

一种 ISAR 目标转动补偿及图像尺寸标定方法

叶春茂¹, 鲁耀兵¹, 宋建社², 曹 哲¹

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2. 西安市第二炮兵工程大学, 陕西西安 710025)

摘 要: 通过对逆合成孔径雷达 (ISAR) 匀速平面旋转体散射中心的距离和多普勒走动分析, 提出一种 ISAR 目标转动速度及旋转中心估计算法, 并实现目标聚焦成像. 该方法通过 Keystone 变换补偿一阶距离走动, 采用匹配处理补偿一阶多普勒走动, 从而实现对非合作目标的转动补偿和聚焦成像. 进而, 通过图像质量评价获得目标转速和等效旋转中心联合估计. 结合对目标的转动估计, 提出了较完整的高分辨 ISAR 聚焦成像及图像尺度标定的处理流程, 并分析了其应用条件. 最后, 通过实测飞机目标数据验证了该方法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达; 转动估计; 尺寸标定; 图像聚焦

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0611-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.030

A Rotation Compensation and Image Scaling Method for ISAR Targets

YE Chun-mao¹, LU Yao-bing¹, SONG Jian-she², CAO Zhe¹

(1. Institute of Beijing Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2. The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: For inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging of uniformly planar rotating objects, the characteristic of range walk and Doppler walk of a scattering center is analyzed. Thus, a method is proposed for rotation estimation and compensation. This method exploits Keystone transform to compensate for the first order range walk, and exploits matched processing to compensate for the first order Doppler walk. With the above compensation, the rotational center and velocity of a non-cooperative object may be searched. Furthermore, a complete processing scheme is formed for very high resolution ISAR imaging of non-cooperative targets, and the necessity for applying delicate imaging algorithms is investigated. Finally, experiments with some measured airplane data demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: inverse synthetic aperture radar; rotation estimation; size scaling; image focusing

1 引言

逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 是一种原理成熟的微波成像技术, 可提供目标的高分辨二维/三维图像^[1,2]. 当前, ISAR 系统已经从 L/S 等较低频段向 Ka/W 甚至是激光频段^[3]扩展, 必将在目标识别领域发挥越来越显著的作用.

在 ISAR 应用中, 通常将经过有效平动补偿^[4]处理后的目标等效成平面匀速旋转体模型. 此时, 可采用距离-多普勒 (Range Doppler, RD) 算法获取目标的二维图像. 然而, 当观测视角较大时, 目标散射中心会发生越分辨单元徙动 (Migration Through Resolution Cells, MTRC) 效

应. 此时, 采用 RD 成像结果将散焦. 为抑制 MTRC 效应, 可根据目标等效转动信息, 采用极坐标格式 (Polar Format Algorithm, PFA) 或卷积反投影 (Convolution Back-projection, CBP) 等精细成像算法补偿目标等效转动, 从而获得聚焦图像^[1]. 另一方面, RD 图像反映的是目标在距离-多普勒平面上的投影信息, 并不能提供目标的二维尺寸, 只有结合目标等效转速信息才能将目标在距离-跨距离域中进行表达. 因此, 获得目标相对雷达的转动信息, 是进行 ISAR 高分辨成像及图像信息提取的关键.

为实现目标的转动估计, 可采用雷达窄带跟踪数据拟合, 然而其精度较低, 不适用于目标存在自身姿态调整的情形. Werness 提出基于目标 ISAR 回波数据分析的

特显点处理(PPP)算法^[5]估计目标转动速度和加速度. 其后,很多研究者相继提出采用时频分析等方法^[6-8]提取目标散射中心相位系数,以增强 PPP 处理的有效性,但此类算法的鲁棒性通常不高.为此,人们希望对目标数据进行综合利用. Flores 提出采用 FPA 成像质量评价方式搜索目标的等效转速^[9],但是该方法不仅计算量大,而且由于 PFA 成像质量同时受到目标未知旋转中心的影响,因此效果较差.叶春茂等采用相邻图像相关处理的方法^[10]综合利用目标回波数据,但该方法需要较长观测时间,目标散射特性的变化对算法性能产生不利影响.

为克服现有目标转动估计及补偿方法的不足,本文提出一种综合利用目标回波数据进行转动估计的新方法.该方法通过 Keystone 变换^[2]补偿目标越距离分辨单元走动,然后通过匹配处理方式同步搜索目标等效转动中心及转速.根据转动估计结果,一方面可直接通过方位匹配处理获得目标的聚焦图像,并根据转速进行图像尺度标定;另一方面,对于高分辨应用情形,根据等效转动估计结果进行 PFA 或 CBP 成像,实现高阶转动效应补偿,得到聚焦的尺度标定图像.

2 ISAR 成像信号模型

经过平动补偿之后,在较短成像时间内一般可将 ISAR 目标视作平面匀速旋转体,如图 1 所示.在远场条件下,旋转体上某散射中心同雷达天线相位中心之间的距离可近似表达成^[10]

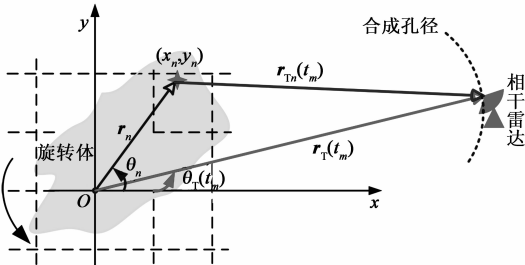


图1 旋转体模型

$$r_{Tn}(t_m) \approx r_{T0} - (x_n \cos \theta_T(t_m) + y_n \sin \theta_T(t_m)) \quad (1)$$

其中, (x_n, y_n) 为散射中心坐标, $\theta_T(t_m)$ 为随着脉冲时间 t_m 变化的雷达观测视角, $t_m = mT_r$, T_r 为脉冲重复间隔, m 为整数, r_{T0} 为目标等效旋转中心到天线相位中心的距离, 经过平动补偿之后为恒定值.

对于匀速平面旋转体假设模型, $\theta_T(t_m) = \omega_o t_m$, 其中 ω_o 为目标等效转速. 则在小角度观测假设条件下, 式(1)中的距离可进一步近似为

$$r_{Tn}(t_m) \approx (r_{T0} - x_n) - y_n \omega_o t_m + 0.5 x_n \omega_o^2 t_m^2 \quad (2)$$

当 ISAR 系统采用线性调频波形时, 散射中心回波的基带相位记录具有如下形式^[10],

$$S_d(f_b, t_m) \approx \exp(j4\pi(f_c + f_b)(p_n + v_n t_m + 0.5 \alpha_n t_m^2) / c) \quad (3)$$

其中, $|t_m| < T_{\text{obs}}/2$, T_{obs} 为成像观测时长, f_b 为基带信号频率, $|f_b| < B/2$, B 为发射信号带宽, f_c 为载波频率, c 为电磁波传播速度, $p_n = x_n - r_{T0}$, $v_n = y_n \omega_o$ 和 $\alpha_n = -x_n \omega_o^2$ 分别对应着散射中心和 APC 之间的距离、速度和加速度.

从式(3)可知, 散射中心相对于雷达的径向速度对应着 ω_o 及其跨距离向坐标 y_n , 该径向速度会引起散射中心的距离向走动并造成多普勒分辨率的下降, 造成图像散焦. 另外, 散射中心相对于雷达的加速度对应着其距离向坐标 x_n 以及 ω_o^2 , 该加速度主要引起多普勒频率的扩展, 造成图像散焦. 另外, 同一距离单元内的散射中心相对于雷达具有相同的加速度.

从上述分析可以看出, 平动补偿后引起 ISAR 图像散焦的主要因素是目标的等效转动. 若能获得目标等效转动信息, 则可采用 PFA 或 CBP 成像算法, 获得高聚焦成像结果. 遗憾的是, ISAR 目标通常是非合作的, 等效转动信息通常是未知的.

3 图像聚焦处理及转动估计

为补偿目标等效转动带来的 ISAR 图像散焦现象, 需要补偿散射中心相对于雷达的速度和加速度分量. 对于散射中心越距离单元走动问题, 可采用 Keystone^[2]处理进行抑制. 对于散射中心相对雷达的加速度, 在忽略其引起的距离走动效应的情况下, 主要是补偿其引起的多普勒展宽效应. 这里提出一种基于图像质量评价的方法补偿加速度引起的多普勒展宽效应, 同时获得非合作目标的等效旋转中心和转速估计, 实现成像结果的尺寸标定.

3.1 基于 Keystone 变换的距离走动补偿

采用 Keystone 变换对散射中心回波相位记录进行处理, 映射关系为 $(f_b + f_c) t_m = f_c \tau_m$. 经过变换后, 依据式(3), 散射中心回波相位记录的相位项为

$$\begin{aligned} \varphi(\tau_m) &= \frac{4\pi}{c} \left((f_c + f_b) p_n + v_n f_c \tau_m + \frac{0.5 \alpha_n f_c^2}{f_b + f_c} \tau_m^2 \right) \\ &\approx \frac{4\pi}{c} \left((f_c + f_b) p_n + v_n f_c \tau_m + 0.5 \alpha_n f_c \tau_m^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

忽略加速度引起的跨距离单元走动, 经过 Keystone 变换后, 散射中心回波位于同一距离分辨单元. 此时, 散射中心的相位记录可表达为

$$s_d(\tau_m) = \sigma_n \exp(j2\pi \alpha_n \tau_m^2 / \lambda) \exp(j2\pi f_{dn} \tau_m) \quad (5)$$

其中, $\lambda = c/f_c$ 为载波波长, $f_{dn} = 2v_n/\lambda$ 为散射中心的中心多普勒频率.

此时, 由于目标等效转动的影响, 散射中心多普勒存在调制效应, 引起图像方位向散焦. 该多普勒调制效

应可近似为二阶相位信号.

3.2 多普勒补偿及目标等效转动估计

由于相同距离单元内匀速旋转体上的散射中心回波二阶多普勒调制系数相同,可设计如下的方位多普勒匹配函数,补偿散射中心的一阶多普勒走动,

$$s_m(\tau_m | \mathbf{r}_T, \omega) = \exp(-j2\pi(\mathbf{p}_n + \mathbf{r}_T)\omega^2 \tau_m^2 / \lambda) \quad (6)$$

则目标的等效旋转中心以及转速可以通过如下方式估计得到.

$$\{\hat{\mathbf{r}}_{T0}, \hat{\omega}_o\} = \min_{\mathbf{r}_T, \omega} \text{IE} \left\{ \left| \text{FT}_{\tau_m} \left\{ s_d(\tau_m) s_m^*(\tau_m | \mathbf{r}_T, \omega) \right\} \right| \right\} \quad (7)$$

其中,“*”表示复共轭, $\text{FT}_{\tau_m}(\cdot)$ 表示对变量 τ_m 进行傅立叶变换, $\text{IE}(\cdot)$ 表示求图像熵.

图像熵定义为

$$\text{IE}(I(x, y)) = - \sum_m \sum_n \bar{I}(x_m, y_n) \ln(\bar{I}(x_m, y_n)) \quad (8)$$

其中, $\bar{I}(x_m, y_n) = I^2(x_m, y_n) / \sum I^2(x_m, y_n)$, $I(x_m, y_n)$ 为像素灰度值.

通过上述处理,在获得目标等效旋转中心和转速估计的同时,实现了目标转动的补偿和图像的聚焦.结合对目标转速估计的结果,可以实现图像的跨距离向尺寸标定.图像的跨距离向尺寸标定因子 η_a 为 $\eta_a = \lambda / (2MT_r\omega_o)$,其中, M 为成像积累脉冲数.

根据上述尺寸标定因子,结合目标转速估计结果,即可通过 ISAR 成像结果获得具有实际意义的目标形状和尺寸信息.

3.3 高分辨 ISAR 聚焦成像流程设计

上述处理过程中,通过 Keystone 变换,可以抑制散射中心的距离向走动;通过对不同距离单元回波的匹配处理实现对散射中心越多普勒走动的抑制.然而,上述的处理方式只能抑制低阶的走动效应.为实现更精细的目标成像,可采用如图 2 所示的处理流程,在本文的目标转速及转动中心估计的基础上,进行 PFA 或 CBP 成像处理,获得更精细的非合作目标图像.

这里对进行 PFA 成像的必要性问题做一点补充说明.根据式(2),成像观测时间内散射中心的距离弯曲近似为 $R_{\text{curve}} \approx x_n \omega_o^2 T_{\text{obs}}^2 / 8$.同时,根据式(1),散射中心的多普勒弯曲量近似为 $D_{\text{curve}} \approx y_n \omega_o^3 T_{\text{obs}}^2 / (2\lambda)$.可以设定:如果散射中心距离弯曲大于八分之一的距离分辨单元,多普勒弯曲大于八分之一的多普勒分辨单元,则有必要采用 PFA 或 CBP 等算法进行精细成像处理.否则,没有必要进行 CBP 或 PFA 成像.因为 PFC 和 CBP 成像算法都需要进行插值处理,而插值误差本身就会影响成像质量.

假设目标的最大距离位置为 x_M ,积累视角为 θ_c .最大跨距离向位置为 y_M ,则无需进行 PFA 或 CBP 精细成像的条件可设置为

$$x_M \theta_c^2 < \rho_r, \quad y_M \theta_c^3 < \lambda / 4 \quad (9)$$

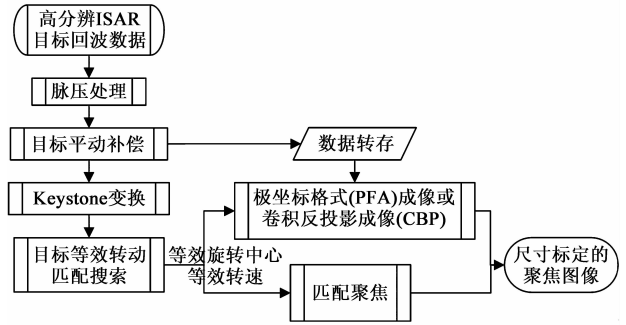


图2 高分辨ISAR聚焦处理流程

4 实测数据验证及分析

4.1 飞机目标实测数据验证

采用我国首部 ISAR 试验系统^[10]采集的飞机数据进行验证.一共处理 1024 批回波,观测时长为 5.12s.图 3(a)展示了飞机的设计草图,该型飞机翼展 34.88m,长 36.38m.图 3(b)展示了 RD 成像结果,此时目标跨距离向尺寸未知;图 3(c)展示经过 Keystone 变换后的成像结果;图 3(d)展示采用匹配处理方式进行目标等效旋转中心及转速搜索结果,相应的目标转速估计为 0.010rad/s,成像过程积累的目标视角变化约为 2.93deg;根据目标等效转速搜索结果,对 RD 图像进行尺寸标定,如图 3(e)所示;根据目标转动估计结果进行匹配处理,获得的尺寸标定聚焦图像如图 3(f)所示.综合图 3(f)的分析,最终获得飞机长度估计为 31.3m;获得飞机翼展估计为 34.15m.结合图 3(a)的目标设计图,可见目标尺寸得到了很好的估计.根据飞机目标的尺寸和转动估计结果,容易看出对这批数据没有必要进行 PFA 或 CBP 成像处理.

另外,以图像熵作为评价准则衡量上述目标转动估计过程中各阶段的成像质量.原始 RD 处理的图像熵为 7.886,经 Keystone 变换处理后图像熵为 7.866,Keystone 变换处理后再进行方位匹配处理的目标图像熵为 7.850.由于平动补偿存在剩余误差,真实目标散射特性复杂等因素,图像熵的变化量并不十分显著.但是,依然可以看到图像聚焦效果得到了逐步提升.

4.2 数据处理讨论

实际上,根据非合作目标的 ISAR 回波数据对其等效转动进行估计是一个非常复杂的问题.等效转动估计方法的性能不仅取决于 ISAR 系统参数,如距离分辨率,波长,等效观测视角等;而且还与目标自身的散射特性、结构、尺寸等诸多因素有关.另外,转动估计性能还与目标自身的等效转动有关.这里重点讨论本文提出算法的模型适应性问题.

本文假设在较短的成像时间间隔内目标呈匀速平面旋转运动,这在一般情况下是成立的.然而,还存在观测时间段内目标表现为匀加速旋转运动的情形.根据式(1),匀加速旋转目标的散射中心相对雷达径向加速度为 $\alpha_n = y_n \alpha_o - x_n \omega_o^2$,其中, α_o 为目标旋转加速度.可

见,目标匀加速旋转主要引起散射中心加速度发生变化,且其影响与目标的跨距离向坐标紧密耦合.因此,为提高本文目标转速估计方法的鲁棒性,在进行匹配搜索时,可以缩小对图像质量评价的多普勒范围,以应对匀加速旋转目标模型.

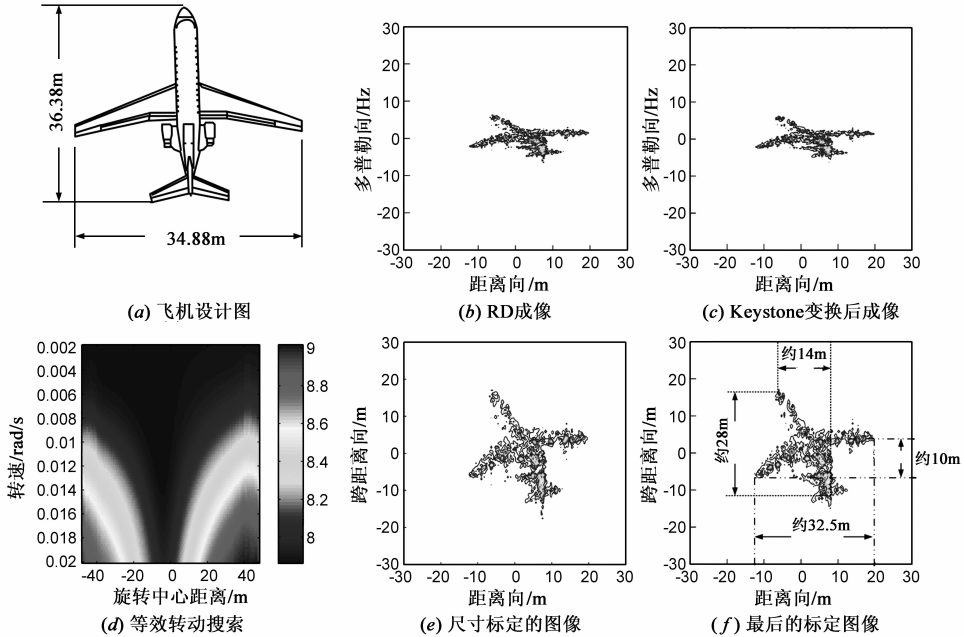


图3 实测飞机数据实验

5 结论

传统的 ISAR 成像通常只能提供匀速平面旋转目标的 RD 图像,这种成像方式既不能克服散射中心 MTRC 效应,也无法有效提供目标的二维形状和尺寸信息.本文充分利用成像观测时间段内匀速目标散射中心走动的属性,提出了补偿散射中心一阶跨距离走动和跨多普勒走动的方法,同时有效地获得了目标等效转速的估计,从而不仅提高了成像质量,而且能实现图像二维尺度标定,提供较为精确的目标二维尺寸信息.实测数据实验证实了该方法的有效性,表明其实际应用价值.

参考文献

- [1] D A Ausherman, A Kozma, J L Walker, et al. Developments in Radar Imaging[J]. IEEE Transactions on AES, 1984, 20(4): 363 - 400.
- [2] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [3] 何劲,张群,罗迎,等.逆合成孔径成像激光雷达微多普勒效应分析与特征提取.[J].电子学报,2011,39(9):2052 - 2059.
HE Jin, ZHANG Qun, LUO Ying, et al. Analysis of micro -

- Doppler effect and feature extraction of target in inverse synthetic aperture imaging radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2052 - 2059. (in Chinese)
- [4] F Berizzi, M Martorella, B Haywood, et al. A survey on ISAR autofocus technique[J]. International Conference on Image Processing, 2004, 1(10): 9 - 12.
- [5] S Werness, W Carrara, L Joyce, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data[J]. IEEE Transactions on AES, 1990, 26(11): 57 - 67.
- [6] 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 Xi, Gu Hong, Liu Guosui. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 44 - 47. (in Chinese)
- [7] M Martorella. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. IEEE Transactions on AES, 2008, 44(1): 281 - 294.
- [8] C M Yeh, J Yang, Y N Peng, et al. Rotation estimation for ISAR targets with a space-time analysis technique[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 899 - 903.
- [9] B C Flores, A Ugarte. Refinement of range-Doppler imagery by feedback control[J]. SPIE—Automatic Object Recognition III, 1993, 1960: 36 - 46.
- [10] C M Yeh, J Xu, Y N Peng, et al. Rotational motion estimation

for ISAR via triangle pose difference on two range-Doppler

images[J]. IET Radar Sonar Navig, 2010, 4(4): 528 – 536.

作者简介



叶春茂 男, 1981 年出生, 湖北咸宁人, 高级工程师, 博士(后), 主要研究领域为雷达系统总体技术、雷达成像与识别.

E-mail: chunmaoyeh@gmail.com



宋建社 男, 1954 年出生, 教授, 主要研究方向为雷达图像处理、目标识别等.



鲁耀兵 男, 1965 年出生, 湖北天门人, 研究员, 主要研究领域为固态相控阵雷达系统、雷达成像技术等.

曹哲 男, 1973 年出生, 研究员, 主要研究方向为雷达系统总体设计.