

空间目标双基地 ISAR 越多普勒单元徙动校正算法

郭宝锋, 尚朝轩, 王昕, 马俊涛, 董健

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 针对双基地逆合成孔径雷达 (ISAR) 的越多普勒单元徙动问题, 以转台模型为研究对象, 分别从回波信号模型和散射点相对收发双站速度变化 2 个角度分析了越多普勒单元徙动的产生机理, 并提出了基于距离单元相位补偿的多普勒徙动校正算法。该算法首先由双基地雷达与目标的几何关系估计出其等效旋转速度, 然后通过等分观测期间的目标回波获取 2 幅不同观测视角的 ISAR 图像, 依据图像旋转相关最大准则估计出图像的等效旋转中心, 实现一维距离像的定标, 最后对每个距离单元进行相位补偿, 完成越多普勒单元徙动的校正。仿真实验表明, 算法能有效解决双基地 ISAR 越多普勒徙动问题, 提高 ISAR 成像质量。

关键词: 双基地; 逆合成孔径雷达; 越多普勒单元徙动; 等效旋转速度估计; 等效旋转中心估计

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)09-0197-10

Correction algorithm of migration through Doppler cells for space target in bistatic ISAR

GUO Bao-feng, SHANG Chao-xuan, WANG Xin, MA Jun-tao, DONG Jian

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem of migration through Doppler cells in bistatic ISAR, based on bistatic ISAR turntable model, the reason of migration through Doppler cells from two aspects of echo model and the relative speed changes of scattered points was analyzed. The correction algorithm was presented based on range cell phase compensation. Firstly, target rotating rate was estimated through the geometrical relationship of bistatic stations and target. Secondly, the algorithm divided the echo data into two parts, and then imaging separately, getting two images of different angles of view. And the rotating center was estimated according to the maximum criterion of rotating correlation, which was used to range scaling. The migration through Doppler cells was corrected through phase compensation of each range cell at last. The simulation result show that the method could solve the problem of migration through Doppler cells, and could improve the image quality.

Key words: bistatic; ISAR; migration through Doppler cells; equivalent rotating rate estimation; equivalent rotating center estimation

1 引言

双基地雷达是发射机和接收机分开放置的雷达系统, 该系统收发分置的工作方式使雷达在对抗“四大威胁”方面具有突出优势^[1]。双基地 ISAR 是基于双基地雷达平台的 ISAR 系统, 在具备“四抗”特性的同时, 它利用接收的目标非后向散射回波进行成像, 能够较单基地雷达获取更加丰富的目

标信息^[2,3]。对于一些目标, 某些视角下, 单基地 ISAR 回波信号可能较弱, 无法得到较清晰的图像, 而双基地 ISAR 有可能在接收站得到高质量的图像, 特别是对一些单基地雷达隐身的目标, 双基地 ISAR 接收到的回波强度一般会明显增加, 并可以获得目标的图像。

国内外对双基地 ISAR 的研究在 2000 年前报道很少, 近年来才开始有较为系统的研究。俄亥俄州

收稿日期: 2013-07-14; 修回日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271373)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61271373)

立大学的 Burkholder 等人从双基地情况下电磁散射变化的角度出发, 分析了双基地角存在情况下目标电磁散射的变化, 并进行了暗室成像实验^[4]。意大利 Pisa 大学的 Martorella 和澳大利亚防御科学与技术组织的 Palmer 等人研究了双基地 ISAR 成像的基本原理, 建立了双基地回波模型, 探讨了双基地角时变对分辨率的影响及对 ISAR 成像的约束, 分析了利用双基地 ISAR 成像在 SAR/ISAR 混合系统中进行旋转矢量估计和图像定标的方法^[5]。Chen 分析了目标双基地多普勒及微多普勒特征, 并指出了其相对单基地 ISAR 的优势^[6]。国内对双基地 ISAR 的研究与单基地几乎同时起步, 2005 年开始, 国防科技大学、海军工程大学和西安电子科技大学先后报道了各自的双基地 ISAR 研究成果^[7-9], 对双基地 ISAR 成像原理、分辨率、目标尺寸限制、采样率、成像平面分析等进行了较为系统的研究, 具有较强指导意义。

双基地雷达由于收发分置, “三大同步”问题^[1]即时间同步、空间同步、频率同步是其主要难题, 反向投影 (BP) 算法、极坐标格式 (PFA) 算法等对雷达同步及目标位置信息要求极高, 现有条件下在实际成像中难以应用, 必须使用距离—多普勒 (RD) 算法、距离—瞬时多普勒 (RID) 等对时频同步要求、位置精度要求较低的成像算法。双基地 ISAR 利用距离多普勒原理进行成像时, 与单基地 ISAR 类似, 经理想的运动补偿后, 就转化为转台模型^[10]。目标的旋转容易引起散射点越分辨单元走动问题, 导致 ISAR 二维像散焦, 影响目标的识别效果^[11,12]。目前, 对双基地 ISAR 越分辨单元徙动的研究主要集中在越距离徙动方面^[13-15], 而对越多普勒单元徙动的研究还很少。

由后文的分析可知, 越多普勒单元徙动的校正, 需要估计目标的等效旋转速度和等效旋转中心位置。目标旋转速度估计一般基于特显点跟踪的方法和回波信号参数分析方法^[16,17], 特显点跟踪的方法要求目标有孤立的强散射点, 在实际情况下很难找到, 而回波信号参数分析方法通过调频参数分析估计目标转角, 步骤复杂且计算量大。目标等效旋转中心估计可由基于单特显点的运动补偿方法近似得到, 但该方法精度较低, 影响后续图像的聚焦效果, 并且, 不是所有的图像都有理想的单特显点单元^[18], 因此, 该方法的应用受到很大的限制。针对平动补偿不能提供等效旋转中心的情况, 清华大

学的叶春茂等人在文献^[19,20]提出了利用某一散射点在 2 幅图像中的位置差提取目标等效旋转中心的位置, 由于成像过程视角一般变化很小, 一个散射点的在 2 幅图像中的位置变化很小, 该方法估计精度也不高, 并且受所选散射点相对等效旋转中心的位置影响较大。

本文针对双基地 ISAR 的越多普勒单元徙动问题, 以转台模型为研究对象, 深入分析了越多普勒单元徙动的产生机理, 对目标的等效旋转速度和等效旋转中心位置等重要参数进行估计, 并补偿一维距离像的相位, 完成越多普勒单元徙动的校正, 仿真结果表明了该方法的有效性。

2 双基地 ISAR 转台模型

图 1 为双基地 ISAR 转台模型, T 和 R 分别为发射站和接收站, 双基地角为 β , O 点为目标的散射中心, 以 O 为原点, 以双基地角平分线为 y 轴建立直角坐标系。目标上的某散射点 $P(x_p, y_p)$ 以旋转速度 ω 绕 O 点转动, 设 OP 长度为 d , 起始时刻与 x 轴夹角为 θ 。

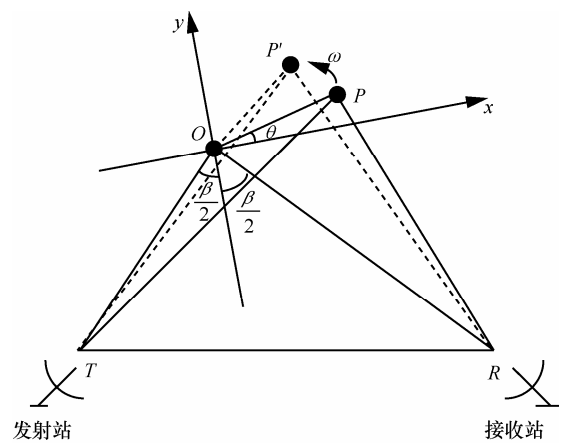


图 1 双基地 ISAR 转台模型

发射站雷达以脉冲重复周期 PRT 发射线性调频信号

$$s_i(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2} \mu \hat{t}^2\right)\right) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$, \hat{t} 为快时间,

$t_m = m\text{PRT}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 为发射时刻, 称作慢时间, t 为全时间, 三者之间的关系为 $\hat{t} = t - m\text{PRT}$, f_c 为

载波频率, T_p 为脉冲宽度, μ 为调频率。

设 P 点的散射系数为 σ_p , t_m 时刻, P 旋转到 $P'(x_{p'}, y_{p'})$, P' 到收发双站的距离和为 $R_{p'}$, 即 $R_{p'} = R_{TP'} + R_{RP'}$, 设光速为 c , 则接收站雷达接收到的回波信号为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sigma_p \text{rect} \left(\frac{\hat{t} - R_{p'}/c}{T_p} \right) \exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t - \frac{R_{p'}}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(\hat{t} - \frac{R_{p'}}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (2)$$

假设双基地雷达理想同步, 对回波信号解线频调处理, 取参考距离 $R_{ref} = R_{TO} + R_{RO}$, 参考信号为

$$s_{ref}(\hat{t}, t_m) = \text{rect} \left(\frac{\hat{t} - R_{ref}/c}{T_{ref}} \right) \exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t - \frac{R_{ref}}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(\hat{t} - \frac{R_{ref}}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (3)$$

T_{ref} 为参考信号的脉宽, 它比 T_p 要大一些。则解线频调后的差频输出为

$$\begin{aligned} s_{if}(\hat{t}, t_m) &= s_r(\hat{t}, t_m) s_{ref}^*(\hat{t}, t_m) \\ &= \sigma_p \text{rect} \left(\frac{\hat{t} - R_{p'}/c}{T_p} \right) \exp \left(j \frac{\pi \mu}{c^2} R_{\Delta}^2 \right) \\ &\quad \exp \left(-j \frac{2\pi (f_c + \mu \hat{t} - \mu \tau)}{c} R_{\Delta} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\tau = R_{ref}/c$, $R_{\Delta} = R_{p'} - R_{ref}$ 。

3 越多普勒单元徙动机理分析

3.1 基于回波模型的越多普勒单元徙动机理分析

对式(4)在快时间域作傅里叶变换, 得

$$S_{if}(f, t_m) = \sigma_p T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f + \frac{\mu}{c} R_{\Delta} \right) \right) \exp \left(-j2\pi \frac{f_c}{c} R_{\Delta} - j2\pi \frac{f}{c} R_{\Delta} + j \frac{\pi \mu}{c^2} R_{\Delta}^2 \right) \quad (5)$$

式(5)中的3个相位项, 第一项为多普勒项, 这是正常的; 第二项为回波包络斜置项, 该项可通过“去斜”处理补偿掉^[18]; 第三项是解线频调方法所特有的, 称为剩余视频相位(RVP), 它对多普勒的

影响很小。式(5)可进一步表示为

$$S_{if}(f, t_m) = \sigma_p T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f + \frac{\mu}{c} R_{\Delta} \right) \right) \exp \left(-j2\pi \frac{f_c}{c} R_{\Delta} \right) \quad (6)$$

式(6)是双基地 ISAR 的一维距离像。sinc 函数的峰值位置对应着散射点相对雷达的距离信息, 若发生越距离单元徙动, 可采用文献[13]提出的 Keystone 变换进行校正。指数相位项是慢时间的函数, 包含了散射点方位信息, 对式(6)的每个距离单元在慢时间域作傅里叶变换即可得到目标二维像。

平稳目标双基地 ISAR 成像时, 成像时间较短, 成像期间目标的转动速度可近似为常数^[21] ω_0 。在 t_m 时刻, 散射点 P' 旋转角度 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \omega_0 t_m \quad (7)$$

双基地雷达系统中, 目标尺寸远小于到收发双站距离, 即 $d \ll R_{TO}, R_{RO}$, 则 P' 到收发双站的距离

$$R_{TP'} = R_{TO} + d \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} - (\theta + \Delta\theta) \right) \quad (8)$$

$$R_{RP'} = R_{RO} + d \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2} - (\theta + \Delta\theta) \right) \quad (9)$$

P' 到收发双站距离和与参考距离之差为

$$\begin{aligned} R_{\Delta} &= (R_{TP'} + R_{RP'}) - (R_{TO} + R_{RO}) \\ &= 2(x_p \sin \Delta\theta + y_p \cos \Delta\theta) \cos \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $\Delta\theta \ll 1$, 所以

$$R_{\Delta} = \left(2x_p \omega_0 t_m + 2y_p \left(1 - \frac{\omega_0^2 t_m^2}{2} \right) \right) \cos \frac{\beta}{2} \quad (11)$$

式(6)中的相位可记为

$$\begin{aligned} \varphi &= -2\pi \frac{f_c}{c} R_{\Delta} \\ &= -2\pi \frac{f_c}{c} \left(2x_p \omega_0 t_m + 2y_p \left(1 - \frac{\omega_0^2 t_m^2}{2} \right) \right) \cos \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

散射点的多普勒频率

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{2f_c}{c} (x_p \omega_0 - y_p \omega_0^2 t_m) \cos \frac{\beta}{2} \quad (13)$$

可以看出, 多普勒频率不是固定不变的, 它是慢时间 t_m 的线性函数, 其初始值由散射点方位坐标决定, 斜率由散射点距离坐标决定。

3.2 基于等效速度变化的越多普勒单元徙动机理分析

下面从散射点相对收发双站等效速度变化的

角度分析越多普勒单元徙动的产生机理。

$P'(x_{p'}, y_{p'})$ 与 $P(x_p, y_p)$ 坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_{p'} \\ y_{p'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t_m) & -\sin(\omega_0 t_m) \\ \sin(\omega_0 t_m) & \cos(\omega_0 t_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

P' 的旋转速度矢量为

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega}_0 \times \mathbf{OP}' \quad (15)$$

$\boldsymbol{\omega}_0$ 为旋转角速度矢量, 方向垂直纸面向外, \mathbf{V} 方向始终与 \mathbf{OP}' 垂直, 则 P' 相对发射站雷达的速度 V_T , 相对接收站雷达的速度 V_R 分别为

$$V_T = V \frac{\mathbf{TO}}{|\mathbf{TO}|} = V \cos\left(\frac{\beta}{2} + (\theta + \omega_0 t_m)\right) \quad (16)$$

$$V_R = V \frac{\mathbf{RO}}{|\mathbf{RO}|} = V \cos\left(\frac{\beta}{2} - (\theta + \omega_0 t_m)\right) \quad (17)$$

散射点相对收发双站的速度和

$$V_\Sigma = V_T + V_R = 2x_p \omega_0 \cos \frac{\beta}{2} \quad (18)$$

散射点多普勒为

$$\begin{aligned} f_d &= -\frac{V_\Sigma}{c} f_c \\ &= -\frac{2(x_p \cos(\omega_0 t_m) - y_p \sin(\omega_0 t_m)) \omega_0}{c} f_c \cos \frac{\beta}{2} \quad (19) \end{aligned}$$

由于 $\omega_0 t_m$ 很小, 式(19)可近似表示为

$$f_d = -\frac{2(x_p - y_p \omega_0 t_m) \omega_0}{c} f_c \cos \frac{\beta}{2} \quad (20)$$

该表达式与通过回波模型分析得到的结果与式(13)完全相同。假设双基地 ISAR 成像时间为 T , 则多普勒的变化量如式(21)所示。

$$\Delta f_d = \frac{2y_p \omega_0^2 T}{c} f_c \cos \frac{\beta}{2} \quad (21)$$

以上分别从回波模型和相对收发双站等效速度变化的角度, 分析了越多普勒单元徙动的发生机理。可以看出, 越分辨单元徙动越多普勒单元徙动的产生是由于成像期间散射点的转动多普勒不恒定引起的, 当多普勒变化量超过一个分辨单元时, 就会出现越多普勒单元徙动现象, 造成图像方位向的散焦。当双基地角 $\beta = 0$ 时, 收发双站雷达在同一地方, 该特殊情况下的双基地 ISAR 就是单基地 ISAR, 单基地 ISAR 越多普勒单元徙动产生机理与双基地内一致, 根源也在于散射点等效转动多普

勒的变化, 两者又有所不同, 在相同的雷达参数及累积转角条件下, 双基地 ISAR 的多普勒走动大小是单基地的 $\cos(\beta/2)$ 倍。

若要求不发生越多普勒单元徙动, 多普勒的变化量应小于一个多普勒分辨单元 $1/T$ 。以典型双基地 ISAR 系统为例, 设成像累计时间 $T = 2\text{ s}$, 线性调频信号波长 $\lambda = 3\text{ cm}$, 双基地角 $\beta = 60^\circ$, 目标转动速度 $\omega_0 = 0.05\text{ rad/s}$, 目标纵向尺寸 $y_p = 10\text{ m}$, 此时, 多普勒走动为 3 Hz , 跨越了 6 个多普勒分辨单元。当目标尺寸较大时, 目标两侧的散射点会穿过更多个多普勒分辨单元, 严重影响 ISAR 成像效果。

4 越多普勒单元徙动校正方法

由于越多普勒单元徙动会引起 ISAR 二维像的横向散焦, 需要对其校正。式(12)中慢时间的二次项是引起多普勒走动的根本原因, 由于式(12)是散射点距离向和旋转速度的函数, 同时, 旋转速度估计也是实现方位向定标的前提^[17], 因此, 需先估计出目标的等效旋转速度和等效旋转中心位置, 然后对距离向准确定标, 进而对每个距离单元进行相位补偿, 完成多普勒单元徙动的校正。

4.1 等效旋转速度估计

平稳目标双基地 ISAR 成像时, 成像时间较短, 双基地角时变效应引起的图像畸变^[22]可以忽略^[21], 目标等效转动速度可认为是常值^[21]。本文充分利用收发双站雷达与目标的三角几何关系, 估计目标的等效旋转速度。

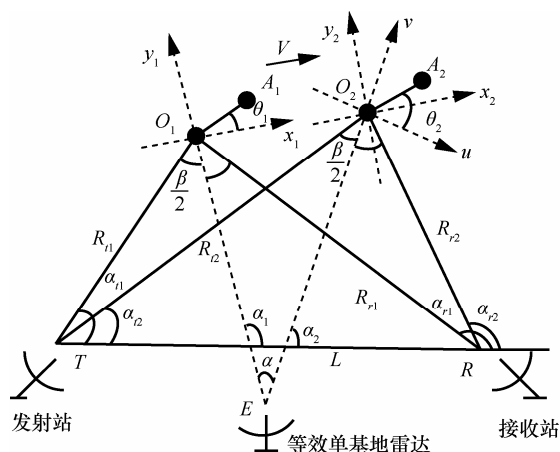


图 2 收发双站雷达与目标的几何关系

图 2 所示为收发双站雷达与目标的几何关系, T 为发射站, R 为接收站, L 为雷达基线长度, E 点为双基地雷达成像系统的等效单基地雷达位置。

在 t_1 时刻, O_1 为目标质心, 以 O_1 为原点, 双基地角平分线 y_1 轴为距离向, 建立直角坐标系 $x_1O_1y_1$, 散射点 A_1 与 x_1 轴的夹角为 θ_1 , 目标质心到收发双站的距离分别为 R_{r1} 、 R_{t1} , TO_1 、 RO_1 、 EO_1 与雷达基线的夹角分别为 α_{r1} 、 α_{t1} 、 α_1 。在 t_2 时刻, 目标质心为 O_2 , 坐标系 $x_2O_2y_2$ 是由坐标系 $x_1O_1y_1$ 平移后得到的, 以 O_2 为原点, 双基地角平分线 v 为距离向, 建立直角坐标系 uO_2v , 新坐标系中各物理量含义与 t_1 时刻类同, 不再赘述, 并令 $\angle O_1EO_2 = \alpha$ 。

根据三角几何关系, 容易得出, 散射点 A 的旋转角度 $\theta_2 - \theta_1$ 即为 α , 并且转角 α 与等效单基地雷达视角 α_1 、 α_2 的关系为

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (22)$$

同时有

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{r1} + \alpha_{t1}}{2} \quad (23)$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{r2} + \alpha_{t2}}{2} \quad (24)$$

由目标质心与收发双站构成的三角形, 可得

$$\alpha_{r1} = \arccos\left(\frac{R_{r1}^2 + L^2 - R_{t1}^2}{2R_{r1}L}\right) \quad (25)$$

$$\alpha_{t1} = \pi - \arccos\left(\frac{R_{t1}^2 + L^2 - R_{r1}^2}{2R_{t1}L}\right) \quad (26)$$

$$\alpha_{r2} = \arccos\left(\frac{R_{r2}^2 + L^2 - R_{t2}^2}{2R_{r2}L}\right) \quad (27)$$

$$\alpha_{t2} = \pi - \arccos\left(\frac{R_{t2}^2 + L^2 - R_{r2}^2}{2R_{t2}L}\right) \quad (28)$$

综合式(22)~式(28), 成像过程中散射点的等效旋转角度为

$$\alpha = \frac{\arccos\left(\frac{R_{r1}^2 + L^2 - R_{t1}^2}{2R_{r1}L}\right) + \arccos\left(\frac{R_{r2}^2 + L^2 - R_{t2}^2}{2R_{r2}L}\right)}{2} - \frac{\arccos\left(\frac{R_{t1}^2 + L^2 - R_{r1}^2}{2R_{t1}L}\right) + \arccos\left(\frac{R_{t2}^2 + L^2 - R_{r2}^2}{2R_{t2}L}\right)}{2} \quad (29)$$

假定收发双站雷达空间同步, 目标质心到收发双站的距离可以得到, 根据式(29)即可求得等效旋转角度, 其与观测时间的比值即为等效旋转速度。

4.2 等效旋转中心估计

平稳运动目标经理想的运动补偿, 就转化为图1所示的转台模型, 这里仍采用图1的模型进行分析。距离多普勒算法成像后, 目标等效旋转中心在二维图像中的像素点位置设为 (X_c, Y_c) , 散射点 P' 在二维图像中的位置为

$$X(t_m) = X_c + \frac{x_{p'}}{\Delta x} \quad (30)$$

$$Y(t_m) = Y_c + \frac{y_{p'}}{\Delta y} \quad (31)$$

式中, $\Delta x = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_\Sigma \cos \frac{\beta}{2}}$, $\Delta y = \frac{f_s c}{2N\mu \cos \frac{\beta}{2}}$ 分别为方位向和距离向的尺度因子, $\Delta\theta_\Sigma$ 为双基地 ISAR 成像过程中累积转角, f_s 为快时间采样频率, N 为每个回波脉冲的快时间采样点数。

式(30)和式(31)可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} X(t_m) \\ Y(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \mathbf{S}\mathbf{Q} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (32)$$

式中, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1/\Delta x & 0 \\ 0 & 1/\Delta y \end{bmatrix}$ 为尺度因子矩阵,

$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t_m) & -\sin(\omega_0 t_m) \\ \sin(\omega_0 t_m) & \cos(\omega_0 t_m) \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵。

将总的观测时间内的回波数据等分成2段, 并分别成像, 得到2幅 ISAR 图像, 2幅图像的方位和距离尺度因子相同, 由于2幅图像相对初始时刻转角不同, 散射点位置的旋转矩阵不同, 设初始时刻雷达的等效视角为 φ_0 , 令 $\varphi_1 = \varphi_0 + \frac{\Delta\theta_\Sigma}{4}$, $\varphi_2 = \varphi_0 + \frac{3\Delta\theta_\Sigma}{4}$, 2幅图像的视角差 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\theta_\Sigma/2$, 则散射点位置对应关系依照式(32)可写为

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \mathbf{S}'\mathbf{Q}_1 \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \mathbf{S}'\mathbf{Q}_2 \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (34)$$

其中, $\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} 1/(2\Delta x) & 0 \\ 0 & 1/\Delta y \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix}。$$

记视角差旋转矩阵 $\mathbf{Q}_\Delta = \begin{bmatrix} \cos\Delta\varphi & -\sin\Delta\varphi \\ \sin\Delta\varphi & \cos\Delta\varphi \end{bmatrix}$ 。根

据式(33)和式(34)，散射点在 2 幅 ISAR 图像中的位置关系

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \mathbf{S}'\mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_\Delta(\mathbf{S}'\mathbf{Q}_1)^{-1} \left(\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \right) \quad (35)$$

令 $\Phi = \mathbf{S}'\mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_\Delta(\mathbf{S}'\mathbf{Q}_1)^{-1}$ ，上式可改写为

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} = \Phi \left(\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \right) \quad (36)$$

Φ 为 2 幅图像像素位置的坐标转换因子矩阵，即，第二幅 ISAR 像的散射点相对等效旋转中心的位置可由第一幅图像相对等效旋转中心的位置经变换矩阵 Φ 得到。双基地 ISAR 的等效旋转中心在多普勒为零的等多普勒线上，只需假定等效旋转中心的对应距离单元位置，对第一幅图进行变换，用得到的图像与第二幅图做相关，当相关性最大时，该假定的旋转中心位置即为目标的等效旋转中心。

4.3 越多普勒单元徙动校正

估计得到等效旋转中心后，对一维距离像的距离向定标，通过对式(12)中慢时间的二次项补偿，就可以完成多普勒徙动的校正。补偿因子为

$$\phi = \exp\left(-j2\pi \frac{f_c}{c} y_p \omega_0^2 t_m^2 \cos\frac{\beta}{2}\right) \quad (37)$$

双基地 ISAR 越多普勒单元徙动校正的具体步骤如下。

step1 根据首发双站雷达与目标的几何关系，估计出目标的等效旋转速度；

step2 对回波数据解线频调，并作“去斜”处理；

step3 对解线频调后的回波信号脉冲压缩，得到一维距离像，并进行平动补偿和相位校正；

step4 利用文献[13]提出的 Keystone 变换方法对越距离单元徙动校正；

step5 将回波脉冲等分成 2 部分，并分别成像；

step6 在零多普勒线上假定旋转中心位置，对第一幅图像经矩阵 Φ 作旋转变换，得到的图像与第二幅 ISAR 像做相关，2 幅图像相关值最大时对应的假定旋转中心位置即为等效旋转中心位置；

step7 根据旋转中心位置，对距离向定标，并通过相位补偿因子式(37)对一维距离像的每个距离单元进行补偿；

step8 对补偿后的每个距离单元作傅里叶变换，得到越多普勒徙动校正后的 ISAR 二维像。

从上述步骤可以看出，step1~step3 和 step8 是距离多普勒成像的必要步骤，step4~step7 是为了完成越分辨单元徙动校正提高图像质量而进行的数据处理过程。现对校正算法的运算量进行分析。由于该校正算法是在一维距离像之后进行，可以先对一维距离像的数据截断，保留成像的有效数据，而后进行后续处理，可有效减少运算量。step4 的 Keystone 变换可通过 8 点 sinc 插值的方法实现，step5 的成像直接 2 次 FFT 即可实现，这 2 步运算量均很小；step6 估计等效旋转中心使用搜索的方式实现，由于等效旋转中心处，散射点聚焦明显，离旋转中心越远，散焦越严重，针对这个特点，搜索时只需要根据 step5 的成像结果，在散射点最强的距离单元附近进行搜索，可以严格控制搜索范围，同时由于 2 幅图像的互相关计算只是实乘运算，这样的运算量还是可以接受的。step7 的相位补偿，是对一维距离像数据乘上相位补偿因子，该运算量也很有限，即越分辨单元徙动校正过程并未大幅度增加算法运算量。

5 仿真实验及结果分析

下面结合仿真实验，说明本文提出的越多普勒单元徙动校正算法的步骤及有效性。仿真场景（如图 3 所示），为双基地雷达对空间某三轴稳定卫星进行成像，菱形为发射站，圆圈为接收站，基线长度 300 km，目标轨道高度约 300 km，其轨道数据由 STK 软件生成，并设定成像期间双基地角不变化。卫星的散射点模型如图 4 所示。仿真参数如表 1 所示。

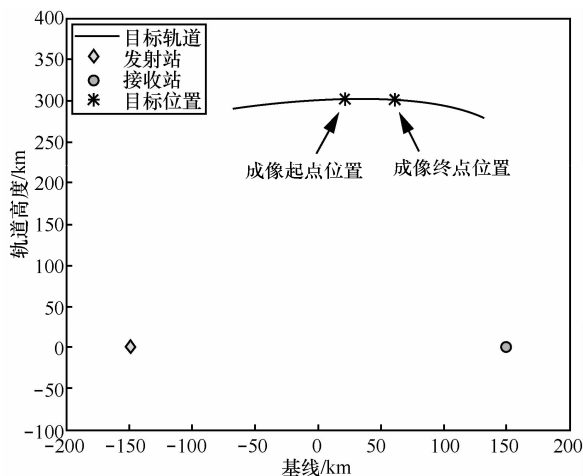


图 3 仿真场景

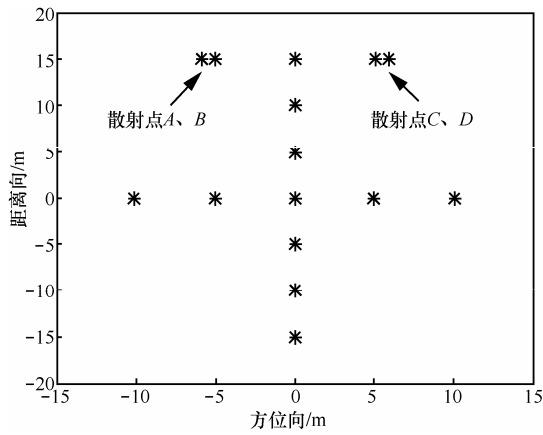
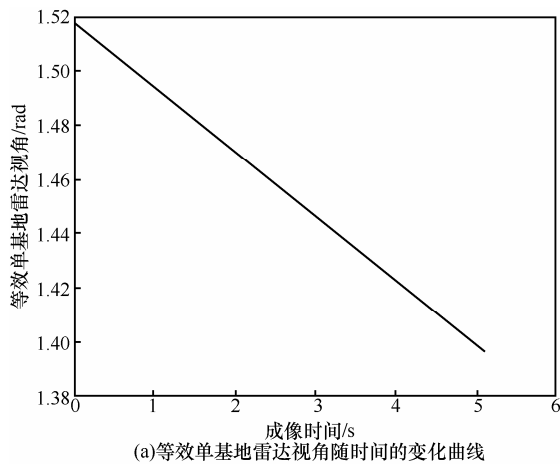
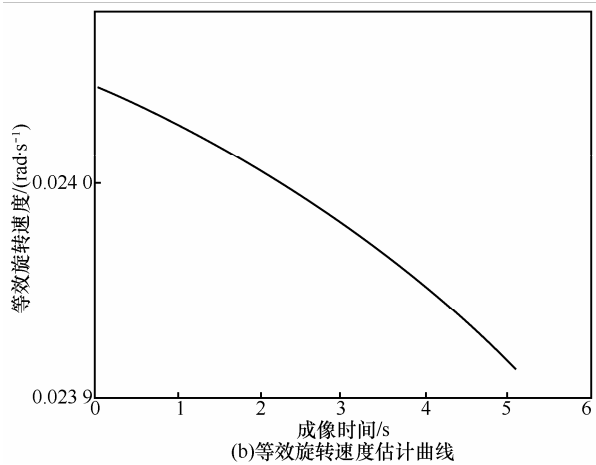


图 4 散射点模型

利用雷达与目标的几何关系，对目标等效旋转速度进行估计，估计曲线如图 5 所示。其中，图 5(a) 为等效单基地雷达视角随成像时间的变化曲线，成像期间总转角约为 0.122 rad，图 5(b) 为等效旋转速度估计曲线，可以看出，成像过程中，等效旋转速度比较平稳，约为 0.024 rad/s。



(a) 等效单基地雷达视角随时间的变化曲线



(b) 等效旋转速度估计曲线

图 5 等效转角及旋转速度估计曲线

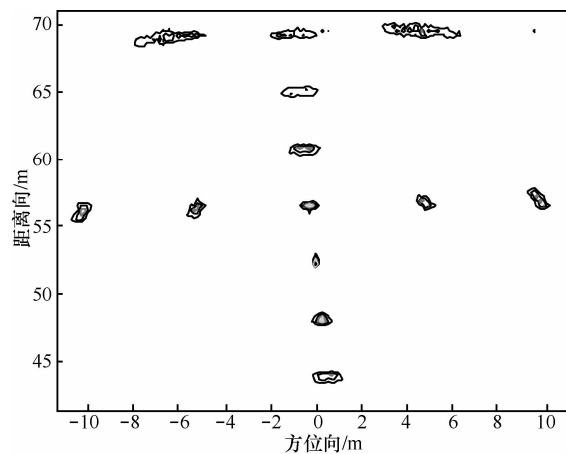


图 6 未校正的 ISAR 二维像

参数名称	参数值	参数名称	参数值
载频	10 GHz	距离分辨率	0.335 m
带宽	400 MHz	方位分辨率	0.137 m
脉冲重复频率	50 Hz	平动补偿	累积互相关
脉冲积累数	256 个	相位校正	多特显点
累积转角	7.0°		

图 6 是未经校正的距离多普勒 ISAR 二维像，图像出现散焦现象，且越靠近图像边缘散焦越严重，散射点 A、B 和散射点 C、D 在图像中均不能分辨开。

图 7 为经 Keystone 变换，越距离单元徙动校正后的 ISAR 像。可以发现，图像中部左右两侧的散射点散焦情况减弱，而图像上下的散射点依然存在严重的散焦，这就是越多普勒单元徙动引起的横向散焦。

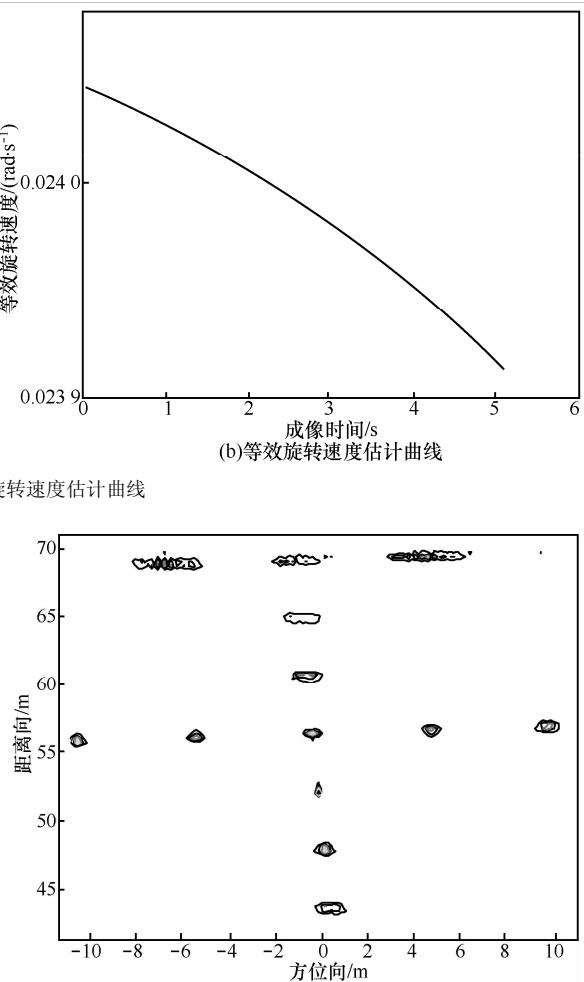


图 7 越距离单元徙动校正后的 ISAR 二维像

要完成越多普勒单元徙动的校正, 还需估计等效旋转中心位置。将回波脉冲等分并使用 RD 算法分别成像, 图 8 是对第 1~128 个脉冲成像结果, 图 9 是第 129~256 个回波脉冲成像结果。2 幅图像相似, 由于成像的观测视角不同, 第二幅图像较第一幅图“倾斜”更严重。

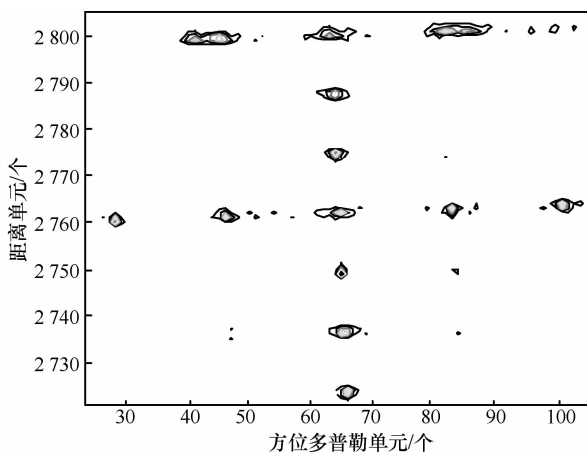


图 8 第一幅 ISAR 像

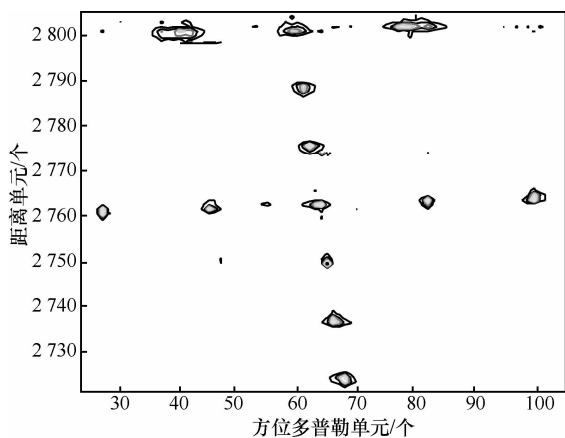


图 9 第二幅 ISAR 像

采用文中提出的基于图像旋转相关最大准则, 在第一幅 ISAR 像的零多普勒线上, 沿距离轴方向搜索等效旋转中心位置, 搜索曲线如图 10 所示。图 10 中, 2 幅图像相关系数随着选择的旋转中心位置不同而变化, 在第 2 749 个距离单元处出现峰值, 表明等效旋转中心在该距离单元处。

根据等效旋转中心位置, 对一维距离像定标, 并对一维距离像进行相位补偿, 消除越多普勒单元徙动的影响。图 11 为越多普勒徙动校正后的 ISAR 二维像, 该图像聚焦良好, 散射点 A、B 和散射点 C、D 均能很好地分辨。计算图 6、图 7 和图 11 的图像对比度, 如表 2 所示, 越多普勒单

元徙动校正后的图像对比度远高于未作任何校正和仅对距离单元徙动校正的 ISAR 图像。越多普勒单元徙动校正效果既表明文中校正算法的正确性, 同时也证实了等效旋转速度和等效旋转中心估计的准确性。

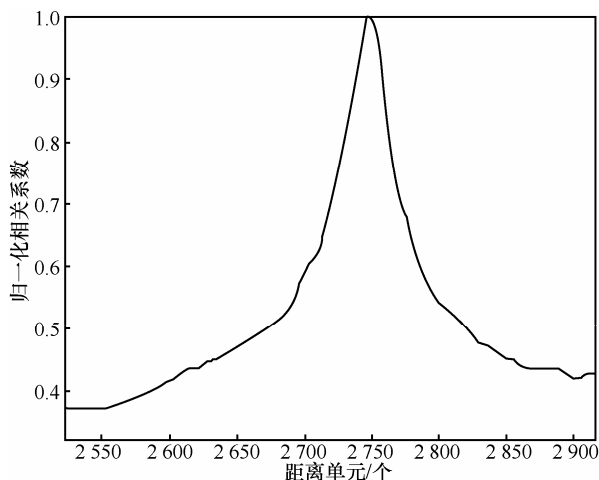


图 10 归一化相关系数曲线

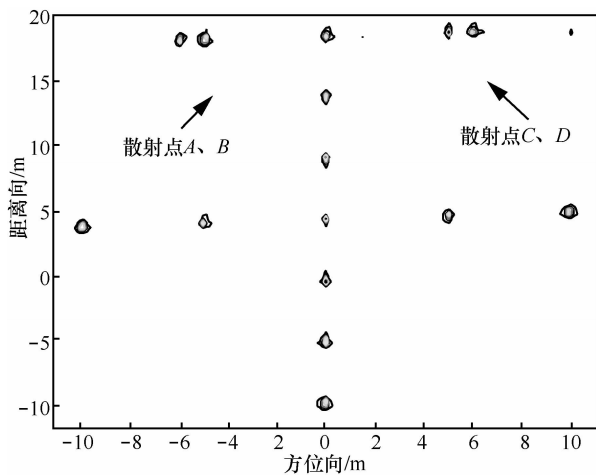


图 11 越多普勒单元徙动校正后的 ISAR 二维像

表 2 图像对比度比较

ISAR 二维像	图像对比度
未校正图像	10.13
越距离单元校正后图像	10.42
越多普勒单元校正后图像	11.71

6 结束语

本文基于双基地 ISAR 转台模型, 研究了成像过程中的越多普勒单元徙动问题。首先分析了越多普勒单元徙动的产生机理, 并估计出目标的

等效旋转速度和等效旋转中心, 完成距离向的定标, 进而对每一个距离单元进行相位补偿, 消除了越多普勒单元徙动产生的 ISAR 二维像的横向散焦问题。最后, 进行了仿真实验, 结果表明, 本文提出的算法在准确估计目标的等效旋转速度和等效旋转中心位置的基础上, 能有效消除双基地 ISAR 的越多普勒徙动问题, 提高雷达成像质量。但本文提出的算法只适用于平稳目标成像, 没有考虑双基地角时变及图像畸变的影响, 这种复杂情况下的双基地 ISAR 越多普勒校正算法仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1998: 14-15, 207-228.
YANG Z Q, ZHANG Y S, LUO Y J. Bistatic (Multistatic) Radar System[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1998: 14-15, 207-228.
- [2] MA C Z, TAT SOON YEO, GUO Q, *et al.* Bistatic ISAR imaging incorporating interferometric 3-D imaging technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3859-3867.
- [3] GUSTAVSSON A, ULANDER L M H, FLOOD B, *et al.* Low frequency bistatic SAR measurements[A]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Munich, Germany, 2012.315-318.
- [4] BURKHOLDER R J, GUPTA I J, JOHNSON J T. Comparison of monostatic and bistatic radar images[J]. Aerospace and Propagation Magazine, 2003, 45(3):41-50.
- [5] MARTORELLA MARCO, PALMER JAMES, HOMER JOHN. On bistatic inverse synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3):1125-1134.
- [6] VICTOR C, CHEN, DES R A, LIPPS R. Bi-static ISAR range-Doppler imaging and resolution analysis[A]. 2009 IEEE Radar Conference[C]. Pasadena, CA, 2009.1-5.
- [7] 吴勇. 双基地逆合成孔径雷达二维成像算法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2005.
WU Y. Study of bistatic ISAR 2-D imaging algorithms[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [8] 张亚标, 朱振波, 汤子跃等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6):969-972.
ZHANG Y B, ZHU Z B, TANG Z Y, *et al.* Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(6):969-972.
- [9] 高昭昭, 梁毅, 邢孟道等. 双基地逆合成孔径雷达成像分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5):1055-1059.
GAO Z Z, LIANG Y, XING M D, *et al.* Analysis of ISAR imagery for bistatic radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(5): 1055-1059.
- [10] 朱仁飞, 罗迎, 张群等. 双基地 ISAR 成像分析[J]. 现代雷达, 2011, 33(8):34-38.
ZHU R F, LUO Y, ZHANG Q, *et al.* Analysis of bistatic inverse synthetic aperture radar imaging[J]. Modern Radar, 2011, 33(8):34-38.
- [11] XING M D, WU R, BAO Z. High resolution imaging of high speed moving targets[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(2): 58-67.
- [12] ZHENG P, JING X J, SUN S L, *et al.* Range migration subaperture algorithm for spotlight SAR in near space[A]. 2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content[C]. Beijing, China, 2012.562-566.
- [13] 韩宁, 尚朝轩, 何强等. 双基地 ISAR 越距离单元徙动分析与校正方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(3):49-52, 57.
HAN N, SHANG C X, HE Q, *et al.* Study on correction method of bistatic ISAR migration through resolution cell for space target[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(3):49-52, 57.
- [14] 朱小鹏, 张群, 朱仁飞等. 双站 ISAR 越距离单元徙动分析与校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9):1828-1832.
ZHU X P, ZHANG Q, ZHU R F, *et al.* Study on correction algorithm of migration through resolution cell in bistatic-ISAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(9):1828-1832.
- [15] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3):511-516.
ZHAN L X, TANG Z Y, ZHU Z B. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 511-516..
- [16] 朱玉鹏, 金光虎, 付耀文等. 基于相位匹配的逆合成孔径雷达转角估计新方法[J]. 信号处理, 2009, 25(4):679-684.
ZHU Y P, JIN G H, FU Y W, *et al.* A new method for estimating the rotation angle of ISAR image based on phase matching[J]. Signal Processing, 2009, 25(4): 679-684.
- [17] 李文臣, 王雪松, 丹梅等. 对称目标的 ISAR 成像横向距离定标方法与性能分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10):2504-2508.
LI W C, WANG X S, DAN M, *et al.* Cross-range scaling method and performance analysis of ISAR imaging for symmetrical target[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(10): 2504-2508.

- [18] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 24-30, 243-249.
- BAO Z, XING M D, WANG T. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 24-30, 243-249.
- [19] 叶春茂, 许稼, 左渝等. 逆合成孔径雷达目标等效旋转中心估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(8): 1205-1208.
- YE C M, XU J, ZUO Y, *et al.* Rotating center estimation for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(8): 1205-1208.
- [20] 叶春茂, 许稼, 彭应宁等. 多视观测下雷达转台目标成像的关键参数估计[J]. 中国科学:信息科学, 2010, 40: 1496-1507.
- YE C M, XU J, PENG Y N, *et al.* Key parameter estimation for radar turntable target imaging under multiple sight[J]. Science China: Information Science, 2010, 40: 1496-1507.
- [21] 许然, 李亚超, 邢孟道. 基于子孔径参数估计的双基地 ISAR 图像融合方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 622-627.
- XU R, LI Y C, XING M D. Research on image fusion based on sub-aperture parameter estimation for bistatic ISAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(3): 622-627.
- [22] 尚朝轩, 韩宁, 董健等. 合作空间目标双基地 ISAR 图像畸变分析及校正方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(1): 38-42.

SHANG C X, HAN N, DONG J, *et al.* Image distortion analysis and correction method of cooperative space target in bistatic ISAR[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(1):38-42.

作者简介:



郭宝锋 (1987-), 男, 河南睢县人, 军械工程学院博士生, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术。

尚朝轩 (1964-), 男, 河南滑县人, 军械工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电子装备性能检测与故障诊断、雷达信号处理。

王昕 (1990-), 女, 安徽桐城人, 军械工程学院硕士生, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术。

马俊涛 (1977-), 男, 重庆人, 军械工程学院讲师, 主要研究方向为电子装备故障诊断、雷达成像技术。

董健 (1982-), 男, 福建福州人, 军械工程学院讲师, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达组网技术、雷达成像技术。