

一种针对多通道 GMTI 的 SAR 复图像精确配准方法

时公涛¹ 桂琳² 陈涛¹ 庞怡杰¹ 王晶¹

(1. 空军装备研究院情报所第十研究室, 北京 100085; 2. 中国人民解放军 94402 部队, 济南 250002)

摘要: 提出了一种针对多通道 GMTI 的 SAR 复图像精确配准算法。首先, 系统分析了配准误差对干涉相位的影响, 推导出了对应配准误差的干涉相位 Cramer-Rao 界, 并利用 Monte Carlo 仿真数据对配准误差的影响进行了量化。在此基础上, 通过对待配准图像进行二维精确插值处理, 生成模板图像库和相应的相关系数库, 以适合多通道 GMTI 的复图像的相位相关为准则, 找出模板图像库和相关系数库中与参考图像具有最大相位相关值的图像作为配准图像, 从而实现多通道 SAR 复图像之间的精确配准。对基于所提算法的实测三通道 SAR 复图像进行慢动目标检测实验, 结果表明所提算法能够提供多通道 GMTI 所需要的配准精度, 证明了该算法的有效性和实用性。

关键词: 合成孔径雷达; 地面动目标指示; 复图像; 配准

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)11-1651-07

A Novel Complex SAR Image Registration Method Aiming at Multi-channel GMTI

SHI Gong-tao¹ GUI Lin² CHEN Tao¹ PANG Yi-jie¹ WANG Jing¹

(1. The Tenth Lab. of Intelligence Institute, Academy of Air Force's Equipment, Beijing 100085; 2. The Army of 94402, Jinan 250002)

Abstract: The paper proposes a novel complex SAR image registration method aiming at multi-channel GMTI. Firstly, the influence of registration error to the interferometric phase is systemically discussed, which include deducing the Cramer-Rao bound corresponding to interferometric phase's standard deviation and utilizing the Monte Carlo simulation data to quantify the registration error. Based on that, according to the processing of two-dimensional interpolations to the input image, the database of template images and correlation coefficients are obtained. Adopting the phase correlation of complex images as the matching criterion, which is agreement with multi-channel GMTI, and finding the image contained in the template database with the maximum value of phase correlation as the registration image, then the precise registration among the multi-channel complex SAR images can be accomplished. By the experiments performed on three-channel real complex SAR images, almost all the moving targets are successfully detected based on the proposed registration method, which proves that the proposed method can provide the needed registration precision for multi-channel GMTI and confirms the effectiveness and practicality of the method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Indication (GMTI); Complex Images; Registration

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 图像的配准研究是当前 SAR 应用的前沿课题, 具有重要的研究意义和迫切的实际需求。针对多通道 GMTI (Ground Moving Target Indication) 的 SAR 复图像配准问题是其中的一个主要方面, 其作为动目标检测、测速与精确定位以及成像的前提和基础, 其性能的优劣对后续处理的影响较大。因此, 稳健、实用的多通道 SAR 复图像配准技术成为 SAR-GMTI 研究者们致力于解决的一个问题^{[1]-[4]}。

目前为止, 已经提出了很多的 SAR 图像配准算法,

比较著名的包括: 互相关和序贯相似检测算法^[5]、傅里叶变换法^[6]、互信息法^[7]、基于特征 (如点、区域和边缘等) 的一类配准算法^[8] 以及基于灰度和特征相结合的一类图像配准算法^[9] 等。但这些算法的提出与应用都主要是针对多源遥感幅度图像 (如不同时相、不同波段、不同传感器等) 之间的配准, 而对复图像的配准问题鲜有涉足。针对多通道 SAR 复图像配准问题, 西安电子科技大学的廖桂生老师领导的研究小组进行了较为系统的研究, 提出了一种基于频域相位相关的 SAR 图像配准方法^[4], 但该方法由于受噪声的影响, 造成距离向、方位向偏移量的估计精度具有较大不确定因素, 进而配准精度有待进一步提高。

收稿日期: 2011 年 5 月 19 日; 修回日期: 2011 年 8 月 30 日

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 61101213, 61040043); 湖南省研究生创新基金项目; 国防科技大学博士创新基金资助项目

为此,本文首先系统分析了配准误差对干涉相位的影响,导出了对应配准误差的干涉相位 Cramer-Rao 界,并利用 Monte Carlo 仿真数据对配准误差的影响进行了量化分析。在此基础上,提出了一种模板库匹配的多通道 SAR 复图像精确配准方法。该方法通过对待配准图像进行距离向、方位向精确插值处理,生成模板图像库和相应的相关系数库,以复图像的相位相关为准则,寻找模板图像库和相关系数库中与参考图像具有最大相位相关值的图像作为配准图像,从而实现多通道 SAR 复图像之间的精确配准。通过对中电集团第三十八研究所提供的三通道 SAR 复图像数据进行实验,结果表明基于所提的配准算法进行慢动目标检测时,能够获得具有高检测率、低虚警率的理想检测性能,说明所提配准算法能够提供多通道 GMTI 所需要的配准精度,证明了该方法的有效性和实用性。

本章内容安排如下:第二节就配准误差对干涉相位的影响进行了系统阐述;第三节给出了配准算法的详细流程和重要细节说明;第四节应用所提算法进行了慢动目标检测分析,证明了所提算法的有效性;最后为结论部分。

2 配准误差的影响分析

干涉相位信息作为进行多通道慢动目标检测时所利用的核心信息,配准误差对检测性能的影响突出表现为对干涉相位的干扰。为此,通过推导对应配准误差的干涉相位 Cramer-Rao 界,并采用 Monte Carlo 仿真数据对配准误差对干涉相位的影响进行定量阐述。

假设前向通道 SAR 复图像中的像素点 $z_1 = x_1 + jy_1$ ($x_1, y_1 \in \mathbb{R}$),对应的后向通道 SAR 复图像中的像素点 $z_2 = x_2 + jy_2$ ($x_2, y_2 \in \mathbb{R}$),可视为相同分辨单元的不同实现。一般情况下,分辨单元内都包含足够多的散射子,从而可认为 z_1 与 z_2 是相互独立的复随机变量,且均服从均值为零、方差为 σ^2 的圆高斯分布,相应的复随机向量 $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2]^T$ 则服从二维的复正态分布^[10],即

$$p(\mathbf{z}) = \frac{1}{\pi^2 \det \mathbf{Z}} \exp\left(-\mathbf{z}^H \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{z}\right) \quad (1)$$

其中, T 表示转置, H 表示复共轭转置, $\det(\cdot)$ 表示求解矩阵的行列式。复协方差矩阵 \mathbf{Z} 为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{E}\left[(\mathbf{z} - \mathbf{E}(\mathbf{z}))(\mathbf{z} - \mathbf{E}(\mathbf{z}))^H\right] = \begin{bmatrix} 2\sigma^2 & \gamma e^{j\psi} \\ \gamma e^{-j\psi} & 2\sigma^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据 $\mathbf{E}(z_1 z_2^*) = \gamma e^{j\psi}$ (ψ 即为干涉相位) 定义相关系数 μ 为

$$\mu = \frac{\gamma}{\sqrt{\mathbf{E}(|z_1|^2)\mathbf{E}(|z_2|^2)}} = \frac{|\mathbf{E}(z_1 z_2^*)|}{\sqrt{\mathbf{E}(|z_1|^2)\mathbf{E}(|z_2|^2)}} \quad (3)$$

由此得到 $\mathbf{E}(z_1 z_2^*) = 2\mu\sigma^2 e^{j\psi}$, $\det \mathbf{Z} = 4\sigma^4(1 - \mu^2)$ 。再

依据 $\mathbf{Z}^{-1} = \frac{\mathbf{Z}^*}{\det \mathbf{Z}}$ (\mathbf{Z}^* 为 \mathbf{Z} 的伴随阵) 得到 \mathbf{Z}^{-1} 为

$$\mathbf{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sigma^2(1-\mu^2)} & -\frac{\mu e^{j\psi}}{2\sigma^2(1-\mu^2)} \\ -\frac{\mu e^{-j\psi}}{2\sigma^2(1-\mu^2)} & \frac{1}{2\sigma^2(1-\mu^2)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

把(2)、(4)式带入到(1)式中,得到复随机向量 \mathbf{z} 服从的分布为

$$p(z_1, z_2) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma^4 (1 - \mu^2)} \cdot \exp\left(-\frac{|z_1|^2 + |z_2|^2 - 2\mu |z_1| |z_2| \cos(\psi - \theta^0)}{2\sigma^2(1 - \mu^2)}\right) \quad (5)$$

其中, $\theta^0 = \arg(z_1 z_2^*)$ 。由(5)式得到似然函数为

$$p(z_{1,1}, z_{2,1}; z_{1,2}, z_{2,2}; \dots; z_{1,K}, z_{2,K} | \psi) = \prod_{k=1}^K p(z_{1,k}, z_{2,k} | \psi) \quad (6)$$

其中, K 为独立观测的次数。把(5)代入到(6)式中,并变换成自然对数形式为

$$\begin{aligned} & \ln p(z_{1,1}, z_{2,1}; z_{1,2}, z_{2,2}; \dots; z_{1,K}, z_{2,K} | \psi) \\ &= -K \ln [4\pi^2 \sigma^4 (1 - \mu^2)] - \sum_{k=1}^K \left[\frac{|z_{1,k}|^2 + |z_{2,k}|^2 - 2\mu |z_{1,k}| |z_{2,k}| \cos(\psi - \theta_k^0)}{2\sigma^2(1 - \mu^2)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

对于 Cramer-Rao 界的求解,通过对 Fisher 信息矩阵 \mathbf{J} 求逆来计算,矩阵 \mathbf{J} 的元素为

$$J_{m,n} = -\mathbf{E} \left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{z} | \theta)}{\partial \theta_m \partial \theta_n} \right] \quad (8)$$

其中, $p(\mathbf{z} | \theta)$ 为似然函数通用表示式。

估计误差的最小方差或估计误差的最小协方差就是 Fisher 信息矩阵中的对应元素,即

$$\mathbf{E}[(\theta_m - \hat{\theta}_m)(\theta_n - \hat{\theta}_n)] \geq \Psi_{m,n} \quad (9)$$

其中, $\Psi_{m,n} = \mathbf{J}^{-1}$ 。由(7)、(8)式可得到干涉相位 ψ 对应的矩阵 \mathbf{J} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= -\mathbf{E} \left[\frac{\partial^2 \ln p(z_{1,1}, z_{2,1}; z_{1,2}, z_{2,2}; \dots; z_{1,K}, z_{2,K} | \psi)}{\partial \psi^2} \right] \\ &= \frac{2\mu}{2\sigma^2(1 - \mu^2)} \mathbf{E} \left[\sum_{k=1}^K |z_{1,k}| |z_{2,k}| \cos(\psi - \theta_k^0) \right] \\ &= \frac{2K\mu^2}{1 - \mu^2} \end{aligned} \quad (10)$$

再根据(9)式,最终得到对应相关系数的干涉相位 ψ 的 Cramer-Rao 界为

$$\mathbf{E}[(\psi - \hat{\psi})^2] \geq \frac{1 - \mu^2}{2K\mu^2} \quad (11)$$

为了进行典型性说明起见,假设通道之间的去相关都是由于配准误差引起的。由(11)式容易得到对应去相关系数 $\rho_{dc} = 1 - \mu$ (即配准误差) 的干涉相位 ψ 的 Cramer-Rao 界为

$$E[(\psi - \hat{\psi})^2] \geq \frac{2\rho_{dc} - \rho_{dc}^2}{2K(1 - \rho_{dc})^2} \quad (12)$$

在推导得到对应配准误差的干涉相位 ψ 的 Cramer-Rao 界之后,利用如下方式产生 Monte Carlo 仿真数据。假设前向、后向通道 SAR 复图像为

$$\begin{cases} I_{fore} = M + S_{fore} \\ I_{aft} = M + S_{aft} \end{cases} \quad (13)$$

其中, I_{fore} 、 I_{aft} 均为服从均值为 0、方差为 1 的圆高斯分布随机变量, S_{fore} 、 S_{aft} 分别为前向、后向通道由于配准误差引起的随机部分,两者相互独立且都服从均值为 0、方差为 ρ_{dc} 的圆高斯分布, M 为两通道的相同部分,服从均值为 0、方差为 μ 的圆高斯分布。

109.2m/s, 波长为 0.03m, 不同通道之间的相位中心间距为 0.524m), 如若能够在较低虚警率条件下检测出 0.2m/s 的慢动目标(对应的失配引起的测速误差在 0.2m/s 以内), 则需要达到的配准精度为 0.1 个像素。所以,为了能够扩展动目标的最小可检测速度,提高测速精度和定位精度,必须实现多通道 SAR 复图像之间的精确配准。

3 精确配准算法

与通常所提的 SAR 图像之间、SAR 图像与光学图像之间等的配准问题不同,用于 GMTI 的多通道 SAR 图像数据是从同一视角、不同位置获取的同一场景的多幅图像,通常不会发生几何失真(即无法借助于平移、旋转和尺度缩放使两幅图像配准),此时原则上利用仿射变换这种线性的刚性变换模型(即保持点与点之间的整个几何关系不变)便能进行有效的配准。然而,仿射变换模型的尺度算子、平移算子和旋转算子的精确求解依赖于控制点的准确选取,当前的各种控制点的选取精度都不足以满足不同通道 SAR 图像之间的配准精度要求。

多通道 SAR 复图像的精确配准的核心是弥补通道之间的间距、脉冲重复频率和载机飞行速度之间不满足严格的约束关系而导致的通道失配,加之可能还存在的行或列平移误差,基于此,本文通过对待配准图像进行精确插值处理,生成模版图像库和相应的相关系数库,以 SAR 复图像的相位相关为准则,寻找模板图像库和相关系数库中与参考图像具有最大相位相关值的图像作为配准图像,从而实现多通道 SAR 复图像之间的精确配准。

3.1 配准流程

本文的多通道 SAR 复图像精确配准方法的实现过程如图 2 所示,概括起来,可分为如下步骤(以三通道为例):

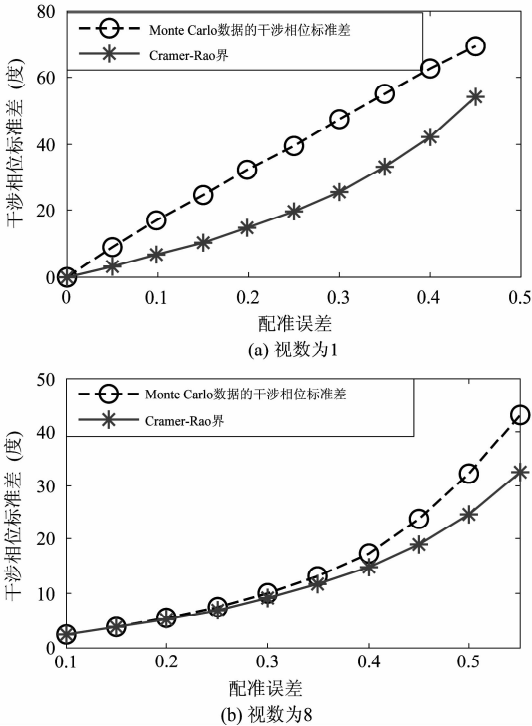


图 1 干涉相位标准差与配准误差之间的关系
Fig. 1 the relation between interferometric phase's standard deviation and registration error

通过如上方式生成了视数为 1、8 时的 10000 个 Monte Carlo 仿真数据,得到的干涉相位标准差与配准误差之间的关系如图 1 所示。图中表明:不论视数大小如何,随着配准误差的逐渐增大,干涉相位标准差都会随之以较大的速度增大。对于慢动目标检测而言,如若要利用干涉相位检测出速度很小的慢动目标,配准精度必须保持在一个很高的水平。以单视情况下为例,参数设置与中电集团第三十八研究所提供的实测三通道数据的系统参数一致(即载机飞行速度为

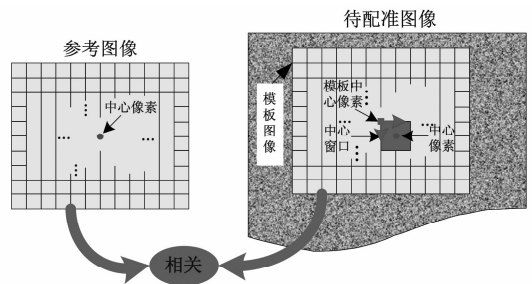


图 2 本文的多通道 SAR 复图像精确配准示意图
Fig. 2 the sketch map of the proposed multi-channel SAR complex image registration

Step1. 以坐标为 (x_0, y_0) 的像素点 i 为中心,利用大小为 $N_0 \times N_0$ 的矩形窗口,截取第一通道 SAR 复图像中对比度强、特征明显的静止场景区域(如人造建筑物区等),以此作为参考图像 f ;

Step2. 在第二、三通道 SAR 复图像中,以坐标为 (x_0, y_0) 的像素点 i' 、 i'' 为中心,大小为 $n_0 \times n_0$ ($n_0 \ll N_0$,

通常选 3×3 即可满足要求) 的矩形区域 (作为中心窗口) 内, 依次以该区域内的整数坐标点和方位向、距离向分数坐标点为中心, 截取大小为 $N_0 \times N_0$ 的矩形场景区域作为模板图像;

Step3. 这其中, 模板图像的数量 L 与中心窗口的大小和方位向、距离向分数点坐标的个数 (假设每个方位向、距离向分辨单元内包含的分数坐标点的个数分别为 L_c 、 L_r) 有关, 即 $L = [(n_0 - 1) \cdot (L_r + 1) + 1] \cdot [(n_0 - 1) \cdot (L_c + 1) + 1]$, 同时方位向、距离向分数坐标点的像素值利用精度较高的立方卷积内插法进行插值获取;

Step4. 在生成第二、三通道各自的模板图像库 (每个库中都包含 L 个模板图像) 之后, 分别对各库中的每一幅模板图像与参考图像作相位相关运算, 记录相关矩阵中坐标为 (N, N) 的点应对应的关系系数, 组成关系系数库;

Step5. 遍历整个模板图像库和关系系数库, 分别找出对应第二、三通道的具有最大关系系数的模板图像 g 、 g' , 该模板图像即为第二、三通道模板图像库中与参考图像 f 精确配准的图像;

Step6. 把上述配准图像的获取规则拓展到整幅第二、三通道 SAR 复图像, 最终得到精确配准的三通道 SAR 复图像。

3.2 细节描述

3.2.1 立方卷积内插法

相比常用的最近邻域法 (又称为零阶内插法, 通过简单的取整操作即可实现)、双线性内插法, 立方卷积内插法不但能够克服最近邻域法可能出现的像素不连续的现象, 同时也能解决由于双线性插值的低通滤波特性使高频分量受损, 造成图像轮廓在一定程度上变得模糊的问题, 因此, 我们牺牲一定的计算量, 选择具有较高插值精度的立方卷积内插法^[11]。

设参考图像中的任意点 (x, y) (对应的像素值为 $f(x, y)$), 对应的待配准 (输入) 图像中的坐标 (x', y') , 当 x' 、 y' 为非整数时, 插值处理获取的值为 $g(x', y')$ 。对于立方卷积内插法, 其利用 (x', y') 的 16 个最近邻点的像素点对 (x', y') 点进行插值。设 (x', y') 最邻近的 16 个像素点依次为 $g(m-1, n-1), \dots, g(m+2, n+2)$, $\alpha = x' - m$, $\beta = y' - n$ 。 $g(x', y')$ 由如下插值公式获得, 即

$$g(x', y') = \mathbf{A} * \mathbf{B} * \mathbf{C} \quad (14)$$

其中,

$$\mathbf{A} = [S(\alpha+1) \quad S(\alpha) \quad S(\alpha-1) \quad S(\alpha-2)] \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} g(m-1, n-1) & g(m-1, n) & g(m-1, n+1) & g(m-1, n+2) \\ g(m, n-1) & g(m, n) & g(m, n+1) & g(m, n+2) \\ g(m+1, n-1) & g(m+1, n) & g(m+1, n+1) & g(m+1, n+2) \\ g(m+2, n-1) & g(m+2, n) & g(m+2, n) & g(m+2, n+2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{C} = [S(\beta+1) \quad S(\beta) \quad S(\beta-1) \quad S(\beta-2)]^T \quad (17)$$

对于 $S(t)$ 是通过如下方式定义的一个分段函数, 是对 $\sin(\pi t)/t$ 的逼近, 即

$$S(t) = \begin{cases} 1 - 2|t|^2 + |t|^3, & 0 \leq |t| < 1 \\ 4 - 8|t| + 5|t|^2 - |t|^3, & 1 \leq |t| < 2 \\ 0, & |t| \geq 2 \end{cases} \quad (18)$$

把内插的值 $g(x', y')$ 赋给校正 (即输出) 图像 \hat{f} 中的点 (x, y) 即可, 即 $\hat{f}(x, y) = g(x', y')$ 。

3.2.2 相关运算的求解

为了获得模板图像与参考图像之间的相关系数, 我们采用相关运算操作, 即假设维数分别为 $M_a \times N_a$ 和 $M_b \times N_b$ 的矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1 \times N_a} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2 \times N_a} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M_a \times 1} & A_{M_a \times 2} & \cdots & A_{M_a \times N_a} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1 \times N_b} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2 \times N_b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{M_b \times 1} & B_{M_b \times 2} & \cdots & B_{M_b \times N_b} \end{bmatrix} \quad (20)$$

将矩阵 \mathbf{B} 按如下方式扩展为 $\tilde{\mathbf{B}}$, 其维数都为 $(2M_a + M_b - 2) \times (2N_a + N_b - 2)$, 有

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(M_a-1) \times (N_a-1)} & \mathbf{0}_{(M_a-1) \times N_b} & \mathbf{0}_{(M_a-1) \times (N_a-1)} \\ \mathbf{0}_{M_b \times (N_a-1)} & \mathbf{B} & \mathbf{0}_{M_b \times (N_a-1)} \\ \mathbf{0}_{(M_a-1) \times (N_a-1)} & \mathbf{0}_{(M_a-1) \times N_b} & \mathbf{0}_{(M_a-1) \times (N_a-1)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

从而, 矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 的互相关定义为

$$C_{ij} = \sum_{m=1}^{M_a} \sum_{n=1}^{N_a} A_{m \times n} \text{conj}(\tilde{B}_{(m+i) \times (n+j)}) \quad (22)$$

其中, $0 \leq i \leq M_a + M_b - 2$, $0 \leq j \leq N_a + N_b - 2$ 。对应的互相关矩阵 \mathbf{C} 为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & \cdots & C_{0 \times (N_a + N_b - 2)} \\ C_{10} & C_{11} & \cdots & C_{1 \times (N_a + N_b - 2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{(M_a + M_b - 2) \times 0} & C_{(M_a + M_b - 2) \times 1} & \cdots & C_{(M_a + M_b - 2) \times (N_a + N_b - 2)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

相关矩阵 \mathbf{C} 中各元素对应的关系系数由下式获得, 即

$$r = \frac{C_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{m=1}^{M_a} \sum_{n=1}^{N_a} A_{m \times n}^2 \right) \left(\sum_{m=1}^{M_a} \sum_{n=1}^{N_a} \left(\text{conj}(\tilde{B}_{(m+i) \times (n+j)}) \right)^2 \right)}} \quad (24)$$

3.2.3 操作数据形式的最优选取

由于待配准的对象是复图像数据, 因而可分为三种

基本的配准操作数据形式:一是直接对复图像进行插值、相关;二是分别对实部、虚部进行插值,找出最大相关处对应的模板图像;三是利用幅度图像、相位图像,分别进行插值、相关,确定作为配准图像的模板图像。

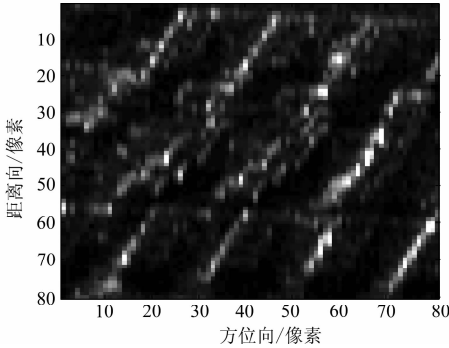


图 3 用于配准规则确定的典型区域(为某一通道幅度图像)
Fig.3 the representative region for determination of registration rules

为此,我们截取了中电集团第三十八研究所提供的三通道 SAR 复图像数据中的一块典型区域(如图 3 所示,对应图 5 中标号为 3 的区域),对选取何种数据形式能够实现最优的配准进行验证。中心窗口的大小选为 3×3(试验表明,选取 5×5、7×7 的试验结果与之相同),每个方位向、距离向分辨单元内都均匀地插入 6 个分数坐标点,对应的中心像素点的总数为 225,即模板图像库的大小为 225,如图 4 所示。试验结果与分析汇总如下:

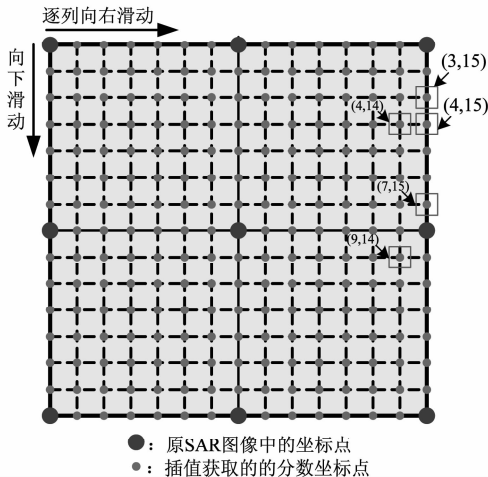


图 4 中心窗口示意图
Fig.4 the sketch map of the center window

(1) 当利用复数据进行插值、相关操作,进而得到不同模板图像对应的相关系数时,由于相关系数是复数,导致进行最优模板图像选择可有两种途径:一是把相关系数的幅值(称为相关度)作为选取的标准,具有最大相关度的模板图像选作配准图像;二是依据相关系数的相位(也就是相关相位)确定最优的模板图像。实验中,前者对应的最大相关度值为 0.9963,最大相关

位置在中心窗口的(9,14)处,其对应的相关相位值为 -0.0202;后者对应的最大相关相位值为 0.5158,在中心窗口的(4,15)处,其对应的相关度值为 0.9121。第一种途径获取的配准图像与参考图像作差处理后的幅度最大值为 2215.8,第二种途径得到的配准图像与参考图像相减后的幅度最大值为 778.2;

(2) 当分别利用复 SAR 数据的实部和虚部分别进行插值和配准时,实部对应的最大相关度值为 0.8570,虚部对应的最大相关度值为 0.8542,最大相关的位置都是在中心窗口的(4,14)处。由配准的实部和虚部得到配准图像后,同参考图像进行幅度相关的值为 0.9103,相位相关的值为 0.5133,与参考图像相减后的幅度最大值为 795.5;

(3) 当分别利用复 SAR 数据的幅度和相位分别进行插值、配准时,幅度对应的最大相关度值为 0.9966,位置在中心窗口的(7,15)处;而相位对应的最大相关度值为 0.3522,位置却在中心窗口的(3,15)处。由于幅度和相位具有最大相关度的位置不同,当取幅度具有最大相关位置处对应的幅度图像和相位图像得到的模板图像作为配准图像时,参考图像与配准图像相减后的幅度最大值为 2297.7;反之,若选取相位具有最大相关位置处对应的幅度图像和相位图像得到的模板图像作为配准图像时,参考图像与配准图像相减后的幅度最大值为 2386.6。

(4) 另外,当截取图 5 不同的典型区域进行多次配准验证时(如标号为 1、2 的区域),利用复图像形式、幅度图像形式进行插值和配准时,被选为配准图像的参考图像在中心窗口中对应的位置具有一致性,而利用实部和虚部形式、相位图像形式进行操作时,作为配准图像的参考图像在中心窗口中对应的位置有差别,说明不适合把采用实部和虚部或相位图像形式下的得到的配准规则拓展到整幅 SAR 图像。实验中还发现,对于复图像形式,只对距离向进行插值与对距离向和方位向都进行插值能够获得相同的配准图像,从而可有效降低配准的计算量。

结合上述实验结果,根据相位信息是多通道 SAR 图像域地面慢动目标检测所利用的核心信息,我们可得出如下结论:利用复图像进行插值、配准是最优的数据形式选择,这其中,在确定可作为配准图像的模板图像时,其标准是依据相位信息,也就是直接求取相位相关最大值处对应的模板图像即可,这种方式是以牺牲一定的幅度相关性为代价的。

4 实验验证与分析

实验采用中电集团第三十八研究所提供的 X 波段、HH 极化的三通道 SAR 复图像,场景为北京某一地区。分辨率为 10m×2m,图像大小为 430×4000,如图 5 所示。从图 5 中截取包含慢动目标的典型区域(标号

为4),利用作者在文献[12]提出的慢动目标检测方法(简称为IMP检测法)进行检测,通过配准前后检测结果的对比,验证本文所提多通道SAR图像精确配准算法的性能。需要说明的是,此处的配准前是指配准精度只达到像素级,而配准后是基于所提配准算法进行慢动目标检测的结果。



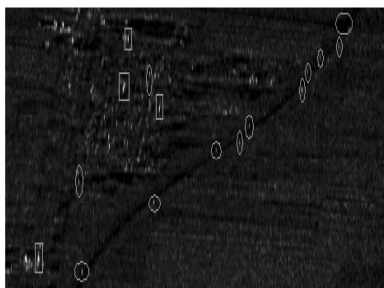
图5 中电集团第三十八研究所提供的三通道SAR图像
(为某一通道的幅度图像)

Fig.5 the three-channel SAR image provided by Chinese Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute

配准前后,利用IMP检测法对图5中标号为4的区域进行慢动目标检测的结果如图6所示。其中,图6(a)对应配准前的检测结果,图6(b)对应配准后的检测结果,两者的检测阈值相同。分析图6可得:



(a) 配准前



(b) 配准后

图6 配准前后对图5中标号为4的区域进行慢动目标检测的结果
Fig.6 the results (fore-and-aft registration) of detecting slow ground moving targets for the region tabbed by 4 in Fig.5

(1) 在图6(a)中,仅检测出3个动目标(如图6中椭圆所标注的区域),同时却产生了15个虚警目标,具有如此低的检测率和高虚警率的检测结果根本不具有实际指导意义;

(2) 在图6(b)中,12个动目标中的11个被成功检测出,只形成了4个虚警目标,取得了较为理想的检

测结果。其根本原因之一就是本文所提的配准算法能够提供满足多通道慢动目标检测时所需要的配准精度;

(3) 需要指出的是,图6(b)中左上角的一个运动车辆(如图6(b)中椭圆短边矩形所标注的区域)未被检测出,形成漏警,并不是因为配准精度不高引起的,其原因是由于该动目标具有较大的方位向速度导致其发生严重散焦,而IMP检测方法进行动目标检测的前提是“利用静止目标的匹配滤波器仍能清晰成像”,此时即使设置较高的虚警率也无法检测出该动目标。不过,利用较为成熟的图像自聚焦方法^[13]即可实现该目标的检测。

另外,为了更全面地说明本文所提的配准算法的有效性,作如下设定:a)图5对应的整幅IMP检测量图像中,幅值大于全局阈值 T_g 的像素判为慢动目标像素;b)假设被检测SAR图像大小为 $M \times N$,检测出的慢动目标像素的总数为 N_{mt} ,从而,静止场景像素数为 $N_s = MN - N_{mt}$;c)利用所提的服从 S^0 分布^[14]的IMP检测量作逐点滑窗检测,检出的慢动目标像素数为 N_{dmt} ,产生的虚警数为 N_{ds} 。

由此,定义实际检测率为

$$P_d = \frac{N_{dmt}}{N_{mt}} \quad (25)$$

相应的实际虚警率为

$$P_f = \frac{N_{ds}}{N_s} \quad (26)$$

其中,全局阈值 T_g 通过IMP检测量图像的直方图自适应确定。考虑到慢动目标像素位于IMP检测量图像直方图的拖尾部分,假设 A_{IMP} 为IMP检测量对应的随机变量,从而,给定慢动目标像素的置信度为 $1 - \varphi$, T_g 可由下式确定

$$P\{A_{IMP} > T_g\} = 1 - \varphi \quad (27)$$

$\varphi \in [0, 1]$ 为经验值,其物理含义是表示静止场景在整幅图像中所占的比例,也即图像中一个像素为慢动目标像素的置信度。在大幅IMP检测量图像中, φ 的取值较大,接近于1。进一步,若由待检测IMP检测量图像直方图得到图像累积分布函数(CDF)为 F ,从而可利用

$$1 - F(T_g) = 1 - \varphi \quad (28)$$

方便地得到 T_g 。

结合(25)、(26)式,计算得到的配准前后的ROC曲线如图7所示。图中清楚地表明,当多通道SAR复图像仅配准到像素级水平时,此时即使设置较高的虚警率对应的检测率也较低;而采用本文所提的配准算法对多通道SAR复图像进行配准后,能够取得非常理想的慢动目标检测性能,证明本文所提的配准算法能够提供多通道SAR-GMTI所需要的配准精度,是一种实用性较强的多通道SAR复图像精确配准方法。

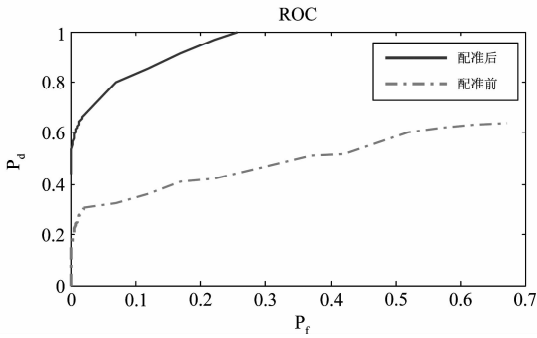


图 7 配准前后的 ROC 曲线

Fig. 7 the ROC curve of fore-and-aft registration

5 结论

针对多通道 GMTI 的 SAR 复图像配准问题,本文提出了一种基于模板图像库匹配的精确配准方法。首先,就配准误差对干涉相位(作为多通道 GMTI 的核心利用信息)的影响进行了系统阐述,推导出了对应配准误差的干涉相位 Cramer-Rao 界,并利用 Monte Carlo 仿真数据对配准误差的影响进行了量化。在此基础上,通过立方卷积内插法对待配准 SAR 复图像进行距离向、方位向插值处理,生成模板图像数据库和相关系数库,并采用适合于多通道 GMTI 的 SAR 复图像相位相关为准则,找出模板图像库和相关系数库中与参考图像具有最大相位相关值的图像作为配准图像,从而实现了多通道 SAR 复图像之间的精确配准。对基于所提配准算法的实测三通道 SAR 复图像进行慢动目标检测实验,结果表明所提算法能够提供多通道 GMTI 所需要的配准精度,证明了所提算法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] Stockman G, Kopstein and Benett S. Matching images to models for registration and object detection via clustering. *IEEE Trans. on PAMI*, 1982, 4(2): 229-241.
- [2] Bentoutou Y, Taleb N, Kpalma K, et al. An automatic image registration for applications in remote sensing. *IEEE Trans. on GRS*, 2005, 53(9): 2127-2137.
- [3] 吕金建. 基于特征的多源遥感图像配准技术研究. 国防科技大学博士学位论文, 2008.
Lv J J. Study on feature-based multi-source remote sensing image registration. [Ph. D. thesis]. National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 邵永杰. 多通道 SAR-GMTI 中的图像配准研究. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2006.
Shao Y J. The research on image registration for the multi-channel SAR-GMTI. The professional degree of Master of Engineering, Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [5] Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration. *IEEE Trans. on Computing*, 1972, 21(2): 179-186.
- [6] Alliney S. Spatial registration of multi-spectral and multi-

- temporal digital imagery using fast-Fourier transform techniques. *IEEE Trans. on PAMI*, 1993, 15(5): 499-504.
- [7] Pluim J P W, Antoine J B, Viergever M A. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, 2000, 19(8): 809-814.
- [8] Winston Li, Henry Leung. A maximum likelihood approach for image registration using control point and intensity. *IEEE Trans. on IP*, 2004, 13(8): 1115-1127.
- [9] 彭文. 基于特征的医学图像配准中若干关键技术的研究. 浙江大学博士学位论文, 2007.
Peng W. The research on several key methods of medical image registration based on features. [Ph. D. thesis]. Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [10] A. van den Bos. The multivariate complex normal distribution. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1995, 41(2): 537-539.
- [11] Lehmann T M, Gönner C, Spitzer K. Survey: interpolation methods in medical image processing. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, 1999, 18(11): 1049-1076.
- [12] 时公涛, 高贵, 匡纲要, 等. 基于干涉图幅度和相位联合的双通道 SAR 地面慢动目标检测方法. *信号处理*, 2009, 25(6): 888-894.
Shi G T, Gao G, Kuang G Y, et al. A novel dual-SAR detecting method based on joint metrics of interferogram's magnitude and phase for slow ground moving targets. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 888-894. (in Chinese)
- [13] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 794-809.
- [14] 时公涛. 基于干涉图的多通道 SAR 地面慢动目标自动检测技术研究. 国防科技大学博士学位论文, 2009.
Shi G T. The research on multi-channel SAR automatic detection of slow ground moving targets based on the interferogram (PH. D). National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介

时公涛(1980-),男,空军装备研究院情报所工程师,博士研究生。主要从事 SAR 成像、SAR 图像处理与自动目标识别、SAR-GMTI、统计建模等方面的研究工作。已发表论文近 20 篇。E-mail: shigongtao@sina.com

桂琳(1982-),女,中国人民解放军 94402 部队工程师,硕士研究生。主要从事遥感信息处理、视频处理等方面的研究工作。已发表论文近 10 篇。

陈涛(1978-),男,空军装备研究院情报所高级工程师,博士研究生。主要从事遥感图像处理、计算机视觉、图像情报处理等方面的研究工作。已发表论文 10 余篇。

庞怡杰(1974-),女,空军装备研究院情报所高级工程师,硕士研究生。主要从事航空航天遥感图像处理等方面的研究工作。已发表多篇学术论文。

王晶(1964-),男,空军装备研究院情报所高级工程师,硕士研究生。主要从事航空航天遥感图像处理等方面的研究工作。已发表多篇学术论文。