

对称目标的 ISAR 成像横向距离定标方法与性能分析

李文臣^{①②} 王雪松^① 丹梅^① 王国玉^①

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(中国人民解放军 63880 部队 洛阳 471003)

摘要: 目标横向定标是实现目标模板匹配识别和特征提取的基础。该文利用横向多普勒频率和横向坐标位置的近似正比关系, 基于对称目标的对称轴垂直于对称点直线, 给出了对称目标转角估计和横向定标新方法。其次给出了定标参数估计误差表达式, 定量分析了影响定标参数估计误差的各因素。最后用弹头模型转台成像和外场飞机 ISAR 数据成像对该方法进行了仿真验证。该方法结构简单, 运算量非常小, 在合作机动目标 ISAR 成像定标方面有很好的应用前景。

关键词: 逆合成孔径雷达(ISAR); 横向距离定标; 对称目标; 定标参数; 转角估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2504-05

Cross-Range Scaling Method and Performance Analysis of ISAR Imaging for Symmetrical Target

Li Wen-chen^{①②} Wang Xue-song^① Dan Mei^① Wang Guo-yu^①

^①(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The cross-range scaling is the base of the pattern matching and target characteristic extraction. Using the approximately proportional relation between the Doppler frequency in cross range and the transverse coordinate position, and based on the orthogonal relation between the centerline and the line through axially symmetric points in the symmetrical target, a novel method of rotation angle estimation and cross range calibration is given for the symmetrical target. Then, the estimation error expression of the scaling parameter is offered, and influencing factors of the parameter estimation error is analyzed quantitatively. Finally, the ISAR imaging simulation results of both the warhead model on rotating platform and the outfield airplane data verify this method. This method has a very good application prospect to the ISAR image calibration aspect of cooperative maneuvering target with simple and low computation cost.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Cross-range scaling; Symmetric target; Scaling parameter; Rotation angle estimation

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)能够实现运动目标高分辨成像, ISAR利用雷达宽带特点得到距离(纵向)高分辨, 利用目标自身转动产生的多普勒信息得到方位(横向)高分辨, 即通过距离-多普勒原理(R-D)得到目标2维像。ISAR成像得到目标的纵向距离尺寸, 而目标横向尺寸仅为多普勒频率信息, 无法反映目标的横向维大小, 需要确定目标相对于雷达视线的总转角, 才能对目标横向定标^[1-3]。目标横向定标是实现目标模板匹配识别和特征提取的基础, 利用ISAR图像可通过图形模板匹配实现目标识别^[4,5]。

目前估计转角的方法主要包括雷达航迹跟踪

法^[5], 多天线相干法^[6,7], 图像熵法^[8], 以及回波信号参数分析法^[2,3]。其中雷达航迹跟踪法利用雷达跟踪数据, 计算出目标的飞行轨迹, 然后得到运动目标相对雷达的转角变化, 但由于非合作目标的横滚, 倾斜或偏航等因素影响, 导致转角估计误差很大。多天线相干法利用多天线相干处理技术, 因此成像定标系统太复杂。图像熵法采用评价函数来优化未知的转角参数, 这种方法需要反复搜索, 计算量大。回波信号参数分析法利用转动目标横向信号的调频率和距离单元的关系, 通过调频参数分析估计目标转角, 调频参数估计方法计算量大。

实际成像目标通常为3维形状的对称目标, 其成像平面投影通常为对称形状, 例如弹头, 飞机和舰船目标等。飞机和舰船目标平稳运动时, 其在成像

平面的投影是对称的, 另外弹头目标成像平面投影可认为是对称的。当考虑目标横滚, 倾斜或偏航等影响时, 飞机和舰船目标成像平面投影对称度下降, 甚至不能称为对称目标。本文研究的对称目标是指成像平面投影是关于某直线对称的目标。文献[1]利用了目标的对称性对舰船目标进行定标, 其算法的推导过程过于复杂。本文简化了对称目标横向定标的推导过程, 利用横向多普勒频率和横向坐标位置的近似正比关系, 基于对称目标的对称轴垂直于对称点直线, 给出了对称目标转角估计和横向定标新方法, 使对称目标横向距离定标具有更广泛的应用, 同时深入分析了定标参数的估计误差。最后用弹头模型转台成像和外场飞机 ISAR 数据成像对该方法进行了验证。

2 匀速目标回波 ISAR 成像模型

雷达成像具有距离高分辨能力, 处于光学区的目标各散射点中心相互影响比较小, 目标总的散射回波是各个独立散射中心回波的线性叠加, 因此目标可以表示为多散射点模型。如果在成像时间内目标运动限制在 2 维平面, 平行于 x 轴的同距离单元 y 的多散射点后向散射雷达调制信号为^[1,2]

$$s(y, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R(t) + x_k \sin \theta(t) + y_k \cos \theta(t)] \right\} \quad (1)$$

其中 λ 为信号波长, N_k 为在距离分辨单元 y 内散射点数目, A_k 为散射点强度, x_k, y_k 为第 k 个散射点位置, x_k 为横向坐标, y_k 为距离坐标, 同一距离单元的各散射点坐标 y_k 可近似为 y 。 $R(t)$ 为目标转动中心径向距离变化, 运动目标回波信号经过运动补偿、包络对齐和相位补偿, 将最终转换为转台模型进行成像。假设目标平动运动补偿后, 距离变化 $R(t)$ 可以消除, 目标运动转换为转台运动模型, 如图 1, 目标转动坐标系 (x, y) 与雷达坐标系 (x_R, y_R) 的距离 $R(t) = r_0$ 。转动角 $\theta(t)$ 引起的相位变化为

$$\phi(x_k, y, t) = -\frac{4\pi}{\lambda} [x_k \sin \theta(t) + y \cos \theta(t)] \quad (2)$$

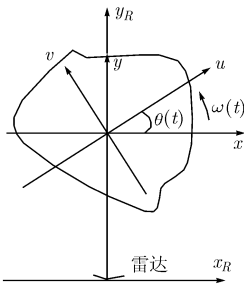


图 1 转动目标成像示意图

其中 $\theta(t) = \omega_0 t$, 角速度 ω_0 以逆时针为正。

在成像时间内, 目标转动角很小, 即 $\theta(t) \ll 1$, 通常在成像时间内可认为目标没有距离徙动。在成像时间 T 内距离单元 y 的第 k 个散射点的多普勒频率为

$$f_d(x_k, y, t) = f_d(x_k, t) + f_d(y, t) \approx \frac{2}{\lambda} y \omega_0^2 t - \frac{2x_k}{\lambda} \omega_0 \quad (3)$$

其中 $f_d(x_k, t) = -\frac{2x_k}{\lambda} \omega_0$, $f_d(y, t) \approx \frac{2y\omega_0^2}{\lambda} t$ 分别为 x 轴和 y 轴坐标引起的多普勒频移。由于 $\theta(t) \ll 1$, 可以忽略 $f_d(y, t)$ 项, 得到 $f_d(x_k, y, t) \approx -(2x_k/\lambda)\omega_0$, 即横向多普勒频率和 x_k 坐标成正比。解得

$$x_k = -\frac{\lambda}{2\omega_0} f_d(x_k, y, t) = \mu f_d(x_k, y, t) \quad (4)$$

其中横向距离定标参数 $\mu = -\frac{\lambda}{2\omega_0}$ 。回波信号参数分析法利用多普勒频率项 $f_d(y, t)$ 来估计目标转角。

3 对称目标的 ISAR 成像横向定标

雷达 ISAR 成像目标通常为对称目标, 例如飞机, 弹头等。如图 2 为真值坐标系弹头目标模型, ABC 为弹头目标的锥体形状, B 和 C 为对称散射点, A 和 D 为目标对称轴上的散射点, 即 AD 为对称轴, 将 $ABCD$ 定义为标校点, 对应目标真值坐标系的坐标分别为 (x_i, y_i) , $i \in [A, B, C, D]$ 。真值坐标系中目标对称轴与雷达视线的角度为 $\phi \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。在 ISAR 测量坐标系(或距离-多普勒坐标系)中, 横向 X 轴为转动引起的多普勒 f , 纵向 Y 轴为散射点距离真值 r , 标校点 $ABCD$ 坐标分别为 (f_i, r_i) , $i \in [A, B, C, D]$ 。真值坐标系和测量坐标系的关系为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \mu f_i \\ y_i &= r_i - r_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $i \in [A, B, C, D]$, r_0 为转轴参考距离。

根据对称关系可知在真值坐标系, $\overline{AD} \perp \overline{BC}$ 或 $\overline{AD} \cdot \overline{BC} = 0$, 其中“ \cdot ”为点乘, 于是得到

$$\left. \begin{aligned} \overline{AD} &= (x_A - x_D, y_A - y_D) \\ \overline{BC} &= (x_B - x_C, y_B - y_C) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

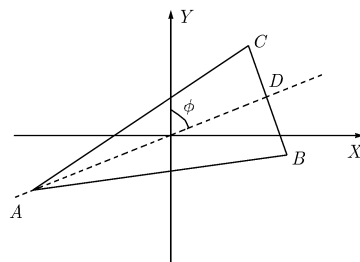


图 2 弹头目标模型

$$(x_A - x_D)(x_B - x_C) + (y_A - y_D)(y_B - y_C) = 0 \quad (7)$$

将式(5)代入式(7), 解得:

$$\mu = \pm \sqrt{-K_{1a}K_{1b}} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{1a} &= \frac{r_{La}}{f_{La}} = \frac{r_A - r_D}{f_A - f_D} \\ K_{1b} &= \frac{r_{Lb}}{f_{Lb}} = \frac{r_B - r_C}{f_B - f_C} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 K_{1a} 和 K_{1b} 分别为测量坐标系的目标中心主轴直线斜率和两对称点直线斜率, 把两直线称为标校直线, 下标“1”表示测量坐标系的数据。 r_{Ln} , f_{Ln} 对应为测量坐标系中标校直线的坐标差, $n \in [a, b]$, 即 $r_{La} = r_A - r_D$, $f_{La} = f_A - f_D$, $r_{Lb} = r_B - r_C$, $f_{Lb} = f_B - f_C$ 。为了简化模型, 可以只选取 3 个标校点 ABC , 将标校点 D 取为 BC 的中心, 标校点 D 在真值坐标系和测量坐标系的坐标分别为 $[x_D, y_D] = [(x_B + x_C)/2, (y_B + y_C)/2]$, $[f_D, r_D] = [(f_B + f_C)/2, (r_B + r_C)/2]$ 。当然根据需要可以在对称轴上选择标校点 D 点, 使 AD 的距离最大, 以减小调频率估计误差。 μ 取值符号将造成方位图像对称翻转, 但不会改变目标形状, 因此可以取 μ 为正号。文献[1]研究了舰船目标的定标, 利用了复杂的运动模型, 基于测量坐标系的标效直线斜率表达式, 没有直接利用对称目标的物理特性-对称轴垂直于对称点直线, 其最终算法与本文是相同的, 本文的对称目标横向定标物理意义更明确。

由 $\mu = -\lambda/(2\omega_0)$, 得到转角 θ 为

$$\theta = \omega_0 T = -\frac{\lambda}{2\mu} T \quad (10)$$

可见利用目标对称特点就可实现目标的横向定标和转角估计。

主轴直线和对称点直线可基于图像利用 Hough 变换求解。为了检测直线首先应连接图像中的分离区域, 增加和填充图像中洞和空白区域。Hough 变换后, 在 $\theta \in [0, \pi/2]$ 和 $\theta \in [\pi/2, \pi]$ 两个区域分别求取最大峰值检测点, 得到两个不同符号的调频率, 最后用式(8)得到定标参数。基于 Hough 变换的自动处理方法增加了算法的复杂性, 本文仅对人工选择定标点的方法进行研究。

4 ISAR 成像横向定标参数估计误差分析

如果图像没有很好地聚焦, 将影响对称轴和对称点直线斜率估计精度, 因此图像质量将影响定标精度。不考虑聚焦对定标参数估计的影响, 分析雷达参数、目标尺寸形状和目标姿态对定标参数估计的影响。

由式(8)可以得到定标参数估计误差为

$$\Delta\mu = \frac{-K_{1a}\Delta K_{1b} - \Delta K_{1a}K_{1b}}{2\mu} \quad (11)$$

由式(9)可以得到直线斜率 K_{1n} 的估计误差为

$$\Delta K_{1n} = \frac{\Delta r_{Ln}}{f_{Ln}} - \frac{r_{Ln}}{f_{Ln}^2} \Delta f_{Ln} = \frac{\Delta r_{Ln}}{f_{Ln}} - K_{1n} \frac{\Delta f_{Ln}}{f_{Ln}} \quad (12)$$

其中 $\Delta f_{Ln}, \Delta r_{Ln}$ 为标校点距离差值的估计误差, $n \in [a, b]$ 。

利用式(5), 式(9), 可以得到真值坐标系的主轴斜率 and 对称点直线斜率分别为

$$\left. \begin{aligned} K_{2a} &= \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} = \frac{K_{1a}}{\mu} = \frac{1}{\tan \phi} \\ K_{2b} &= \frac{y_B - y_C}{x_B - x_C} = \frac{K_{1b}}{\mu} = -\tan \phi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

即用下标“2”表示真值坐标系的数据, $K_{2a}K_{1b} = -\mu$, $K_{2b}K_{1a} = -\mu$ 。

由式(11)-式(13)得到定标参数估计误差为

$$\Delta\mu = -\frac{1}{\tan \phi} \frac{\Delta r_{Lb}}{2f_{Lb}} + \tan \phi \frac{\Delta r_{La}}{2f_{La}} - \mu \frac{\Delta f_{Lb}}{2f_{Lb}} - \mu \frac{\Delta f_{La}}{2f_{La}} \quad (14)$$

假设真值坐标系中目标轴向长度 L , 对称点最大宽度为 W , 如果选择的标校点使 f_{La} 和 f_{Lb} 最大, 则

$$\left. \begin{aligned} \mu f_{La} &= L \sin \phi \\ \mu f_{Lb} &= W \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)得到

$$\Delta\mu = -\mu \frac{\Delta r_{Lb}}{2W \sin \phi} + \mu \frac{\Delta r_{La}}{2L \cos \phi} - \mu^2 \frac{\Delta f_{Lb}}{2W \cos \phi} - \mu^2 \frac{\Delta f_{La}}{2L \sin \phi} \quad (16)$$

当发射信号带宽 B 和成像相参时间长度 T 固定后, 纵向距离分辨率 δr 和横向多普勒分辨率 δf 是固定常数, $\delta r = \frac{c}{2B}$, $\delta f = \frac{1}{T}$ 。理想聚焦情况下, 距离

差值的估计误差 $\Delta r_{Ln}, \Delta f_{Ln}$ 的统计结果为固定常数, $n \in [a, b]$, 将估计误差近似表示为 $|\Delta r_{La}| = |\Delta r_{Lb}| = \delta r$, $|\Delta f_{Lb}| = |\Delta f_{La}| = \delta f$, 由式(16)可以得到

$$|\Delta\mu| \leq \left| \frac{\mu}{2 \sin \phi} \left(\frac{\delta r}{W} + \frac{|\mu \delta f|}{L} \right) \right| + \left| \frac{\mu}{2 \cos \phi} \left(\frac{|\mu \delta f|}{W} + \frac{\delta r}{L} \right) \right| \quad (17)$$

可见定标参数估计误差 $|\Delta\mu|$ 与姿态角度 ϕ , 定标系数 μ , 目标尺寸 L 和 W , 以及 $|\delta r|$ 和 $|\delta f|$ 有关。 $|\mu \delta f|$

$= \left| \frac{\lambda}{2\omega_0} \frac{1}{T} \right| = \frac{\lambda}{2\Delta\theta}$, 根据转速 ω_0 的不同, 需要调整相

干处理时间, 使 $\omega_0 T$ 等于最佳成像角度 $\Delta\theta$, 因此 $\Delta\theta$ 为常数。式(17)转换为

$$|\Delta\mu| \leq \left| \frac{\mu}{2 \sin \phi} \left(\frac{\delta r}{W} + \frac{\lambda}{2\Delta\theta L} \right) \right| + \left| \frac{\mu}{2 \cos \phi} \left(\frac{\lambda}{2\Delta\theta W} + \frac{\delta r}{L} \right) \right| \quad (18)$$

定标参数估计最大误差 $|\Delta\mu|$ 与真值 μ 的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta\mu}{\mu} \right| \leq \left| \frac{1}{2\sin\phi} \left(\frac{\delta r}{W} + \frac{\lambda}{2\Delta\theta L} \right) \right| + \left| \frac{1}{2\cos\phi} \left(\frac{\lambda}{2\Delta\theta W} + \frac{\delta r}{L} \right) \right| \quad (19)$$

即相对误差和 μ 无关。

根据式(19),设置信号波长为0.03 m,距离分辨 $\delta_r = 0.3$ m, $L = 3$ m, $W = 2$ m,根据目标转速,选择最佳相参处理时间,使成像角度 $\Delta\theta = 0.1$ rad。得到目标姿态角 ϕ 与定标参数估计最大相对误差曲线,如图3。实际定标参数估计误差和目标对称度、图像信噪比和模糊度等有关。

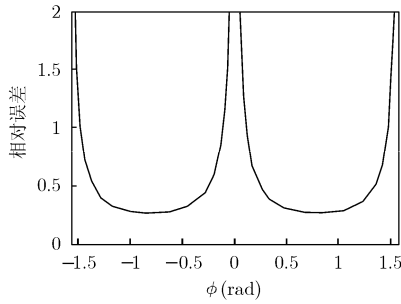


图3 ϕ 与定标参数估计最大相对误差曲线

分析可得到以下结论:

(1)当 $\phi = -\pi/2, 0, \pi/2$ 时,无法得到定标系数 μ 。

(2)定标系数 μ 越大误差越大。由于 $\mu = -\lambda/(2\omega_0)$,因此目标转速 ω_0 越大,则 μ 越小,得到的定标参数误差越小,但相对误差与 μ 无关。

(3)目标 L 和 W 越大误差越小,即尽量选择空间距离比较远的标校点 $ABCD$ 以减小误差。

(4)当 $\mu^2 < 0$ 时表明标校点(位置或顺序)或标校直线选择不合理,需要重新调整标校点或标校直线。

(5)当 $\mu, L, W, |\delta r|, |\delta f|$ 确定后, $|\Delta\mu|$ 最大误差值与目标的姿态角 ϕ 有关,可以解得定标参数最大误差最小时,姿态角满足下式:

$$|\tan\phi| = \frac{2\Delta\theta L\delta r + W\lambda}{2\Delta\theta W\delta r + L\lambda} \quad (20)$$

对应的误差范围为

$$\begin{aligned} |\Delta\mu| &\leq \left| \frac{\mu}{\sin\phi} \left(\frac{\delta r}{W} + \frac{\lambda}{2\Delta\theta L} \right) \right| \\ &= |\mu| \sqrt{\left(\frac{\delta r}{L} + \frac{\lambda}{2\Delta\theta W} \right)^2 + \left(\frac{\delta r}{W} + \frac{\lambda}{2\Delta\theta L} \right)^2} \end{aligned} \quad (21)$$

5 仿真结果

5.1 散射点模型转台 ISAR 成像与定标

设某弹头目标有3个散射点组成,横向半径 R_a 和纵向半径 R_r 均为2 m, RCS相同,其中 BC 为两

对称散射点, A 为弹头鼻端的散射点。雷达频率10 GHz,波长0.03 m,脉冲宽度为50 μ s,带宽为500 MHz,去斜(Dechirp)处理后信号采样率为10 MHz,距离分辨 δ_r 为0.3 m。设置转台逆时针旋转为正,转速为0.05 rad/s。无距离走动成像转角要满足 $\theta < \delta_r/R_a = 0.15$ rad,角度转动取0.1 rad用时约2 s,在该时间内雷达采样点数设置为256个,即采样率为128 Hz。由转台转角模型产生各散射点的慢时间位置和速度,根据宽带回波去斜信号模型产生各慢时间回波信号。由于目标只是转动,因此不用包络对齐和相位补偿,利用3个标校点定标模型得到仿真结果,如图4,其中图4(a)为弹头散射点模型, BC 为对称点, A 为目标主轴上的点;图4(b)为常规R-D成像,得到目标 $A(3.5, -1.05)$, $B(-6, 1.1)$, $C(-2.5, 2.05)$,其中选择 BC 为对称点,得到 $\mu = 0.3032$;图4(c)为横向定标结果。可见通过定标后,各散射点的相对位置关系与散射点模型基本相同, ABC 的位置和原始模型相对 X 轴是对称的,这是由于多普勒符号引起的,与各散射点的 X 轴坐标位置和目標旋转方向有关。

5.2 实测飞机目标的 ISAR 成像与定标

雅克-42飞机机身约36.38 m,翼展为34.88 m,机身高度9.83 m。在成像相参时间内,飞机运动可近似为匀速平动,用R-D算法对雅克-42飞机ISAR成像,即首先对原始数据进行一维距离成像,然后相关法包络对齐和多普勒中心跟踪法聚焦,最后方位慢时间信号傅里叶变换得到目标的2维像。利用3个标校点定标模型,在ISAR像中选择对称轴上的某散射点 A 和对称点 B, C ,根据标校点 ABC 坐标得到定标参数 μ ,并进一步得到定标后的ISAR图像,如图5,其中图5(a)为雅克-42飞机模型;图5(b)为R-D成像结果,其中标校点坐标为 $A(-4.2, 17)$, $B(-6.5, -12)$, $C(5, 2)$, BC 为对称点,得到 $\mu = 2.7862$;图5(c)为横向定标结果。翼展 $|\overline{BC}| = \sqrt{(\mu f_B - \mu f_C)^2 + (r_B - r_C)^2} = 34.9667$ m, $|\overline{BC}|$ 和翼展真值34.88 m相对误差很小。

6 结束语

目标ISAR图像横向定标是实现目标模板匹配识别和特征尺寸提取的基础。本文给出了对称目标转角估计和横向定标方法,并给出了定标参数估计误差表达式,重点分析了影响定标参数估计误差的各因素,并给出了定标参数估计误差最小时的目标姿态角。最后用弹头模型转台成像和外场飞机ISAR数据成像对该方法进行了验证。该方法结构简单,运算量非常小,在合作机动目标ISAR成像定标方面

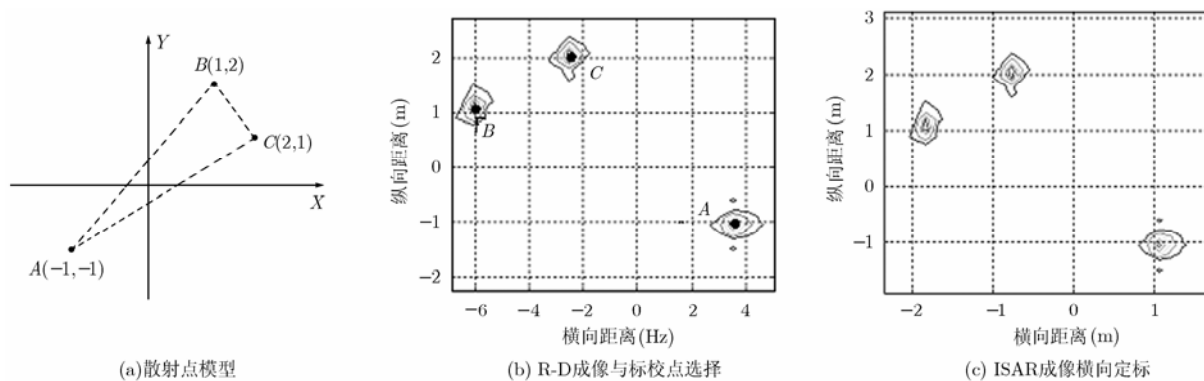


图4 散射点模型转台 ISAR 成像与横向定标

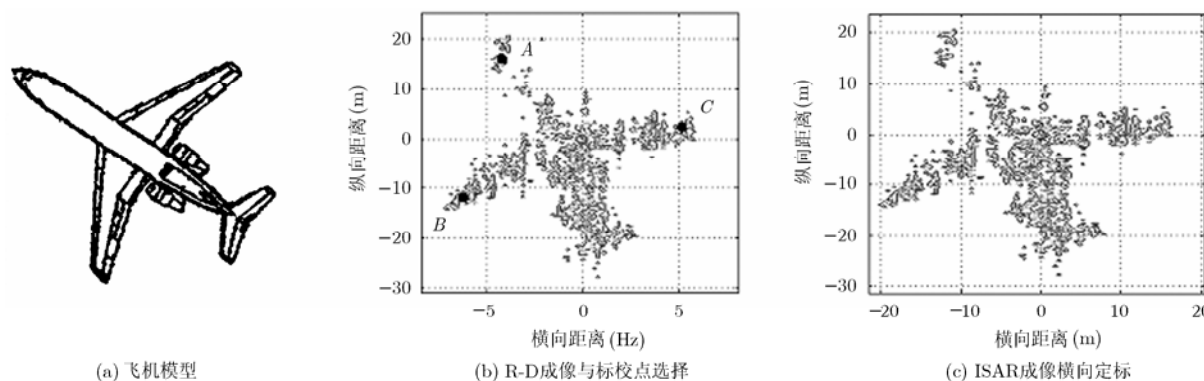


图5 实测飞机目标的 ISAR 成像与横向定标

有很好的应用前景。

非合作机动目标ISAR图像模糊散焦将造成横向定标的误差，同时信噪比对标校点选择会产生影响，这些都需要下一步研究。对称目标上散射点的相互遮挡，使ISAR像不一定是对称目标的像，另外对称目标的不同视图平面投影不一定是对称的，例如舰船目标顶视平面投影是对称目标，而侧视平面投影不是对称的，因此目标对称度下降情况下，如何横向定标也需要深入研究。

参考文献

- [1] Wang L, Zhu D Y, and Zhu Z D. Image-based scaling for ship top view ISAR images [J]. *Journal of Electronics (China)*, 2008, 25(1): 76-83.
- [2] 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.
Li X, Gu H, and Liu G S. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 44-47.
- [3] 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.
Wang Y and Jiang Y C. A new method for estimating the rotation angle of ISAR image [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 521-523.
- [4] Yamamoto K, Iwamoto M, and Kirimoto T. A new algorithm to calculate the reference image of ship targets for ATR using ISAR [C]. MTS/IEEE Conference and Exhibition, Kamakura, Japan, 2001, Vol 4: 2601-2607.
- [5] Rosenbach K H and Schiller J. Identification of aircraft on the basis of 2-D radar images [C]. IEEE International Radar Conference, Wachtberg-Werthoven, Germany, 1995: 405-409.
- [6] 姜正林, 保铮. 低分辨雷达目标成像的横向距离定标[J]. *电子与信息学报*, 2001, 23(4): 365-372.
Jiang Z L and Bao Z. A new method of cross-range scaling of low resolution radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(4): 365-372.
- [7] Zhang Q, Yeo T S, Du G, and Zhang S H. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(2): 292-300.
- [8] Qiu X H and Zhao Y. An non-parametric rotating angle acquisition method for optimal ISAR imaging [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, Albuquerque, New Mexico, USA, 2006: 2697-2700.

李文臣: 男, 1972年生, 博士生, 研究方向为雷达成像、雷达极化信号处理、电子系统建模仿真与评估、弹道导弹攻防对抗等。

王雪松: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达极化信号处理、信号处理与目标检测及识别、弹道导弹攻防对抗、综合电子战等领域研究。

丹梅: 女, 1975年生, 讲师, 研究方向为信号分析与处理、电子系统建模仿真、弹道导弹攻防对抗等。

王国玉: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 从事综合电子战、综合信息感知与处理、系统仿真试验与评估等领域研究。