

光学与 SAR 影像异源匹配方法研究

陈世津, 夏 飞, 许 峰

(广西国土资源规划设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘 要 随着 SAR 卫星的陆续发射和普及, 其全天候、全天时、高分辨对地观测能力与光学卫星形成良好互补应用; 由于光学与 SAR 影像成像机理不同, 同名点自动匹配难度较大, 是近几年来遥感技术研究的难点和热点之一。为了满足光学和 SAR 影像自动匹配的精度需求, 本文基于已有的相位一致性直方图匹配方法, 提出了逐级自适应搜索半径、逐点小区域内存正射纠正、迭代剔除粗差点等匹配策略, 并开展了两种较为复杂地形特征的光学与 SAR 自动匹配实验验证, 旨在为进一步提升匹配算法的鲁棒性和正确率提供参考。试验结果表明, 该方法能够均匀匹配出大量的同名点, 正确率高于 92%。

关键词 遥感影像; 特征描述子; 光学影像; SAR 影像; 异源影像匹配

基金项目: 多源遥感数据自动化处理系统(项目编号: 桂科 AB24010337)。

中图分类号: TP751

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.001

0 引言

单一传感器获取的遥感影像所携带的信息量有限, 为了能够让遥感影像发挥最大的应用价值, 往往需要多源遥感影像的结合^[1]。其中光学影像易受到环境和气候的影响, 导致部分区域的影像因常年云雾覆盖而无法使用。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像具有不受云雾天气影响的特点, 可以弥补光学影像信息的不足^[2]。全自动的影像匹配是影像配准、影像融合、变化检测等最基础、最常用的一项技术, 影像匹配尤其是异源影像之间的匹配尤为关键。

有学者使用 SIFT、SURF、ORB 等基于特征描述子的匹配方法^[3-5]对遥感影像进行了匹配研究, 但对成像机理差异较大的光学和 SAR 影像并不适用; 互相关算法是一种基于区域的匹配方法, 通过计算两幅影像中对应区域的灰度值相关性, 实现对同名点的匹配。互相关算法简单直观, 但对影像的光照变化和噪声比较敏感^[6]。相位相关算法是一种基于频率域的匹配方法, 通过计算两幅影像的傅里叶变换的相位差, 实现对同名点的匹配。相位相关算法对影像的光照变化和噪声不敏感, 但计算量较大^[7]。叶沅鑫提出了基于结构相似性的多模态匹配框架, 将相位一致性特征值与特征方向相结合, 构建几何结构特征描述符, 通过逐像素结构特征匹配框架进行多模态影像匹配^[8]。近几年, 也有很多专家学者研究使用深度学习方法来对遥感影像进行自动匹配^[9-10], 但需要大量且全面的样本才能具有一定的普适性。

为了使光学和 SAR 卫星影像自动匹配能够更好地满足自动化和工程化应用, 本研究在已有的异源影像匹配技术的基础上做了匹配精度和成功率方面的改进, 并展开了匹配实验, 论证了该方法的有效性。

1 光学和 SAR 影像异源匹配技术

本研究首先针对高分三号雷达卫星影像进行了 SAR 噪声去除、距离多普勒(RD)模型重构 RPC 模型等预处理, SAR 噪声去除提升了 SAR 影像的纹理质量, 而 RD 模型重构 RPC 模型统一了和光学同样的数学模型基础; 其次介绍了 HOPC 实现可见光和 SAR 影像匹配的基本原理; 最后基于 HOPC 基本原理, 提出了三点改进方法, 进一步提升匹配的准确率和鲁棒性。

1.1 SAR 预处理

1.1.1 SAR 噪声去除

SAR 影像的相干斑噪声是成像过程中散射体相干叠加导致的固有噪声, 不仅影响视觉感受, 也会影响与其他影像的自动匹配。本研究采用小波变换法对 SAR 影像进行去噪处理, 小波变换法能够在不同尺度下分离影像的低频信号与高频噪声, 其核心优势在于兼顾噪声抑制与细节保留。小波变换法对 SAR 影像去噪的主要算法步骤如下:

(1) 小波分解: 将 SAR 影像分解为低频近似分量和高频细节分量, 实现噪声与有用信号的频域分离。(2) 噪声标准差估计: 量化高频分量中的噪声强度, 为阈值

作者简介: 陈世津(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 自然资源遥感监测和调查测绘、数智化与人工智能技术研究。

处理提供依据, 确保阈值能有效区分噪声与有用细节。

(3) 高频细节分量处理: 抑制高频分量中的噪声系数, 保留对应地物边缘纹理的有用系数。(4) 小波逆变换: 将处理后的低频分量与高频分量重构为去噪后的影像。

1.1.2 RD模型重构RPC模型

多视角SAR数据精密定位技术基于距离—多普勒模型这一核心理论展开, 该模型是SAR成像和目标定位的重要基础, 反映了雷达与目标之间的空间关系以及信号传播的物理特性。在多视角SAR系统中, 每个视角下的雷达都遵循距离—多普勒原理工作。从雷达发射信号到接收目标回波的时间延迟, 可以用于计算雷达与目标之间的距离信息。通过距离时间和方位时间可以构建出每个视角下的距离多普勒方程。当存在多个视角的雷达数据时, 每一个视角的数据都能根据距离—多普勒模型列出一组观测方程。这些观测方程从不同的角度描述了目标的位置信息。不同视角下的距离观测值和多普勒频移观测值都是目标位置的函数, 但由于视角的差异, 这些函数在参数上各不相同。R-D距离多普勒模型可以通过制作自身虚拟控制点的方式来构建其RPC模型, 经过大量数据的验证, 由此得到的RPC模型与R-D模型精度小于0.1个像素。

1.2 HOPC匹配基本原理

相位一致性方向直方图(Histogram of Orientated Phase Congruency, HOPC), 是一种基于相位信息的局部特征描述子, 常用于图像匹配、目标识别、遥感图像配准等场景。其核心优势在于对光照变化、噪声、几何形变具有较强的鲁棒性, 弥补了传统基于梯度特征匹配算法在低对比度、纹理模糊图像中性能下降的不足。

相位一致性的计算是HOPC的基础, 其本质是通过Gabor小波变换或Log-Gabor小波变换对图像进行多尺度、多方向分解, 再分析各分解分量的相位一致性程度。强度值计算公式如下:

$$PC(x, y) = \frac{\sum_n \sum_o W_o(x, y) [A_{no}(x, y) \Delta \Phi_{no}(x, y) - T]}{\sum_n \sum_o A_{no}(x, y) + \varepsilon} \quad (1)$$

式(1)中, $PC(x, y)$ 表示在像点 (x, y) 相位一致性的强度值, $[]$ 符号表示值为正时取本身, 否则取0, T 为噪声阈值, ε 是一个避免除数为零的常数, $A_{no}(x, y)$ 为像点 (x, y) 在 log Gabor 滤波器尺度 n 和方向 o 上的振幅, 它与 $\Delta \Phi_{no}(x, y)$ 的乘积为:

$$A_{no}(x, y) \Delta \Phi_{no}(x, y) = (e_{no}(x, y) \bar{\phi}_e(x, y) + o_{no}(x, y) \bar{\phi}_o(x, y)) - |e_{no}(x, y) \bar{\phi}_o(x, y) - o_{no}(x, y) \bar{\phi}_e(x, y)| \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{\phi}_e(x, y) = \sum_n \sum_o e_{no}(x, y) / E(x, y) \\ \bar{\phi}_o(x, y) = \sum_n \sum_o o_{no}(x, y) / E(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

能量函数 $E(x, y)$ 为:

$$E(x, y) = \sqrt{(\sum_n \sum_o e_{no}(x, y))^2 + (\sum_n \sum_o o_{no}(x, y))^2} \quad (4)$$

式(4)中, $e_{no}(x, y)$ 为 Log Gabor 小波的偶对称滤波器响应值, $o_{no}(x, y)$ 为 log Gabor 小波的奇对称滤波器响应值。

仅仅只有相位一致性的强度值并不能完全构建出特征描述符, 还需要引入特征方向来完善 HOPC 描述子的构建。将多方向的奇对称滤波器结果分别投影到水平方向和垂直方差, 可获得两个方向的反正切值, 从而获得相位一致性特征方向 Φ :

$$\begin{cases} a = \sum_{\theta} (o_{no}(\theta) \cos \theta) \\ b = \sum_{\theta} (o_{no}(\theta) \sin \theta) \\ \Phi = \text{artan}(b, a) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $o_{no}(\theta)$ 表示在方向 θ 上的奇对称滤波器响应值。

对影像进行均匀分块, 分别计算每块影像的相位一致性方向直方图, 将相位一致性的强度和方向归一化为0到1的值, 共同组成 HOPC 特征描述子, 最后使用正交化的相关一致性(NCC)作为相似性测度通过 HOPC 特征描述子来进行影像匹配, 定义为:

$$HOPC_{ncc} = \frac{\sum_{k=1}^n (V_A(k) - \bar{V}_A)(V_B(k) - \bar{V}_B)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (V_A(k) - \bar{V}_A)^2 \sum_{k=1}^n (V_B(k) - \bar{V}_B)^2}} \quad (6)$$

式(6)中, V_A 和 V_B 是影像区域A和影像区域B的HOPC描述子, \bar{V}_A 和 \bar{V}_B 分别表示 V_A 和 V_B 的平均值。

1.3 HOPC匹配改进方法

直接采用 HOPC 方法进行点位匹配时发现该方法的匹配错误率较高, 也不支持有旋转角度影像间的自动匹配, 如 SAR 原始影像和光学影像的角度差异较大。为此, 对该方法进行三点改进:

一是 SuperGlue+HOPC 匹配结果交叉验证。为了进一步提升自动匹配的正确率, 引入基于深度学习的 SuperGlue 算法和 HOPC 算法共同来决定匹配点是否成功。首先, 初始特征点采用 SuperPoint 特征点提取算法来对 SAR 影像进行特征提取, 目的是采用同一套初始特征点; 其次, 分别采用 SuperGlue 算法和 HOPC 算法同时对 SAR 影像和光学影像进行自动匹配, 得到两组匹配对; 最后, 对两组匹配对进行分析处理, 假设某个特征点使用 SuperGlue 匹配方法得到的第二景影像的像素坐

标为 $P_s(x_s, y_s)$ ，使用 HOPC 匹配方法得到的第二景影像的像素坐标为 $P_h(x_h, y_h)$ 。则最终确定的匹配点像素坐标如下 $P(x, y)$ ：

$$P(x, y) = \begin{cases} x = \frac{x_s + x_h}{2} (|x_s - x_h| \leq \theta) \\ y = \frac{y_s + y_h}{2} (|y_s - y_h| \leq \theta) \end{cases} \quad (7)$$

如果两种匹配方法匹配得到的坐标值差小于误差阈值 θ （本文取 0.3 像素），则取这两种匹配方法得到的坐标平均值，如果大于误差阈值 θ ，则匹配失败。

二是在匹配过程中结合 DEM 数据进行实时小块影像内存正射，解决 HOPC 算法不支持旋转影像和由于地形起伏等原因无法匹配的问题。原始 SAR 影像由于拍摄角度和升降轨问题，相对基准影像是上下颠倒的；无 DEM 正射的 SAR 影像，影像左下角扭曲严重，加入 DEM 后，扭曲问题得到了缓解，为匹配算法输入无旋转和精度差异最小的数据，提升匹配的可靠性和正确率。

三是使用迭代剔除粗差点的方法。由于可见光与 SAR 影像的纹理差异性，自动匹配的控制点会存在一定比例的错误点，如果不进行有效删除，则会影响区域网平差的精度。通过 RPC 模型和 DEM 数据计算每个点的误差值，删除误差值最大的点位，剩余的控制点再利用 RPC 模型和 DEM 数据计算每个点的误差值，再次删除误差值最大的点，如此循环迭代删除点位，直到最大误差值小于设定的误差阈值停止迭代，保留的控制点就认为是正确的。该方法虽然增加了一定的计算量，但是能够避免一次性删除多个点造成有些正确的点被误删。

2 试验与分析

2.1 匹配试验数据

为了验证本研究匹配方法改造的效果，采用两组光学和 SAR 影像作为试验数据（见表 1），分别采用本研究改进的方法、HOPC 方法进行匹配，并记录不同方法匹配的总点数、匹配正确率。

表 1 匹配试验数据情况

序号	参考影像		待匹配影像		数据特点
	数据 类型	分辨率 (米)	数据 类型	分辨率 (米)	
1	光学	2	SAR	3	SAR 数据内部存在畸变
2	光学	2	SAR	8	山区，地形起伏较大

试验中的匹配参数统一设置为：种子点数为 1 000 个，搜索半径为 50，RPC 模型粗差别阈值为 3 个像素，匹配精度小于 1 个像素为正确点。

2.2 匹配试验结果

分别使用原始的 HOPC 方法和本研究改进的 HOPC 方法使用相同的参数对两组实验数据进行自动匹配试验，两种匹配方法的试验结果对比见表 2。

表 2 匹配试验结果对比

序号	方法	匹配点数	匹配正确率
试验 1	HOPC	89	89.6%
	本文方法	129	92.4%
试验 2	HOPC	154	87.2%
	本文方法	210	93.4%

从匹配试验结果对比可以看出，对于内部存在畸变或地形起伏较大的数据，本研究改进的方法不论是匹配点数还是匹配正确率均优于原始 HOPC 方法。

3 结束语

针对光学和 SAR 影像自动异源匹配的问题，本研究基于相位一致性直方图匹配方法做了金字塔逐级自适应搜索半径、逐点小区域内存正射、迭代剔除粗差点三个方面的改进，并采用原始 HOPC 方法和本研究改进的 HOPC 方法分别对两组光学和 SAR 影像进行自动匹配试验。试验结果表明，本研究改进的 HOPC 方法相较于原始 HOPC 方法在鲁棒性和正确率方面均有明显的提升，为下一步批量化异源影像配准、融合、区域网平差等处理奠定了坚实的基础。

参考文献：

- [1] 林月卿. 多源遥感数据融合在土地利用变化监测中的应用 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(18): 220-222.
- [2] 杨超, 刘畅, 唐腾峰, 等. 基于深度特征重构增强的光学和 SAR 图像鲁棒匹配 [J]. 遥感学报, 2025, 29(08): 2616-2626.
- [3] 何巧. 线性注意力机制优化的光学与 SAR 影像匹配方法 [J]. 遥感信息, 2024, 39(05): 171-178.
- [4] 邓睿. 基于孪生网络和噪声解耦的可见光-SAR 图像匹配方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [5] 田丹, 陈钰坤. 基于改进 ORB 算法的遥感图像匹配 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2024, 36(01): 34-39, 85.
- [6] 门宇博, 宋佳, 程思源. 基于边缘特征互相关的快速 SAR 图像匹配算法 [J]. 中国宽带, 2023, 19(05): 68-70.
- [7] 衣家欣, 王金鹤. 基于改进相位相关算法的图像匹配 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(06): 1456-1459.
- [8] 刘盼. 面向光学遥感与 SAR 图像的配准方法 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [9] 傅水清. 基于深度学习的宽基线弱纹理影像匹配研究 [J]. 科学技术创新, 2024(14): 47-50.
- [10] 王迎春. 一种基于学习型特征的多模态影像匹配方法 [J]. 时空信息学报, 2023, 30(03): 345-351.