

文章编号:1001-2486(2011)05-0116-07

一种基于相位校正的 InSAR 图像配准新方法*

刘承兰,高勋章,贺峰,黎湘

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对 InSAR 三维成像中的图像配准问题进行研究,从理论上推导了同一基线上两干涉天线之间图像失配准的原因,并定量分析了图像失配准量对后续干涉处理的影响。研究表明,初始时刻同一基线上两干涉天线间的波程差引起两幅 ISAR 图像距离方向的亚像素级失配,而成像积累时间内两干涉天线波程差的变化量则引起两幅 ISAR 图像多普勒方向的像素级失配。针对干涉天线图像间的二维失配问题,提出了一种基于相位校正的图像配准新方法。该方法从参考距离选取的角度出发,对辅助接收天线的回波信号进行相位校正,补偿了由干涉天线间的位置差异引起的两幅 ISAR 图像之间的失配准量,完成两幅图像间的精确配准,得到反映目标真实尺寸的三维像。

关键词:干涉式逆合成孔径雷达;三维成像;图像配准;相位校正

中图分类号:TN957.52 **文献标识码:**A

A Novel Method for Image Registration in InSAR Imaging Based on Phase Correction

LIU Cheng-lan, GAO Xun-zhang, HE Feng, LI Xiang

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

Abstract: Aimed at the image registration problem in interferometric inverse synthetic aperture radar (InSAR), the causation of the offset between two ISAR images for different interferometric antennas along one baseline was analyzed. Then a quantitative analysis of the offset and its influence on the following interferometric processing was discussed. It was shown that the sub-pixel offset in the down-range direction and the pixel offset in the Doppler (cross-range) direction induced mismatching of two ISAR images. A novel image registration method based on phase correction was proposed to solve the mismatching problem in InSAR imaging. Simulation results demonstrate that the offset between two ISAR images is compensated effectively when the proposed new method is used, achieving an improvement of the quality of three-dimensional (3-D) image consequently.

Key words: interferometric inverse synthetic aperture radar (InSAR); three dimensional (3-D) imaging; image registration; phase correction

利用高分辨三维图像能更好地获取和辨别雷达目标属性、类别等信息,因此雷达目标高分辨三维成像已成为现代雷达技术一个重要的发展方向^[1]。将多天线的干涉技术应用到 ISAR,即干涉式逆合成孔径雷达(Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, InSAR)^[2-3],可以形成目标的三维像。在实际处理中,由于干涉天线相对于雷达目标的空间位置不同,各天线在成像积累时间内所接收信号之间存在波程差,将导致用于干涉的 ISAR 图像间发生不同程度的失配准现象,直接影响后续的干涉成像效果^[4-6]。为了对各 ISAR 图像上的相同散射点进行干涉处理,需

要进行图像配准。图像精确配准是 InSAR 干涉测量的前提和关键,其精度直接影响两幅图像的相干性和干涉相位测量的精度^[4]。

现有的 InSAR 图像配准方法主要包括相关法^[6]和基于角运动参数估计的失配准量补偿的方法^[3-5,7]。相关法一般包括时域相关法和频域搜索法^[6]。前者为了提高对齐精度,需要补零后再做谱分析;后者则需要对搜索的每个频移量进行 ISAR 成像并作相关估计,计算量很大^[3]。而且,上述两种方法均是以各散射点相对于两天线的多普勒失配量近似与散射点位置无关为前提的^[6],当不同散射点回波的多普勒失配量之间差

* 收稿日期:2011-02-22

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(61025006)

作者简介:刘承兰(1984—),女,博士生。

异较大时,这种统一平移的方法难以实现图像间的精确配准。文献[4-5,7]将图像配准问题转化为角运动参数的精确估计,并且提出了一种基于一维距离像的角运动参数估计方法,补偿成像积累时间内的相位差,理想情况下可以获得足够精确的角运动参数估计值。然而在实际应用中,由于天线结构的不同,限制了该方法的推广。该方法要完成三维成像,至少需要 5 副天线^[5],为了克服相位模糊,甚至需要 9 副天线^[4,7],增加了工程实现的难度。而且由于在建模中引入了大量近似,导致在其他不同的天线结构下即使能够估计出角运动参数,也无法将失配准量完全补偿,甚至引入更多误差。

针对 InSAR 成像系统中的图像配准问题,本文以线性调频信号为例,详细推导了同一基线上形成干涉的两天线之间图像失配准的原因,给出了图像失配准量的定量分析结果,并从理论上分析了其对后续干涉处理的影响。针对干涉天线图像间的失配准问题,从参考距离选取的角度出发,提出了一种基于相位校正的图像配准新方法,对干涉天线 ISAR 像之间的失配准量进行补偿,有效提高了三维成像的质量。

1 InSAR 成像系统回波建模

三天线 InSAR 三维成像系统的几何结构如图 1 所示。收发一体的天线 A 和接收天线 B、C 构成两对沿 X 轴和 Z 轴方向的相互垂直的干涉基线,基线长度均为 L。目标中心 O 点在雷达坐标系中的坐标为 (X, Y, Z),特别地,在数据录取初始时刻 O 点坐标为 (X₀, Y₀, Z₀)。目标上任意一点 P 在目标坐标系中的坐标为 (x_p, y_p, z_p), O 点和 P 点到天线 A, B, C 的距离分别为 R_{AO}, R_{AP}, R_{BO}, R_{BP}, R_{CO}, R_{CP}。

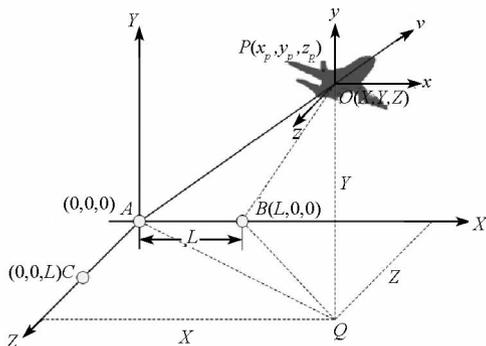


图 1 三天线 InSAR 成像系统

Fig. 1 InSAR three-antenna imaging geometry

设天线 A 发射线性调频脉冲信号

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}(\hat{t}/T_p) \exp[j2\pi(f_c t + \gamma \hat{t}^2/2)] \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形包络, f_c 为中心频率, T_p 为脉宽, γ 为调频率, $\hat{t} = t - mT$ 为快时间, T 为脉冲重复周期, $t_m = mT$ 为慢时间, $m = 0, 1, 2, \dots, M-1, M$ 为总的脉冲数目。

将解线频调脉压处理后的差频回波对快时间(以参考点的时间 $\hat{t} - 2R_{\text{ref}A}/c$ 为基准)作傅里叶变换,天线 A 接收的目标 P 点回波在差频域的信号表达式为^[8]

$$S_{\hat{y}}(f, t_m) = A_p T_p \text{sinc}\left[T_p\left(f + \frac{2\gamma R_{\Delta AP}}{c}\right)\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta AP}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f}{c} R_{\Delta AP}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi \gamma}{c^2} R_{\Delta AP}^2\right) \quad (2)$$

其中, A_p 为回波信号幅度, $\text{sinc}(a) = \sin(\pi a)/(\pi a)$, λ 为雷达信号的波长; $R_{\Delta AP} = R_{AP} - R_{\text{ref}A}$, $R_{\text{ref}A}$ 为参考距离,且距离 $R_{\Delta AP}$ 相对快时间 \hat{t} 固定,相对慢时间 t_m 变化。在较短的成像时间内,设 $R_{\Delta AP}$ 的变化近似线性(忽略高次项),即 $R_{\Delta AP} \approx R_{\Delta AP0} + V_{AP} t_m$,其中 $R_{\Delta AP0}$ 为初始时刻 P 点相对于参考点的距离, V_{AP} 可视为 P 点相对于雷达的径向速度。

将式(2)中剩余视频相位和包络斜置的两个相位项去除^[8],有

$$S_A(f, t_m) = A_p T_p \text{sinc}\left[T_p\left(f + \frac{2\gamma R_{\Delta AP}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP0} + V_{AP} t_m)\right] \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_1}\right) \quad (3)$$

其中, T_1 为成像数据录取期间总的相干积累时间。

包络对齐后,将式(3)对慢时间作傅里叶变换,得到天线 A 接收回波的复数域 ISAR 像

$$S_A(f, f_m) = A_p T_p T_1 \text{sinc}\left[T_p\left(f + \frac{2\gamma R_{\Delta AP0}}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[T_1\left[f_m + \frac{2V_{AP}}{\lambda}\right]\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta AP0}\right) \quad (4)$$

类似地,分别可得天线 B 和天线 C 接收回波的复数域 ISAR 像

$$S_B(f, f_m) = A_p T_p T_1 \text{sinc}\left\{T_p\left[f + \frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta BP0})\right]\right\} \cdot \text{sinc}\left\{T_1\left[f_m + \frac{(V_{AP} + V_{BP})}{\lambda}\right]\right\} \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta BP0})\right] \quad (5)$$

$$S_C(f, f_m) = A_p T_p T_1 \text{sinc}\left[T_p\left(f + \frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta CP0})\right)\right] \cdot \text{sinc}\left\{T_1\left[f_m + \frac{(V_{AP} + V_{CP})}{\lambda}\right]\right\} \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta CP0})\right] \quad (6)$$

经过图像配准和干涉处理,得 P 点处的干涉相位差为

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{AB} &= \text{Angle}[S_A^*(f, f_m)S_B(f, f_m)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP0} - R_{\Delta BP0}) \triangleq \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{AB0}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{AC} &= \text{Angle}[S_A^*(f, f_m)S_C(f, f_m)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP0} - R_{\Delta CP0}) \triangleq \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{AC0}\end{aligned}\quad (8)$$

其中, $\text{Angle}(\cdot)$ 表示提取复数值相位的运算。

由上述分析可知, 经过干涉 ISAR 处理后, 得到的是初始时刻 P 点相对于同一基线上两干涉天线的相位差。即, 只要在数据录取初始时刻, 目标位于相位不模糊区域内, 不论在相干处理时间内目标是否运动出不模糊区域, 干涉处理时都不会发生相位模糊^[6]。一般情况下, 对于远场小尺寸目标, 在正视($X_0, Z_0 \approx 0$)以及斜视不严重的情况($X_0, Z_0 \ll R_0$), 通过设置适当的基线长度, 该条件是可以满足的^[4,9]。下文将针对同一基线上两干涉天线 ISAR 像之间的图像配准问题进行研究。

2 图像失配量分析

不同天线间 ISAR 图像的干涉处理是以各天线图像间的精确配准为前提的。考虑到 B, C 两天线的对称关系, 下面以 AB 天线对为例, 考察两幅 ISAR 像间的失配准关系。 AC 天线对的情况类似。

对比式(4)~式(5)中 A 天线和 B 天线的二维 ISAR 成像结果, 散射点 P 在两幅图像中对应的像素位置分别为

$$\left\{ -\frac{2\gamma R_{\Delta AP0}}{c}, -\frac{2V_{AP}}{\lambda} \right\} \quad (9)$$

$$\left\{ -\frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta BP0}), -\frac{(V_{AP} + V_{BP})}{\lambda} \right\} \quad (10)$$

可见, 初始时刻两天线的波程差以及成像积累时间内波程差的变化率分别导致了距离和多普勒维的失配准。其中, 径向距离方向的频率偏移量为

$$\begin{aligned}\Delta f &= -\frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP0} + R_{\Delta BP0}) + \frac{2\gamma R_{\Delta AP0}}{c} \\ &= \frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP0} - R_{\Delta BP0}) = \frac{\gamma}{c}(R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=0}\end{aligned}\quad (11)$$

在一个脉冲重复周期内占据的径向距离分辨单元数为

$$n_x = \Delta f \cdot T_p = \frac{B}{c}(R_{\Delta AP0} - R_{\Delta BP0}) \quad (12)$$

横向距离方向的多普勒偏移量

$$\Delta f_m = -\frac{(V_{AP} + V_{BP})}{\lambda} + \frac{2V_{AP}}{\lambda} = \frac{1}{\lambda}(V_{AP} - V_{BP}) \quad (13)$$

在成像相干处理时间内所占据的横向距离分辨单元数为

$$\begin{aligned}m_x &= \Delta f_m \cdot T_1 = \frac{1}{\lambda}(V_{AP} - V_{BP})T_1 \\ &= \frac{1}{\lambda}[(R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=T_1} - (R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=0}]\end{aligned}\quad (14)$$

由上述分析可知, 初始时刻同一基线上两干涉天线间的波程差引起两幅 ISAR 图像距离方向的失配, 而干涉天线在成像积累时间内的波程差的变化量则引起两幅 ISAR 图像多普勒方向的失配。由于目标散射点相对于参考中心的距离 $R_{\Delta AP}, R_{\Delta BP}$ 与运动补偿时参考距离的选取密切相关, 下面将根据雷达和目标的几何关系对图像失配准量进行定量分析。

2.1 参考距离的选取

由图 1 所示, 根据目标和天线的几何关系, 易得

$$R_{AP} - R_{BP} = \frac{R_{AP}^2 - R_{BP}^2}{R_{AP} + R_{BP}} = \frac{2L(X + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (15)$$

$$R_{AO} - R_{BO} = \frac{R_{AO}^2 - R_{BO}^2}{R_{AO} + R_{BO}} = \frac{2LX - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \quad (16)$$

传统 InSAR 通常采用中心天线估计的相同运动参数对各天线统一补偿^[3-7,9-11], 即 $R_{refA} = R_{refB} = R_{AO}$, 那么

$$\Delta R_{AB} = (R_{AP} - R_{AO}) - (R_{BP} - R_{AO}) = \frac{2L(X + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (17)$$

设运动目标在三维坐标方向的速度分量分别为 V_x, V_y, V_z , 则在 t_m 时刻

$$X = X_0 + V_x t_m \quad (18)$$

$$Y = Y_0 + V_y t_m \quad (19)$$

$$Z = Z_0 + V_z t_m \quad (20)$$

结合式(11)~式(14), 此时 AB 天线 ISAR 像之间径向和横向偏移的分辨单元数及相应的频率失配准量分别为

$$\begin{aligned}n_x &= \frac{B}{c}(R_{\Delta AP0} - R_{\Delta BP0}) \\ &= \frac{B}{c}[(R_{AP} - R_{AO}) - (R_{BP} - R_{AO})] \Big|_{t_m=0} \\ &= \frac{B}{c} \frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}}\end{aligned}\quad (21)$$

$$m_x = \frac{1}{\lambda}[(R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=T_1} - (R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=0}]$$

$$= \frac{1}{\lambda} \left[\frac{2L(X_0 + V_x T_1 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \right]$$

$$= \frac{1}{\lambda} \frac{2LV_x T_1}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (22)$$

$$\Delta f = \frac{n_x^T}{T_p} = \frac{\gamma}{c} \frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (23)$$

$$\Delta f_m = \frac{m_x^T}{T_1} = \frac{1}{\lambda} \frac{2LV_x}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (24)$$

2.2 失配准定量分析

为直观,举例说明。假设目标相对于雷达匀速飞行,其中 X 方向的速度分量为 $V_x = 300\text{m/s}$, 初始时刻 $X_0 = 10\text{m}$, $Y_0 = 10\text{km}$, $Z_0 = 10\text{m}$, 成像积累时间为 2.56s 。基线 $L = 1\text{m}$, 雷达信号载频为 10GHz , 带宽 1GHz 。目标最大尺寸不超过 50m 。根据式(21) ~ 式(22), 有

$$n_x = \frac{B}{c} \frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \leq 0.02 < 1 \quad (25)$$

$$m_x = \frac{1}{\lambda} \frac{2LV_x T_1}{R_{AP} + R_{BP}} \approx 2.56 > 1 \quad (26)$$

易见,距离方向的偏差小于一个分辨单元尺寸,而横向多普勒失配准量已经大于一个横向分辨单元的尺寸,受傅里叶变换的离散频率点计算误差影响,多普勒维会出现三个分辨单元的偏差。这就必然导致后续干涉处理时两幅 ISAR 像在多普勒方向没有对齐,即产生了失配准。

3 基于相位校正的图像配准

为了实现同一基线上两干涉天线 ISAR 像之间距离和多普勒方向的精确配准,直观的想法是利用时频域的傅里叶变换关系,

$$S'_B(f, f_m) = S_B(f + \Delta f, f_m + \Delta f_m)$$

$$\Leftrightarrow s_B(\hat{t}, t_m) \exp[-j2\pi(\Delta f \cdot \hat{t} + \Delta f_m \cdot t_m)] \quad (27)$$

此时的 $S'_B(f, f_m)$ 与 $S_A(f, f_m)$ 在距离和多普勒维均是精确配准的。但是由式(23) ~ 式(24)可知,距离维 Δf 是与待求参数 x_p 有关的量,因此无法在数据域直接进行补偿;另外,多普勒维 Δf_m 与散射点 P 到雷达的距离 R_{AP} 和 R_{BP} 有关,因此无法对所有的散射点统一精确补偿。此时若只对 B 天线 ISAR 像的多普勒维进行近似相位补偿,如式(28)所示,必将打乱原有相位关系,无法实现正确的 InSAR 三维成像,这在后面的仿真实验中得到了证实。

$$S'_B(f, f_m) = S_B(f, f_m + \Delta \tilde{f}_m)$$

$$\Leftrightarrow s_B(\hat{t}, t_m) \exp[-j2\pi \Delta \tilde{f}_m \cdot t_m] \quad (28)$$

其中, $\Delta \tilde{f}_m = \frac{1}{\lambda} \frac{2LV_x}{R_{AO} + R_{BO}}$ 。

基于此,本文从参考距离选取的角度出发,提出一种新的失配准量补偿方法,通过对运动补偿后的回波数据进行相位校正,实现 AB 两天线间的二维 ISAR 图像配准。

事实上,相对于传统的参考距离选取方式,如果对不同天线回波分别采用各自的参考距离进行补偿,即 $R_{refA} = R_{AO}$, $R_{refB} = R_{BO}$, 那么

$$\Delta R_{AB} = (R_{AP} - R_{AO}) - (R_{BP} - R_{BO})$$

$$= (R_{AP} - R_{BP}) - (R_{AO} - R_{BO})$$

$$= \frac{2L(X + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LX - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \quad (29)$$

结合式(11) ~ 式(14), 此时 AB 天线对径向和横向的失配准量分别为

$$n'_x = \frac{B}{c} (R_{\Delta AP0} - R_{\Delta BP0})$$

$$= \frac{B}{c} [(R_{AP} - R_{AO}) - (R_{BP} - R_{BO})] \Big|_{t_m=0}$$

$$= \frac{B}{c} \left[\frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LX_0 - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \right]$$

$$\approx \frac{B}{c} \frac{2Lx_p}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (30)$$

$$m'_x = \frac{1}{\lambda} [(R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=T_1} - (R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP}) \Big|_{t_m=0}]$$

$$= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{2LV_x T_1}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LV_x T_1}{R_{AO} + R_{BO}} \right) \approx 0 \quad (31)$$

$$\Delta f' = \frac{n_x^F}{T_p} = \frac{\gamma}{c} \left[\frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LX_0 - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \right]$$

$$\approx \frac{\gamma}{c} \frac{2Lx_p}{R_{AP} + R_{BP}} \quad (32)$$

$$\Delta f'_m = \frac{m_x^F}{T_1} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{2LV_x}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LV_x}{R_{AO} + R_{BO}} \right) \approx 0 \quad (33)$$

由于这种参考距离选取方法在解线频调处理的同时使 AB 天线之间的位置差异得到了有效补偿,削弱了两天线间的基线去相干效应,因此两天线 ISAR 像之间的失配准量远远小于传统方法。利用 2.2 节设定的雷达参数,结合式(30) ~ 式(31), 有

$$n'_x = \frac{B}{c} \left[\frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LX_0 - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \right] \approx 0.017 < 1 \quad (34)$$

$$m'_x = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{2LV_x T_1}{R_{AP} + R_{BP}} - \frac{2LV_x T_1}{R_{AO} + R_{BO}} \right) \approx 0.0001 \ll 1 \quad (35)$$

此时距离和多普勒方向的偏差均远小于一个分辨单元,由此带来的图像失配准影响可以忽略。

可见,如果将传统方法运动补偿后的回波进行相位校正处理,即可以实现干涉天线 ISAR 像之间失配准量的有效补偿。由式(16)可得

$$\begin{aligned} \nabla R_{comp}^B &= R'_{\Delta BP} - R_{\Delta BP} = (R_{BP} - R_{BO}) - (R_{BP} - R_{AO}) \\ &= R_{AO} - R_{BO} = \frac{2LX - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \end{aligned} \quad (36)$$

利用式(36)对完成运动补偿后的 B 天线回波进行相位校正,即

$$\begin{aligned} s_{if}^B(\hat{t}, t_m)_{comp} &= s_{if}^B(\hat{t}, t_m) \cdot \{ \exp[-j4\pi\gamma\hat{t} \nabla R_{comp}^B/2c] \\ &\cdot \exp[-j4\pi \nabla R_{comp}^B/2\lambda] \} \end{aligned} \quad (37)$$

类似地,对 C 天线回波,有

$$\nabla R_{comp}^C = R'_{\Delta CP} - R_{\Delta CP} = \frac{2LZ - L^2}{R_{AO} + R_{CO}} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} s_{if}^C(\hat{t}, t_m)_{comp} &= s_{if}^C(\hat{t}, t_m) \cdot \{ \exp[-j4\pi\gamma\hat{t} \nabla R_{comp}^C/2c] \\ &\cdot \exp[-j4\pi \nabla R_{comp}^C/2\lambda] \} \end{aligned} \quad (39)$$

易见, ∇R_{comp}^B 和 ∇R_{comp}^C 均是与散射点 P 的坐标位置 (x_p, y_p, z_p) 无关的量,因此可以实现对所有散射点回波的统一精确补偿。

相位校正后的 B、C 天线回波经 ISAR 处理后分别与 A 天线 ISAR 像进行干涉处理,在相位不模糊的情况下,即可解算出真实的目标坐标值。

需要指出的是,在实际工程应用时,天线 A 到目标的距离 R_{AO} 容易测得,而天线 B 和 C 到目标的距离 R_{BO} 、 R_{CO} 直接通过目标回波时延测量难度较大,主要表现在:①各天线分别测距,其参考点一般不同;②不同天线回波时延相差很小,对雷达测距精度要求较高。事实上,如图 1 所示,由各天线与目标的相对几何关系,易得

$$R_{BO} = \sqrt{OQ^2 + BQ^2} = \sqrt{Y^2 + (X - L)^2 + Z^2} \quad (40)$$

$$R_{CO} = \sqrt{OQ^2 + CQ^2} = \sqrt{Y^2 + (Z - L)^2 + X^2} \quad (41)$$

4 仿真分析

采用图 1 所示的三天线干涉成像结构,对远场平稳运动目标进行三维成像仿真。初始时刻目标在雷达坐标系中的位置坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,其中 $X_0 = 10m, Y_0 = 10km, Z_0 = 10m$,成像积累时间为 2.56s。目标沿 X、Y、Z 方向的速度分量分别为 $V_x = 300m/s, V_y = 80m/s, V_z = 300m/s$ 。基线 $L = 1m$,雷达发射 chirp 脉冲信号,载频为 10GHz,带宽 1GHz,脉冲重复频率为 100Hz。

考虑到 B、C 两天线的对称关系,以 AB 天线对为例,比较 B 天线回波相位校正前后 AB 天线

对图像间的像素失配准关系。AC 天线对的情况类似。

首先考察干涉相位模糊出现的可能性。以坐标位置为 $(x_p, y_p, z_p) = (7, 1, 0)$ 的目标散射点为例,根据式(7)和式(17),可得初始时刻形成干涉的两天线间的相位差

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{AB} &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_{AB0} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{2L(X_0 + x_p) - L^2}{R_{AP} + R_{BP}} \\ &= 0.3455 < \pi \end{aligned} \quad (42)$$

由上式可见,由于参数设置适当,干涉相位差满足 $|\Delta\varphi_{AB}| < \pi$,因此不会发生相位模糊。下面的仿真分析均是在此前提下进行。

需要说明的是,如前所述,现有的典型 InSAR 图像配准方法中,基于角运动参数估计的方法对天线结构有所依赖,不具有普适性,在本文的三天线 InSAR 成像模型中无法实现角运动参数的正确估计以及后续的精补偿;而相关法是以各散射点的多普勒失配量近似相同为前提的,而且这种仅能实现幅度图像对应像素位置配准的方法,并不能真正提高 InSAR 的成像质量,这在下面的仿真结果中也得到证实。

为了便于表述,将利用式(28)对 B 天线回波进行多普勒方向的失配准量补偿的方法称为“多普勒补偿”法,将利用式(37)对 B 天线回波进行相位校正的方法称为“相位校正”法。下面将通过对这两种方法的分析和比较验证后者的有效性。

图 2 给出了分别利用两种方法进行图像配准前后得到的 AB 天线对的 ISAR 图像比较。选择飞机左翼中部聚焦效果较好的一个特显点作为参考点,提取出该参考点在每幅图像中的对应像素位置和强度信息(此处以 RGB 值表征)。该参考点在 4 幅图像中的对应像素位置分别为 (105, 125), (108, 125), (105, 125), (105, 125), RGB 值分别为 (0.175, 0.175, 0.175), (0.19, 0.19, 0.19), (0.19, 0.19, 0.19), (0.175, 0.175, 0.175)。从仿真结果可以得出如下结论:

①相对于 A 天线, B 天线回波在距离维对准良好(像素级配准),在多普勒维出现 3 个分辨单元的失配准量,这与式(25)和式(26)的数值分析结果一致。

②经过多普勒补偿, B 天线回波在多普勒维完成与 A 天线的位置配准,但像素强度值仍然与 A 天线存在差异。

③经过相位校正, AB 两天线的对应像素位置均为 (105, 125),且表征像素强度的 RGB 值相等,

说明对应像素的位置和强度均得到良好配准。

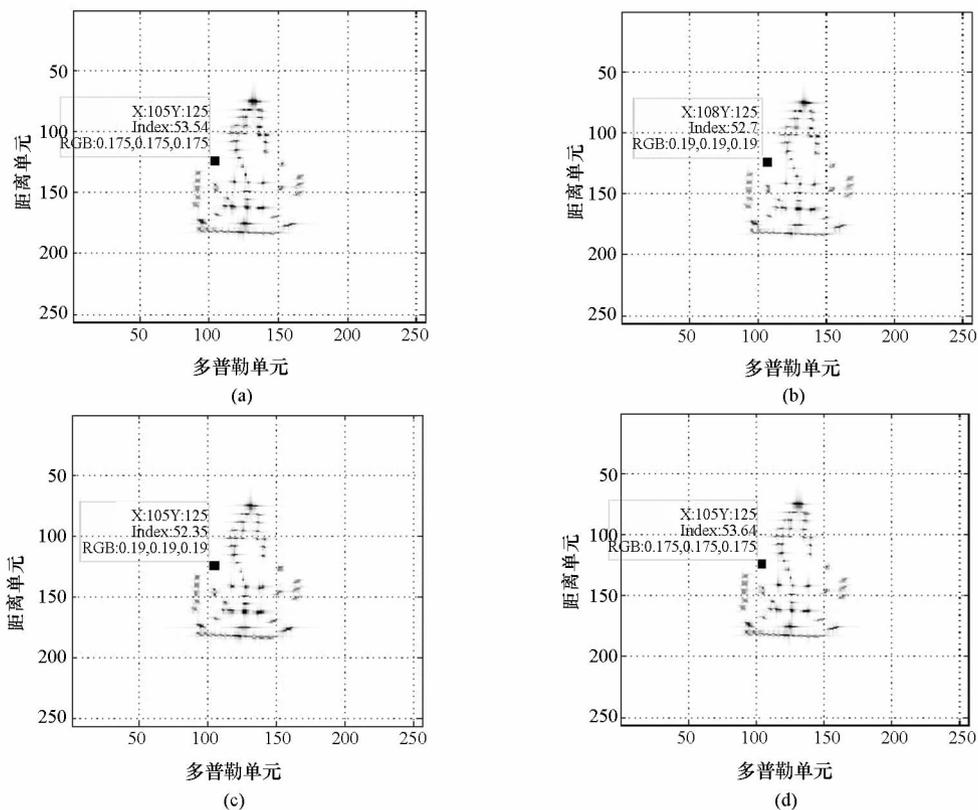


图 2 分别利用两种方法图像配准前后 AB 天线对的 ISAR 像比较

(a) A 天线 ISAR 像 (b) B 天线 ISAR 像 (c) 多普勒补偿后的 B 天线 ISAR 像 (d) 相位校正后的 B 天线 ISAR 像

Fig. 2 Comparison between ISAR image of antenna A and ISAR images of antenna B before and after two methods of image registration (a) ISAR image of antenna A (b) ISAR image of antenna B

(c) ISAR image of antenna B after Doppler-offset-compensation (d) ISAR image of antenna B after phase correction

图 3 给出了分别利用两种方法进行图像配准前后三维成像效果比较。图 3(a) 为目标散射中心模型,用于作为仿真结果的参照。图像配准前同一基线上两干涉天线的 ISAR 像存在多普勒维的失配,严重影响后续干涉处理,导致目标散射中心位置的估计值与真实值出现较大偏差,如图 3(b) 所示。图 3(c) 给出了对 B、C 天线回波进行多普勒补偿后的 InSAR 三维成像结果。相对于原始成像结果,成像效果有所改善,但与真实目标模型的差异仍然很大。这说明如果仅对多普勒方向的失配量进行补偿,虽然可以实现二维 ISAR 图像的位置配准,却无法得到理想的干涉成像结果。这与前面的理论分析结果一致。图 3(d) 给出了对 B、C 天线回波进行相位校正后的 InSAR 三维成像结果,此时三维成像结果有了明显改善,与真实目标模型吻合良好,进一步证实了本文提出的基于相位校正的图像配准方法的有效性。此外,基于多普勒补偿的图像配准方法的成像结果也证明了仅仅幅度上的位置配准对 InSAR 的后

续成像处理是没有意义的,同一基线上干涉天线 ISAR 像的对应像素之间的相位配准才是关键。

5 结束语

本文对 InSAR 三维成像的图像配准问题进行研究,得出如下结论:初始时刻同一基线上两干涉天线间的波程差引起两幅 ISAR 图像距离方向的失配,而干涉天线在成像积累时间内的波程差的变化量则引起两幅 ISAR 图像多普勒方向的失配。仅对多普勒方向的失配量进行补偿能够实现 ISAR 图像像素级的位置配准,但无法真正提高三维像的质量。针对干涉天线图像间的失配问题,本文从参考距离选取的角度出发,提出了一种基于相位校正的图像配准方法,对不同天线 ISAR 像之间的失配量进行有效补偿,完成两幅图像的精确配准,得到了与目标真实尺寸吻合良好的高质量的三维像。本文提出的图像配准方法不仅适用于三天线的 InSAR 成像系统,同时也适用于多天线的情况,具有一定的普适性。

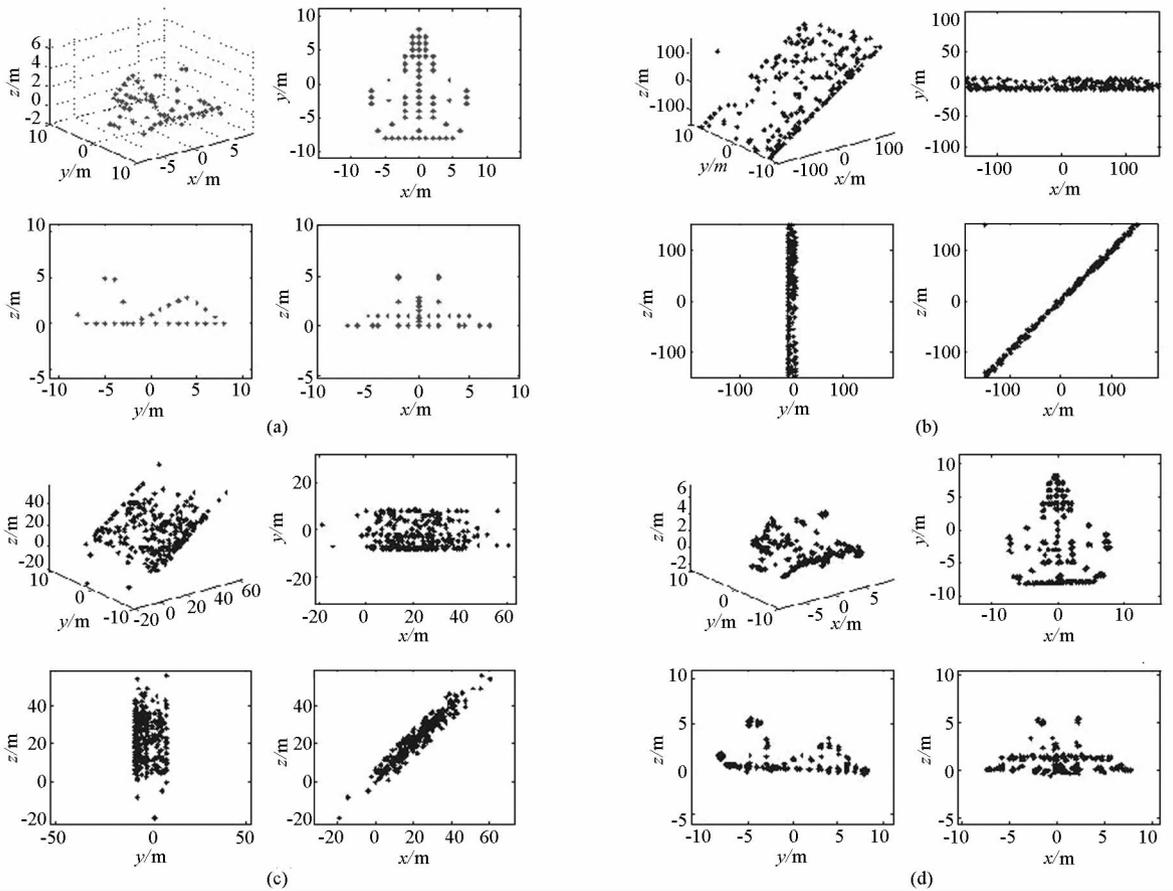


图3 分别利用两种方法图像配准前后三维成像效果比较

(a) 目标散射中心模型 (b) 目标的原始三维成像结果 (c) 多普勒补偿后的三维成像 (d) 相位校正后的三维成像

Fig.3 Comparison of InSAR 3-D images before and after two methods of image registration

(a) 3-D view of target model (b) original 3-D image

(c) 3-D image after Doppler-offset-compensation (d) 3-D image after phase correction

参考文献:

[1] 马长征. 雷达目标三维成像技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.

[2] Xu X J, Narayanan R M. Three-dimensional Interferometric ISAR Imaging for Target Scattering Diagnosis and Modeling[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(7): 1094-1102.

[3] 张冬晨. InSAR 三维成像的关键技术研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.

[4] Zhang Q, Yeo T S, Du G, et al. Estimation of Three-dimensional Motion Parameters in Interferometric ISAR Imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(2): 292-300.

[5] 罗斌凤, 张群, 袁涛, 等. InSAR 三维成像中的 ISAR 像失配准分析及其补偿方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(6): 739-743.

[6] 张群, 马长征, 张涛, 等. 干涉式逆合成孔径雷达三维成像技术研究[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(9): 890-898.

[7] Zhang Q, Yeo T S. Novel Registration Technique for InSAR and InSAR[C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), Toulouse, France; 2003.

[8] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[9] Wang G Y, Xia X G, Chen V C. Three-dimensional ISAR Imaging of Maneuvering Targets Using Three Receivers[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3): 436-447.

[10] Mu L, Yuan W M, Xing W G. Cross-range Calibration of Interferometric ISAR under a Condition of Phase Ambiguity [C]//IEEE 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an; 2009.

[11] Zhang Q, Yeo T S. Three-dimensional SAR Imaging of a Ground Moving Target Using the InSAR Technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1818-1828.