

SAR 图像适配区选择方法*

任三孩, 常文革

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为选择具有高匹配概率和高匹配精度特点的 SAR 适配区, 结合 SAR 成像特点, 分析了惯导及成像参数误差对适配区的影响, 设计了多种适配性评价参数, 提出了一种由粗到细的适配区层次性选择方法。该方法充分考虑了适配区在总体和细节上的需求, 层次性选择有效避开了构造预测函数的难题。试验结果表明该方法可在 SAR 图像匹配系统中选出高性能的适配区, 且所选适配区匹配概率可达 97% 以上。

关键词:适配区选择; 合成孔径雷达 (SAR); 基准图; 导航

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)01-0115-08

The method for selecting matching area of SAR image

REN Sanhai, CHANG Wenge

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to select SAR matching areas with high matching accuracy and matching probability, the current study analyzed the error influence of INS and imaging parameters on the matching area, designed several kinds of rules for suitability analysis, and proposed a coarse-to-fine selecting method. The method fully considers the macroscopic and microcosmic requirements, and keeps it away from the difficulty of constructing predicting functions. Experiment results indicate that the method can select good matching areas in the SAR image matching system, and achieve an over 97% matching probability of the selected matching area.

Key words: matching area selection; synthetic aperture radar (SAR); reference image; navigation

合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar)/惯性 (INS, Inertial Navigation System) 组合导航已经成为现代精确打击武器的一种重要的导航方式, 它利用弹上 SAR 实时获取地面图像, 并与计算机中预存储的二维数字地图 (基准图) 比较, 从而获得飞行器当前位置信息, 产生导航信号, 把飞行器引向目标^[1]。其中选择可获得高匹配概率和高匹配精度的 SAR 适配区是保障精确匹配的必要条件, 也是精确导航的实际需求。

基准图适配区选择问题最初由国外研究者提出^[2], 但后期研究方向主要集中在目标跟踪背景下基于特定兴趣区域的特征提取与特征选择^[3-4]。对照而言, 直接针对这个问题做出大量系统研究的却是国内相关机构, 而且目前还在沿着这一思路继续研究。付文兴等从分析影响适配区匹配概率和匹配精度的各项特征参数 (如信息量、稳定性和重复模式等) 出发, 研究了适配区的选择方法^[5]。曹菲、李俊等分别基于粗糙集理

论^[6]和简化 Mumford-Shah 模型^[7]将适配区的选择转化为对基准图所生成的局部适配稳健性指标向量图的一个最优划分。这些方法虽然在各自背景下都取得了较为理想的效果, 但是它们都是针对光学或红外图像进行的研究。由于 SAR 特殊的工作原理造成了 SAR 图像与可见光、红外等图像存在显著的差异, 这使得当采用 SAR 图像进行组合导航时, 基准图适配区选择面临许多新的问题。赵倩等在考虑高程起伏对 SAR 图像影响的基础上, 引入了高程方差的概念, 并结合各特征参数对适配性能的影响, 提出了适合 SAR 图像匹配的基准图选择准则^[8]。但是此方法没有结合传感器特点和必要的约束条件, 因而实用性较为欠缺。卜彦龙结合 SAR 图像特点及传感器约束条件, 对 SAR 景象区域适配性进行了研究^[9]。此研究虽然较为深入, 但是没有考虑实时图与基准图匹配前的几何校正过程, 而且预测函数构建比较复杂。另外, 所有这些适配区选择方法都是在原

* 收稿日期: 2011-06-19

资助名称: 国家自然科学基金资助项目 (61072116)

作者简介: 任三孩 (1982-), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, E-mail: sanhai@163.com;

常文革 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: changwenge@nudt.edu.cn

始基准图已经确定的前提下进行的,而现实中如何选择原始基准图也是需要研究的内容之一。

本文针对以上问题,对 SAR 图像适配区的选择方法进行了深入的研究。在分析惯导及传感器参数对适配区尺寸影响的基础上,研究了影响适配区选择的特征参数,包括与图像几何畸变有关的地形特征参数,以及一些与匹配概率和匹配精度有关的图像特征参数。然后,针对 SAR 基准图给出了一种由粗到细、逐层严格筛选的适配区选择方法,有效化解了构造预测函数的难度。最后,根据 SAR 正射图像、数字高程模型 (DEM)、INS 及成像参数误差,构造基准图-实时图对,将理论模型与统计试验相结合,进而选出最佳景象适配区,将其作为基准图。

1 参数误差对适配区尺寸的影响

由于组合导航系统各参数误差,飞行器会偏离设定航线,因而导致实际获得的 SAR 图像与预定的成像区域发生偏离,如图 1(a) 所示。图中黑色实线方框为预定的成像区域,加粗黑色方框为理想基准图,虚线方框为实际成像区域。可以明显地看出,如果按照理想成像区域去确定基准图适配区尺寸,可能会造成实时图不能落在基准图区域内,或部分在基准图区域内,这必然会影响到后续的图像匹配。

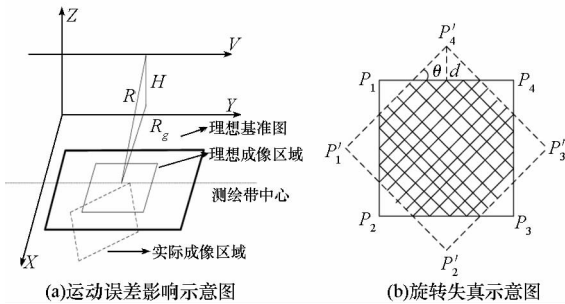


图 1 参数误差对适配区的影响

Fig. 1 The error influence of parameters on matching area

因此保证实时图落在基准图区域内是进行匹配的前提,首先必须根据导航系统各参数误差确定适配区范围。下面具体分析一些参数误差对适配区范围的影响。

对于组合导航中的 SAR 景象匹配而言,造成实际成像区域与理想位置偏差的因素包括惯导参数误差、SAR 成像参数误差、平台控制误差等,其中前两项影响有绝对作用,计算时其他误差可以忽略^[9]。首先是 INS 航向角误差,它主要引起图像的旋转失真,如图 1(b) 所示。图中实线和虚线方框分别表示初始图像和旋转变换后的图像,阴

影网格为两幅图像的重叠部分。图像的旋转变换可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 x_i 和 y_i 为初始图像坐标, x_o 和 y_o 为旋转后的图像坐标, θ 为航向角误差。以 $N \times N$ 的正方形为例,假设角点 P_1, \dots, P_4 的坐标依次为 $(-N/2, -N/2), (N/2, -N/2), (N/2, N/2), (-N/2, N/2)$, 根据式(1)可得旋转变换后的四个角点坐标 P'_1, \dots, P'_4 分别为

$$\begin{aligned} P'_1 &= [-N/2(\cos\theta - \sin\theta), -N/2(\cos\theta + \sin\theta)] \\ P'_2 &= [N/2(\cos\theta + \sin\theta), N/2(-\cos\theta + \sin\theta)] \\ P'_3 &= [N/2(\cos\theta - \sin\theta), N/2(\cos\theta + \sin\theta)] \\ P'_4 &= [-N/2(\cos\theta + \sin\theta), -N/2(\cos\theta - \sin\theta)] \end{aligned} \quad (2)$$

由正方形的性质可知,图 1(b) 旋转图像中非重叠的 4 个三角形相等,通过计算 P'_4 与线段 $P_1 P_4$ 之间的距离可得三角形的高为 $d = N(\cos\theta + \sin\theta - 1)/2$ 。因此,INS 航向角误差使得适配区尺寸在方位向和距离向分别增大 $2d$ 。

另一个参数为飞行高度。假设地面高程数据为 h , 则垂直斜距 R 可以表示为

$$R = \sqrt{(H-h)^2 + (R_g)^2} \quad (3)$$

式中 H 为飞行高度, R_g 为目标的地距。对 H 求导可得

$$\begin{aligned} \delta R &= \frac{2(H-h)}{2\sqrt{(H-h)^2 + (R_g)^2}} \delta H \\ &= \frac{H-h}{R} \delta H = \delta H \cos\eta \end{aligned} \quad (4)$$

则由此引起的测绘带变化为

$$\Delta SW = \delta H (\cos\eta_f - \cos\eta_r) \quad (5)$$

式中 η 为入射角, η_f 和 η_r 分别表示远端和近端的入射角。可见,随着 H 的增大或缩小,适配区范围需要相应地随之调整。同理,对于距离向的位置误差,可以参照同样的方法求得其对适配区尺寸的影响。对于方位向位置误差来说,只需根据误差对适配区方位向尺寸进行相应的调整即可。

以上分析了单个参数误差对适配区尺寸的影响,而现实中各参数误差并非是孤立存在的,因此需要分析这些误差并存时适配区范围的确定。一种方法是理论计算法,即根据这些参数误差的典型值,分别计算它们对适配区尺寸的影响,然后将它们相加,确定实时图在二维方向上的最大偏移,进而确定最佳的适配区尺寸。另一种方法是文献[9]提出的实验法,它首先根据影响适配区尺寸

各参数的标准差,运用蒙特卡洛模拟法,对各自变量参数分别进行抽样,从而得到一组带误差的参数向量。然后,将这组自变量向量代入实时图偏差函数进行计算。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。

2 SAR 适配区特征参数选取准则

2.1 地形特征指标选取

SAR 具有斜距成像的特点,因此当其飞过地面高程起伏地区时会产生严重的几何畸变,如叠掩、阴影、迎坡缩短等。地面高程起伏对 SAR 图像的影响如图 2 所示。图中 S 为 SAR 位置, Y 为距离向。飞行高度为 H , T 是高程为 h 处的目标, T 在地面的垂直投影点为 T' , T 与雷达的斜距为 R_T , T' 与雷达的斜距为 R'_T 。由图可以得到目标 T 由于高程 h 的影响而使得斜距缩短了 ΔR , 如式 (6) 所示

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{R_T^2 - (H-h)^2 + H^2} - R_T \\ &= \sqrt{R_T^2 + 2H \cdot h - h^2} - R_T \end{aligned} \quad (6)$$

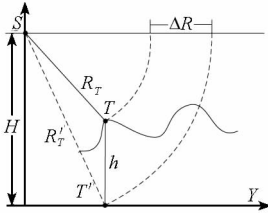


图 2 地形起伏对 SAR 图像的影响

Fig. 2 The influence of undulation on SAR image

高程起伏导致了图像畸变的产生,使得 SAR 实时图与经过正射校正的基准图存在较大差异,增加了匹配的难度。常用的做法是在图像匹配前对实时图进行几何校正,去除高程引起的几何畸变,具体校正方法可参考文献[10]。从这个意义上讲,其实可以忽略高程起伏的影响。但是高程变化越剧烈,几何校正难度越大,更重要的是几何校正一般只能校正位置误差,对于阴影和灰度拖影等灰度畸变无法校正,这依然会影响图像的匹配。由式(6)可知,几何畸变是由区域内地形分布与成像参数共同决定的,因此,要通过特征指标将图像上广泛分布的几何畸变和匹配结果联系起来,就必须从地形分布的角度来选择特征指标。

能够反映地形特征的参数有很多,比如高程均值、高程方差、粗糙度、相关长度、坡度均值、坡度方差等,而只有反映地形起伏及起伏变化快慢的特征对适配区的选择才有用。因此,本文选择地形高程方差、坡度均值和坡度方差作为地形特

征参数。

2.1.1 高程方差

高程方差反映了地形的离散程度与地形总体起伏,计算如下

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{M_d N_d} \sum_{i=1}^{M_d} \sum_{j=1}^{N_d} [h(i, j) - \bar{h}]^2 \quad (7)$$

其中, h 为地面高程, \bar{h} 为高程均值, DEM 数据矩阵的尺寸为 $M_d \times N_d$ 。

2.1.2 地形坡度

地形坡度是地形高程变化快慢的一种度量。地表上某点的坡度 S 是地形曲面 $h = f(i, j)$ 在东西(Y 轴)和南北(X 轴)方向上高程变化率的函数,即

$$S(i, j) = \arctan \sqrt{f_x^2(i, j) + f_y^2(i, j)} \quad (8)$$

用 D 表示网格间距,式中

$$\begin{aligned} f_x(i, j) &= [h(i+1, j+1) + h(i+1, j) \\ &\quad + h(i+1, j-1) - h(i-1, j+1) \\ &\quad - h(i-1, j) - h(i-1, j-1)]/6D \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} f_y(i, j) &= [h(i+1, j+1) + h(i, j+1) \\ &\quad + h(i-1, j+1) - h(i+1, j-1) \\ &\quad - h(i, j-1) - h(i-1, j-1)]/6D \end{aligned} \quad (10)$$

2.1.3 坡度均值 E 和坡度方差 σ_s^2

$$E(S) = \frac{1}{M_d N_d} \sum_{i=1}^{M_d} \sum_{j=1}^{N_d} S(i, j) \quad (11)$$

$$\sigma_s^2(i, j) = \frac{1}{M_d N_d} \sum_{i=1}^{M_d} \sum_{j=1}^{N_d} [S(i, j) - E(S)]^2 \quad (12)$$

2.2 图像特征指标选择

对于图像特征参数来说,选择方法与光学图像相似,需要从信息量、重复模式等方面来考虑。由于任何适配区特征参数的选择都是与匹配算法紧密联系在一起,因此下面从匹配算法开始,对所选图像特征参数进行说明。

2.2.1 匹配算法

匹配算法决定了影响匹配结果的特征指标,以及这些指标的重要程度,所选匹配算法不同,适配区选取准则及过程就不同,同样得到的结果也会有差异。对于实时图与基准图同为 SAR 图像的匹配系统(即同源图像匹配),去均值归一化积分相关算法以其简单易实现、理论成熟等优点成为首选,本文研究即以此算法为基础展开,具体如下所示

$$\rho(m,n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i,j) - \bar{f})(R(i+m,j+n) - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i,j) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i,j) - \bar{R})^2}} \quad (13)$$

式中 $0 \leq m \leq M_r - M + 1, 0 \leq n \leq N_r - N + 1$, \bar{f} 和 \bar{R} 分别为实时图和基准图的均值。实时图尺寸为 $M \times N$, 基准图尺寸为 $M_r \times N_r$ 。

2.2.2 适配区信息量分析

根据文献[11], 在其他条件不变时, 实时图与基准图信噪比 SNR 越大, 匹配概率就越大。但在实际情况下, 由于实时图不能事先获得, 因此无法获知其真实的信噪比。理论分析时, 可假定实时图是附加了噪声的基准图, 这样就可以通过下式来近似估算实时图相对基准图的信噪比, 即

$$\text{SNR} = \sigma^2 / \sigma_n^2 \quad (14)$$

式中 σ^2 表示基准图方差, σ_n^2 表示噪声方差。其中后者是由景象匹配系统设计和景象匹配系统工作条件决定的, 在选择适配区时无法改变, 只能选择信息量大的区域减少它们的影响。

图像方差反映了图像诸元素的离散程度和整个图像区域总的起伏程度, 其值越大, 图像所含像素灰度值分布范围越宽, 图像所能表征的景象信息越丰富, 信息量越大。其表达如式(13)所示, 其中各参数意义同上。

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{M_r N_r} \sum_{i=1}^{M_r} \sum_{j=1}^{N_r} [R(i,j) - \bar{R}]^2 \quad (15)$$

图像熵反映了图像所包含的平均信息量的多少, 定义为

$$H_E = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log p_i \quad (16)$$

式中, H_E 表示图像的熵, L 表示图像总的灰度级数, p_i 表示灰度值为 i 的像素数 N_i 与图像总像素数 N 之比, 即 $p_i = N_i / N$ 。

独立像素数从统计角度反映了图像内包含的独立景物的多少, 直观而言, 如果图像内包含有较多的能够明显分辨的景象, 该图匹配概率一般都较高。定义为

$$\text{IPN} = (M/L_h) \times (N/L_v) \quad (17)$$

式中, M, N 为图像的尺寸, L_h 和 L_v 分别是水平方向和垂直方向的相关长度, 其计算方法详见文献[12]。一般认为图像数据中, 凡是行距超过 L_h 或列距超过 L_v 的两个像元是不相关的。

对于一幅图像来说, 其总的方差、熵与图像中局部区域可能不一致, 会出现总体方差、熵较小, 而局部区域却很大的情况。因此, 这两种信息量是

一种局部信息量的表示, 可用来对适配区进行度量。而对同一幅图像来说, 由于其空间分辨率相同, 计算出的相关长度也大致相同。这说明独立像素数是宏观信息量的表示, 可用来对整幅图像进行度量。

2.2.3 适配区重复模式计算

重复模式主要是指在适配区中重复出现的一些子区域, 它们在灰度或其他特征上有相似之处。适配区中存在的重复模式会造成误匹配或定位偏差, 因此度量适配区中的重复模式是适配区选择的一个重要的步骤。重复模式的多少是衡量适配区品质好坏的重要指标, 直接影响匹配概率和匹配精度。

实时图与基准图中的每个位置进行匹配, 得到一个相似度值, 将这一系列相似度值按实时图在基准图中的扫描方式排列成一个二维平面, 即得到相关面。相关面一般会呈现高低起伏分布, 把局部最大值区域称为相关峰, 其中最高的一个称为最高峰, 以下依次称为次高峰等。对重复模式的评价即用相关峰特征参数来表示, 其中最高峰尖锐度与匹配精度有关, 最高峰越尖锐, 图像匹配越不容易发生偏移。而次高峰与最高峰之差与匹配概率有关, 差值较小的个数越多, 说明基准图中相似区域越多, 则匹配概率就越低。

最高峰尖锐度的计算方法有很多, 这里我们采用一种较为简单的方法, 利用最高峰 8 邻域峰值比近似代替。该量的意义如图 3 所示, o 点是相关面的最大值点, 它对应的相关值用 V_{\max} 表示, 1-8 位置距离 o 点 n 个像素长度, 用 V_{ngb} 表示这 8 个位置中数值最大的点对应的相关值, 则最高峰 8 邻域值比 R_s 定义为

$$R_s = V_{ngb} / V_{\max} \quad (18)$$

R_s 处于 $[0, 1]$ 之间, 值越小, 说明相关峰越尖锐。

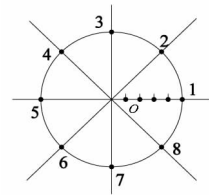


图 3 最高峰尖锐度计算方法

Fig.3 The method to calculate curvature of the highest peak

另一个重要参数为次高峰与最高峰之差。令 V_{sub} 表示相关面上次高峰对应的最大值, 则次高峰与最高峰之差 R_d 定义为

$$R_d = V_{\max} - V_{sub} \quad (19)$$

该值也处于 $[0, 1]$ 之间, 它表征的是次高峰

对应的图像区域与最高峰对应的图像区域的相似程度。为了找出基准图中所有可能的相似区域,这里给出另一种表示方法,即自匹配数。

在初选基准图中依次截取适配区大小的子图,然后在每个子图中各位置截取实时图大小的模板,利用 2.2.1 节的相关匹配算法计算它与所在适配区内各位置的相关系数,最后将这些相关系数与最大值 V_{max} 做差值处理,统计适配区内各位置的 $R_d > R_{th}$ 的数目 Num ,其中 R_{th} 为次高峰与最高峰差值门限。适配区自匹配数定义为

$$R_p(i, j) = Num/N_a \quad (20)$$

其中 (i, j) 为适配区内截取模板的位置, N_a 为模板在适配区内逐点匹配时,参与匹配计算的图像块数(如果适配区大小为 $M \times N$,模板大小为 $m \times n$,那么 $N_a = (M - m + 1) \times (N - n + 1)$)。

可以看出 R_p 表示适配区的局部区域与其整体的二维相关性。如果从适配区中均匀地抽取一定数量的子图,那么这些子图的自匹配数的均值就可以用于检测适配区自身的二维相关性,因此适配区自匹配数计算公式为

$$S_f = \frac{1}{n_s} \sum R_p(i, j) \quad (21)$$

式中 n_s 为从适配区中抽取的子图数目。

3 SAR 图像适配区选取方法

3.1 算法描述

为准确快速地选择出 SAR 适配区,本文采用一种由粗到细、逐层筛选的方法,其流程如图 4 所示。具体方法如下:

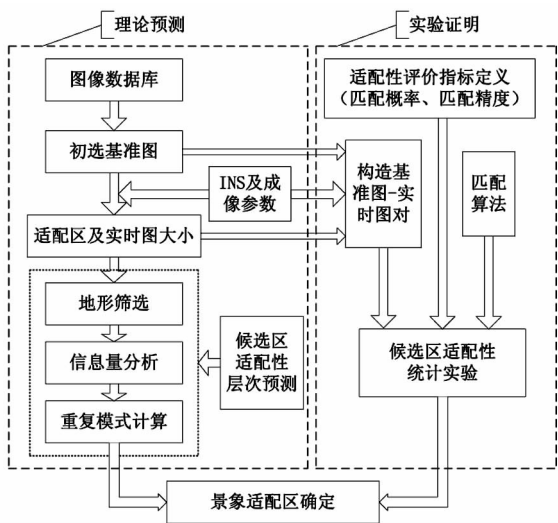


图 4 SAR 图像适配区选取方法

Fig. 4 The method to select matching area

(1) 基准图初选。这是一种最初级的选择,是指从大量的图像数据中挑选出最合适的图像作

为初始基准图。基本原则是尽量选择同类型同波段的图像,如果同时存在多幅这样的图像,可以根据 2.2.2 节所述,利用独立像元数加以区分,即选择独立像元数最大的图像作为初始基准图。本文基于此原则挑选的初始基准图如图 5(a)所示(已按比例缩小)。

(2) 适配区及实时图大小确定。根据 INS 及成像参数误差,利用第 1 节所述方法进行确定。

(3) 候选区适配性预测。这是指利用一定的特征指标,将最佳适配区域从初始基准图中挑选出来。这里采用层次预测的方法。

首先是地形筛选。虽然实时图与基准图(经过几何与辐射校正的 SAR 图像)在匹配前有一个几何校正的过程,但是如果地形起伏过大,不但会加大实时图几何校正的难度,而且由此引起的灰度拖影及阴影现象也会增大(这些现象无法通过几何校正消除),影响图像匹配。根据 2.1 节所述地形参数(高程方差、坡度均值和坡度方差)的计算方法,分别计算各候选区的特征参数,然后统计其中值,并将小于中值的适配区挑选出来作为候选适配区。筛选结果如图 5(b)所示,其中白线框为所选适配区的边界,以下相同。

接下来是信息量分析。根据 2.2.2 节所述信息量(图像方差和图像熵)的计算方法,在地形筛选后的候选区内,按照跟高程筛选一样的方法可以得到进一步筛选后的适配区,结果如图 5(c)所示。

最后是重复模式计算。这是适配区筛选的关键一步,也是最耗时的一步,即在地形筛选和信息量筛选后的每个候选区内,依次截取实时图大小的子图,然后针对每个子图,计算它与候选区各个位置的二维相关系数,并统计相关峰特征。为减少计算量,这里采用一种跳跃截取子图的方法,即在方向向和距离向分别以相关长度的一半为步长

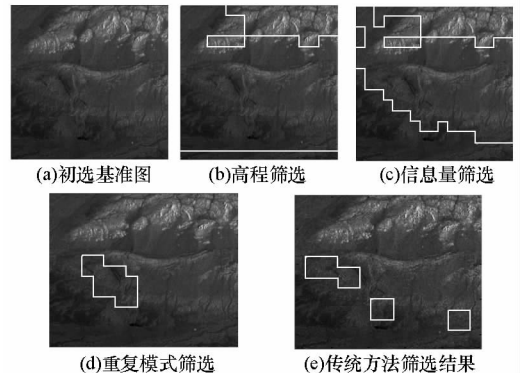


图 5 适配区层次筛选结果

Fig. 5 The layered filtrating results of matching area

进行截取,可以保证既不失真性,又缩短计算时间。最后将计算得到的自匹配数、最高峰尖锐度作均匀加权,挑选出一系列最佳适配区,图 5(d)所示为最终挑选的 5 个综合信息量最靠前的适配区(放大图如图 6(a)~6(e)所示),可以看出图像中特征较为丰富的地区(机场附近)均在所选适配区内。如果按照传统方法只进行信息量分析,则筛选结果如图 5(e)所示,可以看出信息丰富的地区没有完全包含在所选适配区内。

(4)统计实验验证。根据 INS 和成像参数误差,构造基准图-实时图对,然后按照 2.2.1 节的匹配算法进行匹配实验,统计得到各候选区的适配性评价指标(匹配概率和匹配精度),并将满足要求的适配区作为最佳适配区。

(5)适配区确定。将理论分析得到的适配区选择结果与统计实验得到的结果进行融合,选择二者的共有部分作为最终的景象适配区。

3.2 算法复杂度分析

本文算法是 SAR 基准图制备关键技术之一,它是在航迹规划时完成的,属于“事后处理”,因此对时间的要求不是很严格。但是,为了对算法有较充分的认识,也为实际应用提供指导,下面对算法的复杂度作简要分析,如表 1 所示。表中(S_a, S_r)表示原始基准图的尺寸, (M, N)表示适配区的尺寸, (m, n)表示实时图的尺寸, L 表示灰度级数。由表 1 可知,适配区尺寸与算法计算量有很大关联,需重点考虑。另外,算法中最费时的是自匹配数的计算,不过由于其处于层次筛选的最下层,需计算的位置数较少,再加上 3.1 节的快速方法,算法的处理速度依然较快。表中仿真时间是在 P4/2.4GHz 主频,2G 内存计算机中运用 MATLAB 进行 SAR 适配区选择的运行时间。

表 1 算法复杂度分析
Tab.1 Complexity analysis

	高程选择			信息量分析			重复模式计算
	方差	坡度均值	坡度方差	灰度方差	信息熵	尖锐度	自匹配数
加法	$M \times N - 1$	$5 \times M \times N$	$5 \times M \times N - 1$	$M \times N - 1$	L	\\	\\
减法	$M \times N$	$6 \times M \times N$	$7 \times M \times N$	$M \times N$	\\	7	\\
乘方	$M \times N$	$2 \times M \times N$	$3 \times M \times N$	$M \times N$	\\	\\	\\
乘法	2	5	6	2	$2 \times (L - 1)$	1	\\
FFT	\\	\\	\\	\\	\\	\\	$(M - m + 1)(N - n + 1) \log n$
计算次数	$(S_a - M + 1) \times (S_r - N + 1)$			$(S_a - M + 1) \times (S_r - N + 1) / 2$			$(S_a - M + 1) \times (S_r - N + 1) / 4$
仿真 本文方法	8.759s			5.216s			926.394s
时间 传统方法	\\			15.425s			1569.526s

4 统计实验结果及分析

根据第 3 节介绍的 SAR 图像适配区选择方法可知,统计实验法与理论分析法是同一个问题的两种解决方法,没有主次之分,可以利用它们其中任何一种方法或同时利用两种方法来进行适配区选取。鉴于统计实验法过于耗时,这里仅对理论分析选中的区域进行统计实验。

4.1 候选区适配性评价指标

候选区适配性评价指标有很多,这里主要用匹配概率和匹配精度^[13]来表示。

(1)匹配概率指正确匹配次数(N_c)与总的匹配次数(N_a)之比: $P = N_c / N_a$ 。

(2)匹配精度指实际匹配位置与理想匹配位置之差的平均值: $\varepsilon = \sum_{i=1}^{N_c} \varepsilon_i / N_c$,其中 ε_i 指第 i 次

匹配时的匹配位置误差。

4.2 基准图-实时图对构造方法

以统计实验的方法评估算法的性能,就要模拟算法的真实工作环境,必须建立一个基准图-实时图对序列。在统计实验中,基准图-实时图对的构造方法主要有三种。一种方法是在基准图适配区中截取一定数量实时图大小的子图,根据 INS 和成像参数误差,对截取的子图添加几何畸变,构造仿真实时图。此时需要注意的是实际匹配时,实时图一般是经过几何校正的,这里对子图添加的几何畸变是指由 INS 或成像参数误差导致的几何校正无法消除的畸变。另一种方法是根据此地区的正射 SAR 图像、DEM 数据及 INS 和成像参数,模拟出此地区的 SAR 图像,然后截取实时图大小的子图作为实时图。第三种方法是已经存在待评估地区的基准图及其对应的实时图,此时

只需要在已有实时图中截取所需大小的子图作为实时图即可。后两种方法虽然较为真实,但无法获得截取实时图在基准图中的精确位置,只能用来近似评估。

4.3 统计实验结果及分析

根据基准图的初选原则,选取一幅 22km × 25km 大小的图像作为初选基准图,图像分辨率为 6m,为使其与 DEM 分辨率相同,我们对其进行降采样处理,得到的图像分辨率为 10m(如图 5(a)所示)。基准图适配区大小为 3km × 3km,实时图大小为 1km × 1km,最终挑选的适配区如图 5(d)所示。DEM 覆盖范围与基准图精确对应,其分辨率(格网间距)为 10m,高程标准差为 3m。

为验证文中理论分析的正确性,分别以图 5(d)中 5 个适配区对应的图像为基准图(如图 6(a)~6(e)所示,其综合信息量排名依次减小),然后按照 4.2 节方法一构造实时图进行匹配(这里采用仿射变换模拟几何失真,其中旋转 3°,平移 5 个像素。因为惯导航向角误差会导致图像的旋转失真,成像参数误差会导致图像在两个方向上的平移,而实时图几何校正之后,可以做到与基准图具有同样的分辨率,因此这里添加的畸变只有旋转和平移误差,省略了缩放误差)。统计结果及其对应的适配区特征参数如表 2 所示。

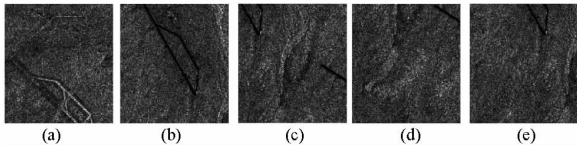


图 6 最终挑选的基准图

Fig. 6 The final selected reference images

表 2 适配区特征参数及统计实验结果

Tab. 2 The suitability parameters and experimental results

	标准	1	2	3	4	5
σ_d	≤ 23.64	7.04	8.94	10.3	11.28	11.72
$E_s(^{\circ})$	≤ 6.701	1.625	1.768	2.373	2.526	2.210
$\sigma_s(^{\circ})$	≤ 5.549	1.145	1.668	1.857	1.855	1.667
σ_p	≥ 34.96	37.53	36.14	36.96	36.43	35.71
H_E	≥ 3.895	6.987	6.893	6.954	6.939	6.925
IPN	\ \	10885	10842	10896	10803	10809
R_s	≤ 0.743	0.711	0.705	0.705	0.702	0.704
S_F	≤ 42	36	27	32	25	28
统计结果						
P	≥ 0.85	1	1	1	1	1
ε	≤ 3 (像素)	1.518	1.289	1.452	1.265	1.314

表 2 第 1 行中的“标准”指的是适配区特征参数选取的门限,其获取方法依据第 3 节所述,数字“1”~“5”分别表示挑选的适配区子图的序号,依次代表图 6(a)~6(e)。 σ_d 为 DEM 数据的标准差, E_s 和 σ_s 分别为 DEM 数据的坡度均值和坡度标准差, σ_p 和 H_E 分别为适配区的灰度标准差与信息熵,IPN 为适配区的独立像素数, R_s 为相关峰的尖锐度, S_F 为自匹配数, P 和 ε 分别为适配区统计匹配概率和匹配精度。由表中的数据可知,所选适配区的特征参数远远满足标准值的要求,而且由统计实验结果可知,适配区具有较高的匹配概率和匹配精度。

为进一步验证所选适配区的性能,我们利用 4.2 节方法二得到了对应 DEM 地区的 SAR 图像(如图 7(a)所示),生成图像时假设航向角误差为 3°,由于飞行高度及成像位置误差引起的图像平移为 5 个像素。然后在每个适配区中随机截取 100 幅子图像进行统计实验,为有直观效果,在每个适配区中随机选出一幅图像进行演示,选出的子图如图 7(b)~7(f)所示。匹配结果如图 7(g)所示,其中白色方框“b”~“f”分别代表适配后图 7(b)~7(f)在基准图中的位置。可以发现,在 5 个适配区中选出的图像均能在基准图中找到对应的位置。原则上,匹配误差门限越低,匹配概率越高,越能说明所选适配区适配性较好。但是,文中所用仿真实时图相对于基准图添加了仿射失真,而所用匹配算法是最简单的灰度相关算法,对图像的旋转和尺度变化等失真很敏感,匹配精度只能达到像素级。因此折中选择 3 个像素为误差门限对所有匹配结果进行统计。结果表明 5 个适配区匹配概率均在 97% 以上,可以满足匹配导航的要求。当然,实际应用中,为保证高的匹配概率,还需要对实时图进行一些几何校正、灰度均衡等预处理操作。

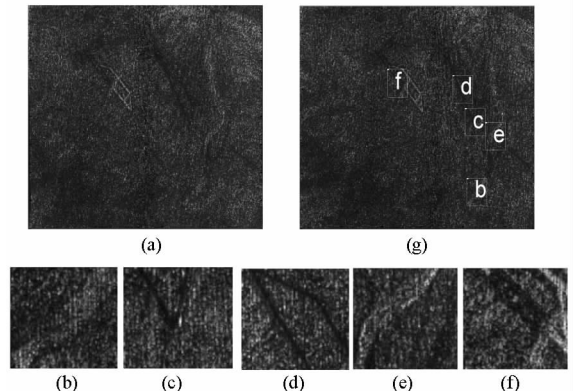


图 7 SAR 图像及适配结果

Fig. 7 SAR image and matching results

5 结 论

本文结合 SAR 景象匹配辅助导航应用中对适配区选择的实际需求,研究了 SAR 图像适配区选择涉及的基本问题,从原始基准图到最佳适配区,给出了一种由粗到细、逐层严格筛选的适配区选取方法。算法的关键有适配区范围确定、适配性参数设计、分层筛选方法、统计实验建模等。其中适配区范围确定给我们明确了适配区的尺寸,为后续适配区选取提供了基础;适配性参数设计提供了可以度量候选区适配性的参数;分层筛选方法充分考虑了适配区选取在总体上和细节上需要满足的要求,有效地避免了构造预测函数的难题;统计实验建模给出了构造基准图-实时图对序列的方法,可以模拟算法的真实工作环境。理论分析及统计结果表明,所选适配区匹配概率可达 97% 以上,满足匹配导航的要求。

参考文献 (References)

- [1] 秦玉亮,黄宗辉,邓彬,等. INS/双天线弹载 SAR 组合弹体定位技术[J]. 电子学报,2009,37(6):1216-1221.
QIN Yuliang, HUANG Zonghui, DENG Bin, et al. Missile geo-location using INS and dual-antenna missile-borne SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1216-1221. (in Chinese)
- [2] Ratkavic J A, Conrow E H. Almost everything one needs to know about image matching systems [R]. AD - A100024, 1980.
- [3] Ralph J F, Sims S W. Scene-referenced object localization [J]. Proceeding of SPIE, 2004, 5429(1): 20.
- [4] Amihoud A, Richard C, Ramesh H. Overlap matching [J]. Information and Computation, 2003, 181(1): 57-74.
- [5] 付文兴,王建民,金善良. 一种实用的景象适配区选择方法[J]. 宇航学报,2003,24(4):348-353.
FU Wenxing, WANG Jianmin, JIN Shanliang. A practical method for selecting scene matching area [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(4):348-353. (in Chinese)
- [6] 曹菲,缪栋,陆芳. 基于粗糙集理论的制导基准图选定准则研究[J]. 弹箭与制导学报,2005, 25(3): 362-365.
CAO Fei, MIAO Dong, LU Fang. The reference image for guidance selection based on rough set theory [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(3): 362-365. (in Chinese)
- [7] 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): 45-36.
LI Jun, YANG Xin, YANG Li. Mumford-shah model based critical subset segmentation from navigation reference images[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(1): 45-36. (in Chinese)
- [8] 赵倩,许家栋,袁健全,等. 基于高程选择的 SAR 景象适配系统基准图选择准则[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(6): 253-262
ZHAO Qian, XU Jiadong, YUAN Jianquan, et al. Reference image selection roles for scene matching guidance based on elevation selection [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(6): 253-262. (in Chinese)
- [9] 卜彦龙,李洪俊,张国忠,等. 面向 SAR 适配辅助导航的景象区域适配性[J]. 光学精密工程,2010,18(3): 692-700
BU Yanlong, LI Hongjun, ZHANG Guozhong, et al. Area matching suitability for SAR image matching aided navigation[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 692-700. (in Chinese)
- [10] Ren S H, Chang W G. A new method of SAR images geometric rectification under undulate areas based on the application of navigation [C]// 2nd ASIAN - PACIFIC Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings, Xi'an, China, Oct 26-30, 2009.
- [11] Johnson M W. Analytical development and test results of acquisition probability for terrain correlation devices used in navigation systems [C]// Proceedings of AIAA 10th Aerospace Sciences Meeting, San Diego, USA, Jan 17-19, 1972.
- [12] 王刚,段晓君,王正明. 基于图像区域相关的景象匹配概率与精度研究[J]. 宇航学报,2009,30(3): 1237-1242
WANG Gang, DUAN Xiaojun, WANG Zhengming. Research on acquisition probability and matching precision of scene matching systems based on area correction of the image[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1237-1242. (in Chinese)
- [13] He F F, Sun J Y, Guo W P. A practical method for evaluating capability of scene matching algorithms [C]// Proceedings of 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, Hangzhou, China, Nov 17-19, 2006.