

文章编号:1671-8860(2012)03-0330-04

文献标志码:A

# 混合三角网极化干涉 SAR 影像配准

史 磊<sup>1</sup> 李平湘<sup>1</sup> 杨 杰<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘要:**以常用 SAR 影像三步配准法为基础,针对国产机载 X 波段极化干涉 SAR 影像的变形特点,提出了一种分块格网与三角网相结合的极化干涉 SAR 配准方法。首先,在影像分块的基础上利用最大-次大相干系数识别不可靠点;再用三角网限制配准误差传播;最后,进行配准模型系数求解。实验结果表明,所提出的改进方法相比于普通方法,提高了极化干涉 SAR 影像的配准精度,有效地改善了主辅影像的干涉质量,适用于新型国产机载极化干涉 SAR 数据的后处理。

**关键词:**极化;干涉;影像配准;混合三角网

**中图法分类号:**P237.3

利用机载极化干涉数据进行 DEM 生产、植被参数提取等研究面对的首要问题是如何获取高精度配准的干涉数据,较低的配准精度会降低干涉处理的相干系数,造成误差的引入<sup>[1]</sup>。一方面,由于机载 SAR 成像时在空中遇到各种气流的影响,相对于星载 SAR 而言,主辅影像变形较为复杂<sup>[2-4]</sup>;另一方面,国内自主研制的机载双天线 SAR 处于起步阶段,在飞行平台运动补偿与极化成像算法方面还有所欠缺。这使得机载双天线数据的高精度配准难于星载数据。

在干涉 SAR 处理中,三步配准法是最常用的配准方法,其原理简单、计算量小。由于飞机成像时受气流影响较为严重,常用的三步配准法精度较差,不能满足正常的干涉需要。诸多改进配准算法中,研究较为广泛的是基于特征点提取的配准(如 SIFT<sup>[5-7]</sup>),但其计算量巨大,难以对大范围的极化干涉数据进行快速配准。本文在三步配准的基础上加入了三角网控制配准误差,同时,利用最大-次大相干比值适当剔除错误配准点。

## 1 混合三角网配准

### 1.1 影像分块

由于获取到的数据是成像后数据,已经完成

了运动补偿、极化通道配准与极化定标等预处理,无法利用 POS 数据直接估计实际双天线变形模型。本文将影像划分为若干小块,将二次多项式模型作为局部变形模型,实验结果表明,影像不同位置的变形是不同的,若整幅影像采用单一的配准模型会增大误差,而小范围内的影像变形可以用二次多项式模型进行模拟。

### 1.2 配准格网点可靠性检测

配准格网可靠性检测的目的在于估计二次多项式配准模型系数。配准模型正确求解的前提是搜索到的同名点是正确的。常用方法是统计滑动窗口的复相干系数,相干系数最大则为同名点。相干系数受到很多因素的影响,如森林、草地、水面、较为平整的马路等都属于面状分布目标,其格网点统计特性与周围相似,复相干图像中有多个峰值,相干系数最大不一定是同名点。图 1(a)为主影像中位于农田的格网点;获取粗配准后辅影像对应格网点,用  $64 \times 64$  窗口在格网点 500 像素  $\times$  500 像素范围内统计所有像素的相干性大小。图 1(b)为以格网点为中心各个像素的相干性,图 1(c)为图 1(b)沿方位向的相应切面。从图 1(c)放大后的峰值可以看出,在辅影像中,对应格网点周围有 3 个点相干性非常相似,其相对位置从 1 个像元到 3 个像元不等;而有的地物其峰值范围

收稿日期:2012-01-06。

项目来源:国家 863 计划资助项目(2009AA12Z145,2011AA120404);国家自然科学基金资助项目(60890074,40523005);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

甚至更宽(如水体有 5~7 个像素),若使用这些格网点进行配准模型系数的求解会增加配准误差,这也是极化干涉主辅影像配准误差的来源之一。对此,本文提出了一种简单的方法来区分可靠性较低的格网点,然后再采用其他的方法来处理这些格网范围内的变形关系。主影像格网点与对应的辅影像格网点可靠与否,可以通过以下两个条件来判断。

1) 最大相干系数模  $|\gamma_{\max}|$  与次大相干系数模  $|\gamma_{\sec-\max}|$  应该有较好的可分性,定义  $\text{Rate} = |\gamma_{\sec-\max}| / |\gamma_{\max}|$ 。Rate 越接近 1,则相干系数峰值处越平坦,同名点可靠性越低;Rate 越接近 0,则相干系数

图越接近点响应函数,同名点可靠性越高。

2) 定义最大与次大相干系数距离:

$$\text{Dis} = \sqrt{(x - j)^2 + (y - k)^2} \quad (4)$$

其中,  $(x, y)$  为最大相干系数影像坐标;  $(j, k)$  为次大相干系数影像坐标。若相干系数曲线类似 Sinc 函数,则 Dis 应越接近 0, 同名点可靠性越高; 对于面分布目标, 由于统计特性较为相似, Dis 比较大, 这样的同名点可靠性低。若精配准后的格网点满足以上两个条件, 视此格网点为正确同名点, 用于求解二次配准模型系数; 否则, 此点配准精度较差, 加入模型系数求解中会增大配准误差, 格网点需要采用其他方法进行处理。

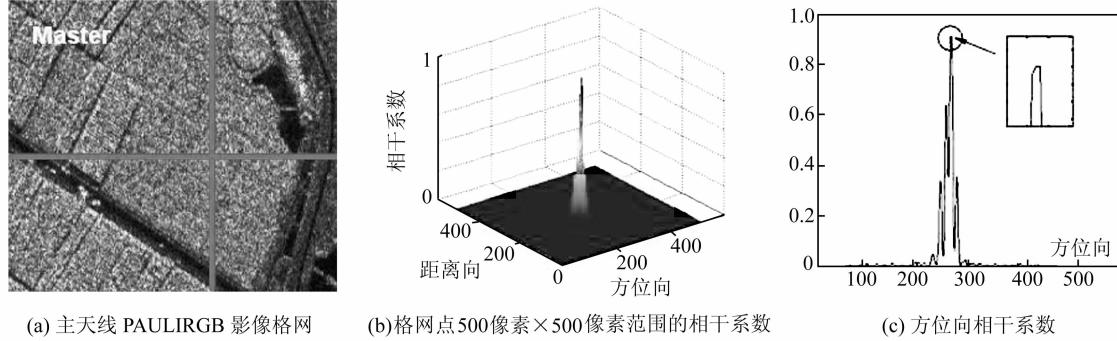


图 1 格网点相干系数

Fig. 1 Coherence Coefficient of Grid Points

### 1.3 构建误差限制三角网

若直接将可靠性较低的格网点从所在块剔除,固然可以有效提高整块配准精度,防止配准误差的传播。但是,这样也使得被剔除点的附近没有格网点辅助,只能通过距离较远的其他格网点进行几何形变控制,在提高整体配准精度的同时,造成了局部配准精度的降低。对此,本文对块内可靠性较低点构建 Delaunay 三角网<sup>[6,8]</sup>,尽可能控制误差传播,提高局部配准精度。若构建的三角网中有某个三角形面积大于指定阈值,则放弃此三角形,重采样时的配准关系以块的二次配准多项式为准;若此三角形面积小于阈值,则重采样时的配准关系以三角形构成的仿射变换为准,称为有效三角形。如图 2 所示,圆点表示过采样搜索到的格网点,其中实心表示经验证后可靠性较高的点,空心表示可靠性较低的点,连线表示阈值筛选后空心点构建三角网边缘。若没有加入面积限制条件, Tri 1、Tri 2、Tri 3 小三角网都是整体 Delaunay 三角网的一部分,应该是相互连续的;加入面积条件后,面积超过指定阈值的三角形被裁剪掉,大三角网被分割成了 3 个不连续的小三角网。

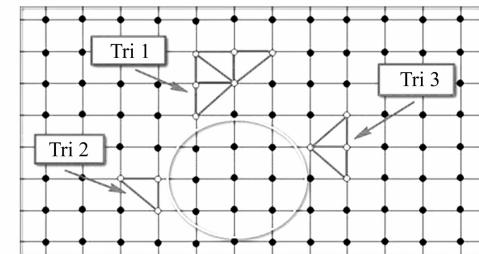


图 2 加入三角形面积条件限制的 Delaunay 三角网

Fig. 2 Delaunay Triangle with Area Refined

## 2 实验与分析

本文实验数据来自中国电子科技集团 38 研究所研制的 X 波段原型样机于 2010 年 1、2 月在海南省陵水黎族自治县获取的双天线极化干涉 SAR 数据, 分辨率约为 0.4 m。为了分析算法的有效性, 用常规的配准法进行对比实验。图 3(a) 为实验区 SAR 数据示意图, 数据块主要覆盖范围为陵水县周边, 已经完成了极化通道间的配准与极化定标等预处理, 数据块为 6 185 行、7 893 列的主、辅影像。

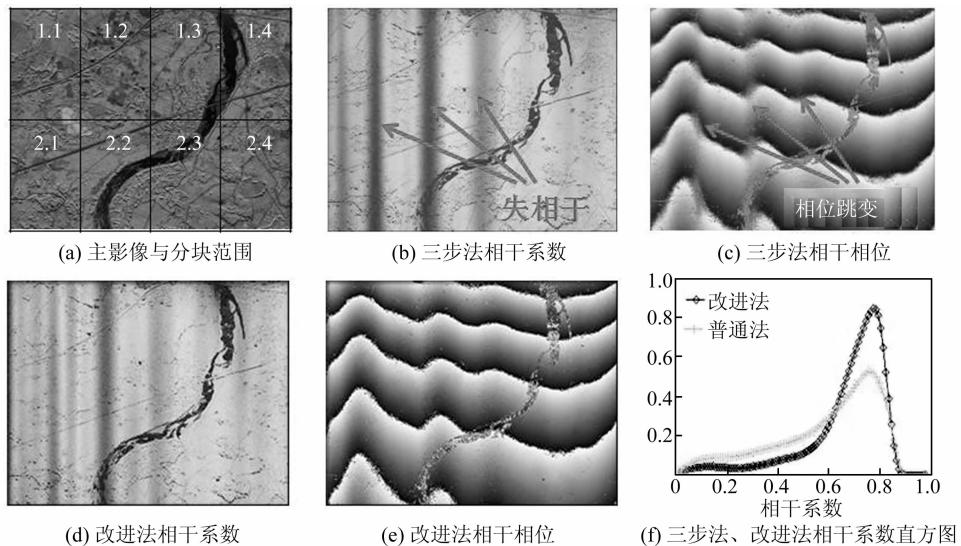


图3 常规、改进法结果

Fig. 3 Results of General and Improved Methods

普通三步法整幅影像配准模型行列误差分别为 1.520 像素、1.604 像素；生成的相干系数图与干涉相位(未去除平地效应)结果如图 3(b)、3(c)所示。可以看出，普通方法在进行整景影像配准时产生了 3 处较为严重的配准失相干区域(图 3(b)箭头处)，使得配准后的干涉相位在这 3 个地方产生了明显的不连续。这主要是飞行时气流扰动带来的成像平台不稳定，使得主辅影像变形较大，从而引起配准去相干。

本文的改进算法对实验区在行列方向分别进行了  $2 \times 4$  块等大小分块处理(见图 3(a))，重叠度为 40%，Rate 阈值设置为 0.9，Dis 阈值设置为采样率的 2 倍，改进方法配准相干系数、干涉相位、相干系数直方图如图 3(d)、3(f)所示。为了详细分析改进算法的优化程度，列出了每块低可靠性点数与高可靠点数比值 LR/HR，有效三角形数与总三角形数比值 RT，最终行列配准误差(像素)RRE/ RCE。

从表 1 中可以看出：① 从 RRE、RCE 来看，进行分块运算大大提高了配准精度。分块算法将影像不同位置的不同误差有效地区分开来，如第

1.3、1.4、2.2、2.3 块的配准精度相对于常规方法(配准行列误差 1.520 像素、1.604 像素)有明显提高。在这 4 块中，位于陵水河中的格网点是常规方法配准误差的主要来源。水域一方面回波信号较弱，另一方面同质性较强，这导致了配准的同名格网点可靠性较低，影响了整体的配准精度。本文加入了可靠性检查与构建三角网，提高了这 4 块的配准精度，这表明改进方法是有效合理的。② 对第 1.1、1.2、2.1 块，改进算法的配准精度也有了较大提高。相对于常规方法，改进方法提高了这 3 个区域的配准相干性(见图 3(b)~3(e))，并增强了干涉相位连续性。这 3 块的配准误差来源与前述 4 块的误差来源不同，由于没有水体的影响，误差主要来自不精确的运动补偿。同时，三角网的构建较好地将配准误差限制在三角形中，提高了整体相干性。③ 本文算法无论在整体配准精度，还是局部配准精度的改善上都是有效的。从图 3(f)可以看出，改进算法大大增加了高相干区域的面积，这对利用极化干涉数据进行大范围 DEM 提取、分类、植被参数的提取都是极其有利的。

表 1 改进算法各块提取参数及配准误差一览表

Tab. 1 Registration Results of Every Patch

	LR/HR	RT	RRE/ RCE		LR/HR	RT	RRE/ RCE
1. 1	35/2 109	0/59	0.489/0.701	2. 1	48/2 109	1/82	0.527/0.390
1. 2	27/2 451	6/47	0.601/0.823	2. 2	33/2 451	6/52	0.692/0.403
1. 3	61/2 508	15/109	0.008/0.096	2. 3	29/2 508	7/45	0.009/0.116
1. 4	54/2 109	12/95	0.007/0.068	2. 4	14/2 109	5/19	0.085/0.089

### 3 结 语

本文在常规三步配准法的基础上进行了适当的改进,对影像进行分块使得整幅影像不同位置采用不同的变形模型进行处理;对规则格网点进行可靠性检测,每块高可靠性点采用二次多项式模型配准、低可靠性点采用构建三角网仿射变换的方法进行配准,提高了配准的适应性;对三角网中超过阈值面积的三角形进行剔除,限制了误差传播,很好地提高了整体相干性。上述改进在成像时传感器平台运动补偿未知的情况下,可以满足双天线极化干涉 SAR 高精度、大范围快速配准的要求。

### 参 考 文 献

[1] 钟雪莲,向茂生,岳焕印,等. 机载差分干涉 SAR 的误差分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 941-947

[2] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002

[3] 黄源宝, 保铮, 周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 33(3): 459-462

[4] 盛蔚, 房建成, 韩晓英. 运动补偿用惯性器件误差对 SAR 成像分辨率的影响研究[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1162-1167

[5] 刘秀芳, 尤红建. 基于 SIFT 的多时相星载 SAR 图像特征点自动配准[J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 43-45

[6] 史磊, 李平湘, 杨杰. 利用 SIFT 与粗差探测进行 SAR 影像配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11): 1296-1299

[7] 郑永斌, 黄新生, 丰松江. SIFT 和选择不变 LBP 相结合的图像配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2010, 22(7): 286-292

[8] 付必涛, 王乘, 曾致远. 基于六元组和面积比的图像自动配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(9): 955-958

第一作者简介:史磊,博士生,主要研究方向为极化 SAR 图像处理。

E-mail: comefromshilei@sohu.com

## Polarimetric and Interferometric SAR Imagery Registration Based on Hybrid Triangle

SHI Lei<sup>1</sup> LI Pingxiang<sup>1</sup> YANG Jie<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A registration algorithm which hybridizes the block grids and Delaunay-triangle is proposed to enhance the domestic airborne POLINSAR data accuracy. Firstly, the highest and sec-highest coherence values are used to refine the reliable grid points based on the image blocks. Secondly, the registration error is limited by Delaunay-triangles. Then, the offset model coefficient is solved. The final experiment shows that the proposed scheme increases the POLINSAR images registration.

**Key words:** polarimetric; interferometric; SAR; imagery registration; hybrid triangle

**About the first author:** SHI Lei, Ph.D candidate, majors in POLSAR image processing.

E-mail: comefromshilei@sohu.com