

LIU Guoliang, HUANG Aimin. The Effect of SAR Wavelength on Remote Sensing Image Statistical Features[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(1): 87-92. (刘国良, 黄爱民. SAR 波长对遥感图像统计特征的影响[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 87-92.)

## SAR 波长对遥感图像统计特征的影响

刘国良<sup>1,2</sup>, 黄爱民<sup>1</sup>

1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 哥廷根伯恩斯坦神经科学研究中心, 哥廷根 37073

## The Effect of SAR Wavelength on Remote Sensing Image Statistical Features

LIU Guoliang<sup>1,2</sup>, HUANG Aimin<sup>1</sup>

1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Bernstein Center for Computational Neuroscience Goettingen, Goettingen 37073, Germany

Abstract: In order to achieve more robust image processing and analysis, it's necessary to investigate the correlations between the statistical features used in the state of the art and the sensor parameters. The research is on the robustness of six kinds of statistical features against the wavelength (L band, C band and X band) of the synthetic aperture radar (SAR). First the measurement of robustness of statistical features is defined, and then the comparison and analysis are presented in our experiment. In addition, the experiment also shows that statistical features of different terrains have different change while wavelength changes.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); wavelength; image matching; statistical feature; robustness; common characteristic

摘 要: 传感器参数不同会导致图像灰度与表象特征不同, 进一步会影响到统计特征表达。因此有必要系统研究常用统计特征与传感器参数之间的相关性, 从而实现更加抗差的图像处理与分析。研究目前常用的 6 种图像统计特征, 在合成孔径雷达(SAR)波长变化时(L 波段、C 波段和 X 波段)的抗差性。试验中, 对抗差性能指标作出定义, 并对不同统计特征的抗差性做出了比较与分析。试验结果发现, 不同统计特征对波长变化的抗差性不同, 同时图像特征在不同地形时随波长变化的规律也不一致。

关键词: 合成孔径雷达; 波长; 影像匹配; 统计特征; 抗差性; 共性特征

中图分类号: P237; TP751

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)01-0087-06

## 1 引 言

现有的合成孔径雷达(SAR)技术已经能够提供高分辨率的多波段、多极化、多视角图像(如表 1、表 2 所示)<sup>[1]</sup>, 因此现阶段更为迫切的问题是要更深入地开展 SAR 图像分析技术研究, 有效地利用已有的 SAR 图像的理论基础, 满足军事和民用不同领域的需求, 如遥感图像识别、影像匹配制导和可适配区域分析等。

表 1 航载 SAR 成像系统波段极化参数

Tab. 1 The wavelength and polarization parameters of shuttle-borne SAR image system

系统名称	SIR-A	SIR-B	SIR-C	X-SAR
开发机构(国家)	NASA	NASA	NASA	DRL-SAI
时间	1981	1984	1993—1994	1993—1994
波段类型	L	L	L	X
极化类型	HH	HH	HH, HV, VH, VV	VV

表 2 星载 SAR 成像系统波段极化参数

Tab. 2 The wavelength and polarization parameters of satellite-borne SAR image system

系统名称	Seasat	AL MAZ	E-ERS-1	J-ERS-1	Radarsat
开发机构(国家)	NASA	USSR	ESA	NASDA	Canada
时间	1978	1991	1991	1992	1995
波段类型	L	S	C	L	C
极化类型	HH	HH	VV	HH	HH

SAR 图像的特征与地物、波长、极化方式、雷达波入射角等众多因素相关<sup>[1]</sup>, 因此只有进行 SAR 图像特征与雷达参数相关联的变化规律研究, 才能更深入地进行 SAR 图像分析, 更有效地拓展 SAR 图像应用领域。如在利用合成孔径雷达(SAR)进行影像匹配制导中, 不可避免不同源图像的匹配问题, 通常星载和航载图像作为基准图, 机载、弹载图像作为实时图, 这样同一地区的基准图和实时图因为雷达参数的不同将出现较大

的差异。为此美国和俄罗斯就着重建立了地物目标特性数据库,迅速发展了新型的雷达影像匹配制导技术<sup>[2]</sup>。而国内由于缺少有效的对地观测手段,一直沿袭可见光图像的研究策略,对目标特性变化研究不足,至今未取得突破性成果。显而易见,建立 SAR 图像特征与雷达参数之间的关系,是解决 SAR 图像应用的一个更有效的途径。

传统的 SAR 图像配准的特征选择,一般基于同源假设,不考虑传感器参数对特征的影响<sup>[3-4]</sup>。这就造成某些配准特征在同源图像配准时比较抗差,而在不同传感器参数的 SAR 图像配准时却表现不佳。近年来,遥感图像特征选择中开始考虑传感器参数对特征的影响,比如文献[5]在 SAR 图像目标检测中使用了方向性粗糙度特征,并使用该特征在 X 波段的 MSTAR 数据与 Ka 波段的 ADTS 数据上进行了试验分析,验证了该特征在两个波段图像上的有效性。但是,试验中检测的对象是人工嵌入的目标,忽略了传感器参数对目标回波强度的影响。同时该特征在其他波段(如 L、C 和 S 等波段)SAR 图像中的性能还需要进一步分析。

本文为系统研究不同雷达参数下 SAR 图像的共性抗差特征,使用了一种单因素影响分析方法,即将多个可变参数隔离研究与分析。本文主要研究 SAR 传感器参数中波长对图像统计特征的影响,分析了当前常用的 6 类图像统计特征在 SAR 波长变化下的规律。通过试验分析,总结出对 SAR 波长变化具有相对稳健性的特征。本文的研究结果对不同源 SAR 影像匹配制导中共性特征的选择, SAR 图像辨识中统计特征的选择、波段的选择,以及影像适配性分析中适配性指标的设计具有重要的指导意义。

## 2 SAR 图像统计特征

SAR 图像的表象特征主要体现为纹理特征,特征的具体形态与波长方式有关。参考光学图像的统计分析方法,本文对 SAR 图像进行分析主要采用 6 大类特征:基于直方图的统计特征、基于灰度差分的统计特征、基于共生矩阵的统计特征、基于视觉感知的 Tamura 特征、基于分形理论的分形特征和自相关函数等。

### 2.1 基于直方图的统计特征

直方图是图像处理中应用十分广泛的统计方法。一幅数字图像可以看做是一个二维随机过程的一个样本,可以用联合概率分布来描述。通过测

得的图像各像素的幅度值,可以估计图像的概率分布,形成图像的直方图特征<sup>[6]</sup>。直方图的特征参数主要有均值、方差、熵、峰度、偏度以及边缘密度等。

### 2.2 基于共生矩阵的统计特征

任何图像都可以看做是三维空间中的一个曲面,直方图是研究单个像素在这个三维空间中的统计分布规律,但不能很好地反映像素之间的灰度级空间相关性的规律。因此产生了以像素的灰度和位置为参数的分析方法,这就是基于灰度共生矩阵 GLCM(gray level co-occurrence matrix)的计算纹理特征的方法<sup>[7-9]</sup>。灰度共生矩阵是关于两个具有确定空间位置关系的灰度  $i$  与  $j$  在图像中出现的联合概率分布矩阵<sup>[10]</sup>。空间位置关系是指角度  $\theta$  和距离  $d$ ,对于每个确定的角度和距离可以得到一个共生矩阵,每个共生矩阵可以得到 14 个统计参数<sup>[7]</sup>。本论文试验采用其中的能量(或称二阶矩、一致性)、对比度(或称惯性矩)、相关、熵、最大概率、方差、均值、相异性、逆差矩、逆差分等 12 个统计参数。试验中距离取值为  $d=1$ ,角度取值为  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。由此共产生 4 个方向的共生矩阵,其中每个方向得到 12 个统计参数值,最后将 4 个方向的参数值作平均,就可以得到该图像基于灰度共生矩阵的纹理特征。

### 2.3 基于灰度差分的特征参数<sup>[11]</sup>

图像中一点  $(x, y)$  与它只有微小距离的点  $(x+\Delta x, y+\Delta y)$  灰度差分  $g_\Delta(x, y) = g(x, y) - g(x+\Delta x, y+\Delta y)$ ,式中,  $g(x, y)$  为在图像点  $(x, y)$  的灰度值。若图像的灰度级为  $N$ ,则灰度差分的所有可能取值共有  $2N+1$  级,而共生矩阵中灰度值所有可能组合有  $N^2$  种,显然灰度差分统计方法要比共生矩阵减少了工作量。令  $(x, y)$  在整个图像中移动,计算出取  $g_\Delta$  各个数值的个数,由此即可得到灰度差分直方图。在灰度差分直方图基础上可以得到描述图像纹理的参数:对比度、能量(角度方向二阶矩)、熵和均值。试验取  $(\Delta x = d, \Delta y = 0), (\Delta x = d, \Delta y = d), (\Delta x = 0, \Delta y = d)$  和  $(\Delta x = -d, \Delta y = d)$ ,分表代表水平、 $45^\circ$ 、垂直和  $135^\circ$  这 4 个方向。计算 4 个方向的灰度差分直方图及其对应的差分特征,然后将 4 个方向的特征值取平均,即得到基于灰度差分的纹理特征<sup>[12]</sup>。

### 2.4 基于 Tamura 纹理特征参数<sup>[10, 13-14]</sup>

文献[14]提出了与人类视觉感知特性有紧密关联的几个纹理特征,包括粗糙度、对比度和方向度等。根据心理学试验和计算机视觉试验,基于

Tamura 纹理特征对图像纹理的分析结论与人类视觉感知有很强对应性。本文采用的 Tamura 特征的计算方法与参数设置同文献[10]。

### 2.5 空间自相关函数<sup>[11]</sup>

纹理的粗糙性可以用空间自相关函数作为测度,粗糙性大小与局部结构的空间重复周期有关,周期大纹理粗,周期小纹理细,所以空间自相关函数可以用来说明纹理测度变化的倾向。对于大小为  $n \times n$  的二维图像  $f$ ,自相关函数可定义如下

$$C(\xi, \eta) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(i, j) f(i - \xi, j - \eta)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |f(i, j)|^2} \quad (1)$$

式(1)对大小为  $(2\omega + 1) \times (2\omega + 1)$  的图像窗口内每个像点与偏离值为  $\xi, \eta = 0, \pm 1, \dots, \pm \omega$  的临近像点之间进行相关值计算。粗纹理对给定偏离值  $\xi, \eta$  时的相关性要比细纹理高,而方差一般用来表达这种空间相关性,所以可以用自相关函数值的方差作为纹理测度,即

$$T_c = \sum_{\xi=-\omega}^{\omega} \sum_{\eta=-\omega}^{\omega} \xi^2 \eta^2 C(\xi, \eta) \quad (2)$$

图像中纹理粗糙性越大,则测度  $T_c$  就会越大。考虑到  $\xi$  或  $\eta$  取值为 0 时,该测度恒为 0 值,无法反映水平和垂直方向的纹理自相关性。本文进一步修正该测度为

$$T_c = \sum_{\xi=-\omega}^{\omega} \sum_{\eta=-\omega}^{\omega} (\xi^2 + 1)(\eta^2 + 1)C(\xi, \eta) \quad (3)$$

表 3 试验采用的 SAR 图像(NASA)

Tab. 3 The SAR images used in experiment (NASA)

拍摄地区(图像编码)	包含地形	波段与极化方式	拍摄时间
New York (P-45621)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1995-05-11
Salt Lake(P-46219)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1995-09-28
Lisbon (P-46348)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1995-11-02
Sydney (P-46685)	城市、山脉、海洋	L-VH,C-VH,C-VV	1996-03-29
Orange Country(P-46722)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1996-04-25
Taipei (P-47480)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1996-10-03
Dublin(P-46297)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-VV,C-VV	1995-10-19
Taal Volcano (P-44903)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1994-11-18
Victoria, British Columbia (P-46709)	城市、山脉、海洋	L-HH,C-VV,X-VV	1996-03-14
Honolulu, Oahu(P-46966)	城市、山脉、海洋	L-HH,L-HV,C-HV	1996-06-06
North Atlantic Ocean (P-46255)	海洋	L-HH,C-HH,L-VV	1995-10-05
Arabian Sea(P-46293)	海洋	L-VV,AVE,C-VV	1995-10-26

### 3.2 抗差性指标

本试验采取单因素影响分析的方法,考虑到表 3 内不同地区图像采集时间不同,为了尽量减

### 2.6 基于分形理论的分形特征<sup>[15]</sup>

灰度图像的分形维数可以表示图像灰度曲面起伏的复杂度,近年来成为一个重要的图像表象特征。求解分形维数的方法很多,考虑到精确度与算法效率之间的权衡,本文采用文献[15]基于 DFBR 场的改进的毯覆盖图像分维数提取算法。

## 3 试验方法

### 3.1 图像数据

试验数据采用美国(NASA)奋进号航天飞机拍摄的 SAR 图像。该飞机携带的合成孔径雷达 SIR-C/X-SAR 有 3 个波段:L 波段(24 cm)、C 波段(6 cm)和 X 波段(3 cm),4 种极化方式 HH、HV、VV 和 VH,可以根据科研需要拍摄多波段多极化的 SAR 图像。试验中需要的 SAR 图像见表 3,每个地区均有 3 幅对应不同波长与极化方式组合的图像,如 New York 地区,有 3 幅图像分别对应 L-HH、L-HV 和 C-HV 3 种波长与极化组合。然后根据需要研究的地形和波长方式,对各地区图像内的不同地形图像进行随机采样,城市采样图像大小为 32 像素  $\times$  32 像素,山地采样图像大小为 64 像素  $\times$  64 像素,海洋采样图像大小为 64 像素  $\times$  64 像素。对每种地形随机采样 3 幅子图像。

少其他因素的影响,抗差性指标仅由同一地区、同一地形与同一时间拍摄的两幅 SAR 图像获得。如在 New York 地区的山地地形,设抗差性指标

为  $H$ , 分析波长对某一统计特征  $W$  的影响, 仅需要分析 L-HV 和 C-HV 两幅同一时刻同一极化方式获得的图像。然后计算这两幅图像对应的  $W$  特征, 得到  $W_{L-HV}$  和  $W_{C-HV}$ 。该统计特征对应于波长的抗差性指标即可表达如下

$$H = |W_{L-HV} - W_{C-HV}| \quad (4)$$

### 3.3 参数归一化

在研究某类参数受波长影响的时候, 往往涉及多个特征, 如基于共生矩阵的统计参数就有 12 个, 每个参数的取值范围也不一样, 所以由原始参数值直接计算得到的各参数抗差性指标之间没有可比性。这就需要在计算抗差性指标前对原始参数值进行归一化。高斯归一化方法是一种在实际应用中表现较好的归一化方法, 其优点是部分超大或超小的元素值对整个归一化后的元素值分布影响较小。假设共有  $m$  幅图像  $n$  个特征, 则高斯归一化公式如下

$$f_{i,j}^N = \frac{f_{i,j} - \mu_j}{3\sigma_j} \quad (5)$$

式中,  $f_{i,j}$  代表第  $i$  个图像的第  $j$  个特征;  $f_{i,j}^N$  代表归一化后的特征;  $\mu_j$  和  $\sigma_j$  分别对应第  $j$  个特征的均值和方差。式(5)可以保证归一化后的特征值落在区间  $[-1, 1]$  的概率可达到 99%。试验中, 对区间外的值设为 -1 或 1, 以保证所有  $f_{i,j}^N$  值均在区间  $[-1, 1]$  内。

## 4 试验分析

波长主要通过两个方面来影响回波信号, 一是影响地面的有效粗糙度; 二是影响地物的复介电常数。有效粗糙度主要影响地物目标对电磁波的散射方向分布, 进一步影响回波能量; 复介电常数则影响到地物目标反射能力以及电磁波穿透能力的大小<sup>[2]</sup>。回波强度  $\sigma^0$  与雷达波长之间的关系在各种试验中的结果并不完全一致, 部分原因是环境因素的影响。但大多数的试验表明  $\sigma^0$  随雷达波长减小而增大<sup>[16]</sup>。根据上面的分析, 在同一极化方式下, 不同波段对同一地物目标成像自然导致回波强度不同, 进而图像的灰度以及纹理也有了很大改变。

本试验主要研究了 L、C 和 X 3 个波段的影响下, 各统计参数在城市, 山地和海洋地形中抗差性指标的对比。3 种地形的试验结果分别如图 1、图 2 和图 3 所示, 其中分图(a)~(b)的纵坐标  $H$  是参数归一化后的抗差性能指标值。分图(e)的纵坐标  $H_1$  和  $H_2$  分别表示分形特征和自相关系

数的抗差性能指标值。分图(a)的横坐标  $G_1$  至  $G_{12}$  分别表示共生矩阵的 12 个特征参数: 能量、对比度、相关、熵、最大概率、方差、均值、相异性、逆差矩、逆差分、聚类渐变和聚类突变。分图(b)的横坐标  $C_1$  至  $C_4$  分别表示灰度差分的 4 个特征参数: 对比度、均值、能量和熵。分图(c)的横坐标  $T_1$  至  $T_3$  分别表示 Tamura 的 3 个特征参数: 粗糙度、对比度和方向度。分图(d)的横坐标  $Z_1$  至  $Z_7$  分别表示直方图的 7 个特征参数: 均值、方差、熵、能量、峰度、偏度和边缘密度。分图(e)的横坐标表示试验对应的图像, 共 30 幅。

首先是城市地形, 本文采用表 3 中包含城市地形特征的 P-45621、P-46219、P-46348、P-46685、P-46722、P-47480、P-46297、P-44903、P-46709 和 P-46966, 共 10 幅图像。基于共生矩阵的统计参数对波长的抗差性同样保持着较好的规律性, 其中的对比度、相异性和熵值是较为抗差的统计参数, 抗差性指标  $H$  分别在 0.033、0.058 和 0.035 以下; 基于 Tamura 的对比度参数是相对其他两个较为抗差的参数, 最大  $H$  值在 0.1 左右; 基于灰度差分和直方图的统计特征没有多大的规律性, 灰度差分的 4 个参数  $H$  值基本都在 0.04 以下, 直方图的参数中方差、熵和能量是抗差性相对较好的参数, 抗差性指标  $H$  在 0.16 以下; 分形维数和自相关函数的抗差性指标除去个别奇异点基本上没有多大的差异, 最大  $H$  基本在 0.2 左右。

其次是山地地形, 本文采用表 3 中包含城市地形特征的 P-45621、P-46219、P-46348、P-46685、P-46722、P-47480、P-46297、P-44903、P-46709 和 P-46966, 共 10 幅图像。基于共生矩阵的对比度和相异性仍然是 12 个统计参数中较抗差的量, 熵值不再抗差; 对比度仍然是 Tamura 统计参数中较为抗差的量, 最大  $H$  值在 0.15 左右; 基于统计差分的统计参数  $H$  值依然没有什么规律, 但最大的  $H$  值依然在 0.05 左右; 方差和偏度是直方图参数中较抗差的量, 最大  $H$  值在 0.12 左右; 分形维数在此表现了相对自相关函数较抗差的特征, 分形维数的最大  $H$  值在 0.2 左右, 而自相关函数在山地地形中却达到了 0.4。

最后是海洋地形, 本文采用表 3 中包含城市地形特征的 P-46255、P-46219、P-46348、P-46685、P-46722、P-47480、P-46297、P-46293、P-46709 和 P-46966, 共 10 幅图像。基于共生矩阵的特征中, 对比度和相异性较抗差, 同时逆差矩和逆差分也

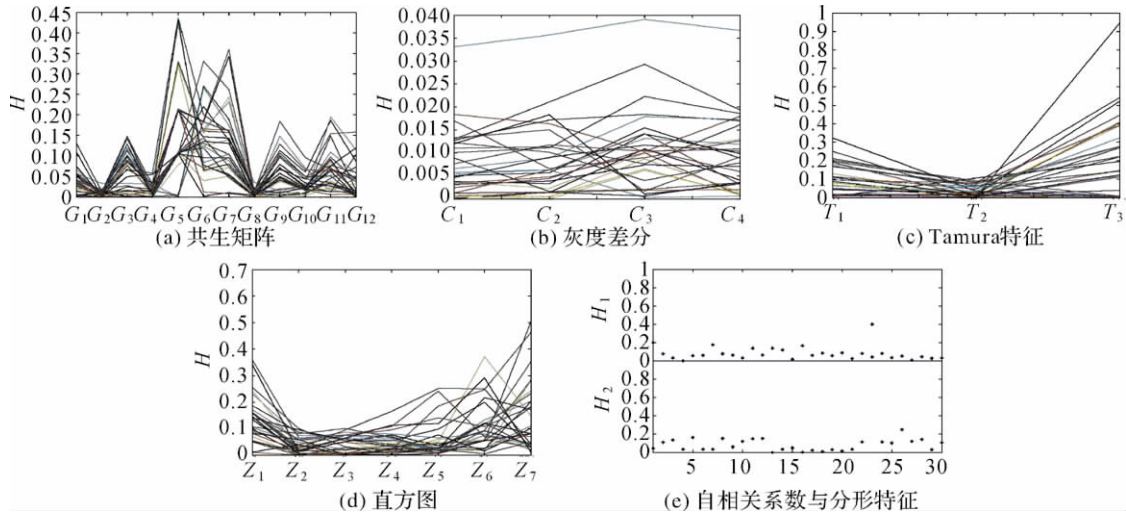


图 1 SAR 波长对城市图像统计特征抗差性的影响

Fig. 1 The robust of statistical feature against the wavelength for city terrain

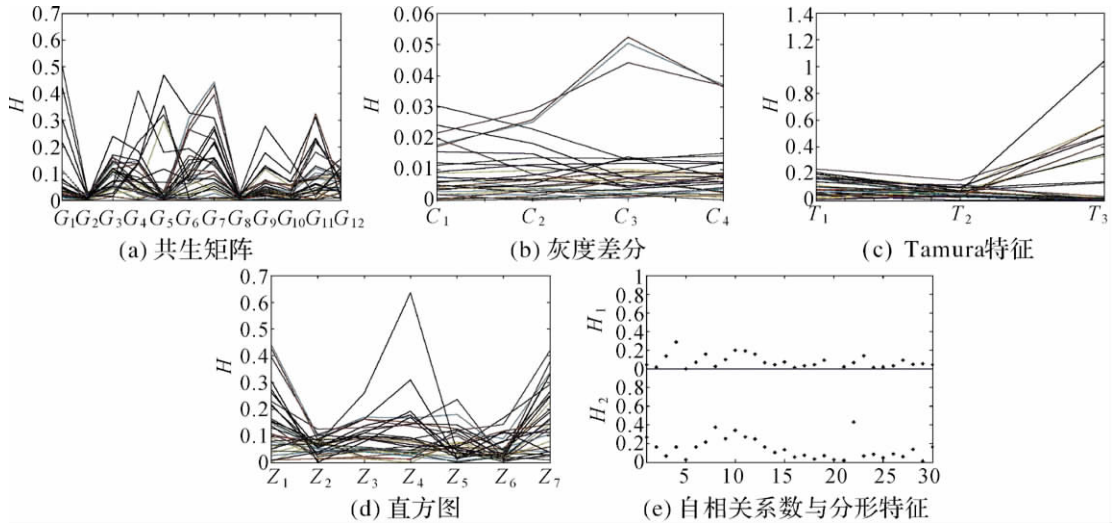


图 2 SAR 波长对山地图像统计特征抗差性的影响

Fig. 2 The robust of statistical feature against the wavelength for hill terrain

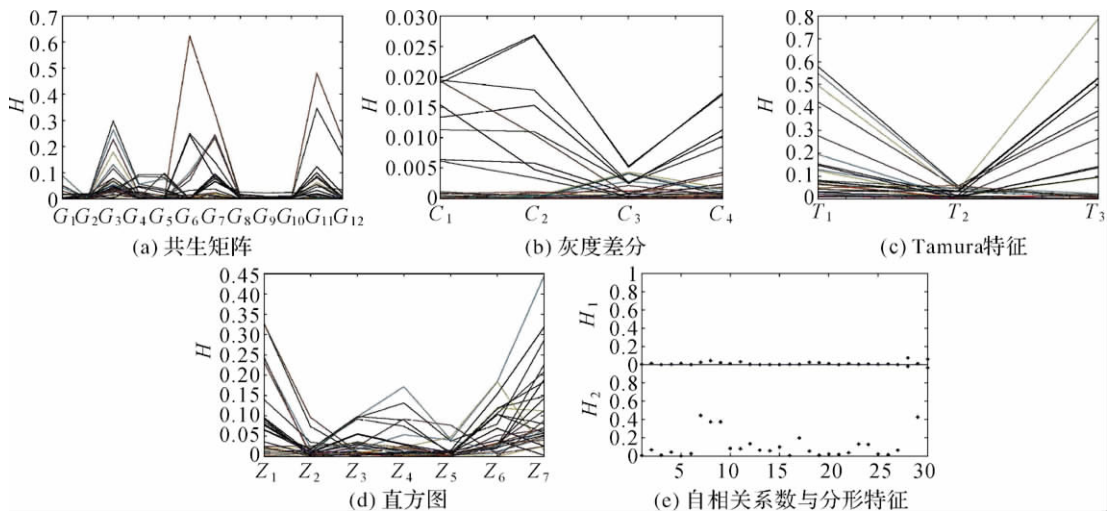


图 3 SAR 波长对海洋图像统计特征抗差性的影响

Fig. 3 The robust of statistical feature against the wavelength for sea terrain

表现了与对比度和相异性同样的抗差性,最大  $H$  值在 0.026 左右; Tamura 3 个参数中最抗差的是对比度,最大  $H$  值在 0.058 左右; 基于灰度差分的 4 个参数规律性有很大不同,  $H$  值均保持了较低的变化范围,最大  $H$  值在 0.027 左右,其中较为抗差的是能量参数,最大  $H$  在 0.005; 基于直方图的统计参数中,较抗差的参数是方差和峰度,最大  $H$  值分别在 0.096 和 0.077 左右。分形维数保持了较好的抗差性,最大  $H$  值在 0.07 左右; 自相关函数的起伏波动较大,最大  $H$  值已经逼近 0.5。

通过分析 6 类统计参数在波长单因素变化下的抗差性,可以初步得到如下结论:

(1) 基于共生矩阵的对比度和相异性参数在 3 类地形中均有良好的抗差性。熵值在城市地形具有较好抗差性; 逆差矩和逆差分在海洋地形表现出较好的抗差性。

(2) 基于 Tamura 的统计参数中,对比度是对波长最抗差的参数,但抗差性指标值相对其他类统计特征比较大。

(3) 基于灰度差分的 4 个统计参数受波长影响比较显著,但抗差性指标变化范围却很小,说明基于灰度差分的 4 个指标均有较好的抗差性。

(4) 基于直方图的 7 个统计参数中,方差是 3 类地形中均具有较好抗差性的参数,熵和能量在城市地形较抗差; 偏度在山地地形较抗差; 峰度在海洋地形较抗差。

(5) 分形维数在山地和海洋地形均表现了较好的抗差性,在城市地形中抗差性指标有一定起伏; 自相关函数在城市地形表现比山地和海洋要出色。

(6) 在以上 6 类统计特征中,基于共生矩阵的抗差性指标分布具有相对其他 5 类统计特征较好的规律性; 虽然基于灰度差分的 4 个参数之间的抗差性没有多少规律可循,但整体抗差性指标值很低,可见该方法分析的纹理特征对传感器参数较不敏感。

## 5 结 论

本文详细分析了 6 类常用统计特征在 SAR 波长影响下的变化规律,并结合不同地貌特征,力求寻找到对 SAR 波长变化以及不同地貌特征相对比较抗差的共性特征。但是从试验中可以分析得出, SAR 波长对所选用的统计特征均有不同程

度的影响,同时地形因素也导致其变化规律不同,建议对不同波段 SAR 图像特征匹配时,需要融合各参数来提高匹配的准确性和抗差性,其中基于共生矩阵的各参数之间抗差性指标分布较为规律,而基于灰度差分的特征参数抗差性普遍较好,综合两类参数的优点用来描述 SAR 图像特征是今后研究的重要方面。另外,今后的工作还需要对其他传感器参数进行单因素试验分析,为不同源图像配准以及图像辨识提供更可靠、更抗差的特征<sup>[17]</sup>。

## 参考文献:

- [1] SHU Ning. Principles of Microwave Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001. (舒宁. 微波遥感原理[M]. 武汉: 武汉出版社, 2001.)
- [2] CURLANDER J, MCDONOUGH R. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing[M]. New York: Wiley Press, 1991.
- [3] YUAN Wei. Research on the SAR Image Registration Based on Structural Information[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (袁伟. 基于结构信息的 SAR 图像配准方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.)
- [4] SOLBERG A H S, JAIN A K. Texture Fusion and Feature Selection Applied to SAR Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(2): 475-479.
- [5] HU Fengming, FAN Xuehua, YANG Ruliang, et al. Study of Target Detection of SAR Image Using Directional Roughness Feature[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(3): 229-235. (胡风明, 范学花, 杨汝良, 等. 利用方向性粗糙度特征对 SAR 图像目标检测的研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 229-235.)
- [6] SHEN Tingzhi, FANG Ziwen. Digital Image Processing and Pattern Recognition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998. (沈庭芝, 方子文. 数字图像处理及模式识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.)
- [7] SHARMA M, SINGH S. Evaluation of Texture Methods for Image Analysis[C] // Proceedings of the Seventh Australian and New Zealand Intelligent Information Systems Conference. Perth: IEEE, 2001: 117-121.
- [8] HARALICK R, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural Features for Image Classification[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1973, 3(6): 610-621.
- [9] BARALDI A, PARMIGGIANI F. An Investigation of the Textural Characteristics Associated with Gray Level Cooccurrence Matrix Statistical Parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remoter Sensing, 1995, 33(2): 293-304.

(下转第 99 页)

- [C]//Proceedings of 2009 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR'09). Xi'an: [s. n.], 2009: 165-168.
- [10] XU W, CHANG E C, KWONG L K, et al. Phase Unwrapping of SAR Interferogram with Multi-frequency or Multi-baseline[C]//1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94). Piscataway: [s. n.], 1994: 730-732.
- [11] GHIGLIA D C, WAHL D E. Interferometric Synthetic Aperture Radar Terrain Elevation Mapping from Multiple Observations[C]//Proceedings of 6th IEEE Digital Signal Processing Workshop. Yosemite National Park: [s. n.], 1994: 33-36.
- [12] KIM M G, GRIFFITHS H D. Phase Unwrapping of Multi-baseline Interferometry Using Kalman Filtering [J]. Seventh International Conference on Image Processing and Its Applications. Manchester: IEEE, 1999: 813-817.
- [13] LI Z F, BAO Z. A Joint Image Coregistration, Phase Noise Suppression, and Phase Unwrapping Method Based on Subspace Projection for Multi-baseline InSAR Systems [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3): 584-591.
- [14] LACHAISE M, EINEDER M, FRITZ T. Multi Baseline SAR Acquisition Concepts and Phase Unwrapping Algorithms for the TanDEM-X Mission[C]//2007 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'07), Barcelona: [s. n.], 2007: 5272-5276.
- [15] GAO Yukai, ZHANG Wei. Spectrum Estimation from Non-uniformly Sampled Signals[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(2): 8-11. (高玉凯, 张维. 非均匀采样信号的频谱分析方法[J]. 电测与仪表, 2009, 46(2): 8-11.)
- [16] GOLDSTEIN R M, ZERBER H A, WERNER C L. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23 (4): 713-720.  
(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-04-07

修回日期: 2011-03-16

第一作者简介: 谢先明(1979—),男,博士生,研究方向为雷达干涉成像处理。

First author: XIE Xianming (1979—), male, PhD candidate, majors in synthetic aperture radar signal processing.

E-mail: xxmxgm@163.com

(上接第 92 页)

- [10] JIANG Renbo. Research and System Implementation on Content-based Image Retrieval (CBIR) [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (蒋仁波. 基于内容的图像检索技术与系统实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.)
- [11] RUAN Qiuqi. Digital Image Processing[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2001. (阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.)
- [12] CHEN Aimin. Content-based Image Retrieval Technology and Its Application in Medicine[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. (陈爱民. 基于内容的图像检索技术及其在医学中的应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2004.)
- [13] WU Jun. Content-based Image Retrieval Technology and Its Application in Remote Sensing Images[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2001. (吴均. 基于内容的图像检索技术及其在遥感图像中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2001.)
- [14] TAMURA H, MORI S, YAMAWAKI T. Textural Features Corresponding to Visual Perception[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1978, 8(6): 460-473.
- [15] ZHANG Tao. Fractal Features Based Scene Navigability Analysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (张涛. 基于分形特征的景象适配性分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.)
- [16] LONG M W. Radar Reflectivity of Land and Sea[M]. London: Artech House Press, 2001.
- [17] LIU Guoliang. Analysis of Influence Factors and Simulation Research on SAR Image[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (刘国良. SAR 图像影响因素分析与图像仿真[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.)  
(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2011-02-21

修回日期: 2011-04-18

第一作者简介: 刘国良(1983—),男,博士生,研究方向为图像处理 and 模式识别。

First author: LIU Guoliang (1983—), male, PhD candidate, majors in image processing and pattern recognition.

E-mail: guoliang.liu@hotmail.com