

基于目标检测的 SAR 图像匹配算法

张辉 王建国

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文提出一种基于目标检测的 SAR 图像匹配算法。针对 SAR 图像的特点, 该算法先检测 SAR 图像的强散射目标, 接着计算各强散射目标的质心, 对主、辅图像的质心点集合进行 Delaunay 三角剖分, 以三角剖分后的对应相似三角形的质心、内心、外心为匹配点进行匹配, 最后用 ERS-I, ERS-II 卫星的 SAR 图像进行实验, 通过与相干系数法进行比较, 实验结果证实了方法的有效性。

关键词: SAR 图像; 目标检测; Delaunay 三角剖分; 图像匹配

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2818-04

A SAR Image Matching Algorithm Based on Target Detection

Zhang Hui Wang Jian-guo

(College of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: This paper presents an algorithm about SAR image matching based on target detection. According to the characteristics of SAR image, this method detects the strong scatterer targets firstly, and then calculates the centroid points of the strong scatterers targets, then these centroid points are used to generating Delaunay triangulation, After triangulation, in the centroids, incenters, circumcenters of the corresponding similar triangle for establishing the mapping function between master-image and slave-image. Finally, the test carried out with SAR images of ERS-I, ERS-II satellite, compareing with the methods based on correlation, the experimental result confirms the effectiveness of this method.

Key words: SAR image; Target detection; Delaunay triangulation; Image matching

1 引言

SAR(Synthetic Aperture Radar)图像匹配就是寻求两幅SAR图像像素点之间的几何变换关系, 通过这一变换可以把一个图像数据集中的任意一点的坐标变换到另一个数据集中的对应位置的坐标。它是SAR图像应用中的一个重要环节, 直接影响到诸如SAR图像变化检测, SAR图像与光学图像融合, 目标识别等SAR图像多种应用的效果, 因此研究SAR图像匹配技术具有重要的理论意义和实用价值。

目前常用的图像匹配方法有相干系数法、最大频谱法、互信息量法等^[1]。其中相干系数法和互信息量法对灰度变化比较敏感; 相干系数法和最大频谱法运算量较大。SAR图像本身固有的相干斑噪声使得相干系数法、最大频谱法, 互信息量法应用于SAR图像匹配时效果不是很好。另外, 不同SAR载体得到的SAR图像分辨率可能不一样, 这也使得传统的图像匹配方法不适合应用于不同分辨率的SAR图像匹配。

针对SAR图像动态范围比较大, 相干斑使得图像质量下降的情况, 本文应用检测强散射目标的方法, 结合Delaunay三角剖分, 提出了一种新的SAR图像匹配算法。新算法其主要思想是根据目标的分布特性, 检测出主图像和辅图像的强

散射目标, 计算各强散射目标的质心。对主、辅图像的各强散射目标的质心点集合进行Delaunay三角剖分, 以主、辅图像三角剖分后的对应相似三角形的质心、内心、外心为匹配点进行匹配。实验结果表明, 新方法可以有效抑制SAR图像相干斑噪声的影响, 提高图像匹配的精度, 并具有运算量小的优点。

2 基于目标分布特性的目标检测

对于 SAR 图像, 假设目标和背景都服从 Gamma 分布, 这种分布假设下, 有目标 H_1 和没有目标 H_0 的联合概率密度函数分别表示为

$$p(x; L, m_1, H_1) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{m_1} \right)^L x[n]^{L-1} \exp\left(-\frac{Lx[n]}{m_1}\right) \quad (1)$$

$$p(x; L, m_0, H_0) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{m_0} \right)^L x[n]^{L-1} \exp\left(-\frac{Lx[n]}{m_0}\right) \quad (2)$$

$$m_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n] \quad (3)$$

其中 L 是 SAR 图像的等效视数, 是可以估计的; m_0 是背景的均值, 可从背景中估计, 认为是已知参数, 因此似然比为

$$L_G(\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}; L, m_1, H_1)}{p(\mathbf{x}; L, m_0, H_0)} = \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^{LN} \exp\left[-LN + LN \frac{m_1}{m_0}\right] \quad (4)$$

根据纽曼-皮尔逊准则, 可以推导出恒虚警目标检测算法^[2], 得到检测算子为

$$T(\mathbf{x}) = \ln\left(\frac{m_0}{m_1}\right) + \frac{m_1}{m_0} > \beta \quad (5)$$

这时判检测区域为目标区。从式(5)可见, 当 $\frac{m_1}{m_0} = 1$ 时,

$T(\mathbf{x})$ 取得最小值, 当 m_0 与 m_1 差别越大, $T(\mathbf{x})$ 取值越大, 说明检测区域与背景差别越大, 当 $T(\mathbf{x})$ 大于门限值时, 判为有目标出现。由于我们检测的目标是强散射的目标, 因此式(5)中去掉对数项后的检测效果更好, 即

$$T(\mathbf{x}) = \frac{m_1}{m_0} > \beta' \quad (6)$$

判为有目标出现。当 N 较大时, 根据大数定律, m_1 可以认为服从高斯分布 $H_1: N\left(m_1, \frac{m_1^2}{NL}\right)$, $H_0: N\left(m_0, \frac{m_0^2}{NL}\right)$, 可以得到检测算子的概率密度函数为

$$T(\mathbf{x}) \sim \begin{cases} N\left(\frac{m_1}{m_0}, \frac{m_1^2}{NLm_0^2}\right), & H_1 \\ N\left(1, \frac{1}{NL}\right), & H_0 \end{cases} \quad (7)$$

那么可以得到虚警概率 P_{FA} 和检测概率 P_D

$$P_{FA} = P\{T(\mathbf{x}) > \beta; H_0\} = Q\left((\beta - 1)\sqrt{NL}\right) \quad (8)$$

$$P_D = P\{T(\mathbf{x}) > \beta; H_1\} = Q\left(\frac{m_0\beta - m_1}{m_1}\sqrt{NL}\right) \quad (9)$$

显然, 在一定虚警概率条件下, 检测概率与目标相对背景强度有关, 目标相对背景越强, 检测概率越高。同时也与等效视数有关, 等效视数越大, 检测概率越高。因为本文要检测的是强散射目标, 为减少运算量, 可以适当降低虚警概率。

3 Delaunay 三角剖分

三角剖分是代数拓扑学里最基本的研究方法。以平面为例, 把平面剖开成一块块碎片, 要求满足两个条件: (1) 每块碎片都是三角形; (2) 平面上任何两个这样的三角形, 要么不相交, 要么恰好相交于一条公共边(不能同时交两条或两条以上的边)。拓扑学告诉我们: 任何平面都存在三角剖分。

令 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 为平面域(R^2)上 N 个离散点的集合, 尽管有多种方法实现点集 P 的三角剖分, 但是俄国数学家 Delaunay 在 1934 年证明: 必定存在且仅存在一种剖分(一般称之为 Delaunay 三角剖分) 算法, 使得所有三角形的最小内角之和最大。因此, Delaunay 三角剖分能够尽可能地避免病态三角形的出现。Delaunay 三角剖分具有最小内角最大以

及平均形态比最大的性质, 因此它是给定区域的点集的最佳三角剖分。Delaunay 三角剖分方法是一种精确而合理的利用关系衡量点集之间匹配程度的方法^[3]。

4 图像匹配

因为主、辅图像可能是在不同时间、不同雷达波段、不同 SAR 载体得到的, 所以两图的强散射目标数目有可能不相同。检测出强散射目标并计算两图各强散射目标的质心后, 确定主、辅图像的对应匹配点成了 SAR 图像匹配最关键、最重要的环节。

为得到主、辅图像的对应匹配点, 本文对主、辅图像的各强散射目标的质心点集合进行 Delaunay 三角剖分, 得到剖分图 A, 图 B。设图 A 含有 k 个三角形, 图 B 含有 l 个三角形, 将图 A 每个三角形的三边边长(按长度由短至长排序)存入矩阵 \mathbf{A}_1 的各行, 即 \mathbf{A}_1 是 $k \times 3$ 维矩阵, 同理得到 $l \times 3$ 维的矩阵 \mathbf{B}_1

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{l1} & b_{l2} & b_{l3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

则图 A 各三角形的三边边长比例可以表示为

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} a_{12}/a_{11} & a_{13}/a_{11} \\ a_{22}/a_{21} & a_{23}/a_{21} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k2}/a_{k1} & a_{k3}/a_{k1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

图 B 各三角形的三边边长比例可以表示为

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} b_{12}/b_{11} & b_{13}/b_{11} \\ b_{22}/b_{21} & b_{23}/b_{21} \\ \vdots & \vdots \\ b_{l2}/b_{l1} & b_{l3}/b_{l1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

如果图 A 的第 p 个三角形和图 B 的第 q 个三角形相似, 那么应该有

$$\begin{cases} \mathbf{C}_1(p, 1) = \mathbf{D}_1(q, 1) \\ \mathbf{C}_1(p, 2) = \mathbf{D}_1(q, 2) \end{cases}, \quad 1 \leq p \leq k, \quad 1 \leq q \leq l \quad (14)$$

考虑到 SAR 图像成像时会出现几何畸变, 当满足

$$\begin{cases} \left|1 - \frac{\mathbf{C}_1(p, 1)}{\mathbf{D}_1(q, 1)}\right| \leq \xi \\ \left|1 - \frac{\mathbf{C}_1(p, 2)}{\mathbf{D}_1(q, 2)}\right| \leq \xi \end{cases}, \quad 1 \leq p \leq k, \quad 1 \leq q \leq l \quad (15)$$

时, 本文认为图 A 的第 p 个三角形和图 B 的第 q 个三角形相似。对给定图 A 的第 p 个三角形, 如果图 B 中满足式(15)

的三角形有 r 个, 则当 D_1 中第 q_m 个三角形满足

$$\min \left\{ \left| 1 - \frac{C_1(p,1)}{D_1(q_s,1)} \right| + \left| 1 - \frac{C_1(p,2)}{D_1(q_s,2)} \right|, \quad 1 \leq s \leq r \right\} \quad (16)$$

时, 认为图 A 的第 p 个三角形和图 B 的第 q_m 个三角形相似。

这样在图 A, 图 B 之间得到若干对相似三角形, 显然这些相似三角形就是主、辅图像的对应匹配三角形区域。计算各相似三角形的质心、内心、外心, 则可以得到主、辅图像的对应匹配点。

SAR 图像成像时, 由于地球曲率和雷达平台运动的不规则性, 使 SAR 图像不可避免地出现几何畸变, 而且其与光学图像的成像方位存在一定的偏差, 故必须进行几何校正。本文采用的是多项式几何校正法。多项式几何校正的基本思想是认为图像变形可以看成平移、缩放、仿射、偏扭和弯曲等形变的合成^[4]。使用简化的形式, 其表达式如下:

$$\begin{cases} X_1 = a_0 + a_1X_2 + a_2Y_2 + a_3X_2Y_2 + a_4X_2^2 + a_5Y_2^2 \\ Y_1 = b_0 + b_1X_2 + b_2Y_2 + b_3X_2Y_2 + b_4X_2^2 + b_5Y_2^2 \end{cases} \quad (17)$$

采用最小二乘法, 对主、辅图像的对应匹配点建立映射关系并进行重采样(重采样采用三次样条插值), 即可得到最后的匹配结果。

5 匹配效果的评价方法

根据合成孔径雷达干涉测量原理, 对配准后的复图像 I_1 , I_2 复共轭相乘, 并提取相位主值, 可以得到清晰的干涉条纹图。如果匹配误差大于或等于一个像素, 则两幅图像完全不相干, 干涉图轮廓不清晰, 甚至看不到干涉条纹, 干涉相位图看上去就像在 $0 \sim 2\pi$ 上均匀分布的相干噪声。因此干涉纹的清晰度可以作为匹配好坏的一个主要判断标准^[5]。本文采用观察干涉条纹的清晰度来衡量匹配效果。

6 实验结果与分析

实验所用的图像是 1996 年 4 月 26 日 (ERS-I 卫星) 和 1996 年 4 月 27 日 (ERS-II 卫星) 华南某地区的 SAR 图像, 图像大小为 450×500 。

图 1 是本文匹配算法的流程图。在进行图像匹配之前先对主、辅图像进行加权中值滤波以抑制相干斑。图 2 和图 3 是复图像取模值后的图像(即幅度图), 从图上只能看到几个强点目标, 背景则看不清楚, 也就是说图像的对比特不太好, 但是这对于检测强散射目标却非常有利。为使检测的强点目标较均匀的分布在图像中, 本文对主、辅图像都平均分成四个子块, 对四个子块分别检测强散射目标, 检测的结果如图 4, 图 5 所示。

检测时, 虚警概率 $P_{FA} = 0.0001\%$, 检测概率 $P_D = 99.999\%$ 。对主、辅图像的各强散射目标的质心点集合进行 Delaunay 三角剖分, 得到剖分图 6, 图 7, $\xi = 0.006$ 。从这两个图可以看到有三对相似三角形, 图 6, 图 7 中的星点是各个相似三角形的质心。表 1, 表 2 是主、辅图像的对应匹配点。

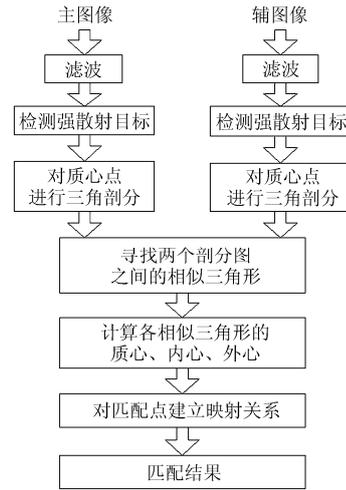


图 1 算法流程图

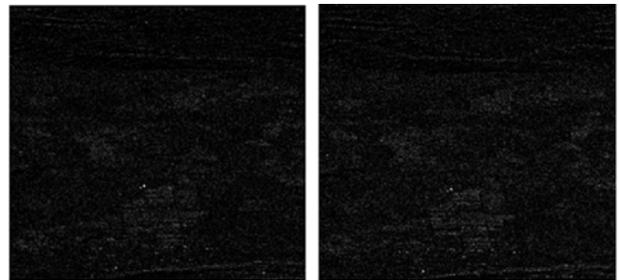


图 2 主图像

图 3 辅图像

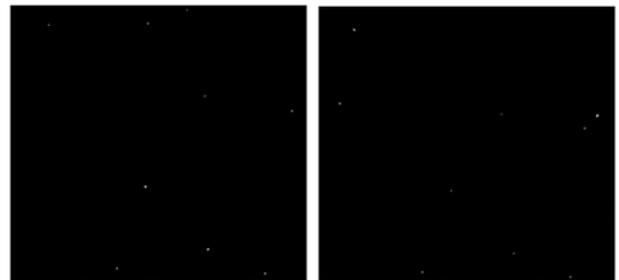


图 4 主图像的强散射目标

图 5 辅图像的强散射目标

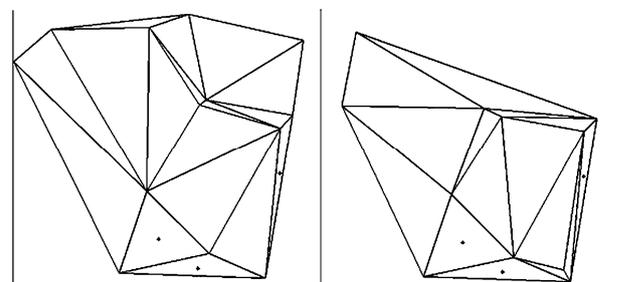


图 6 主图像的 Delaunay 三角剖分

图 7 辅图像的 Delaunay 三角剖分

最后的匹配结果如图 8, 图 9 所示, 为了便于观察, 对幅度图像的对比特进行了适当的调整。两幅图像的几何变换关系为

表1 主图像匹配点

	匹配三角形1			匹配三角形2			匹配三角形3		
	质心	外心	内心	质心	外心	内心	质心	外心	内心
横坐标	489.7722	678.7305	484.5123	440.8056	444.0293	439.3503	329.3000	398.6280	255.5141
纵坐标	314.8222	299.0392	332.0930	247.5556	249.4203	246.5503	453.4333	638.5308	462.8938

表2 辅图像匹配点

	匹配三角形1			匹配三角形2			匹配三角形3		
	质心	外心	内心	质心	外心	内心	质心	外心	内心
横坐标	496.0000	685.8765	490.7307	447.0000	450.2003	445.5534	335.5556	405.3752	261.8636
纵坐标	310.3333	294.6986	327.6192	243.0000	244.7997	242.0333	448.6111	634.0982	457.8380

$$\begin{cases} X_1 = -7.0142 + 1.0015X_2 + 0.0103Y_2 \\ \quad - 10^{-7}X_2Y_2 - 8 \times 10^{-6}X_2^2 + 10^{-6}Y_2^2 \\ Y_1 = 4.7670 - 0.0018X_2 + 1.0019Y_2 \\ \quad - 5 \times 10^{-6}X_2Y_2 + 10^{-5}X_2^2 - 4 \times 10^{-7}Y_2^2 \end{cases}$$

甚至看不到条纹，这是因为相干系数法的匹配精度只能达到像素级别，可见本文提出的算法匹配效果要比相干系数法好。

7 结束语

本文将恒虚警目标检测和 Delaunay 三角剖分方法应用于 SAR 图像匹配，提出了一种新的 SAR 图像匹配算法。实验结果证实，该方法能有效抑制 SAR 图像相干斑噪声的影响，对不同的 SAR 图像强度、分辨率的一致性没有严格的要求，具有较好的算法稳健性，能取得很好的匹配效果。

参 考 文 献

- [1] Barbara Zitová, Jan Flusser. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.
- [2] 甘荣兵. 合成孔径雷达对抗及目标检测技术研究. [博士论文], 成都, 电子科技大学, 2005, 11.
- [3] 马小虎. 一种基于图的平面点集Delaunay三角剖分算法, *中国图象图形学报*, 1997年, 2(1), 7-10.
Ma Xiao-lu. A graph-based algorithm for generating the Delaunay triangulation of a planar point set. *China journal of image graphics*, 1997, 2 (1), 7-10.
- [4] 黄勇. SAR图像变化检测及相关技术研究: [博士论文]. 成都, 电子科技大学, 2006.
- [5] 张晓玲. 干涉合成孔径雷达成像处理技术研究. [博士论文], 成都, 电子科技大学, 1999, 12.

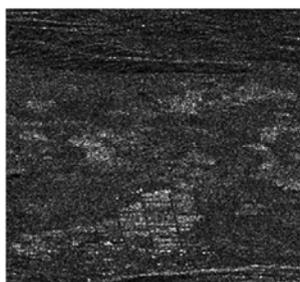


图 8 主图像(调整对比度后)

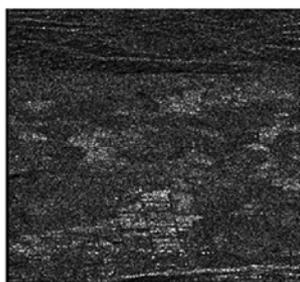


图 9 匹配后的辅图像(调整对比度后)

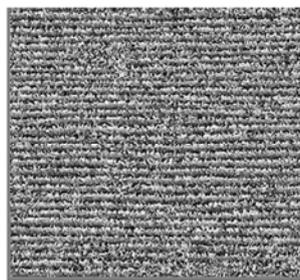


图 10 本文算法的干涉图



图 11 相干系数法干涉图

图 10 是本文算法对复图像匹配后的干涉图，可以较明显地看到干涉条纹，即图像匹配的精度达到了亚像素的级别。而图 11(相干系数法的干涉图)条纹则比较模糊，大部分区域

张 辉： 男，1982年生，硕士生，研究方向为SAR图像处理与应用。
王建国： 男，1954年生，教授，主要从事SAR系统、成像和SAR图像处理等方面的研究工作。