

# 基于 ISAR 像序列的弹道目标进动特征提取

金光虎<sup>1</sup>,高勋章<sup>1</sup>,黎 湘<sup>1</sup>,陈永光<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所, 湖南长沙 410073;  
2. 中国人民解放军 63880 部队, 河南洛阳 471003)

**摘 要:** 中段弹道目标进动特征是分辨弹头及诱饵的重要依据. 以二维 ISAR 图像序列为基础, 分析了弹道目标成像特点和目标姿态角的变化过程, 提出了基于图像配准的 ISAR 像姿态差估计方法; 采用等间隔配准避免了配准奇异, 根据姿态差二次方曲线实现了进动参数的估计, 给出了计算目标进动角、进动周期的具体步骤. 仿真结果表明, 该方法能够实现弹道目标进动特征提取, 估计精度较高.

**关键词:** 弹道目标; 进动; ISAR 像; 配准; 特征提取

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1233-06

## Precession Feature Extraction of Ballistic Targets Based on Dynamic ISAR Image Sequence

JIN Guang-hu<sup>1</sup>, GAO Xun-zhang<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, CHEN Yong-guang<sup>2</sup>

(1. Institute of Spatial Electronics Information Technology, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;  
2. Unit 63880, PLA, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** The precession parameters of ballistic targets are of great importance to warheads and decoys discrimination. Based on dynamic ISAR image sequence, this paper analyzes the specialties of scattering and ISAR imaging of spatial ballistic targets. The history of posture changing is deduced. And a method for posture difference evaluating based on image registration is proposed. Moreover, equal interval registration method is adopted to avoid singular registration. Precession parameters are extracted based on posture difference curve. And the extraction process is presented detailedly. Experimental results show that the posture difference can be estimated correctly and the precession parameter estimation has good precision.

**Key words:** ballistic target; precession; ISAR image; registration; feature extraction

### 1 引言

弹道导弹防御是国家领土安全的重要组成部分, 弹道目标在中段飞行过程中, 目标飞行平稳, 留给防御系统的反应时间相对充足, 被认为是攻防对抗的主要阶段. 为了增加突防能力, 弹道导弹通常在上升段末期释放诱饵, 诱饵在外形上与弹头相似, 通过涂敷诱饵表层等方式可以实现雷达散射截面积与弹头相仿, 导致了区分弹头及诱饵比较困难. 弹头采用自旋定向以保证一定的再入攻角, 释放过程中的横向扰动力会导致弹头产生进动, 重诱饵和弹头在外形和姿态运动上较为类似, 但是因为质量及质量分布的差异, 导致进动频率、进动角等运动参数上差异较大. 文献[1]研究了运动特性在区分弹头及诱饵上的有效性. 针对目标姿态运动特性反演问题, 以美国海军实验室为主的多个知名机构在这方面做了大量研究<sup>[2-4]</sup>, 根据窄带回波获得的 RCS 曲线或者

微多普勒谱提取了进动周期、进动角等特征.

本文研究了基于 ISAR 像序列的进动参数反演方法. 中段目标具有旋转对称结构, 自旋基本不会造成雷达回波的变化, ISAR 像的变化主要是由于目标平动和进动引起的, 忽略平动对目标姿态的微小影响, 进动导致了 ISAR 像周期转动. 本文推导了弹道目标姿态变化过程, 根据弹道目标 ISAR 像的特点提出了通过图像配准估计目标姿态差的方法, 采用等间隔配准获得了图像姿态差序列, 进而根据姿态差二次方曲线得到了进动周期及进动角. 仿真实验结果表明, 该方法稳定可靠, 估计精度较高.

### 2 弹道目标进动下的 ISAR 成像

#### 2.1 中段目标的散射分析

空间弹道目标是比较特殊的一类目标, 通常是旋转对称体, 即绕对称轴的旋转不改变目标外形. 根据凯勒

几何绕射理论的局部场原理,在高频极限情况下,绕射场只取决于绕射点附近很小的一个区域内的物理性质和几何性质,而和距离绕射点较远的物体的几何形状无关.理论计算和试验测量表明,在高频区,目标总的电磁散射可以认为是由某些局部位置上的电磁散射所合成的,这些局部性的散射通常被称为等效多散射中心<sup>[5]</sup>,每个散射中心相当于斯特拉顿-朱(Stratton-Chu)积分中的一个不连续处,从几何观点分析,就是一些曲率不连续处与表面不连续处.图1是典型的中段目标散射场示意图.

图中,散射场主要包括尖顶散射、锥面行波、曲面不连续处散射、柱面行波和角顶散射.这五类散射中,行波是散射较弱的一类,通常采用散射中心近似的时候可以忽略.锥顶散射、角顶散射、表面不连续处绕射等可以用相应位置的散射中心近似,在任意时刻得到的回波都可以表示为上述某些散射中心的回波合成.对于空间弹道目标而言,绕对称轴的旋转不会带来散射场的变化,其回波仅决定于对称轴和雷达视线的夹角(目标姿态角).在飞行过程中,复杂的姿态运动(自旋、进动等)会导致目标的三维转动,但是,雷达回波仍可以等效为某一平面内相同姿态角下的回波,ISAR 成像的结果会因为目标姿态不同而发生旋转,但是由于散射点模型不发生变化,图像中散射点相对位置不会有较大差异(不包括因为遮挡产生消隐的散射点).

## 2.2 弹道目标姿态运动分析

弹道目标进入中段后,将进入无动力飞行阶段,这一过程中目标的运动包括两部分:第一部分是弹道运动<sup>[6,7]</sup>,受初速度和万有引力的作用,目标以地球质心为焦点沿椭圆轨迹运动;第二部分是目标的姿态运动,为了保证弹头对地面物体的攻角,弹头通常采用自旋稳定方式飞行,从而避免在再入过程中大气的扰动导致攻角过大而引起威力减小或弹头失效等现象的发生.弹道目标起旋时不可避免地受到横向作用力的扰动,使得目标绕对称轴自旋的同时还绕着另一根轴旋转,这种运动被称为进动,其示意图如图2所示.中段飞

行高度较高,通常处于大气层外,空气阻力影响可以忽略,因此,该飞行阶段的进动是一种稳定的姿态运动.

根据文献[6],目标进动周期和进动角可以用下式表示:

$$\begin{cases} T = \frac{2\pi I_t}{\sqrt{Q^2 + (I_s \omega_s)^2}} \\ \theta = \arctan\left(\frac{Q}{I_s \omega_s}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $I_t$  为横向转动惯量,  $Q$  为横向干扰冲量矩,  $I_s$  为纵向转动惯量,  $\omega_s$  为自旋角速率.

从式(1)中可以看出,进动角、进动周期是物体的横向转动惯量和纵向转动惯量的反映.由于弹头及诱饵的质量及质量分布差异,导致转动惯量差异较大,通常情况下,弹头的质量集中在尾部,而诱饵质量分布较为均匀,且弹头的质量较重诱饵大许多,导致弹头的进动角较小,进动周期较小.综上所述,弹道中段,弹头和诱饵的姿态运动差异较大,主要体现在进动周期、进动角等运动参数上.提取中段弹道目标的运动特征将为防御系统区分弹头和诱饵提供重要依据,从而实现主动拦截和精确打击.

## 2.3 弹道目标 ISAR 像序列

弹道目标在中段飞行过程中,宽带雷达可以通过孔径合成方式得到目标的 ISAR 像序列,该 ISAR 像序列是随着目标的姿态运动发生变化的.根据前面的弹道目标散射场分析可以得知,散射点所在的成像平面实际上是在目标对称轴的切平面上,雷达回波决定于目标姿态角,ISAR 像对应了目标在成像时刻的姿态,因此,在目标进动过程中,ISAR 像会随着姿态运动发生转动.下面推导姿态角变化过程.

中段目标飞行过程中,目标绕进动轴的旋转是均匀的,以进动轴为  $x$  轴,在进动轴和雷达视线方向所成平面内逆时针转过  $90^\circ$  为  $y$  轴,根据右手定则建立  $z$  轴坐标,如图3所示.

设进动轴和雷达视线的夹角为  $\varphi$ ,则雷达视线在该坐标系中的坐标为:

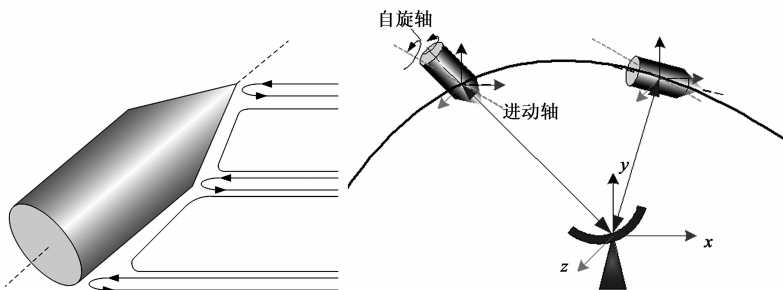


图1 典型弹道目标散射场

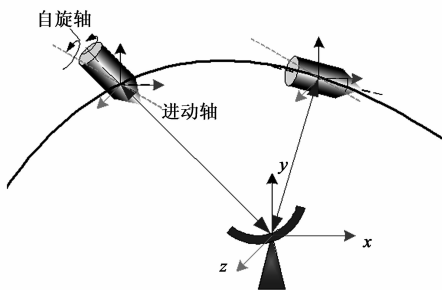


图2 典型弹道导弹运动场景

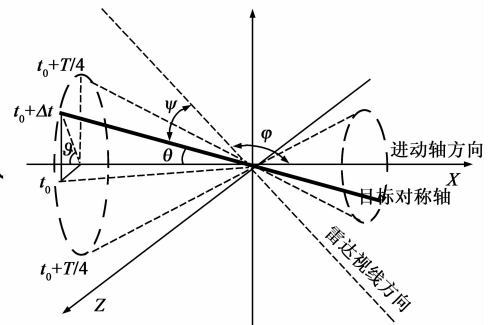


图3 进动下姿态角随时间变化关系

$$(x_s, y_s, z_s)^T = (-\cos\varphi \quad \sin\varphi \quad 0)^T \quad (2)$$

在  $t_0 + \Delta t$  时刻,目标绕进动轴转过角度  $\vartheta = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T}$ ,此时目标对称轴位置为:

$$(x_{t_0+\Delta t}, y_{t_0+\Delta t}, z_{t_0+\Delta t})^T = (-\cos\theta, \sin\theta\sin\vartheta, \sin\theta\cos\vartheta)^T \quad (3)$$

所以  $t_0 + \Delta t$  时刻对应的目标姿态角为

$$\begin{aligned} \psi &= \arccos \frac{(x_s, y_s, z_s) \cdot (x_{t_0+\Delta t}, y_{t_0+\Delta t}, z_{t_0+\Delta t})^T}{\|(x_s, y_s, z_s)\| \cdot \|(x_{t_0+\Delta t}, y_{t_0+\Delta t}, z_{t_0+\Delta t})\|} \\ &= \arccos \left[ \cos\varphi\cos\theta + \sin\varphi\sin\theta\sin\left(2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T}\right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

从上式中可以看出,目标姿态角成高度非线性变化,在小角度范围内仍然可以近似为线性变化,采用距离多普勒成像算法(或者距离-瞬时多普勒成像算法)得到目标 ISAR 像.不失一般性,本文以线性调频体制雷达为例,介绍采用距离多普勒算法对空间弹道目标成像.设目标上某一散射点与雷达距离为  $R_i$ ,那么解调后的雷达回波为:

$$\begin{aligned} S_i(\hat{t}, t_m) &= A \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T_p}\right) e^{-j\frac{4\pi}{c}[f_c + \gamma(\hat{t} - 2\frac{R_i}{c})]} (R_i - R_{ref}) e^{j\frac{4\pi\gamma}{c}(R_i - R_{ref})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\hat{t}$  为脉内采样时间,  $t_m$  为脉间采样时间,  $R_i$  为散射点与雷达距离,  $\gamma$  为调频率,  $R_{ref}$  为参考距离,  $c$  为光速.在  $\hat{t}$  域对信号做傅立叶变换,变换到一维距离像域,结果为:

$$s_{if}(f_i, t_m) = AT_p \sin\left[T_p(f_i + 2\frac{\gamma}{c}R_\Delta)\right] e^{-j\left(\frac{4\pi f_i}{c}R_\Delta + \frac{4\pi\gamma}{c^2}R_\Delta^2 + \frac{4\pi f_i}{c}R_\Delta\right)} \quad (6)$$

假设在二维平面上有一个散射点  $P$  坐标为  $(x, y)$ (相对于质心),成像时间  $[t_c - t_m/2, t_c + t_m/2]$  内,目标姿态角在  $\psi(t_c)$  附近摆动,目标转速近似为  $\omega(t_c)$ ,在成像积累时间内目标转过了角度  $\Delta\theta = \omega t_m$ ,该角度值是很小的,则散射点  $P$  在成像时间段内坐标可以近似为:

$$\begin{cases} x_{t_c} = x\cos\psi(t_c) - y\sin\psi(t_c) \\ y_{t_c} = x\sin\psi(t_c) + y\cos\psi(t_c) \end{cases} \quad (7)$$

散射点  $P$  在该段时间内任意时刻的  $R_\Delta(t)$  可以表示为:

$$\begin{aligned} R_\Delta(t) &= y\sin(\psi(t_c) + \omega t) + x\cos(\psi(t_c) + \omega t) \\ &= x_t\omega t + y_t \end{aligned} \quad (8)$$

将其代入式(6),并忽略式(6)中的剩余视频项(指数项中的第二和第三项),在成像积累时间内,共采得  $M$  个脉冲,脉冲重复周期为  $T_{prf}$ ,总的转角  $\theta$  为  $M\omega T_{prf}$ .利用  $M$  个脉冲做孔径合成,对  $t_m$  做傅立叶变换实现横向聚焦,可得  $t_c$  时刻的 ISAR 图像为:

$$s_{if}(f_i, f_m, t_c) = AT_p \text{sinc}\left[T_p(f_i + 2\frac{\gamma}{c}y_t)\right] \cdot \text{sinc}\left[MT_{prf}(f_m + \frac{2f_c}{c}x_t\omega)\right] e^{-j\frac{4f_i y_t}{c}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,在二维平面  $(f_i, f_m)$  内,峰值位置对应了  $t_c$  时刻目标位置,ISAR 图像反映了  $t_c$  时刻目标的姿态,其中纵向可以根据  $y_t = \frac{f_c}{2\gamma}$  进行定标,而横向位置和角速度是耦合的,得到角速度后方能对横向进行定标,通常角速度无法预知,空间目标 ISAR 像在横向上定标比较困难.图像的另一个特点是横向位置会随着角速度的正负发生镜像现象,即图像并不是总和  $t_c$  时刻的目标姿态完全对应,如果角速度为负值,那么 ISAR 图像将与目标的实际姿态以雷达视线为对称轴成镜像关系.

### 3 基于图像序列的进动参数反演

#### 3.1 基于图像配准的目标姿态差估计方法

目标的姿态运动导致成像时姿态角发生变化,雷达视线移动带来的姿态变化相比于进动带来的姿态变化可以忽略,目标 ISAR 像序列会因为进动的周期性而发生周期变化,这种周期变化导致了 ISAR 像的规律转动.如果能够得到 ISAR 图像之间对应的目标姿态差,那么通过进一步的计算,便可以得到进动角、进动周期.由前面的 ISAR 像序列分析可以得知,ISAR 像在横向上无法定标,图像之间的转角难以直接获得,利用弹道目标 ISAR 像中散射点相对位置不变化的特点,本文采用图像配准方法估计图像之间的旋转角度,从而得到目标成像时刻对应的姿态差序列.

实际上,由于目标 ISAR 像可以看作是目标在多个姿态下的投影,因其形体为旋转对称体,成像平面基本一致,那么两幅图像应大致相同,散射点相对位置不发生变化.由于成像时目标姿态不同,ISAR 图像之间存在旋转,孔径合成时利用的脉冲数不同和旋转角速度不同导致了两幅图像横向比例尺不一致.设已经得到目标的两幅 ISAR 像:图 A 和图 B,横向上分别以比例尺  $a_1, a_2$ (不一定正确)进行标定,如果以图 B 为基准,那么图 A 可以通过三个步骤映射到图 B:第一步是横向伸缩,伸缩因子是  $\alpha_1$ ,将图 A 变换到实际横向比例尺下;第二步是旋转变换,该步骤实现图像由图 A 对应姿态向图 B 对应姿态旋转,转动角度  $\theta$  为目标姿态差;第三步是再一次横向伸缩,伸缩因子为  $\alpha_2$ ,将图像从实际横向比例尺下变换到  $a_2$  比例尺下.三个变换过程可以用三个变换矩阵表示:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \alpha_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

在图像配准后,图  $A$  中散射点  $(x, y)^T$  映射到图  $B$  散射点中  $(x', y')^T$ ,其过程可以用下面的方程表示:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = M_3 M_2 M_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \cos\theta & -\alpha_2 \sin\theta \\ \alpha_1 \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (13)$$

图像配准有很多工程算法<sup>[7,8]</sup>(控制点配准、干线对配准等),可以借助 MATLAB 等数学工具得到配准矩阵  $M$ ,其结果为下面的一个  $2 \times 2$  的矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

在完全配准条件下,这个矩阵应该和矩阵  $M_3 M_2 M_1$  是相同的.从而可得方程组如式(15)所示:

$$\begin{cases} \alpha_1 \alpha_2 \cos\theta - m_{11} = 0 \\ \alpha_2 \sin\theta + m_{12} = 0 \\ \alpha_1 \sin\theta - m_{21} = 0 \\ \cos\theta - m_{22} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

该方程组有三个未知量,是一个超定方程组,在有解的情况下,其解是唯一的,而实际姿态差是方程的解,因而求解该方程组得到的姿态差必然是正确的.实际中,两幅图像不可能完全一样,图像配准也存在误差,上面的方程一般不等于 0,存在一个很小的误差值.为此,采用最小均方误差准则计算方程,最小均方误差为:

$$f = \|\alpha_1 \alpha_2 \cos\theta - m_{11}\|^2 + \|\alpha_2 \sin\theta + m_{12}\|^2 + \|\alpha_1 \sin\theta - m_{21}\|^2 + \|\cos\theta - m_{22}\|^2 \quad (16)$$

上式中是有三个未知量  $\alpha_1, \alpha_2, \theta$  的非线性二次方程,最小化  $f$  没有近似解析解.实际应用中,可以先通过方程组(15)中的第 2、3、4 方程得到三个未知量的一个估计值,设为初值,使用标准的最小二乘算法(如牛顿-泊松算法)通过迭代优化寻找最优的估计值.如果初始估计值接近真实值,算法将很快收敛,从而得到两幅图像姿态差  $\theta$ .

### 3.2 基于图像序列的进动参数提取

图像配准能够得到图像之间的姿态差,实际中这种配准是有条件的.如果两幅图像之间的姿态差过小,即两幅图像基本相似,几乎不存在旋转,那么这种配准将是奇异的,从而导致姿态差估计值变化剧烈,误差较大.为了能够正确估计出姿态差,应选择姿态差异较大的两幅 ISAR 像进行配准.本文采用等间隔配准方式,通过粗估计进动周期,选择间隔半周期的 ISAR 图像进行配准,从而有效解决配准奇异问题.

由前面的推导可知,目标姿态角呈高度非线性变

化,为了后面计算方便,需要对式(4)进行简化.令  $\sin(2\pi t/T_{pre}) = \tau$ ,式(4)可以表示为:

$$\psi(\tau) = a \cos(\cos\varphi \cos\theta + \tau \sin\varphi \sin\theta) \quad (17)$$

式中  $\cos\varphi \cos\theta + \tau \sin\varphi \sin\theta \in [\varphi - \theta, \varphi + \theta]$ .因为进动角通常较小, $\psi(\tau)$ 的波动范围较小,可以用线性方程近似.为了方便后面的进动周期及进动角的计算,使用根据两个端点求斜率和截距的方式对其进行近似,其斜率为

$$k = \frac{\psi(1) - \psi(-1)}{2} = \frac{(\varphi + \theta) - (\varphi - \theta)}{2} = \theta \quad (18)$$

截距为

$$a = \frac{\psi(1) + \psi(-1)}{2} = \frac{(\varphi + \theta) + (\varphi - \theta)}{2} = \varphi \quad (19)$$

因此,非线性方程(17)可以用下面线性方程近似:

$$\psi(\tau) = a + k\tau = \varphi - \theta\tau \quad (20)$$

这里没有使用泰勒展开,可以证明,泰勒展开远比该式复杂,会使进动特征的提取变得困难,本文采用该近似方法将使得进动特征提取容易许多.将  $\tau = \sin(2\pi t/T_{pre})$  回代可得:

$$\psi(t) = \varphi - \theta \sin(2\pi t/T_{pre}) \quad (21)$$

选择间隔  $\Delta\tau$  的  $A, B$  两幅图像进行配准,  $A$  图为  $t$  时刻成像结果,  $B$  图为  $t' = t + \Delta\tau$  时刻图像.考虑角速度为负值时和角速度为正值时图像镜像对角度估计的影响,采用图像配准时,如果配准矩阵第一个元素  $\alpha_1 \alpha_2 \cos\theta$  为负值,表明图像出现了镜像,对原图像做一次镜像,重新配准,从而得到目标姿态差(进动角较小,这种做法是合理的).由于无法知道是  $A$  图还是  $B$  图发生了镜像,因此姿态差值的正负符号是无法确知的,为了避免符号问题,采用 ISAR 像姿态差序列的二次方估计进动参数:

$$\begin{aligned} \Delta^2 \psi(t) &= [\psi(t + \Delta\tau) - \psi(t)]^2 \\ &= 2\theta^2 \sin^2 \frac{\pi\Delta T}{T_{pre}} + 2\theta^2 \sin^2 \frac{\pi\Delta T}{T_{pre}} \cos \frac{4\pi(t + \Delta T/2)}{T_{pre}} \end{aligned} \quad (22)$$

上式表明姿态差序列二次方曲线呈余弦变化,其周期为  $T_{pre}/2$ ,幅值为  $2\theta^2 \sin^2(\pi\Delta T/T_{pre})$ .通过傅立叶变换换频谱分析,可得姿态差序列二次方曲线的周期,即半进动周期  $T_{pre}/2$ ,从而得到进动周期  $T_{pre}$ .进一步采用  $y = a + a \cos((4\pi/T_{pre})t + \varphi_0)$  对姿态差二次方曲线做最小二乘拟合,得到幅值  $a$ ,根据幅值和进动角的关系可得进动角的估计值为:

$$\theta = \sqrt{a/(2\sin^2(\pi\Delta T/T_{pre}))} \quad (23)$$

### 3.3 基于图像序列估计进动参数的步骤

实际中基于图像序列的进动参数估计过程还需要一些其他方面的工作.本文基于图像序列的进动参数估计可以归纳为以下步骤:

(1)对进动目标成 ISAR 像,采用距离-瞬时多普勒方法得到目标的瞬时 ISAR 像序列  $Im_i, i = 1, 2, 3, \dots$ .

(2)对所有图像采用谱系聚类法聚类出强散射中心(为了提高准确度也可以通过手工选取,比较费时).

(3)设置距离门,根据图像间散射点位置移动关联强散射点.

(4)根据图像序列的运动大致估计进动周期  $T_{aux}$ ,并令  $\Delta\tau = T_{aux}/2$ .

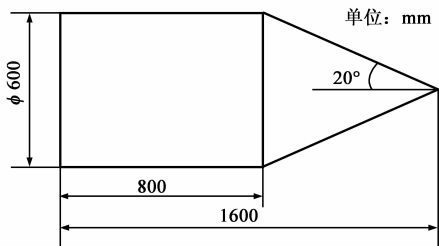
(5)采用控制点仿射变换法配准  $t$  时刻和  $t + \Delta\tau$  的图像,得到姿态差序列  $\Delta\psi(t)$ .

(6)计算姿态差序列二次方  $\Delta^2\psi(t)$ ,并通过傅立叶变换得到频谱最大值点,提取进动周期.

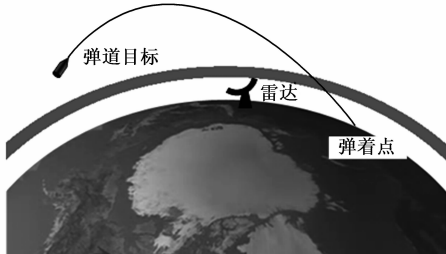
(7)采用  $y = a + a\cos(\frac{4\pi}{T_{pre}}t + \varphi_0)$  拟合,剔除粗大误差后重新拟合得到拟合参数  $a$ ,根据式(23)得到进动角.

## 4 实验及结果

这里采用图 4(a)所示仿真弹头目标对本文算法进行验证,目标外形尺寸及飞行场景如图 4(b)所示.以地心为原点,以弹道平面为  $xy$  平面建立地心惯性坐标系,雷达在该坐标系中的坐标为  $(356 \times 10^3, 6350 \times 10^3, 19 \times 10^3)$  m,关机点坐标为  $(-1850 \times 10^3, 6440 \times 10^3, 0)$  m,关机点速度  $(4 \times 10^3, 4 \times 10^3, 0)$  m/s,目标共飞行 13 分 40 秒,从关机点开始到弹着点飞行距离为 3911km.设弹头的纵向转动惯量为  $116\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ,横向转动惯量为  $503.5\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ,弹头自旋频率为 3Hz,代入公式计算可得进动周期为 4s,进动角为  $10.0^\circ$ ,雷达带宽 1GHz,中心频率 9GHz,脉冲重复频率 500Hz.



(a) 目标外形尺寸图

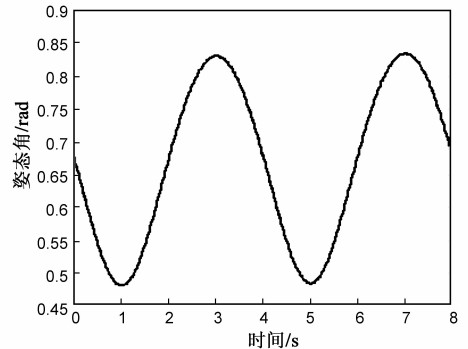


(b) 飞行场景示意图

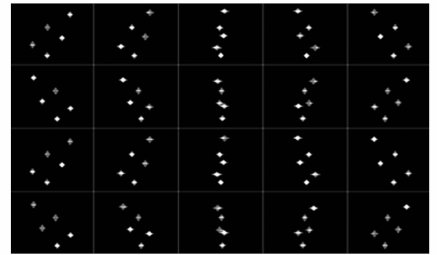
图4 目标外形尺寸图及空间飞行场景示意图

目标的姿态角变化曲线如图 5(a)所示,每间隔 10 个脉冲为脉冲起始位置,并用 100 个脉冲进行孔径合成,

得到 ISAR 像序列,ISAR 图像成像时间间隔为 0.02s,图 5(b)是从中间隔 0.4s 抽取一幅得到的 ISAR 像序列,图像没有经过标定.从图像上可以看出,由于姿态角的变化,目标的 ISAR 图像发生规律转动,转动角速度的大小变化导致图像的横向标尺发生变化,图像中散射点的密集程度随角速度而改变,同时,角速度的正负变化导致了图像中目标的倾斜方向发生改变,随着角速度从负值变为正值,图像中目标从偏左变为偏右,图像发生了镜像.在未标定的情况下,由于横向伸缩,图像变形严重,难以估计图像对应的目标姿态差.



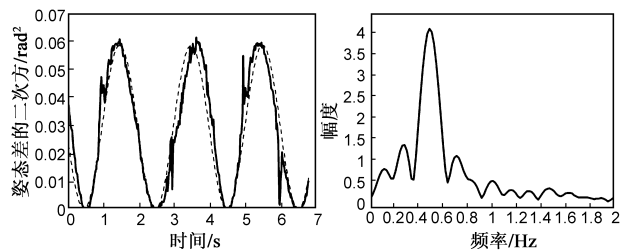
(a) 目标姿态角序列



(b) ISAR像序列

图5 目标姿态角序列及ISAR像序列

采用本文算法进行估计.首先,从图 5(b)中可以大致估计进动周期为 4s 左右.取  $T_{aux} = 4\text{s}$ ,采用间隔 2s 的两幅图像进行配准得到图像转角,并计算对应的目标姿态差二次方曲线  $\Delta^2\psi(t)$ ,如图 6(a)中实线所示,曲线拟合结果如图 6(a)中虚线所示,傅立叶变换得到其频谱如图 6(b)所示.



(a) 姿态差二次方曲线

(b) 姿态差二次方曲线的频谱

图6 姿态差二次方曲线及其频谱

根据频谱图上峰值位置可得姿态差二次方曲线的周期为 2.0149s,从而得到进动周期估计值为 4.0298s,误差为 0.75%,进一步根据拟合后曲线幅度可得进动

角估计值为  $9.8567^\circ$ , 估计误差为  $1.43\%$ .

表 1 不同参数和信噪比下反演结果

进动参数 数值	不同信噪比参数估计值的偏差 $\Delta T, \Delta\theta$				
	SNR = 25	SNR = 20	SNR = 15	SNR = 10	SNR = 5
$T = 3s$ $\theta = 6^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 0.29^\circ$	$\Delta T = 0.02s$ $\Delta\theta = 0.34^\circ$	$\Delta T = 0.11s$ $\Delta\theta = 0.23^\circ$	$\Delta T = 0.14s$ $\Delta\theta = 0.49^\circ$	$\Delta T = 0.08s$ $\Delta\theta = 1.57^\circ$
$T = 4s$ $\theta = 6^\circ$	$\Delta T = 0.01s$ $\Delta\theta = 0.24^\circ$	$\Delta T = 0.07s$ $\Delta\theta = 0.35^\circ$	$\Delta T = 0.05s$ $\Delta\theta = 0.46^\circ$	$\Delta T = 0.15s$ $\Delta\theta = 0.77^\circ$	$\Delta T = 0.19s$ $\Delta\theta = 0.95^\circ$
$T = 4s$ $\theta = 8^\circ$	$\Delta T = 0.02s$ $\Delta\theta = 0.33^\circ$	$\Delta T = 0.04s$ $\Delta\theta = 0.40^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 0.32^\circ$	$\Delta T = 0.17s$ $\Delta\theta = 0.29^\circ$	$\Delta T = 0.10s$ $\Delta\theta = 0.49^\circ$
$T = 5s$ $\theta = 10^\circ$	$\Delta T = 0.01s$ $\Delta\theta = 0.15^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 0.33^\circ$	$\Delta T = 0.06s$ $\Delta\theta = 0.27^\circ$	$\Delta T = 0.06s$ $\Delta\theta = 0.10^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 1.33^\circ$
$T = 6s$ $\theta = 12^\circ$	$\Delta T = 0.05s$ $\Delta\theta = 0.13^\circ$	$\Delta T = 0.02s$ $\Delta\theta = 0.30^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 0.10^\circ$	$\Delta T = 0.03s$ $\Delta\theta = 0.36^\circ$	$\Delta T = 0.01s$ $\Delta\theta = 1.23^\circ$

为了进一步验证算法性能,表 1 给出不同进动参数情况下和不同信噪比下的反演结果.

从表 1 中可以看出,进动周期的估计精度是很高的,通常误差在  $1\%$  之下.进动角的估计精度会随着进动角的减小而降低,这是因为在图像配准中,角度差越大,配准精度越高,姿态角序列估计也更为准确.另外,由于二维图像本身对信噪比敏感度较低,使得本文算法受信噪比影响较小,在信噪比  $10\text{dB}$  的情况下估计结果仍然较好,在信噪比为  $5\text{dB}$  的时候,进动角估计误差上升较明显.

## 5 结论

空间弹道目标 ISAR 像提供了弹道目标的二维图像,该图像反映了散射点的分布情况,利用二维图像序列反演进动参数是空间弹道目标防御的重要组成部分.在不同姿态角下其 ISAR 像具有很大的相似性,散射点相对位置基本不变,但是,由于横向位置和角速度的耦合,图像标定和目标姿态差序列估计比较困难.本文将图像配准方法用于 ISAR 图像定标和转角估计,同时解决了这两个难题,进而根据姿态差二次方曲线估计出了目标的进动角和进动周期,从而实现了基于 ISAR 像序列的中段弹道目标进动特性反演.仿真实验表明,该方法准确、可靠,参数反演精度较高.

## 参考文献:

- [1] Dieter Mehrholz. Radar techniques for the characterization of meter-sized object in space[J]. Adv Space Res, 2001, 28(9): 1259 - 1268.
- [2] Chen V C, Fayin Li, Harry-shyang Ho, 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.
- [3] 庄钊文,刘永祥,黎湘.目标微动特性研究进展[J].电子学报,2007,35(3),520 - 525.

ZHUANG Zhao-wen, LIU Yong-xiang, LI Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3), 520 - 525. (in Chinese)

- [4] 陈行勇.微动目标雷达特征提取技术研究[D].长沙:国防科技大学,2006.131 - 138.
- CHEN Hang-yong. Research on Radar Signature Extraction from Target with Micro-motions[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 131 - 138. (in Chinese)
- [5] 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,2006.230 - 237.
- [6] 金文彬,刘永祥,任双桥,等.锥体目标空间进动特性分析及其参数提取[J].宇航学报,2004,25(4):408 - 410.
- JIN Wen-bin, LIU Yong-xiang, REN Shuang-qiao, et al. character analyzing of spatial precession for cone and its parameter extracting[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(4): 408 - 410. (in Chinese)
- [7] 韦燕凤,赵志明,闫冬梅,等.基于特征的遥感图像自动配准算法[J].电子学报,2005,33(1):162 - 165.
- WEI Yan-feng, ZHAO Zhong-ming, YAN Dong-mei, et al. remote sensing image automatic registration based on feature[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 162 - 165. (in Chinese)
- [8] H Li, B S Manjunath, S K Mitra. A contour-based approach to multi-sensor image registration[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1995, 4(3): 320 - 334.

## 作者简介:



金光虎 男,1980 年生于安徽霍邱,现为国防科技大学信息与通信工程专业博士研究生,研究方向为雷达成像、自动目标识别.联系地址:湖南省长沙市国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所.  
E-mail: kingnudt@163.com



高勋章 男,1972 年生于湖北监利,现为国防科技大学副教授,2004 年获国防科技大学信息与通信专业工学博士学位,研究方向为自动目标识别、雷达信号处理.  
E-mail: gaoxunzhang@126.com

黎湘 男,1967 年生于湖南浏阳,现为国防科技大学教授,博士生导师,1998 年获国防科技大学信息与通信专业工学博士学位,中国电子学会高级会员.研究方向为空间信息处理、自动目标识别及智能信号处理.

陈永光 男,1956 年生于安徽合肥,总工程师,研究员,博士生导师,享受政府特殊津贴,1995 年获国防科技大学信息与通信专业工学博士学位,研究方向为电子战系统实验理论与技术.

