

文章编号 1004-924X(2010)03-0692-09

面向 SAR 匹配辅助导航的景象区域适配性

卜彦龙,李洪俊,张国忠,沈林成,潘 亮

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:对合成孔径雷达(SAR)景象匹配辅助组合导航的关键技术之一——SAR 景象区域适配性进行了分析。结合 SAR 成像过程、组合导航过程及 SAR 图像的特点对 SAR 景象区域适配性问题进行了综合描述;围绕减小几何畸变和提高匹配概率两个目标剖析 SAR 景象区域适配性的影响要素,包括基本约束条件、适配性特征指标和预测函数构建等。在此基础上,以限制几何畸变,优化图像特征为原则构建了基于多目标遗传优化的 SAR 景象适配区选择模型。基于真实 SAR 图像进行的实验表明,根据模型选出的最佳适配区匹配概率达到 94%,验证了分析和建模的合理性。该结论可为选择高性能的 SAR 景象适配区提供参考。

关键词:合成孔径雷达;匹配辅助导航;景象区域适配性;多目标遗传优化

中图分类号:V448.2;TN957.52 **文献标识码:**A

Area matching suitability for SAR-image matching aided navigation

BU Yan-long, LI Hong-jun, ZHANG Guo-zhong, SHEN Lin-cheng, PAN Liang

(College of Mechatronics and Automation, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Matching-area suitability for Synthetic Aperture Radar(SAR) images, one of the key technologies of scene matching aided navigation, was studied in this paper. The problem of SAR matching-area suitability was described combined with SAR imaging process, integrated navigation course and SAR image characters. Then, for decreasing geometric distortion and improving matching probability, several effect factors on matching-area suitability were analyzed, including constraint conditions in application, construction of feature criterions and predicting functions. Furthermore, a multi-objective genetic optimizing model based on SAR matching-area selection was proposed to decrease geometric distortion and optimize image features. Experimental result shows that the matching probability of the best matching area selected is 94%, which proves the rationality of the analysis and model. The proposed method can provide a reference for choosing good SAR matching areas.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); image matching aided navigation; matching-area suitability; multi-objective genetic optimizing

收稿日期:2009-06-25;修订日期:2009-09-13.

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(No. 07JJ3127);国防科技大学优秀博士创新基金资助项目(No. B070301)

1 引言

在基于 SAR 景象匹配辅助定位的飞行器组合导航系统中,选择可获得高匹配概率和高匹配精度的 SAR 匹配区域是保障精确匹配的必要条件,继而也是实现精确导航的必要前提。

景象区域适配性技术经过近些年的发展,已经获得了许多重要成果。Kaneko 在模板图与基准图间仅为高斯噪声的假设下,估计不同区域中斜方差矩阵,以平均误差的上界作为特征区域的选择指标^[1],该方法与 Smith 等人基于角点评价的方法^[2]进行比较,不仅关注了角点信息,同时关注了非角点的纹理特性。Tomasi 等提出以二维变换矩阵的特征值作为衡量特征稳健性的指标,通过合理设置阈值可靠地跟踪角点,椒盐纹理等各种模式特征^[3]。李俊等基于简化 Mumford-Shah 模型,将适配区的分割转化为对基准图所生成的局部匹配稳健性指标向量图的一个最优划分^[4]。曹国等人运用支持向量机分类方法将航拍图像内任意区域的匹配概率估计问题转化为待估区域内像素的分类问题^[5]。

然而,目前所提出的景象区域适配性方法仍主要是针对可见光图像,其像面信息是地表信息的真实反映。由于 SAR 特殊的工作原理造成了其图像与可见光存在显著的差异,这使得当采用雷达图像进行组合导航时,区域适配性研究将面临许多新的问题,虽然少数文献关于多源图像匹配适配性有过一定分析^[6-7],但总体讲,对景象适配性的分析目前只关注景象本身的像面特征,并没有结合传感器特点和必要的约束,但这些问题却是 SAR 景象适配性与其他景象适配性最显著的部分,因此针对 SAR 景象区域适配性的研究尚有待深入。

针对以上问题,本文结合 SAR 景象特点及传感器约束条件,对 SAR 景象匹配辅助组合导航中的 SAR 景象区域适配性进行研究。在问题总体描述的基础上,对 SAR 景象区域适配性影响要素,适配区选取方法进行分析探讨,最后将真实数据与仿真数据相结合对分析所得结论进行了实验验证。

2 SAR 景象区域适配性基本分析

2.1 SAR 景象区域适配性问题描述

SAR 景象区域适配性技术是联系其底层的 SAR 成像和匹配算法,以及其上层的组合导航的中间技术,与可见光景象适配性研究既有联系又有区别。一方面,SAR 景象区域适配性属于景象适配性研究的范畴,它以从原始基准图上选出符合匹配概率及区域尺寸等指标要求的候选匹配区景象作为基准图作为目标,通过对原始基准图像特征的综合描述,建立综合特征量与适配性指标间的关系;另一方面,SAR 传感器特殊的工作方式和成像条件,又使其适配性存在许多一般景象适配性研究不必考虑的因素,包括:地面区域内地形起伏对成像产生的畸变影响,辐射特性影响,匹配算法的影响,以及传感器工作特性对匹配区域的约束。

基于以上分析,将 SAR 景象区域适配性问题通过框图描述图 1。其中,SAR 景象区域适配性分析依次分为两个过程,首先通过对各种 SAR 适配性特征指标及对适配性造成影响的各种约束的综合分析构建 SAR 景象区域适配性预测函数;然后利用构建好的预测函数,对输入的原始基准图上的各候选匹配区进行适配性综合预测,从中选出最佳适配区作为基准图。构建预测函数主要结

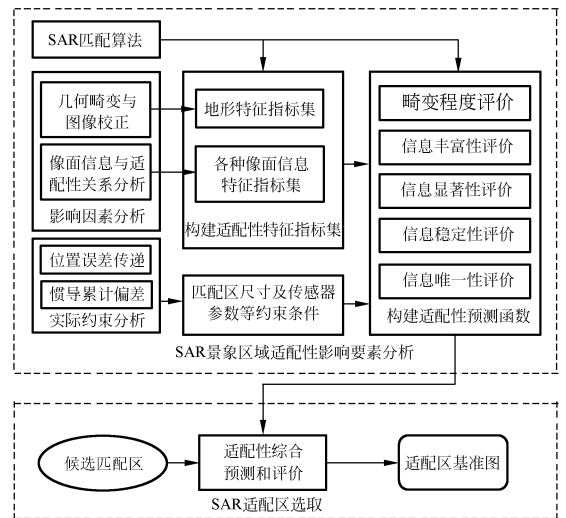


图 1 SAR 景象区域适配性问题描述框图

Fig. 1 Block diagram of area suitability for SAR-image matching

合图像畸变程度,信息丰富性,显著性,稳定性及唯一性等基本准则,为了评估预测结果的可靠性,往往最后需要通过模拟实时图来对所选择的适配区的匹配概率进行仿真验证。

2.2 SAR 景象区域适配性的特点

通过问题描述可知,SAR 景象区域适配性不是个单纯的遥感图像处理问题,它需要图像处理,传感器技术及组合导航等多种技术的融合,同可见光、红外等其他景象适配性相比较,SAR 景象区域适配性从理论和应用上都有其自身特点,主要表现在以下诸方面:

2.2.1 特征指标的确定与雷达成像特性紧密耦合

雷达几何畸变和辐射特性等成像特性会影响特征指标的确定,致使在指标构建时除了要考虑图像本身的像面信息外,还要结合几何畸变模型和辐射特性模型考虑成像对适配特征的影响。

2.2.2 综合特征量的构建与匹配算法紧密耦合

SAR 景象匹配往往是以图像间典型特征的匹配为基础,不同的匹配算法所关注的特征差别很大,因此适配性特征指标的选择及综合特征量的构建应当考虑匹配算法的特点,即 SAR 景象区域适配性的预测和评价是针对特定的匹配算法而言的。

2.2.3 适配性与传感器特性紧密耦合

传感器各参数误差直接影响到适配区范围的合理确定,这个误差不仅与惯导累积误差有关,而且与 SAR 匹配点位置参数向机上惯导中心传递的过程等有密切关系,并且这个过程是 SAR 组合导航所特有的。

3 SAR 景象区域适配性影响要素分析

通过 2.1 节分析知,构建适配性预测函数是 SAR 景象区域适配性分析的重要部分,而选取合适的特征指标,并结合应用约束对图像区域畸变程度及像面信息进行分析评价又是构建适配性预测函数的关键。

3.1 约束条件分析

SAR 景象区域适配性的约束主要来自匹配算法和组合导航系统中各传感器误差两方面。

3.1.1 来自匹配算法的约束

匹配算法决定了对适配性预测值产生影响的特征指标,以及这些特征指标在综合特征量中的权重,因此选用的匹配算法不同,适配性分析过程以及得到的适配性结论也应不同。实验证明,如果采用经过正射投影校正的同波段或者相近波段的 SAR 图像进行相关匹配,相干斑和后向散射系数辐射畸变会对匹配造成的影响可以被容忍^[8],而对于波段差异很大的 SAR 图像的匹配,就应选用基于特征或者互信息的匹配算法^[9-10]。本文研究针对归一化积相关算法的适配特征,其表达式(1):

$$C(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^{(M_a-1)(N_a-1)} \sum_{n=0}^{(M_b-1)(N_b-1)} A(m, n) \cdot B(m+i, n+j)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{(M_a-1)(N_a-1)} \sum_{n=0}^{(M_b-1)(N_b-1)} A(m, n)^2} \cdot \sqrt{\sum_{m=0}^{(M_a-1)(N_a-1)} \sum_{n=0}^{(M_b-1)(N_b-1)} B(m+i, n+j)^2}}, \quad (1)$$

$$\text{where} \quad \begin{aligned} 0 \leq i < M_a + M_b - 1 \\ 0 \leq j < N_a + N_b - 1 \end{aligned}$$

其中,实时图矩阵 \mathbf{A} 维数为 (M_a, N_a) ,基准图矩阵 \mathbf{B} 维数为 (M_b, N_b) 。

3.1.2 来自组合导航系统传感器误差的约束

由于组合导航系统传感器误差,使得实际拍摄实时图位置与理想位置存在偏差,而保证实时图落在基准图区域内是其适合匹配的前提,因此必须结合各传感器的误差特性来确定适配区的范围^[11]。对于组合导航中的 SAR 景象匹配而言,造成实时图位置与理想位置偏差的因素包括惯导位置累积误差,SAR 传感器位置参数传递误差,平台控制误差等,其中前两项影响起绝对作用,计算时其他误差影响可以忽略^[12]。

惯导位置累积误差可表示成飞行时间 Δt 的函数;SAR 传感器位置参数传递误差估计比较复杂,它是 SAR 成像参数 x_{SAR} 、惯导参数 x_{INS} 以及各自误差 $\Delta x_{\text{SAR}}, \Delta x_{\text{INS}}$ 等多变量的函数,准确描述需要建立参数传递模型;实时图位置误差是两种主要误差共同作用的结果。将以上误差简单表示如式(2):

$$\begin{cases} e_{\text{INS}} = g_{\text{INS}}(\Delta t) \\ e_{\text{transfer}} = g_{\text{transfer}}(x_{\text{SAR}}, x_{\text{INS}}, \Delta x_{\text{SAR}}, \Delta x_{\text{INS}}) \\ e_{\text{image Real}} = G(e_{\text{INS}}, e_{\text{transfer}}) \end{cases} \quad (2)$$

假设实时图与基准图都是矩形区域,且理想实时图位置处于基准图中心,这样可以通过统计

方法估计实时图落入匹配区的置信分布参数。具体方法是在式(2)各自变量参数标准差已知前提下,运用蒙特卡洛方法,对各自变量表现值分别进行随机抽样,而得一组带误差的自变量参数向量,将这组自变量向量代入实时图偏差函数进行计算。依据上述思路共进行组干扰实验,而 m 得组实时图偏差量 $e_{\text{image Real } i} (i=1, 2, \dots, m)$, 最后采用最小平方估计来计算实时图偏差分布参数,如式(3):

$$\sigma_e = a(m) \sqrt{\frac{S_{m,e}^2}{m-1}} \quad (3)$$

其中, $S_{m,e}^2 = \sum_{j=1}^m (e_j - \bar{e})^2, \bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m e_j, a(m) =$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot \Gamma(m/2)}{\sqrt{m-1} \cdot \Gamma[(m-1)/2]}$$

Γ 为伽玛函数,查表即得^[13]。

得到实时图偏差分布参数后,适配区范围便可以根据置信要求确定。

3.2 SAR 适配性特征指标选取分析

3.2.1 准确反映几何畸变

从几何畸变程度考虑特征指标的选取,首先需要分析几何畸变的成因和影响。

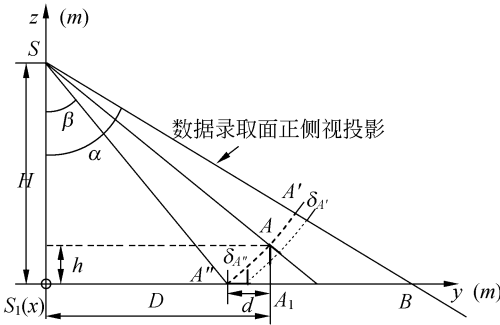


图 2 地形起伏引起的距离方向几何畸变示意

Fig. 2 Sketch map for geometric distortion in range direction

地形起伏造成 SAR 成像几何畸变,如图 2 所示,其中 S 点为雷达当前位置,其在地面坐标系中高为 H ,它经垂直投影到地面 S_1 点,某点 A 高程 h ,它经垂直投影到地面 A_1 点, SB 为数据录取平面正侧视投影斜距。 A 点由于其高程影响,成像时将被映射到地距平面上等斜距的 A'' 处,再由 A'' 映射到主斜距上 A' 处,偏差畸变即为 A' 到地面投影 A_1 的间距 d ,通过几何关系,可得其表达式^[14](4):

$$d = D - \sqrt{(H-h)^2 + D^2 - H^2} \quad (4)$$

设景象区域内地形起伏为随机变量 h ,其概率密度为 $p_h(h)$,则式(3)表示的偏差函数 d 成为随机变量函数 $d(h, D)$,由随机变量函数分布律定理,经推导得 d 的密度函数为:

$$p_d(d) = p_h(H - \sqrt{(D-d)^2 - D^2 + H^2}) \cdot \frac{(D-d)}{\sqrt{(D-d)^2 - D^2 + H^2}} \quad (5)$$

对于不同的 D, H ,偏差 $d(h, D)$ 期望表达为:

$$E(d_{D,H}) = \int_0^D d_{D,H} \cdot p_d(d_{D,H}) \delta d_{D,H} \quad (6)$$

可见,几何畸变由区域内地形分布与成像参数共同决定的,即使不存在地形起伏离原点距离不同,也存在不断变化的平均偏差。要通过特征指标将图像上广泛分布的几何畸变和适配性结果联系起来,就必须从地形分布的角度来选取特征指标,这样就需要借鉴地形分析的成果,包括地形均值、地形方差、坡度特征、分形特征等多种地形描述特征。

3.2.2 准确反映像面信息

从像面信息角度考虑特征指标的选取,从满足特征丰富、唯一、稳定、典型等原则来讲与可见光适配性研究思路是一致的,所不同的是 SAR 像面适配性特征指标必须紧密结合 SAR 图像辐射特性。

合成孔径雷达利用场景中不同地物具有不同后向散射而构成图像,后向散射系数 σ° 不仅与雷达参数有关,还与地物自身特征有关,是众多参数的函数^[15]。由于后向散射系数的复杂性,造成同样的地物信息在像面上的反映却不同,继而影响到匹配结果。乘性相干斑特性同样是对雷达图像匹配造成极大影响的辐射特性,它的存在使检测与背景反差不大的目标、轮廓和辨识地表变得非常困难,继而增加了 SAR 匹配过程中有效特征的选择和提取的难度。

由于边缘图像反映了地物纹理固有的形态,受辐射特性变化影响相对较小,因而具有较强的稳健性,反映 SAR 景象像面信息的适配性特征指标应当基于边缘图像来选取。对于归一化积相关匹配算法,可以用边缘图像方差,零交叉密度^[16],边缘连续度^[17],边缘密度^[18],图像复杂度^[5]等作为反映 SAR 图像像面信息适配性特征指标。而

对于基于特定特征的匹配算法,特征指标应结合算法特征进行定义。

3.3 预测函数构建分析

基于特征指标来构建预测函数最直接的方法是直接将经过变换的特征指标加权融合,但由于确定权值存在较大主观性,造成预测函数性能不佳,更加客观的方法是通过训练得到合理的权系数来构建适配性目标函数,这要求广泛使用多属性决策的相关理论。另外,可以借鉴人工智能等领域的众多方法,如通过 SVM 训练不同的分类器参数,然后以与某匹配区特征参数最接近的分类器参数作为该区域的近似分类器,进行特征分类与适配性评价^[5]。

本文将 SAR 景象区域适配性这个综合问题分解为较为独立的若干子目标,而不去构建统一的预测函数表达式。分别选取能够直接影响各子目标效能的特征指标,以此构建反映几何畸变程度,像面特征丰富程度,显著程度,稳定程度及匹配唯一性等适配特性的子目标函数 $f_i(x)$, $i=1, 2, \dots, 5$ 。特征指标的确定紧密结合各子目标的特点,例如,用地形分形系数,地形坡度,地形方差等反映几何畸变;用边缘密度,图像复杂度等反映像面信息丰富程度;用边缘方差,图像粗糙度等反映特征明显程度;用信噪比,失配阈值等反映特征稳定程度。

4 基于多目标优化的 SAR 适配区选择

在得到反映适配性各方面的子目标函数基础上,将 SAR 适配区选取作为一个多目标优化过程进行分析,如图 3 所示。设原始基准图为 I_0 ,若已知适配性特征指标集以及匹配区尺寸,则 I_0 区域内每一幅按给定尺寸分割的子区域 I_k 都将对应一组特征指标集自变量 x 。结合前边分析,将 SAR 适配区选择问题分解为寻求几何畸变小,像面特征丰富,显著,稳定性高及匹配唯一的区域,并分别用 5 个独立的目标函数 $f_i(x)$, $i=1, 2, \dots, 5$ 来表示,不失一般性,以最小化为原则建立 SAR 适配区选取的多目标模型如式(7):

$$\begin{aligned} \min y &= f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)) \\ \text{s. t. } & g_j(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, j. \end{aligned} \quad (7)$$

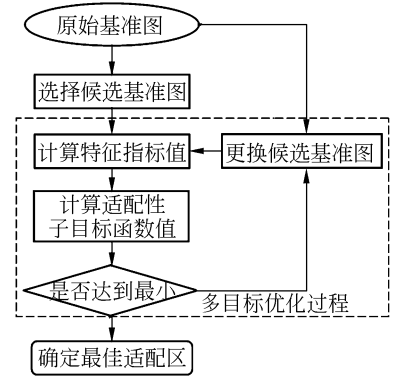


图 3 最佳适配区选取流程

Fig. 3 Flowchart of the best matching-suitable area selection

其中,决策变量 $x \in \Omega \subseteq \mathbf{R}^p$, Ω 表示基本适配性特征指标集空间,其维数 p 表示特征指标集中特征指标的种类,每个特征指标以确定的实数形式表达;目标函数向量 $y \in \Lambda \subseteq \mathbf{R}^5$ 表示该区域适配性评价结果,目标向量空间 $\Lambda = \{\eta = f(\xi) | \xi \in \Omega\}$;约束条件 g_j 反映了各特征指标间的约束,其形式要根据所选取的具体特征指标和构建的目标函数而定。

由于特定目标函数 $f_i(x)$ 实现时仅需要考虑特征指标集 Ω 中特定的特征指标,因此 $f_i(x)$ 的原象集合空间 M_i 应为 Ω 的真子集,即 $\{x_i\} = M_i \subset \Lambda$,故(7)改写为:

$$\min y = f(x) = (f_1(x_1), f_2(x_2), f_3(x_3), f_4(x_4), f_5(x_5))$$

$$\text{其中, } \bigoplus_{i=1}^5 x_i = x, \{x_i\} = M_i \subset \Lambda$$

$$\text{s. t. } g_j(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, J, \quad (8)$$

依照多目标优化过程选取原始基准图 I_0 内最小 y 所对应的子区域 I_k 即为最佳匹配区。

模型建立以后,实现多目标优化的具体算法可以灵活选取,本文采用精英保留非劣排序遗传算法作为优化算法。该算法通过提出新的适应度计算方法和精英保留策略,在保证计算量小的同时能够更好地保持种群的多样性和避免优秀个体的流失,从而使运算速度和算法的鲁棒性进一步提高。

5 实验与讨论

通过本文算法构建 SAR 适配性预测函数,进

行适配区选取实验,同时通过模拟实时图的仿真匹配实验来对所选匹配区匹配概率进行检验。本文以 AIRSAR 提供的经过校正的真实 C 波段 SAR 地距图像作为基准图,通过该地区 DEM 并结合 C 波段地距图像模拟生成同区域 C 波段 SAR 斜距图像,在其上均匀截取子图像块作为实时图。实验中所有基准图成像条件相同,飞行高度 8 547.5 m,雷达视角为 29.4°,通过对基准图置信范围的估计,其尺寸定为 300 pixel×300 pixel,实时图尺寸为 50 pixel×50 pixel,基准图与实时图分辨率都为 5 m。匹配采用归一化积相关算法,匹配概率采用文献[4]给出的配准率(MP)表达,其值通过各基准图上等间隔的 100 次匹配的成功率来计算。

5.1 SAR 区域适配性特征指标选则实验

构建地形标准差 TS、地形均值 TM、图像强度标准差 IS、图像强度均值 IM、图像粗糙度 IR、图像边缘密度 ED、局部边缘密度均值 LDM、局部边缘密度标准差 LDS 等 8 个指标分别进行配准率实验。分析各特征指标与配准率之间的关系,发现对于归一化互相关匹配,8 个指标中,地形标准差(TS)、地形均值(TM)与配准率(MP)之间存在整体的单调关系如图 4 所示,是影响匹配最显著的因素。

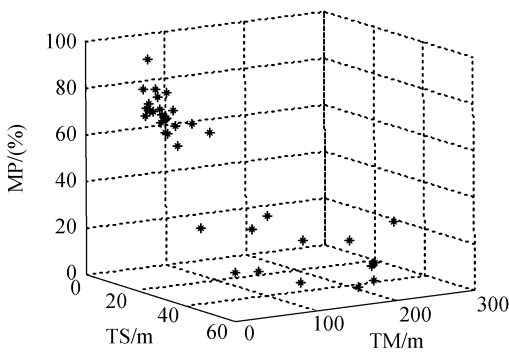


图 4 地形标准差、地形均值与配准率的关系

Fig. 4 Relation of TS, TM and matching probability

下边给出 40 幅实验图中配准率前 10 位的基准图各特征指标值列表。

由表 1 可以看出,配准率列前 10 位的各图像,地形特征相差不大,而此时通过绘制关系曲线,可知图像强度标准差、图像强度均值、图像粗糙度、图像边缘密度与配准率之间不存在明确关

系,而局部边缘密度均值和局部边缘密度标准差与配准率存在一定关系,该关系有二次曲线的相似特征,这里用二次曲线进行近似。

表 1 备选特征指标值列表

Tab. 1 Values of candidate features

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MP	0.91	0.79	0.79	0.76	0.75	0.73	0.71	0.7	0.70	0.69
TS	5.15	5.52	7.71	5.31	6.58	6.57	6.59	7.71	6.46	5.73
TM	61.7	55.2	64.1	85.5	70.1	58.6	56.2	61.4	72.6	62.7
IS	10.7	10.3	10.8	10.8	10.7	11.5	10.4	10.4	10.8	10.7
IM	137.8	107	144.	174	153	168	121	126	162	139
IR	26.6	23.4	27.5	25.0	26.5	21.9	22.8	21.6	26.1	24.7
ED	0.49	0.61	0.61	0.57	0.44	0.58	0.52	0.60	0.67	0.51
LDM	0.53	0.53	0.52	0.56	0.58	0.49	0.54	0.57	0.59	0.61
LDS	0.68	0.71	0.69	0.75	0.76	0.64	0.74	0.75	0.78	0.80

这些结果验证了对 SAR 适配性分析的合理性,地形方差与均值反应了几何畸变,局部边缘密度均值反映了图像信息丰富程度,局部边缘密度标准差反映了图像信息显著程度;其他几个特征指标直接基于图像强度而定义,受相干斑干扰严重,不能作为稳健的 SAR 适配性特征指标。

5.2 SAR 适配区选则实验及分析

结合 4.1 分析,用实验获得的地形标准差、地形均值、局部边缘密度均值、局部边缘密度标准差等四个有效特征指标分别构建以最小化为目标的目标函数 $f(x)$ 及子目标函数 $f_i(x_i)$, ($i=1,2,3$) 如下:

$$\min y=f(x)=(f_1(x_{TS},x_{TE}),f_2(x_{LDM}),f_3(x_{LDE})), \tag{9}$$

其中, $f_1(x_{TS},x_{TE})=x_{TS}+x_{TE}$;

$$f_2(x_{LDM})=16.3x_{LDM}^2-17.1x_{LDM}+3.74;$$

$$f_3(x_{LDS})=10.6x_{LDS}^2-14.6x_{LDS}+4.24$$

when $x_{TS}<8.0$.

特别说明,由于目前所选取的几个特征指标主要是为验证理论模型的有效性,因此暂时放松约束条件,对稳健性目标 f_4 及唯一性目标 f_5 不作考虑。

用另外 80 幅相同条件下的候选基准图作为检验图像,一方面采用遗传算法进行上述模型的多目标优化计算,从理论角度确定 6 幅各子目标函数满足(9)式的结果预测最优基准图,另一方面采用去均值归一化互相关匹配算法对每一幅 C

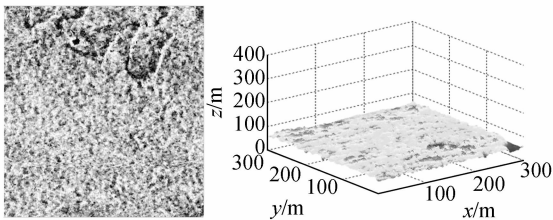
波段候选基准图与模拟的 C 波段实时图进行匹配,从实验角度对各候选基准图适配性能按照配准率进行排序,二者比较结果如表 2 所示。

表 2 理论预测与实验选择的适配区结果对比关系

Tab.2 Comparison of experimental results and predicted results

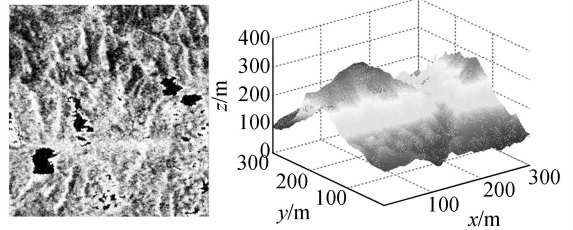
标号	1	2	3	4	5	6	7	8	19	31
MP	0.94	0.89	0.89	0.84	0.84	0.83	0.80	0.79	0.68	0.56
TS	6.12	7.77	5.41	7.23	9.97	6.21	12.49	5.80	7.66	6.34
TM	72.3	88.2	64.8	73.1	69.4	58.6	96.2	72.8	68.5	57.5
LDM	0.53	0.58	0.52	0.55	0.62	0.69	0.54	0.54	0.63	0.65
LDS	0.70	0.72	0.68	0.74	0.69	0.77	0.63	0.72	0.76	0.78

表 2 中,标号数值表示通过实验得到的高配准率基准图排序,其中黑斜体标号代表采用上述多目标优化过程的预测排序。可以发现,理论选取的基准图如 1,3,4,5,8 等与实验获得的基准图适配性能总体相符,所选出的最佳适配区配准率达到 94%,因此可以用来指导多波段 SAR 景象适配区的选取;而序号为 2,6,7 的基准图虽然也有较好的匹配效果,但并未通过预测评价选出,而且序号为 19,31 的基准图虽然预测效果较好,但实验评价结果却较差,究其原因在于特征指标的选取以及(7)式多目标函数构建并不完备,对 $f_i(x_i)$, ($i=1,2,3$)应采用好的学习算法,而且应当综合考虑稳健性目标 f_4 和唯一性目标 f_5 。同时由表 2 看出,有些地区虽然存在畸变很小仍没能有效匹配,这一方面是因为图像集合有限,另一



(a) 配准率为 94% 的候选基准图及其地形表面

(a) Candidate image and corresponding terrain area with success probability of 94%



(b) 配准率为 8% 的候选基准图及其地形表面

(b) Candidate image and corresponding terrain area with success probability of 8%

图 5 算法选出的不同性能的候选基准图及其地表缩略图

Fig.5 Candidate image and corresponding terrain area with different predicted efficiency

方面也说明了本文在多波段 SAR 图像匹配中采用相关算法会影响精度。图 5 为通过多目标优化选取的适配性较好和较差的两幅实验图像缩略图及其地形表面缩略图。

最后说明,本文实验结论只适用于归一化互相关算法下相同或相近波段 SAR 图像匹配,同时仿真实验是为验证 SAR 适配性分析模型的可行性,因此所选取的特征指标不十分完备,但反应出了 SAR 适配性的主要因素。

6 结 论

SAR 成像原理和图像特性造成了 SAR 图像精确匹配的困难,继而为 SAR 匹配辅助导航中匹配区选取带来许多新问题。本文研究了 SAR 景象区域适配性问题涉及的基本要素,通过对匹配诸约束条件的分析,将 SAR 图像适配性与一般景象适配性过程相融合,构建了基于多目标遗传优化的 SAR 景象适配区选取模型。仿真实验选出的最佳适配区匹配概率达到 94%,初步验证了该理论模型的有效性,为进一步的深入研究奠定了基础。

and Pattern Recognition, 2003:796-802.

- [2] SMITH S M, BRADY J M. Susan-A new approach to low level image processing [J]. *International Journal on Computer Vision*, 1997,23(1):45-78.
- [3] SHI J B, TOMASI C. Good features to track[C].

参考文献:

- [1] KANEKO T. Feature selection for reliable tracking using template matching[C]. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision*

- Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994:593-600.
- [4] 李俊,杨新,杨莉. 基于简化 Mumford-Shah 模型的导航基准图适配区分割方法[J]. 自动化学报, 2004, 30(1):45-56.
LI J, YANG X, YANG L. Mumford-Shah model based critical subset segmentation from navigation reference images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(1):45-56. (in Chinese)
- [5] 曹国,杨新. 基于 Gabor 滤波器与支持向量机的景象匹配概率估计方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(3):485-489.
CAO G, YANG X. The estimation of scene matching probability using Gabor filters and support vector machine [J]. *Journal of Shanghai JiaoTong University*, 2006, 40(3):485-489. (in Chinese)
- [6] 李俊山,李旭辉,罗蓉,等. 不同传感器图像的景象匹配区选取准则研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1):210-213.
LIN J SH, LI X H, LUO R, *et al.*. Research on selection criterion of scene matching field for different sensors [J]. *Microelectronics and Computer*, 2007, 24(1):210-213. (in Chinese)
- [7] 江标初,陈映鹰. 层次景象匹配区选取准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(6):830-833.
JIANG B CH, CHEN Y Y. A rule of selecting scene matching area [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(6):830-833. (in Chinese)
- [8] XIE H, PIERCE L E, ULABY F T. Mutual information based registration of SAR image [C]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2003:4028-4031.
- [9] BENTOUTOU Y, TALEB N, KPALMA K, *et al.*. An automatic image registration for applications in remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9):2127-2137.
- [10] XIE H, PIERCE L E, ULABY F T. Mutual information based registration of SAR image [C]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2003: 4028-4031.
- [11] 王浩,段凤阳,孙百香,等. 微型平台组合导航信息分配新方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 802-808.
WANG H, DUAN F Y, SUN B X, *et al.*. Novel information-sharing method in micro-platform integrated navigation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):802-808. (in Chinese)
- [12] 卜彦龙,潘亮,沈林成,等. INS/SAR 组合导航参数传递建模及精度分析[J]. 航空学报, 2009, 30(3):526-533.
BU Y L, PAN L, SHEN L CH, *et al.*. Modeling and accuracy analysis of parameters transmission in INS/SAR integrated navigation system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(3): 526-533. (in Chinese)
- [13] 马振华. 现代应用数学手册:概率统计与随机过程卷[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
MA Z H. *Manual of Modern Application Mathematics: Probability Statistics and Random Process* [M]. Beijing: Publishing House of Tsing Hua University, 2000. (in Chinese)
- [14] 叶勤,李启炎. 地面起伏对成像及雷达景象匹配的影响[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 50-55.
E Q, LI Q Y. Impact of terrain undulations on imaging and radar scene matching [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(1):50-55. (in Chinese)
- [15] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
BAO ZH, XIN M D, WANG T. *Radar Imaging Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [16] 赵锋伟,刘扬,沈振康,等. 景象匹配评估系统中图像特征指标的选择(一):图像统计特征[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4):265-269.
ZHAO F W, LIU Y, SHEN ZH K, *et al.*. Selection of image feature set in performance evaluation system scene matching algorithm (Part I: Image statistic feature) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4):265-269. (in Chinese)
- [17] XIAO Y J, DING M Y, ZHOU C P. Matching suitability analysis of reference map for scene-matching-based navigation [C]. *Proceedings of International Symposium on Multispectral Image Processing*, 1998:100-103.
- [18] 杜菁,张天序. 景象匹配区的选择方法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4):368-369.
DU J, ZHANG T X. Selection of matching region for scene matching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4):368-369. (in Chinese)

作者简介:



卜彦龙 (1979—), 男, 山西太原人, 博士研究生, 2004 年、2009 年于国防科技大学分别获得硕士、博士学位, 研究方向为遥感图像处理与任务规划。E-mail: byl_nudt@yahoo.com.cn



李洪俊 (1979—), 男, 河南周口人, 博士研究生, 2004 年于国防科技大学获得硕士学位, 研究方向为遥感图像融合与传感器网络。E-mail: rm9200@nudt.edu.cn



张国忠 (1973—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 副研究员, 1999 年、2003 年于国防科技大学分别获得硕士、博士学位, 研究方向为遥感图像处理及飞行器监督控制。E-mail: zgc_2001@sina.com



沈林成 (1965—), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 博士生导师, 1996 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学机电工程与自动化学院副院长, 研究方向为人工智能、图象处理、任务规划与精确制导等。E-mail: lcshe@nudt.edu.cn



潘亮 (1973—), 男, 新疆库尔勒人, 博士, 副研究员, 2003 年于国防科技大学获得博士学位, 研究方向为任务规划与精确制导。E-mail: Panliang.2000@gmail.com

● 下期预告

主辅通道型微混合器的设计与制作

张平¹, 胡亮红^{1,2}, 吴一辉¹, 刘震宇¹, 刘永顺¹, 邓永波^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了实现微量液体的快速均匀混合, 设计了一种 PDMS 双层结构的新型微混合器。对该混合器的制作方法以及几何尺寸和 Re 对混合的影响进行了研究。首先, 依据 fick 第一定律介绍了主辅通道型微混合器的设计原理; 然后, 采用有限元方法对不同几何尺寸及 Re 下混合器中液体的速度流场及浓度场进行了数值模拟。数值分析显示随着主辅通道出口宽度比的减小、通道长度的增加和 Re 的减小, 混合器的混合率增加。最后, 依据仿真结果制作了主辅通道深度比为 0.71, 出口宽度比为 1, 通道长度为 9 mm 的微混合器并进行了去离子水和红墨水的混合实验。实验结果表明: 当 $Re < 5$ 时, 设计的混合器能实现液体的快速混合, 并且混合率随着 Re 的减小而增大, 基本满足低 Re 下微量液体快速均匀混合的要求。