带成像新方法。该方法通过将进动目标回波模型等效成在某2维平面转动的目标回波模型，并采用后向投影的方法实现目标在该平面内的成像，分析了目标进动参数估计误差对本文成像方法的影响。利用暗室测量数据进行了实验验证。需要指出的是，本文方法只针对旋转对称目标进行成像，对于有翼目标的成像，还需要进一步的研究，这些问题将在后续工作深入分析。

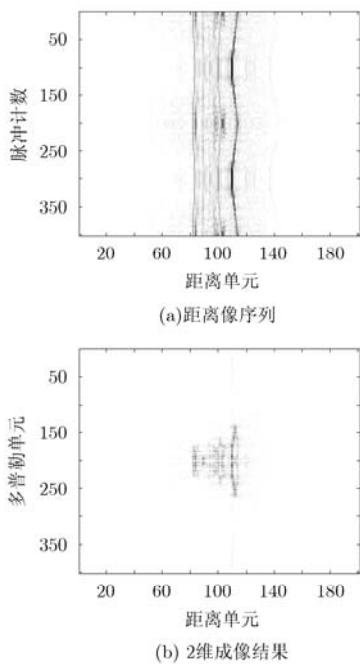


图 5 RD 成像

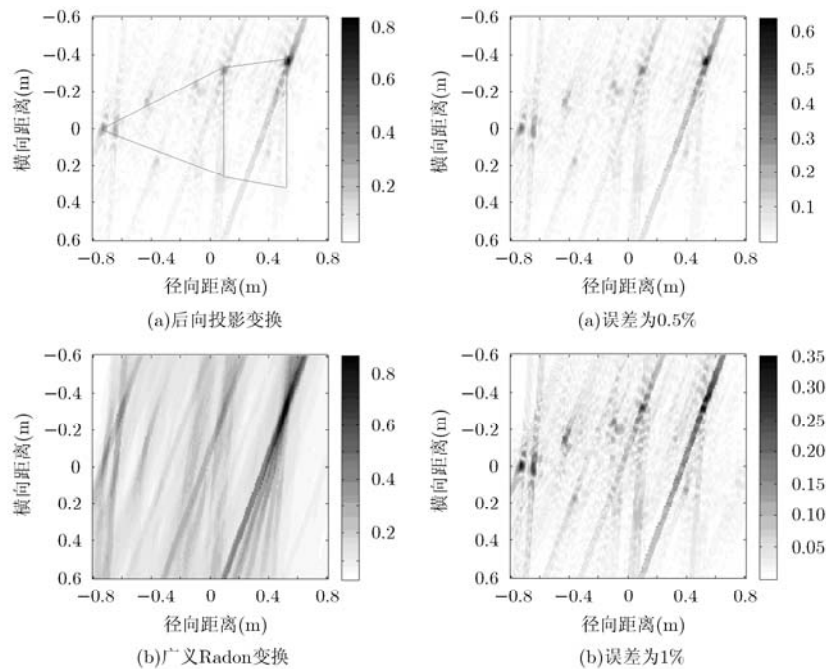


图 6 成像结果比较

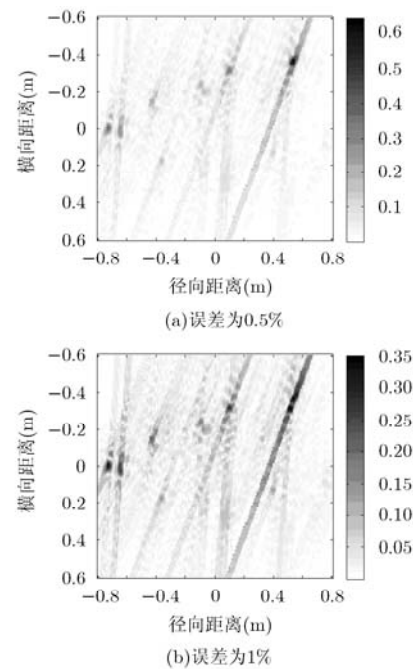


图 7 进动角速度存在误差时的成像结果

参 考 文 献

[1] 以光衡. 陀螺理论与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997: 117-122.
 [2] 张磊, 李亚超, 等. 基于时频特性的窄带高速自旋目标运动估

计及成像算法[J]. 中国科学F辑, 2010, 40(6): 863-875.
 Zhang Lei, Li Ya-chao, et al. Narrowband motion estimating and imaging method for rapidly spinning targets based on time-frequency characters[J]. Scientia Sinica Informationis,

- 2010, 40(6): 863-875.
- [3] Wang Q, Xing Mengdao, *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.
- [4] Bai X R, Xing M D, *et al.* High-resolution three-dimensional imaging of spinning space debris [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2352-2362.
- [5] 陈行勇, 黎湘, 等. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 643-646.
- Chen Hang-yong, Li Xiang, *et al.* Radar feature extraction of macro-precession ballistic missile warhead [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 643-646.
- [6] 胡杰民, 付耀文, 等. 空间锥体目标进动周期估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2849-2852.
- Hu Jie-min, Fu Yao-wen, *et al.* Precession cycle estimation of cone-shaped spatial target [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2849-2852.
- [7] 牛杰, 刘永祥, 等. 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, *et al.* 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.
- [8] Ding Xiao-feng, Fan Mei-mei, *et al.* Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets [J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(4): 941-947.
- [9] Chen V C, Fayin L, *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.
- [10] 黄培康, 殷红成, 等. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 230-237.
- [11] Martorella M, Haywood B, *et al.* Performance analysis of an ISAR contrast-based autofocusing algorithm using real data [C]. *Proceedings of the International Radar Conference, USA: IEEE Press*, 2003: 30-35.
- 胡杰民: 男, 1983年生, 讲师, 博士, 研究方向为空间目标识别、雷达成像。
- 占荣辉: 男, 1978年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达目标识别、雷达信息处理。
- 牛 威: 男, 1975年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为空间信息感知、空间目标识别等。
- 欧建平: 男, 1974年生, 副教授, 博士, 研究方向为空间信息处理、非线性信号处理等。