

## 基于成像序列的弹道目标 ISAR 图像横向定标

何兴宇<sup>1</sup>, 童宁宁<sup>1</sup>, 贺吉峰<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051;  
2. 驻航天科工集团二院 23 所军代表室, 北京 100854)

**摘要:**对目标逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)像横向定标是进行目标结构特征提取的基础,重点是进行目标转速的估计。从弹道目标的 ISAR 像序列出发,得到 ISAR 像中散射点构成的向量。利用给出的转角估计表达式,考察模值最大的向量在成像序列之间的转角,以此作为目标的转角,完成目标转速的估计。最后对所提方法的性能进行了分析。该方法充分利用 ISAR 像序列的特点和序列中包含的目标特征信息,避免了繁琐的图像配准过程和复杂的回波多普勒调频率估计。仿真实验表明,该方法能有效完成目标转速估计,定标误差较小。

**关键词:**电路与系统;横向定标;ISAR 像;弹道目标;角度估计;向量

中图分类号:TN957.52 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.017

## Cross-range scaling of ISAR imaging for ballistic target based on image sequence

HE Xing-yu<sup>1</sup>, TONG Ning-ning<sup>1</sup>, HE Ji-feng<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Military Representative Office in No. 23 Research Institute of CASIC, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Cross-range scaling for ISAR image is the basis of target's structure feature extraction, and the key point is the estimation of its rotate speed. Firstly, the vectors which are composed of target's scattering points in ISAR image are obtained based on ballistic target's ISAR sequence. Secondly, the expression is estimated by using the rotate angle, and the maximum modulus vectors' rotating angle between ISAR sequence is mapped to target's rotating angle. Then, the estimation of target's rotate speed is achieved. At last, the performance of the method is analyzed. This method takes full advantage of the characteristics of ISAR image sequence and target's feature information, and it avoids the complex image registration and complicated echo Doppler rate estimation. Simulation results show that the method can estimate target's rotate speed efficiently and have a low scaling error.

**Key words:** circuits and systems; cross-range scaling; ISAR image; ballistic target; angle estimation; vector

### 1 引言

弹道目标特征提取是中段弹道目标识别的基础和关键。弹道目标的特征主要包括微动特征和结构特征,微动特征如进动角、进动周期等,结构特征如尺寸、形状等<sup>[1-3]</sup>。利用 ISAR 实现高分辨成像是进行目标结构特征提取的重要途径,而 ISAR 图像的横向定标是提取目标结构特征的难点和关键。中段

弹道目标在转台模型下通常是均匀旋转的,其 ISAR 图像定标的关键是成像积累角及转速的估计。由于 ISAR 成像是小角度成像,通常成像积累角不超过

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61372166)资助。  
作者简介:何兴宇(1989-),男,硕士研究生,研究方向为雷达信号处理。E-mail:hxy\_19890708@163.com  
收稿日期:2014-04-18

10°, 依靠单次 ISAR 像难以完成转速的准确估计<sup>[4-6]</sup>。

目前, 大多数横向定标算法都是基于多特显点法, 筛选出包含特显点的距离单元, 通过提取这些单元内特显点的回波信号估计调频率。文献[7]通过图像分割划分强散射区域来实现横向定标, 该方法利用 LPFT(Local Polynomial Fourier Transform, 局域多项式傅里叶变换)等算法, 实现散射中心的提取和调频斜率的估计, 有较高的估计精度, 然而图像分割门限确定不准确将直接影响定标精度, 算法稳定性不高。文献[7]指出, ISAR 图像散射中心相对位置不因目标的三维转动而发生变化, 并据此提出了基于图像配准的弹道目标 ISAR 像横向定标算法, 该算法同样需要寻找合适的控制点, 通过仿射变换实现 ISAR 像横向定标。但是该方法敏感于横向伸缩因子的估计, 且计算较复杂。本文根据文献[8]分析得到的 ISAR 图像散射中心相对位置不变的特点, 通过提取 ISAR 图像序列中由散射点构成的模值最大的向量, 根据弹道目标的旋转对称性, 得到目标对称轴方向的单位向量表示, 并估计该向量在成像序列之间的转角及转速, 最后完成 ISAR 像的横向定标。仿真实验表明, 本文的 ISAR 图像定标算法能准确地完成目标转速估计, 定标效果较好。

## 2 ISAR 图像定标原理

逆合成孔径雷达利用发射宽带信号达到距离向的高分辨, 依靠长的合成孔径实现方位向的高分辨, 而距离—多普勒算法是最常用的 ISAR 成像算法。

雷达工作在线性调频体制下。设目标到雷达的距离为  $R_i$ , 参考距离为  $R_{ref}$ 。解调后的雷达回波为<sup>[9-11]</sup>:

$$s_{ij}(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T_p}\right) e^{-j\frac{A\pi}{c}\gamma(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c})R_\Delta} \cdot e^{-j\frac{A\pi}{c}f_c R_\Delta} e^{j\frac{A\pi}{c^2}R_\Delta^2} \quad (1)$$

式中,  $A$  代表回波信号幅度;  $R_\Delta = R_i - R_{ref}$ ;  $\hat{t}$  称为快时间;  $t_m$  为慢时间;  $f_c$  为中心频率;  $T_p$  为脉宽;  $\gamma$  为调频率。

对得到的解调后的回波以  $f_s$  采样频率进行采样, 设每次回波可以得到  $N$  个采样点, 做  $N_f$  点离散傅里叶变换, 可得目标的一维距离像:

$$s_{ij}(n_f, t_m) = \frac{4A}{N} e^{-j\frac{A\pi}{c}f_c R_\Delta} e^{-j\frac{A\pi}{c^2}R_\Delta^2} e^{-j\frac{A\pi}{c}(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c})R_\Delta} \cdot \text{sinc}\left[2\pi N\left(\frac{\gamma}{f_s c} R_\Delta + \frac{n_f}{2N_f}\right)\right] \quad (2)$$

设目标平动补偿后, 转动速度为  $\omega$ , 则散射点与参考中心的距离为:

$$R_\Delta = x \sin\theta(t) + y \cos\theta(t), \theta(t) = \omega t_m \quad (3)$$

去斜后, 在慢时间域作  $M_f$  点离散傅里叶变换实现横向压缩, 得到目标的 ISAR 像为:

$$s_{ij}(n_f, m_f) = \frac{4A}{MN} \text{sinc}\left\{2\pi N\left[\frac{\gamma y}{f_s c} + \frac{n_f}{2N_f}\right]\right\} \cdot \text{sinc}\left\{2\pi M\left[\frac{f_c \omega x}{f_p c} + \frac{m_f}{2M_f}\right]\right\} e^{-2\pi j\left(\frac{2f_c}{c} + \frac{f_c \omega t_m}{f_p}\right)} \quad (4)$$

式中,  $M$  表示脉冲积累数;  $f_p$  为脉冲重复频率;  $(n_f, m_f)$  表示尖峰脉冲位置。

由上式可以看出, 在完成距离像和横向压缩后, 在  $(n_f, m_f)$  域会出现 sinc 函数形式的尖峰脉冲, 对应了散射点的位置。尖峰脉冲位置可以用下式表示:

$$\begin{cases} n_f = -\frac{2\gamma N_f}{f_s c} y \\ m_f = -\frac{2f_c \omega M_f}{f_p c} x \end{cases} \quad (5)$$

从而可得散射点的纵向/横向位置为:

$$\begin{cases} y = -\frac{N}{N_f} \frac{c}{2B} n_f \\ x = -\frac{M}{M_f} \frac{\lambda}{2T_m \omega} m_f \end{cases} \quad (6)$$

孔径合成时间为  $T_m = \frac{M}{f_p}$ 。由式(6)可以看出, 距离向定标参数均为已知, 而横向位置  $x = -\frac{M}{M_f} \frac{\lambda}{2T_m \omega} m_f$  的确定与目标转动角速度  $\omega$  有关, 且通常角速度无法预知, 所以 ISAR 像横向定标比较困难。以往算法在进行 ISAR 像横向定标时, 需要进行回波调频斜率估计或图像配准, 计算过程比较复杂且计算量大。本文针对转台成像特点, 利用 ISAR 像散射点相对位置不变, 通过 ISAR 像序列提取弹道目标的转动角, 实现 ISAR 像的横向定标。

## 3 转动角速度估计

### 3.1 模型建立

设 ISAR 像的纵向分辨率和横向分辨率分别为  $\rho_r$  和  $\rho_a$ , 若不发生越距离单元徙动, 则目标的最大径向尺寸和横向尺寸应满足以下条件<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} X \leq 4\rho_a \rho_r / \lambda \\ Y \leq 4\rho_a^2 / \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  为雷达发射信号波长; 若取  $\lambda = 4 \text{ cm}$ ,  $\rho_r$  和  $\rho_a$  均为  $0.4 \text{ m}$ , 则目标尺寸应不大于  $16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ , 弹道目标通常都能满足这一要求, 因此本文成像算法

中假设散射点不发生越距离单元徙动。

运动目标回波信号经包络对齐和相位补偿,将最终转为转台模型进行成像。假设目标完成平动补偿后,距离变化可以消除,同时,仿真假设识别的弹道目标为锥柱体。

由于 ISAR 成像是小角度成像,加上干扰噪声等因素的影响,依靠单次 ISAR 像进行目标转速估计有较大的不确定性。本文提出利用 ISAR 像序列估计目标转动角速度,对消干扰噪声因素的影响,提高定标精度。其模型如图 1 所示。

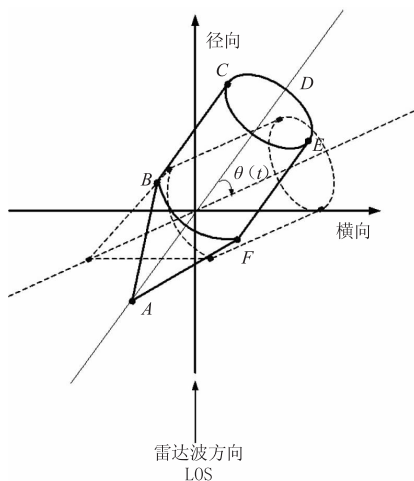


图1 ISAR 像序列目标位置及转角

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $F$  为目标上的五个散射点,  $AD$  为目标的对称轴。由目标 ISAR 像的散射点构成的向量有多个,考察 ISAR 像中模最大的向量。由于弹道目标的旋转对称性,通常模值最大的向量有两个,可以通过它们来确定对称轴的方向,进而估计成像序列间目标的转角。

### 3.2 算法分析与设计

假设散射点在 ISAR 像中坐标分别为  $(x_i, y_i)$ ,  $i \in [A, B, C, E, F]$ 。得到各向量的坐标表示,如  $AB = (x_B - x_A, y_B - y_A)$ 。可以看出,向量只与散射点的相对位置有关。

从图 1 可以看出,模值最大的向量在  $AC$  和  $AE$  中产生。如果图像聚焦效果不好,将影响向量模值的估计和目标转角的估计精度,进而影响目标的定标精度。因此,对  $AC$  和  $AE$  向量作以下处理:

$$\begin{aligned} & \left| |AC| - |AE| \right| \\ &= \left| \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} - \sqrt{(x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2} \right| \\ &= \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} - \sqrt{(x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2} \leq \delta r \end{aligned} \quad (8)$$

首先,判断式(8)是否成立。式中,  $\delta r$  为允许的

偏差值,取  $\delta r = 1$ ,即两向量的模值差不大于一个横向(径向)距离单元。

当式(8)成立时,判定两向量模值相同,通过计算两向量的合成向量在成像序列中的变化来估计转动角;但是,在目标的一定姿态角下,式(8)并不成立,此时需提取  $AC$  和  $AE$  中模值大的向量,考察它在成像序列中的变化来估计转动角。本文后面的分析均假设式(8)成立,其他情况可按下面分析作类似处理。

设初始时刻对称轴  $AD$  方向的单位向量为  $e_1$ , 则有下式成立:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{AC + AE}{|AC + AE|} \\ &= \frac{(x_C - x_A + x_E - x_A, y_C - y_A + y_E - y_A)}{\sqrt{(x_C - x_A + x_E - x_A)^2 + (y_C - y_A + y_E - y_A)^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

经历时间  $t$  后,在下一个成像时刻,对称轴方向的单位向量设为  $e_2$ , 则  $e_1$  与  $e_2$  的夹角即为在时间  $t$  内目标转过的角度  $\theta(t)$ 。有下式成立:

$$\begin{cases} \theta(t) = \omega t \\ \theta(t) = \arccos e_1 \cdot e_2 \end{cases} \quad (10)$$

通过式(10),提取目标的转动角,估计目标转速,进而根据式(6)完成目标的横向定标。

## 4 仿真分析

假设目标由五个散射点组成,其位置关系如图 2 所示。

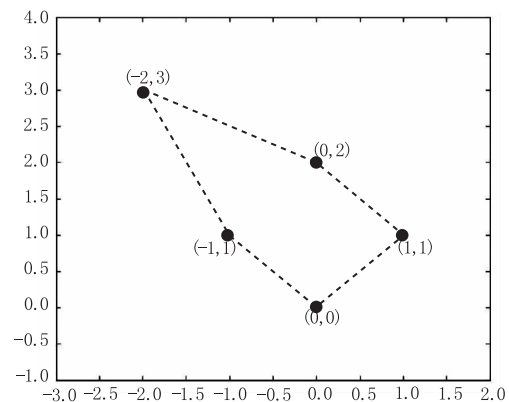


图2 各散射点位置关系

雷达发射的线性调频信号载频  $f_c = 6$  GHz, 波长  $\lambda = 0.03$  m, 脉冲宽度  $T_p = 40$   $\mu$ s, 带宽  $B = 300$  MHz, 调频斜率  $k = B/T_p$ , 采样频率  $F_s = 300$  MHz。设转台模型逆时针方向旋转为正, 转速设置为  $\omega_0 = 0.01$  rad/s。

初始成像时刻为  $t_1 = 0$  时, 根据目标初始时刻的位置, 得到目标 ISAR 像如图 3 所示。

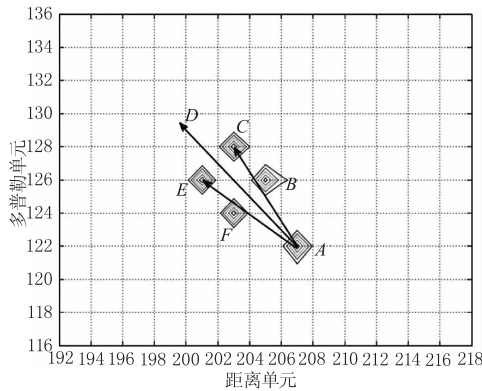


图3  $t_1 = 0$  s时目标 ISAR 像

各散射点在 ISAR 像中的坐标如下:  $A(207, 122)$ ,  $B(205, 126)$ ,  $C(203, 128)$ ,  $E(201, 126)$ ,  $F(203, 124)$ 。模值最大的向量为  $AC = (-4, 6)$  及  $AE = (-6, 4)$ ,  $|AC| = |AE|$ 。根据式(9)计算得  $e_1 = (-\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ 。

二次成像时刻为  $t_2 = 40$  s 时, 由于转台的转动, 各散射点的位置发生了变化, 如图 4 所示。

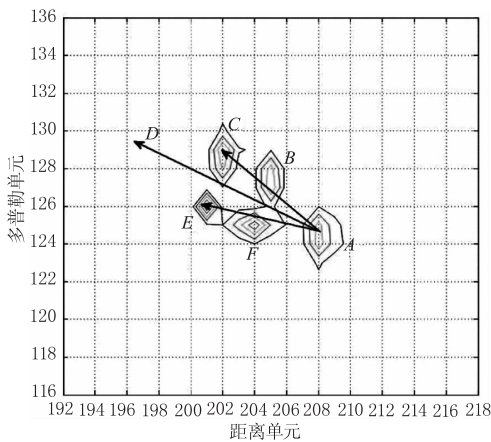


图4  $t_2 = 40$  s时目标 ISAR 像

由  $t_2 = 40$  s 时的 ISAR 像可得  $AC = (-6, 4)$ ,  $AE = (-7, 1)$ ,  $||AC| - |AE|| = 0.14 \leq 1$ ,  $e_2 = (-13, 5) / \sqrt{(-13)^2 + 5^2} = (-0.9333, 0.3590)$ 。

目标在 40 s 的时间里转过的角度为  $\theta(t) = \arccos e_1 \cdot e_2 = 0.4182$  rad, 计算得目标转速  $\omega = \frac{\theta(t)}{t} = 0.0105$  rad/s, 与仿真设置的目标转速  $\omega_0 = 0.01$  rad/s 相当, 相对误差  $\delta\omega = \left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right| \times 100\% = 4.5561\%$ , 转速估计效果较好。

将得到的转速估计值带入式(6), 对  $t_1 = 0$  时的 ISAR 像定标, 结果如图 5 所示。

从图 5 中的定标结果可以看出, 各散射点的相对位置关系与散射点模型基本相同, 定标效果较好,

精度较高。定标得到的散射点位置与原始模型关于原点对称, 这是由于多普勒符号引起的。

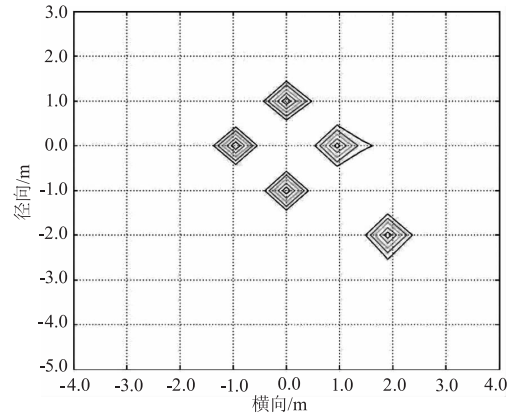


图5 ISAR 定标后图像

为了验证算法性能, 选取不同的成像序列间隔, 得到转角、转速、转速估计误差及横向定标误差如表 1 所示。

表 1 不同序列间隔下的仿真实验结果

Tab. 1 Simulation results in different time interval

实验 序次	时间间隔 /s	转角估计值 /rad	转速估计值 /(rad · s <sup>-1</sup> )	转速估计 误差/%	横向定标 误差/%
1	10	0.090 7	0.009 1	9.340 1	9.253 6
2	20	0.197 4	0.009 9	1.300 2	1.010 1
3	30	0.3059	0.010 2	1.959 6	1.960 8
4	40	0.418 3	0.010 5	4.556 1	4.761 9

从表 1 可看出, 除了初次实验, 转速估计误差和横向定标误差均在 5% 以下, 估计误差较小, 横向定标精度较高。从表中还可以看出, 在时间间隔较小时, 转角及转速估计值误差较高; 但是时间间隔的选取也不能过大, 否则会由于 ISAR 像序列中向量相对关系和目标散射特性的变化而导致误差急剧增大。另外, 还可以通过选取多个时间间隔来估计目标转速, 增加估计和定标精度。

### 5 结 论

弹道目标 ISAR 图像横向定标在弹道目标识别中有重要地位。本文从经典的距离—多普勒成像算法出发, 分析了 ISAR 成像的特点及利用成像序列估计转速进而完成横向定标的优点。通过对 ISAR 像序列中散射点构成的向量的分析, 得到转角及转速估计表达式, 完成弹道目标的横向定标。仿真实验证明了本文方法简单有效, 定标精度较高。本文研究了两幅 ISAR 像实现横向定标的过程, 当然还可以通过利用多个 ISAR 像序列综合来提高定标精度。

## 参考文献:

- [1] Rihaczk A W, Hershkowitz S J. Theory and practice of radar target identification[M]. Boston: Artech House, 2000.
- [2] Dieter Mehrholz. Radar techniques for the characterization of meter-sized object in space[J]. Adv Space Res, 2001, 28(9): 1259 – 1268.
- [3] MA Liang, WANG Tao, FENG Dejun, et al. The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2273 – 2279. (in Chinese)  
马梁, 王涛, 冯德军, 等. 旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取 [J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2273 – 2279.
- [4] Thayaparan T, Frangos P, Stankovic L. Signal processing techniques for ISAR and feature extraction[J]. IET signal processing, 2008, 2(3): 189 – 191.
- [5] J Li, H Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from target with rotating parts[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284 – 291.
- [6] CHEN Xiuwei, ZHANG Yunhua, ZHANG Xiangkun. Ballistic missile echo simulation based on ISAR[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(1): 29 – 34. (in Chinese)  
陈秀伟, 张云华, 张祥坤. 弹道导弹的 ISAR 回波模拟 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(1): 29 – 34.
- [7] Martorella M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 281 – 294.
- [8] JIN Guanghu, GAO Xunzhang, LI Xiang, et al. ISAR image cross scaling method for ballistic target based on image registration[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2565 – 2569. (in Chinese)  
金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 基于图像配准的弹道目标 ISAR 图像横向定标[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2565 – 2569.
- [9] BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)  
保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [10] QUN Zhang, Tat Soon Yeo, Hwee Siang Tan, et al. Imaging of a moving target with a rotating parts based on the Hough transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291 – 299.
- [11] Jin Guanghu. Research on ISAR imaging and physical feature extraction of midcourse ballistic target [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)  
金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特征反演技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [12] HU Jiemin, ZHANG Jun, ZHAN Ronghui, et al. Novel method for estimating rotation angle based on phase cancellation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 897 – 902. (in Chinese)  
胡杰民, 张军, 占荣辉, 等. 一种基于相位对消的转角估计新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 897 – 902.