

基于图像配准的弹道目标 ISAR 图像横向定标

金光虎¹, 高勋章¹, 黎 湘¹, 陈永光²

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)图像横向定标是估计目标外形尺寸的关键。针对弹道目标,从理论上证明了任意两幅 ISAR 图像仅当横向正确定标的情况下才能完全配准。基于这一原理,提出了一种新的基于控制点仿射变换的 ISAR 图像横向定标方法,给出了横向比例尺的计算过程。最后采用测量数据对算法进行了验证,仿真实验结果表明,该算法能够准确估计横向比例尺,定标精度较高。

关键词: ISAR 像; 横向定标; 图像配准; 仿射变换

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2010.12.16

ISAR image cross scaling method for ballistic target based on image registration

JIN Guang-hu¹, GAO Xun-zhang¹, LI Xiang¹, CHEN Yong-guang²

(1. School of Electronics Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 63880 of the PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The inverse synthetic aperture radar (ISAR) image cross scaling is the key technique for extracting the dimension and shape of radar targets. For ballistic targets, the paper verifies that the ISAR image can be registered only when the cross range is right scaled. Based on this conclusion, a new ISAR image scaling method based on affine transform is presented. The cross ratio is evaluated based on the registration matrix. The experiment result shows the algorithm has a good performance.

Keywords: ISAR image; cross scaling; registration; affine transform

0 引 言

逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)图像^[1-2]横向定标是提取目标外形、尺寸特征的关键技术,定标算法性能直接影响特征提取的精度,从而影响目标识别的准确度。横向定标的任务是确定 ISAR 图像横向像素单元间的距离,即横向比例尺,横向比例尺决定于成像时间内的目标转速。ISAR 成像是一种小角度成像,通常情况下转动速度只有数十个毫弧度每秒,成像积累角一般不会超过 10° ,实际中很难准确估计。

目前,ISAR 图像定标方法研究多针对均匀旋转目标,通过估计成像积累角间接确定横向比例尺。文献[3]提出了通过运动轨迹拟合估计成像积累角的方法,适用于仅存在平移运动的目标;文献[4-5]提出了通过估计距离像序列距离单元内信号调频率间接估计成像积累角的方法;文献[6]提出了通过三次相位信号参数估计成像积累角的方法;文献[7]提出了通过层析成像质量估计的方法,该方法利用了最佳成像质量对应了成像积累角的最优估计值的特点进行估计。

弹道目标是运动较为复杂的一类空间目标,除平移运动外还存在三维姿态旋转,且目标的姿态变化是高度非均匀的^[8-9],文献[3-7]提出的 ISAR 图像定标算法不能应用于此类目标。针对该类目标,本文提出了一种基于图像配准的 ISAR 图像横向定标方法,通过分析弹道目标外形及散射特性可以发现,ISAR 图像中散射中心相对位置不会因为目标的三维转动而发生改变,结合纵向比例尺已知的特点,任意两幅 ISAR 图像能够通过变换横向比例尺和旋转角度进行配准,理论推导证明了当且仅当横向比例尺与实际比例尺相同的情况下,两幅图像才能完全配准。基于这一结论,本文采用控制点仿射变换得到了仿射变换矩阵,根据仿射变换矩阵和横向比例尺的关系提出了横向比例尺求解方法。实验表明,本文的 ISAR 图像定标算法能够准确估计横向比例尺,定标精度较高。

1 ISAR 图像定标原理

距离多普勒成像算法是最为常用的 ISAR 成像算法,横向距离和多普勒成正比关系,定标的关键是确定横向比

例尺,下面以线性调频(linear frequency moderation, LFM)体制雷达的 ISAR 成像过程为例,简要介绍定标原理。

典型的 ISAR 成像场景如图 1 所示,宽带成像雷达通常工作在 LFM 体制下,带宽为 B ,脉冲重复频率为 prf , m 为脉冲序数,用散射中心模型近似,目标由 K 个散射中心构成,目标沿速度 \mathbf{V} 方向飞行,在速度方向和雷达视线方向构成的平面内建立两个直角坐标系。一个是目标本体坐标系,如图 1 中 xy 坐标系所示,坐标原点为目标质心, xy 平面为雷达视线和运动方向构成的平面;另一个是以目标质心为原点的雷达坐标系,如图 1 中 uv 坐标系所示, v 轴为雷达视线方向。为了后续的推导和计算方便,假设在 $t_m=0$ 时刻,本体坐标系和雷达坐标系重合。由于目标的运动和雷达视线的变化,在 $t_m \neq 0$ 时, xy 坐标系和 uv 坐标系之间存在一个很小的转角,记为 θ_m 。

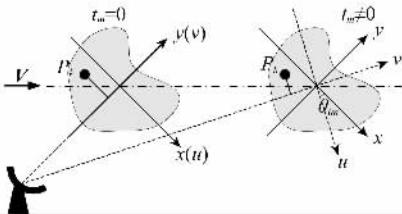


图 1 ISAR 成像场景示意图

根据文献[10],距离向压缩后得到高分辨距离像(high resolution range profile, HRRP)为

$$S_r(f_r, t_m) = \sum_{k=1}^K \left\{ A_k T_p \operatorname{sinc} T_p \left[f_r + \gamma \frac{2\Delta R_k(t_m)}{c} \right] \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{2f_r}{c} \Delta R_k(t_m) + \frac{2\gamma}{c} \Delta R_k^2(t_m) + \frac{2f_r}{c} \Delta R_k(t_m) \right)} \right\} \quad (1)$$

式中, A_k 是第 k 个散射点的散射强度; T_p 为脉冲宽度; γ 是调频率; c 为光速; $\Delta R_k(t_m)$ 为散射点 k 与雷达的实际距离和参考距离之差。

从式(1)中可以看出,一维距离像在 $f_i = -2 \frac{\gamma}{c} R_\Delta$ 处出现了尖峰脉冲。如果解调后信号以 f_s 采样频率进行采样,则采样点数为 $N = T_p f_s$,做 N' 点快速傅里叶(fast Fourier transform, FFT),则频率采样间隔为 $\Delta f = f_s / N'$,所以距离像域两点之间距离(纵向比例尺)为

$$\sigma_r = \frac{f_s}{N'} \cdot \frac{c}{2\gamma} = \frac{N}{N'} \frac{c}{2B} \quad (2)$$

进一步利用孔径合成技术对多个连续脉冲进行综合,脉冲综合时间为 $\left[-\frac{T_m}{2}, \frac{T_m}{2} \right]$ 。在脉冲综合时间内,仅考虑目标姿态的变换,目标运动可以等效为围绕参考中心的转动。如果目标匀速运动,远场条件下目标的转动可近似为均匀转动,设转动速度为 ω ,则任意时刻散射点 k 在雷达视线上的投影位置与参考中心的距离为

$$\Delta R_k(t_m) = x \sin \theta_m + y \cos \theta_m \quad (3)$$

将 $\theta_m = \omega t_m$ 带入式(3),并采用一阶近似可得

$$\Delta R_k(t_m) = x \omega t_m + y \quad (4)$$

将其带入式(1),并忽略 $x \omega t_m$ 对 sinc 包络的影响,补偿式(1)中的剩余视频项(第二和第三项指数项),在 t_m 域做傅里叶变换实现横向压缩,可得

$$s_{if}(f_i, f_m) = \sum_{k=1}^K \left\{ A_k T_p \sin \left[T_p \left(f_i + 2 \frac{\gamma}{c} y \right) \right] \operatorname{sinc} \left[MT_{prf} \left(f_m + \frac{2f_c}{c} \omega x \right) \right] e^{-j \frac{4f_c y}{c}} \right\} \quad (5)$$

在二维平面中,强散射中心在 (f_i, f_m) 域相应位置上出现了尖峰脉冲,实现了二维分辨,用图像表示,式(5)即为目标的 ISAR 图像。设在脉冲综合时间内共采得 M 个脉冲,横向压缩时做 M' 点 FFT,横向比例尺可表示为

$$\sigma_c = \frac{c \Delta f_m}{2 f_c \omega} = \frac{c f_{prf} M / M'}{2 f_c \omega} = \frac{1}{M'} \frac{\lambda}{2 \omega \cdot T_{prf}} \quad (6)$$

均匀转动下,成像积累角 $\theta = \omega T_m$,式(6)等效为

$$\sigma_c = \frac{M}{M'} \frac{\lambda}{2 \theta} \quad (7)$$

上述成像算法是典型的距离多普勒成像算法,如果目标转动非均匀,得到的 ISAR 图像将会变得模糊。通常的做法是横向压缩时采用短时傅里叶变换等时频变换代替 FFT,从而得到瞬时 ISAR 像[11-17]。显然,此时横向比例尺决定于瞬时转动速度。对于非合作目标,成像积累角或转动角速度无法预知,由于成像积累角较小,实际回波中还存在杂波、噪声,积累角及转动速度估计精度较低。

2 弹道目标 ISAR 图像横向定标

2.1 空间弹道目标 ISAR 成像的特点分析

空间弹道目标是比较特殊的一类空间目标,与航天飞机、空间站、卫星等空间目标不同,该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。在雷达的照射下,散射场不会因为目标绕对称轴的旋转而发生改变,根据凯勒几何绕射理论的局部场原理,弹道目标的散射场可以采用散射中心模型近似。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[18]。每个散射中心相当于斯特拉顿-朱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。对于弹道目标而言,强散射中心位于过对称轴的横切面上,散射中心位于该切面的不连续处,典型的中段目标外形及散射中心模型如图 2 所示。

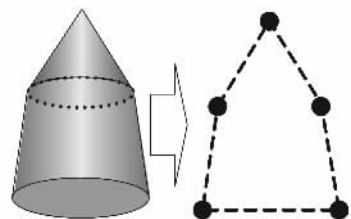


图 2 典型弹道目标外形及散射中心模型

由于散射中心始终位于过对称轴的横切面上,根据 ISAR 成像理论,任意姿态下弹道目标 ISAR 图像都可以看作是散射中心过对称轴的横切面上的二维分布。由于散射点与该平面上的不连续处位置相对应,在不同的 ISAR 图像中,散射中心相对位置不会发生变化。因此,该类目标 ISAR 图像能够配准,由于成像时间段内目标姿态的差异,ISAR 图像中目标姿态会存在一定角度的旋转。

与普通空间目标相比,该类目标的另一个特点是运动较为复杂。弹道目标为了保持一定的攻角,通常采用自旋

定向。由于受到横向扰动的影响,目标同时绕另一轴旋转,这种运动被称为进动,其示意图如图 3 所示^[11]。由于弹道目标的旋转对称特性,雷达回波仅受目标对称轴和雷达视线夹角这一个自由度变化的影响,这种复杂的三维转动可以等效为单自由度转动,其转动角度是高度非线性变化的。为了得到清晰的 ISAR 图像,通常采用距离瞬时多普勒成像算法,该算法得到的 ISAR 图像横向比例尺决定于瞬时转动角速度,文献[3-7]提出的通过估计成像积累角实现横向定标的方法显然不能应用于此类目标。

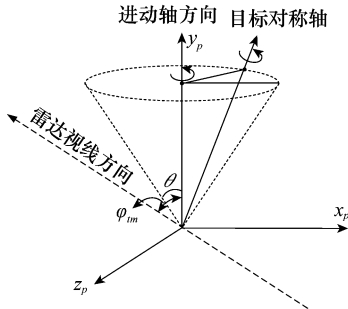


图 3 弹道目标进动示意图

2.2 基于图像配准的弹道目标 ISAR 图像定标原理

对于 ISAR 图像,由式(2)可知纵向比例尺是已知量,横向比例尺因转动角速度不同而不同。设 $f(x, y)$ 是按正确比例尺标定的空间弹道目标 ISAR 图像, A 图 $g(x, y)$ 和 B 图 $h(x, y)$ 是观测得到的两幅 ISAR 图像。由于成像数据

时间段对应的目标姿态不同,图 A 和图 B 与实际图像 $f(x, y)$ 之间存在一定角度的旋转,转角分别为 θ_1, θ_2 。如果横向上不存在标定误差,则图 A 和图 B 可以表示为

$$\begin{cases} g(x, y) = f(x \cos \theta_1 - y \sin \theta_1, y \cos \theta_1 + x \sin \theta_1) \\ h(x, y) = f(x \cos \theta_2 - y \sin \theta_2, y \cos \theta_2 + x \sin \theta_2) \end{cases} \quad (8)$$

由于转动角速度未知,横向比例尺大小与实际大小存在一定误差,记存在标定误差的图像分别为 A' 和 B', 设 A' 图的横向比例尺与实际横向比例尺的比值为 a_1 , 图 B' 的横向比例尺与实际横向比例尺的比值为 a_2 , 图像 A' 和图像 B' 可以表示为

$$\begin{cases} g(x, y) = f(a_1(x \cos \theta_1 - y \sin \theta_1), y \cos \theta_1 + x \sin \theta_1) \\ h(x, y) = f(a_2(x \cos \theta_2 - y \sin \theta_2), y \cos \theta_2 + x \sin \theta_2) \end{cases} \quad (9)$$

对于 ISAR 图像配准而言,图像配准的目的是使得两幅图像中同一散射点的位置达到一致。根据 ISAR 图像之间的相对关系,分别对图 A' 和图 B' 做横向伸缩和旋转变换。显然,如果变换到实际比例尺下,图像能够经过旋转进行配准。如果能够证明只有在变换到实际比例尺下图像才能配准,那么根据横向伸缩因子标定图像就是可行的,下面给出简要证明。

设对图 A' 和图 B' 进行横向伸缩的因子为 $b_1, b_2 (b_1 > 0, b_2 > 0)$, 旋转角度分别为 γ_1, γ_2 , 得到图 A' 表达式 $p(x, y)$ 和图 B' 表达式 $q(x, y)$ 为

$$\begin{cases} p(x, y) = f(a_1 b_1 (x \cos \gamma_1 - y \sin \gamma_1) \cos \theta_1 - (y \cos \gamma_1 + x \sin \gamma_1) \sin \theta_1, \\ \quad (y \cos \gamma_1 + x \sin \gamma_1) \cos \theta_1 + a_1 b_1 (x \cos \gamma_1 - y \sin \gamma_1) \sin \theta_1) \\ q(x, y) = f(a_2 b_2 (x \cos \gamma_2 - y \sin \gamma_2) \cos \theta_2 - (y \cos \gamma_2 + x \sin \gamma_2) \sin \theta_2, \\ \quad (y \cos \gamma_2 + x \sin \gamma_2) \cos \theta_2 + a_2 b_2 (x \cos \gamma_2 - y \sin \gamma_2) \sin \theta_2) \end{cases} \quad (10)$$

配准后任意散射中心的位置应该是一样的,因此必须满足

$$\begin{cases} a_1 b_1 (x \cos \gamma_1 - y \sin \gamma_1) \cos \theta_1 - (y \cos \gamma_1 + x \sin \gamma_1) \sin \theta_1 = \\ \quad a_2 b_2 (x \cos \gamma_2 - y \sin \gamma_2) \cos \theta_2 - (y \cos \gamma_2 + x \sin \gamma_2) \sin \theta_2 \\ (y \cos \gamma_1 + x \sin \gamma_1) \cos \theta_1 + a_1 b_1 (x \cos \gamma_1 - y \sin \gamma_1) \sin \theta_1 = \\ \quad (y \cos \gamma_2 + x \sin \gamma_2) \cos \theta_2 + a_2 b_2 (x \cos \gamma_2 - y \sin \gamma_2) \sin \theta_2 \end{cases} \quad (11)$$

对于任意散射中心上式均能成立的条件是

$$\begin{cases} a_1 b_1 \cos \gamma_1 \cos \theta_1 - \sin \gamma_1 \sin \theta_1 = a_2 b_2 \cos \gamma_2 \cos \theta_2 - \sin \gamma_2 \sin \theta_2 \\ \cos \gamma_1 \sin \theta_1 + a_1 b_1 \sin \gamma_1 \cos \theta_1 = \cos \gamma_2 \sin \theta_2 + a_2 b_2 \sin \gamma_2 \cos \theta_2 \\ \sin \gamma_1 \cos \theta_1 + a_1 b_1 \cos \gamma_1 \sin \theta_1 = \sin \gamma_2 \cos \theta_2 + a_2 b_2 \cos \gamma_2 \sin \theta_2 \\ \cos \gamma_1 \cos \theta_1 - a_1 b_1 \sin \gamma_1 \sin \theta_1 = \cos \gamma_2 \cos \theta_2 - a_2 b_2 \sin \gamma_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (12)$$

联立求解,满足上述方程组的唯一解为

$$\begin{cases} b_1 = \frac{1}{a_1} \\ b_2 = \frac{1}{a_2} \end{cases} \quad (13)$$

利用该结果对图 A' 和 B' 进行横向伸缩,则伸缩后的图像可以分别表示为

$$\begin{cases} g'(x, y) = f(x \cos \theta_1 - y \sin \theta_1, y \cos \theta_1 + x \sin \theta_1) \\ h'(x, y) = f(x \cos \theta_2 - y \sin \theta_2, y \cos \theta_2 + x \sin \theta_2) \end{cases} \quad (14)$$

对比式(8)和式(14)可以看出,利用图像配准得到的横

向伸缩因子进行定标,两幅图像还原为实际比例尺下 ISAR 图像,该结果从理论上说明根据两幅 ISAR 图像配准实现横向定标是可行的。

2.3 基于仿射变换的 ISAR 图像横向比例尺估计

从第 2.2 节的定标过程可以看出,基于图像配准定标图像的关键是获得配准过程中的两个横向伸缩因子 b_1, b_2 , 配准过程涉及四个参量 $b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2$ 的搜索,计算量较大。为了简化计算,本文提出了通过控制点仿射变换计算伸缩因子的方法,通过分析可以发现,对于定标不正确的两幅 ISAR 图像 A' 和 B' 存在一定的关系,以图 B' 为基准,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 α_1 , 该步骤实现图 A' 向实际比例尺图像 A 的变换; 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, 转动角度为 $\theta = \theta_2 - \theta_1$; 第三步是再一次横向伸缩, 伸缩因子为 α_2 , 该步骤实现实际比例尺图像 B 向错误定标的图像 B' 的变换。这三个过程可以用三个变换矩阵表示为

$$M_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \alpha_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

在图像配准后, A' 图中散射点位置 $(x, y)^T$ 映射到 B' 图中 $(x', y')^T$, 其过程可以表示为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = M_3 M_2 M_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \cos \theta & -\alpha_2 \sin \theta \\ \alpha_1 \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (18)$$

式(18)变换过程是典型的仿射变换, 其关键是获得变换矩阵 $M_1 M_2 M_3$ 。仿射变换的实现方法较多^[19-20], 结合 ISAR 图像通常表现为一些强散射中心的特点。本文采用基于控制点的仿射变换实现这一图像配准, 其中控制点为强散射中心, 从而得到配准矩阵 M , 其结果为式(19)所示的一个 2×2 矩阵

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

该矩阵应该和 $M_3 M_2 M_1$ 是相同的, 定义定标方程组, 其方程式为

$$\begin{cases} \alpha_1 \alpha_2 \cos \theta - m_{11} = 0 \\ \alpha_2 \sin \theta + m_{12} = 0 \\ \alpha_1 \sin \theta - m_{21} = 0 \\ \cos \theta - m_{22} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

通过求解该方程组, 将得到定标参数 α_1, α_2 。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, 采用最小误差准则计算下式。

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

式(21)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, 可以先通过式(20)中的第 2, 3, 4 方程得到三个未知量的一个初值, 使用最小二乘算法(如牛顿-泊松算法^[21])通过多次迭代优化该估计值, 从而得到方程的最优解。因为初值接近真实值, 算法将很快收敛。

设图 A' 横向比例尺为 σ_1 , 图 B' 横向比例尺为 σ_2 , 经过配准定标后的横向比例尺 σ_1', σ_2' 为

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sigma_1 \times \alpha_1 \\ \sigma_2' = \sigma_2 / \alpha_2 \end{cases} \quad (22)$$

3 实验与结果

结合仿真弹道, 本文采用 Radbase 计算数据进行了实验, 对上述算法进行验证。目标飞行场景如图 4(a) 所示, 目标的外形如图 4(b) 所示。宽带成像雷达带宽 1 GHz, 中心

频率 10 GHz, 脉宽 100 μ s, 采样率 1 MHz, 目标进动周期 5 s, 进动角 10°, 频率采样间隔为 5 MHz, 采样点数 200 个, 实验中每一次雷达脉冲对应的目标姿态可以精确计算得到, 雷达回波为全姿态数据中对应姿态的目标回波。

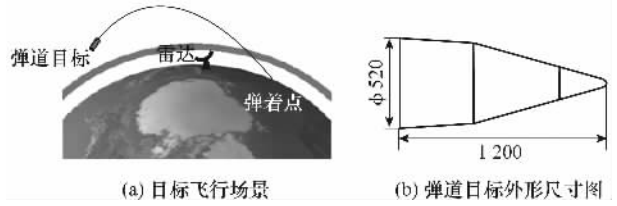


图 4 目标运动场景及目标外形尺寸图

雷达从自由飞行 200 s 后开始采样, 脉冲重复频率 300 Hz, 跟踪时间 80 s, 共采得 24 000 个脉冲, 距离向压缩时 4 倍插值, 即采用 800 点 FFT, 根据式(2), 纵向比例尺为 0.037 5 m, 姿态角变化角速度曲线如图 5 所示。

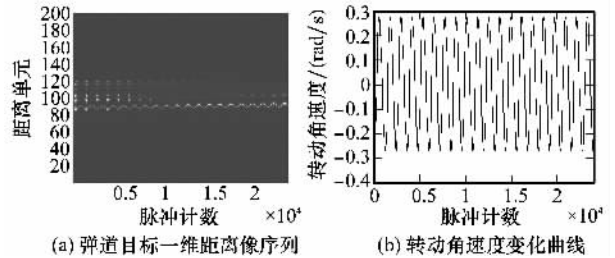


图 5 弹道目标一维距离像序列及转动角速度变化曲线

从目标转动角速度可以看出, 转动角速度不是定值, 即使在短时间内, 目标的转动角速度也不能用均匀变化近似, 采用距离多普勒成像算法成像得不到清晰 ISAR 图像。这里采用距离瞬时多普勒成像算法, 横向聚焦采用短时傅里叶变换实现。对 1 次~80 次回波和 10 001 次~10 080 次回波分别成像, 得到图 A 和图 B, 横向聚焦时采用 8 倍插值 FFT。因此, 两幅 ISAR 图像的大小为 800 p \times 640 p。实际中由于转动角速度无法预知, 横向比例尺无法确定, 暂时采用横向和纵向等比例尺进行预标定, 并根据图像强散射点分布情况选取控制点(先选择大致位置, 根据大致位置确定散射点分布区域, 通过聚类得类中心, 从而得到散射中心的精确位置), 成像结果和控制点分布分别如图 6 所示。

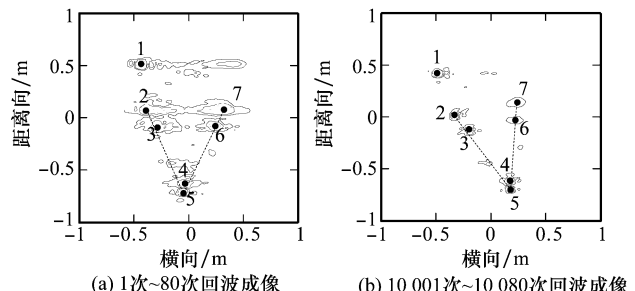


图 6 纵横等比例定标下的两幅弹道目标 ISAR 图像及控制点

图 6 中虚线标示的是锥顶角, 图 6(a) 中锥顶角约为 47°, 图 6(b) 中锥顶角约为 40°。显然, 该角度比图 4(b) 中目标实际锥顶角 31.8° 大许多。因为横向定标误差, 图(6) 中目标外形与图 4(b) 中目标外形、尺寸都发生了严重变形。采用控制点

仿射变换得到仿射变换矩阵,并通过优化参数法解式(21),得到图 A 和到图 B 配准过程的尺度-旋转-尺度变换参数为

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.6437 \\ \alpha_2 = 1.3048 \end{cases}$$

根据式(22)得到横向比例尺的估计值为

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0.0375 \times 0.6437 = 0.0238 \\ \sigma_2 = 0.0375 / 1.3048 = 0.0287 \end{cases}$$

由得到的横向比例尺重新对图像进行标定,重新标定的两幅 ISAR 图像如图 7 所示。

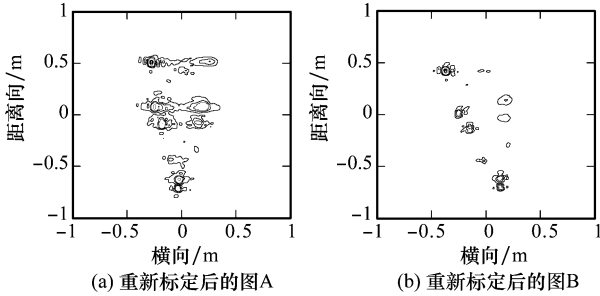


图 7 采用图像配准方法定标后的两幅弹道目标 ISAR 图像

对比图 7 和图 4(b)可以看出,标定后目标图像基本恢复到真实形状。将第 1 240 次回波瞬时角速度 $\omega=0.271 \text{ rad/s}$ 和第 14 040 次回波的瞬时角速度 $\omega=0.241 \text{ rad/s}$ 带入式(6)可得,真实的横向比例尺为分别为 $\sigma_1=0.0259, \sigma_2=0.0291$, 估计误差分别为 8.1% 和 1.3%,为了进一步验证算法的稳定性,选择不同姿态角、不同成像积累角的图像进行横向比例尺估计,结果如表 1 所示。

表 1 不同实验条件下横向比例尺估计结果

序次	成像脉冲范围	瞬时角速度 / (rad/s)	横向比例尺实际值	横向比例尺估计值	估计误差 / (%)
1	1 201~1 280	0.271	$\sigma_1=0.0259$	$\sigma_1=0.0242$	$\epsilon_1=6.6$
	11 201~11 280	0.243	$\sigma_2=0.0289$	$\sigma_2=0.0277$	$\epsilon_2=4.2$
2	2 601~2 680	0.100	$\sigma_1=0.0703$	$\sigma_1=0.0650$	$\epsilon_1=7.5$
	12 601~12 680	0.237	$\sigma_2=0.0297$	$\sigma_2=0.0268$	$\epsilon_2=9.8$
3	4 101~4 180	0.276	$\sigma_1=0.0255$	$\sigma_1=0.0272$	$\epsilon_1=6.7$
	14 101~14 180	0.095	$\sigma_2=0.0704$	$\sigma_2=0.0799$	$\epsilon_2=13.5$
4	5 401~5 480	0.248	$\sigma_1=0.0284$	$\sigma_1=0.0313$	$\epsilon_1=9.3$
	15 401~15 480	0.202	$\sigma_2=0.0348$	$\sigma_2=0.0359$	$\epsilon_2=3.2$

100 次蒙特卡罗实验表明,横向比例尺估计平均误差在 10% 以下,标准差在 5% 以下。实验统计结果表明本文算法能够在多数情况下准确估计横向比例尺,算法性能稳定。

4 结束语

本文针对空间弹道目标研究了 ISAR 图像横向定标问题。在不同姿态角下的弹道目标 ISAR 图像中,散射点的相对位置基本不发生变化,图像之间存在一定角度的旋转,实际配准中只要选择合适的控制点就能够达到较高的配准精度,从而根据配准矩阵实现横向定标。本文从理论上证明了配准方法的可行性,根据测量数据对算法进行了验证。从实验结果可以看出,本文算法对非均匀旋转的空间弹道目标定标具有较好的效果。当然,本文算法的适用性不仅限于非均匀旋转目标,只要目标的 ISAR 图像散射点相对

位置具有不变性的特点,该算法都可以应用。

参考文献:

- [1] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1980,16(1): 2-14.
- [2] Werness S E A. Moving target imaging algorithm for SAR data[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000,26(1):57-67.
- [3] Nagesha V, Kay S. Spectral analysis based on the canonical autoregressive decomposition [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1996,44 (7):1719-1733.
- [4] Qiu X, Zhao Y. An non-parametric rotating angle acquisition method for optimal ISAR imaging[C]// *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 2006:2697-2701.
- [5] 李玺, 顾红, 刘国岁. ISAR 成像中转角估计的新方法[J]. *电子学报*, 2000,28(6):44-47.
- [6] 王勇, 姜义成. 一种估计 ISAR 成像转角的新方法[J]. *电子与信息学报*, 2007,29(3):521-523.
- [7] 余志顺, 朱兆达. 逆合成孔径雷达横向定标[J]. *电子学报*, 1997,25(3):45-48.
- [8] Camp W W, Mayhan J T, O'donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range Doppler imaging of satellites [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2000,12(2):267-280.
- [9] 金光虎, 朱玉鹏, 高勋章. 基于一维距离像序列的弹道目标进动特征提取[J]. *信号处理*, 2009,25(5):771-776.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:24-25.
- [11] Stankovic L S, Djurovic I, Thayaparan T. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006,42(4):1496-1503.
- [12] Berizzi F, Diani M. Target angular motion effect on ISAR imaging[J]. *IEEE Proc. of Radar Sonar*, 1997,144(2):87-95.
- [13] Lu G Y, Bao Z. Range-instantaneous-Doppler algorithm in ISAR based on instant frequency estimation [C]// *International Symposium on Multispectral Image Processing*, 1998:198-201.
- [14] Chen V C, Qian S. Jointtime-frequency transform for radar range-Doppler imaging [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1998,34(2):486-499.
- [15] Jain A, Patel I. SAR/ISAR imaging of a non-uniformly rotating target[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992,28(1):317-320.
- [16] Bao Z, Sun C Y, Xing M D. Time-frequency approaches to ISAR imaging of maneuvering targets and their limitation[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 2001,37(3):1091-1099.
- [17] Peng J, Liu D, Wang G, et al. Reconstruction of ISAR imaging using time-frequency distribution series method[C]// *1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2007:108-115.
- [18] 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, 2005:230-237.
- [19] Li H, Manjunanth B S, Mitra S K. A contour-based approach to multi-sensor image registration[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995,4(3):320-334.
- [20] Althof R J, Wind M G J, Dobbins J T. A rapid and automatic image registration algorithm with subpixel accuracy[J]. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, 1997,16(3):308-316.
- [21] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing* [M]. London Cambridge University Press, 1992.