

基于 TerraSAR-X 影像的桥梁属性估计方法

张绍明^{1,2}, 余 声^{1,2}, 王建梅^{1,2}, 冯甜甜^{1,2}

(1. 同济大学 计算机视觉与遥感研究组, 上海 200092; 2. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 提出了一种基于 TerraSAR-X 影像的桥梁提取和参数计算方法. 首先使用 Gabor 纹理、共生矩阵纹理和多分辨率影像分割获取桥梁的兴趣区, 基于快速直线段检测算子 (LSD) 检测桥梁的方向, 最后利用雷达成像参数和多次回波模型计算桥梁的方向、宽度、水面高度、桥体厚度. 试验结果表明了该方法的有效性.

关键词: TerraSAR-X; 纹理分析; 影像分类; 桥梁检测; 桥梁参数估计

中图分类号: TP751

文献标志码: A

Attributes Estimation of Bridge with TerraSAR-X Imagery

ZHANG Shaoming^{1,2}, YU Sheng^{1,2}, WANG Jianmei^{1,2}, FENG Tiantian^{1,2}

(1. Computer Vision and Remote Sensing Group, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Surveying, Mapping and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An automatic method for detecting and interpreting bridges over water in TerraSAR-X imagery is proposed. Two kinds of image textures including the Gabor features and gray-level co-occurrence matrix statistics are employed to segment the image in multiple scales and obtain the regions of interest (ROIs) of bridge. Line segment detector is used to estimate the direction of bridge. For each ROI, five key parameters of a bridge are estimated based on the imaging model of radar, including angle, width, elevation over water and thickness of body. Experiment results with TerraSAR-X image indicate that the method is effective.

Key words: TerraSAR-X; textural analysis; image classification; bridge detection; estimation of attributes for bridge

作为核心城市基础设施之一, 桥梁目标的自动解译一直是 SAR 影像目标识别领域的重要研究内容, 并对多个领域的应用具有重要意义. TerraSAR-X 影像是目前分辨率最高的星载高分辨率 SAR 影像之一, 在目标识别领域具有非常广泛的应用. 针对星载 SAR 影像的桥梁自动解译主要包含桥梁自动识别和属性计算两个问题. 目前, 桥梁自动检测一般采用水体分割、兴趣区搜索、目标识别三个步骤组成的技术路线. 文献[1]描述了一种多分辨率桥梁检测算法, 在下采样后的影像中提取水体, 并获取线化提取结果. 通过检测线状结果中的灰度突变点确定桥梁兴趣区, 最后基于瑞利分布模型和恒虚警检测完成识别. 文献[2]给出了一种首先进行水体提取, 进而利用桥梁的灰度和几何特性进行识别和检测的方法. 文献[3]提出基于灰度直方图进行水体分割, 利用目标关系提取潜在桥梁, 最后计算兴趣区直方图熵完成识别的方法. 此外, 文献[4-8]也都提出了基于类似技术路线的桥梁检测方法. 上述方法中, 关键环节是确定有效的影像分割方法, 进而基于分割得到的水体目标完成桥梁检测.

随着星载 SAR 传感器的影像分辨率不断提高, 如 TerraSAR-X 的最高斜距分辨率已达到 1 m, 对桥梁参数进行精确估计具备了可行性. 但桥梁高度估计方面的研究较少, 文献[9]最早阐述了基于 ERS SAR 数据的桥梁水面高度估计的原理. 文献[10]阐述了 InSAR 数据中的桥梁高度估计原理. 文献[11]基于模型散射仿真数据论证了桥梁高度估计的理论. 多次反射回波模型的描述和各次回波目标的自动提取是桥梁参数估计的关键, 也是需要进一步深入研究的内容, 本文将该问题作为研究的核心问题之一.

基于上述分析, 本文提出了一种通过多分辨率

收稿日期: 2013-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(41301361, 41171327); 上海市自然科学基金(12ZR1433200, 11ZR1439000); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB719903); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072120057)

第一作者: 张绍明(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为模式识别、计算机视觉. E-mail: zhangshaoming@tongji.edu.cn

通讯作者: 王建梅(1971—), 女, 工学博士, 主要研究方向为遥感图像处理、空间数据挖掘. E-mail: jianmeiw@tongji.edu.cn

影像分割和目标空间分布进行桥梁兴趣区检测,基于快速直线段检测算子(line segment detector, LSD)确定桥梁方向,利用影像精确分割和雷达成像的多次反射特性完成桥梁几何属性估计的方法.最终估计的桥梁目标属性包括方向、宽度、桥梁水面高度、桥体厚度.

1 基于多分辨率影像分割的桥梁兴趣区检测

TerraSAR-X 影像的图幅很大,1 m 斜距分辨率影像每景的大小在 $20\,000 \times 30\,000$ 像素左右,因此桥梁目标的快速定位具有较大难度.本文提出在多分辨率策略下,通过影像分割快速定位桥梁兴趣区的方法.首先对影像建立金字塔,在金字塔顶层的低分辨率影像中进行最大类间方差分割,通过目标空间关系确定初步的兴趣区,再在金字塔底层的高分辨率影像中基于影像灰度、Gabor 纹理和灰度共生矩阵纹理进行局部分割,获取兴趣区精确分割结果,从而实现兴趣区定位.由于桥梁的兴趣区检测只是为属性计算提供初始位置,对定位的精确性要求不高,因此根据多层影像金字塔间的缩放比例,即可由顶层位置定位原始分辨率层的兴趣区.图 1 给出了杭州地区的 TerraSAR-X 影像的整体分割结果.图 1a 为 TerraSAR-X 影像;图 1b 为最大类间方差分割结果;图 1c 为分割结果去掉面积小于 500 个像素的目标,并填充面积小于 500 个像素空洞的结果.小目标和小空洞的面积阈值为根据对图像进行大量试验获取的经验值.

基于金字塔顶层分割的结果,在金字塔顶层计算所有联通体,然后计算联通体的边缘轮廓像素,最后根据联通体空间分布关系进行桥梁兴趣区检测.具体步骤如下:

(1) 对保留的目标,计算两个目标轮廓间的最小距离 d_{\min} ,如果 d_{\min} 小于阈值 ϵ ,则记录构成最小距离的像素点 I_1 和 I_2 . ϵ 根据实际桥梁宽度(一般为 5~15 m)和影像分辨率确定,图 1 中的 ϵ 值为 13.6 m.然后检测与 I_1 和 I_2 相邻的目标边缘点对,将距离与 d_{\min} 接近的像素对都归为兴趣像素点,计算兴趣像素的最小包络矩形.

(2) 计算包络矩形的长宽比,如果满足长宽比阈值条件则确定为兴趣区.长宽比阈值的确定也是根据实际桥梁的一般形态确定,在图 1 中,该阈值为 5:1.

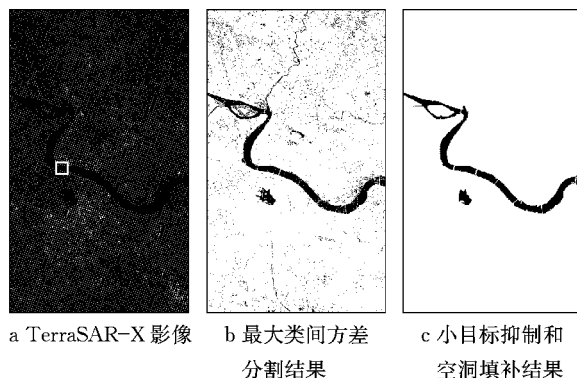


图 1 杭州地区 TerraSAR-X 影像(斜距分辨率 0.909 m)的金字塔顶层分割结果

Fig.1 Segmentation in top-level of the pyramid of the TerraSAR-X image (slant-range resolution 0.909 m) in Hangzhou Area

对于金字塔顶层得到的桥梁兴趣区检测结果,由于兴趣区对定位精度的要求不高,可按照缩放比例,乘以对应的缩放系数得到金字塔底层(原始影像层)的兴趣区大致位置,并在原始影像层,利用影像灰度、Gabor 纹理和灰度共生矩阵纹理构建特征向量,利用支持向量机(SVM)^[12]对影像进行分类(低反射率区域、植被和建筑区).计算量巨大的影像分类过程只在原始影像的桥梁兴趣区内进行,极大地减小了计算量.

SVM 利用核函数计算高维空间内积,保证分类器的分类精度,使用最优分类面保证分类器的推广能力,并且基于凸二次规划计算决策函数,保证了解的全局最优性.这些特性保证了该方法在小样本情况下具有很好的适用性,文献[13]的研究证明了该方法适用于 SAR 图像纹理分类,因此在本文中选择 SVM 完成 SAR 图像分类.

二维 Gabor 基函数^[14]具有方向和尺度选择性,是典型的带通滤波器,并且在 χ^2 检测意义下,二维 Gabor 基函数能够拟合哺乳动物视觉细胞的二维感知域模型.因此可以利用多通道 Gabor 滤波器组描述图像纹理参数,其通用表达式为

$$\begin{cases} \text{Gabor}_{2d}(x, y) = g(x', y') \exp(j2\pi F_0 x') \\ g(x, y) = \frac{1}{2\pi\lambda\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x/\lambda)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \\ x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 为高斯包络函数, λ 和 σ^2 分别为长宽比和尺度参数, θ 为高斯包络函数的方向角, F_0 为常数.为了纹理计算的方便,本文将二维 Gabor 基函数简化为如下形式:

$$\text{Gabor}_{2d}(x, y | T, \theta) = \exp\left(\frac{1}{2T^2}\left(\left(\frac{x'}{\lambda}\right)^2 + y'^2\right)\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{T}x'\right) \quad (2)$$

式中: T 为尺度参数。

灰度共生矩阵 (gray level co-occurrence matrix, GLCM)^[15] 是图像纹理描述的经典方法,文献[16]的研究表明, GLCM 统计量中的能量、非相似性、熵和均质性四个统计量对 SAR 图像纹理描述最为有效。

Gabor 特征和 GLCM 统计量都是较好的纹理描述量,但由于高分辨率 SAR 影像的相干斑噪声强烈,为了提高影像分割的可靠性,本文选择综合使用两类特征构建纹理描述量。

基于上述分析,本文最终选择的纹理特征描述量包括:水平、竖直、两个对角线四个方向,尺度为 3, 5, 9 和 15 的 Gabor 滤波器响应值,共 16 个系数; GLCM 四个方向的二阶矩、非相似性、熵和相关性统计量,共 16 个系数。对 33(影像灰度值、16 个 Gabor 滤波器响应值、16 个 GLCM 统计量)维特征进行主成分分析后,选择能量最高的六维作为图像分类的特征向量。图 2 和 3 给出了 SAR 影像纹理计算的示例,分别为植被区与低反射率区的四方向 Gabor 滤波器响应值(尺度为 3)和 GLCM 统计量值(水平方向、像素位移量 3、影像量化级 8、窗口大小 11×11)。图 2 和 3 中,浮点型的特征值被拉伸到 0~255 灰度级进行表达。

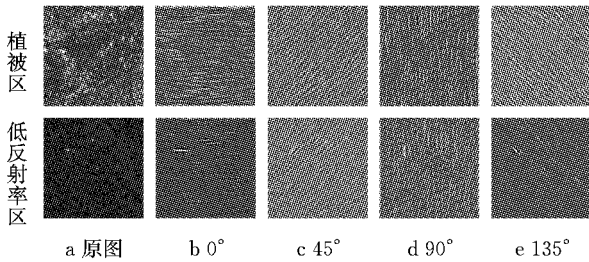


图2 植被区和低反射率区的 Gabor 滤波器响应值

Fig.2 Response of the Gabor filters of vegetation and low-reflectance area

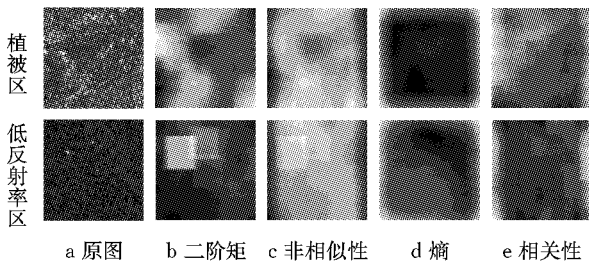


图3 植被区和低反射率区的 GLCM 统计量

Fig.3 GLCM statistics of vegetation and low-reflectance area

图 4 给出了图 1a 中白色框对应的局部影像分类结果。图 4a 为 TerraSAR-X 影像局部,图 4b 为三类分类结果,图 4c 为保留低反射率(水体)的结果。在分类中,使用 C-SVM^[12] 和高斯径向基核函数,惩罚因子 C 为 20。共选择建筑区域样本 7 896 个,植被覆盖区样本 7 096 个,低反射率区样本 7 552 个。

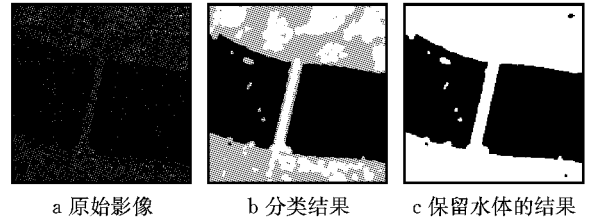


图4 TerraSAR-X 影像分类和水体提取结果

Fig.4 Results of classification and water extraction for TerraSAR-X image

2 基于 LSD 的桥梁方向估计

为了对桥梁进行参数估计,首先要计算桥梁的方向。传统方法多使用 Canny 边缘检测结合 Hough 变换进行计算,但是 SAR 影像中的边缘连续性差,上述方法的误差较大,并且计算量大。本文使用 LSD^[17] 方法对兴趣区所在区域进行直线段提取,通过计算所有直线段的平均方向确定桥梁方向。

LSD 方法是近年计算机视觉领域出现的直线段检测优秀算法,已经被证明比 Hough 变换等方法具有更好的抗噪性能、检测精度和更好的实时性。该算法的基本原理和计算步骤如下:

(1)按照梯度模值,对所有像素进行排序。将所有像素标记为未处理。

(2)选择任意一个未处理像素,开始区域生长,在区域生长过程中,要保证加入到区域中的像素梯度角度与整个区域的梯度角度均值不超过一定的阈值。

(3)判断所有线性区域,如果最小间距小于阈值则进行连接。

(4)判断每个线性区域,如果该区域内梯度角度与整体相差超过一定阈值则设为虚警,如果区域内的虚警率超过设定的阈值,则该区域不作为直线段进行记录。

图 5 给出了 LSD 方法中的区域生长过程。

图 6 给出了某个桥梁兴趣区局部进行 LSD 检测得到的结果。图 6a 为桥梁兴趣区所在区域,图 6b 为该影像局部的 LSD 检测结果。由于 SAR 影像的相干斑噪声强烈, LSD 方法步骤(2)中的区域生长过

程极易受到影响,如果生长过程中的梯度方向一致性阈值设置过于严格,则多数线段无法检测到或退化为断开的长度很小的破碎线段.因此在本文中使用较宽松的梯度方向一致性阈值(30°),从而检测到多个较为连续的线段.图 6 结果可以看到,如果该阈值设置合理,该方法对影像中的直线段可进行较好的检测.对检测结果的线段的方向取均值,可作为桥梁方向的合理估计.

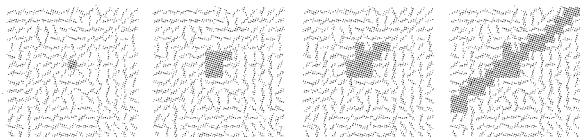
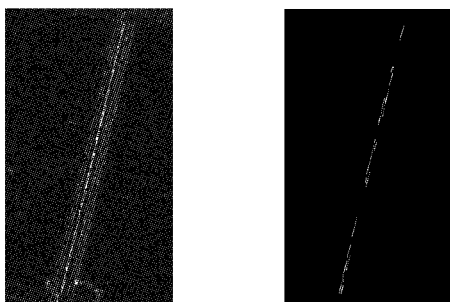


图 5 LSD 方法中的区域生长过程

Fig.5 Procedure of the region growing for LSD algorithm



a 桥梁兴趣区所在局部影像

b LSD 检测结果

图 6 影像桥梁兴趣区所在局部的 LSD 检测结果

Fig.6 Result of LSD in the bridge ROI

3 基于 SAR 成像几何参数的桥梁参数估计

在桥梁兴趣区和方向确定之后,本文利用微波对桥梁成像的多次反射模型对桥梁的宽度、上桥面高度、桥体厚度和真实投影位置进行计算.文献[9]最早对雷达成像的多次反射现象进行了探讨,并提出了初步的模型分析.本文对该模型进行了进一步的细化分析,给出了各次反射信号与桥梁属性间的量化关系,为属性计算提供依据.

3.1 桥梁成像多次反射回波模型

如果桥梁方向平行于 SAR 方位向,在雷达距离向分辨率足够高的情况下,雷达回波的多路径效应将有明显体现,具体表现为:一座桥梁在 SAR 影像中成像多次,表现为多个线性目标.图 7 给出了桥梁目标成像时的多次反射回波示意图.

图 7 中,成像平台位于桥梁左侧, B_{1l} , B_{1r} 和 B_{1b} 分别为桥梁上桥面左边缘、右边缘和桥梁底部左

缘的雷达一次反射回波,即直接反射结果. B_2 为桥梁左侧桥体的二次反射回波,包括两种情况:①雷达波到达桥梁侧面后反射到水面,再由水面反射回传感器;②雷达波到达水面后反射到桥梁侧面,再反射回传感器. B_3 为桥梁底部的三次反射回波,即雷达波到达水面后反射到桥梁底部,再由桥底部反射到水面,最后由水面反射回成像传感器.此外,还会存在高于三次的反射回波,与入射角的大小有关. W 为桥梁两个边缘的一次反射目标的地距差,即桥梁的实际宽度. H_{bo} , H_t 和 H_b 分别为桥体厚度、上桥面距水面高度和底部距水面高度. α 为雷达成像入射角.

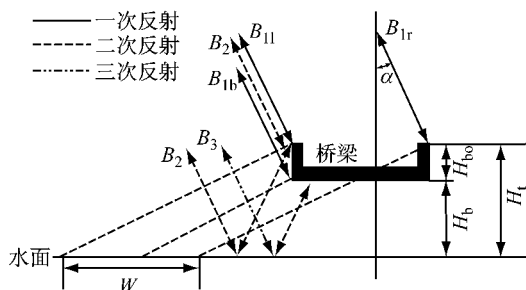
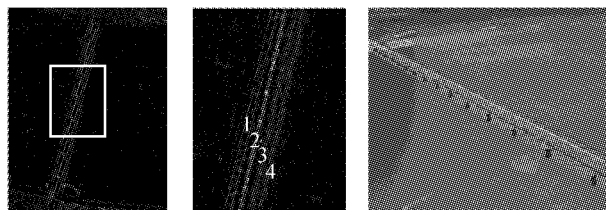


图 7 桥梁方向平行 SAR 方位向情况下的多次反射回波示意图

Fig.7 Multiple bounce of microwave when the bridge is parallel to the SAR azimuth

图 8 给出了高分辨率星载 SAR 影像中的桥梁多次反射回波情况.图 8a 为 TerraSAR-X 影像中的钱塘江大桥成像情况,斜距分辨率 0.909 m,卫星运动方向与大桥方向夹角小于 30° ;图 8b 为图 8a 的局部;图 8c 为钱塘江大桥的三维示意图.从图 8a, b 中可以看到钱塘江大桥在影像中表现为四个平行的线性目标.图 8b 中 1 号目标为一次反射回波的成像结果;2 号目标为二次反射回波结果;3 号目标为三次反射回波结果;4 号目标为高次反射回波结果.



a 钱塘江大桥影像 b 图 8a 的局部图 c 钱塘江大桥三维示意图

图 8 钱塘江大桥在 SAR 影像中的成像情况

Fig.8 Qiantangjiang Bridge in SAR image

图 8b 中 1 号目标的两条边缘亮度高于目标其他位置,这是由于上桥面的内部较为平滑,而边缘处存在栏杆等物体,所以内部的反射率相对低于边缘

处,这为桥梁宽度的估计提供了途径.2号目标的亮度明显高于其他三个目标,这是由于二次反射回波接收两种情况下的回波信号,其接收的回波能量最高,类似角反射器效应.3号和4号目标都是桥梁底部形成的回波,由于桥梁底部较为粗糙,形成漫反射,所以没有明显的边缘.

结合图7给出的多次回波模型和图8给出的SAR桥梁成像情况,可以看到:桥梁距水面的高度和各次反射目标的斜距差之间存在定量关系,并且二次反射回波形成的目标为桥梁正射投影的真实位置.

图9给出了该模型的进一步分析结果.

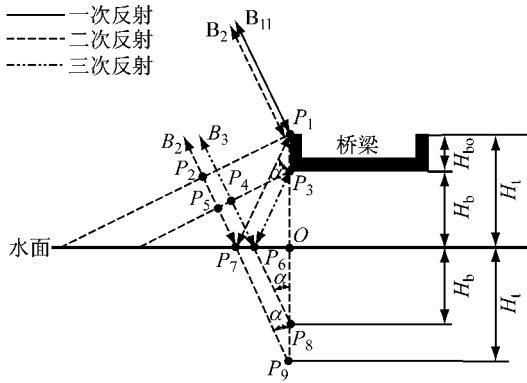


图9 多次回波目标与桥梁参数关系示意图

Fig.9 Connection between the multiple bounce of the microwave and the parameters of bridge

图9中, O 为桥梁左侧桥体在水面的正射投影位置.从图中可以看到,一次反射和二次反射目标的斜距差

$$D_{12} = \frac{|P_7 - P_2| + |P_1 - P_7|}{2} \quad (3)$$

根据微波反射和折射的几何性质,可知所有发生在传感器、左侧桥体和水面之间的二次反射回波的斜距都相等,设该距离为 R_2 .

由于所有二次反射回波的斜距都为 R_2 ,由图9可知二次和三次反射目标的斜距差

$$D_{23} = \frac{|P_6 - P_4| + |P_3 - P_6|}{2} \quad (4)$$

由微波的反射和折射性质可推得

$$|P_1 - P_7| = |P_7 - P_9|, \angle P_7 P_9 O = \angle P_7 P_1 O = \alpha \quad (5)$$

点 P_1, P_2 和 P_9 构成直角三角形,并且其斜边 $P_1 P_9$ 的长度为 $2H_t$,因此 D_{12} 可表示为

$$D_{12} = \frac{|P_2 - P_7| + |P_7 - P_9|}{2} = |P_1 - O| \cos \alpha = H_t \cos \alpha \quad (6)$$

同理可推得

$$D_{23} = \frac{|P_4 - P_6| + |P_6 - P_8|}{2} = |P_3 - O| \cos \alpha = H_b \cos \alpha \quad (7)$$

利用式(6)和(7)能够计算桥梁的 H_t, H_b 和 H_{bo} .

3.2 多次反射回波目标的自动提取和参数自动估计

计算多个目标的斜距差必须首先将目标从兴趣区中自动提取出来.本文通过计算桥梁方向上直线的像素灰度累加值确定各个目标空间位置.

在桥梁兴趣区中沿雷达成像距离向对兴趣区每一行进行扫描,获取每行的最大值,对所有最大值进行直线拟合完成桥梁的方向检测.为避免孤立噪声点对拟合结果的影响,在检测中对每行像素进行基于滑动窗口的中值滤波.

典型的兴趣区行像素灰度情况如图10所示.图10a中的两条白色细线为影像第30行和第40行,白色粗线为方向直线拟合结果;图10b为第30行像素灰度分布,图10c为第40行像素灰度分布.图10b,c中的最大值都对应二次回波反射目标.

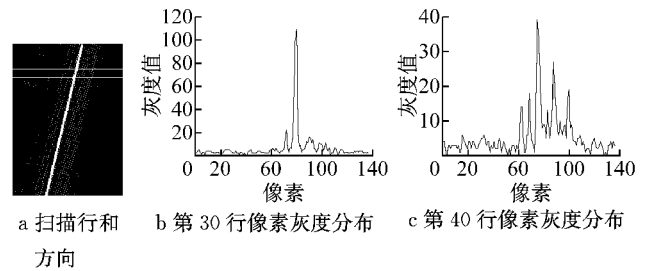


图10 桥梁方向直线拟合示意图

Fig.10 Line fitting of the bridge

获取桥梁的方向拟合直线后,在整个兴趣区内,计算桥梁方向所有直线上的像素均值 M ,将 M 作为该直线的能量描述子.对兴趣区内所有可能的直线进行扫描后,可获得该兴趣区的能量分布曲线.图8a所在兴趣区的能量分布曲线如图11所示.

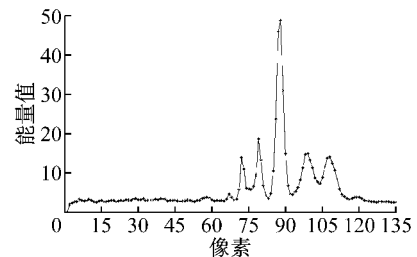


图11 兴趣区中桥梁方向所有直线的能量分布图

Fig.11 Distribution of the energy of all the lines that are parallel to the bridge in the ROI

图 11 中五个极大值从左到右记为 $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, 各极大值的意义如下:

(1) p_1 为上桥面左边缘的一次反射回波成像结果.

(2) p_2 为上桥面右边缘的一次反射回波成像结果.

(3) p_3 为桥梁桥体左侧二次反射回波成像结果.

(4) p_4 为桥梁底部三次反射回波成像结果.

(5) p_5 为桥梁底部高次反射回波成像结果.

计算 p_1 和 p_2 的间距 l_{12} , p_1 和 p_3 的间距 l_{13} , p_3 和 p_4 的间距 l_{34} .

设按照图 10 原理得到的桥梁方向拟合直线 L 的方程为 $Y=kX+b$, 待检测的影像为斜距影像, 且影像相关参数表达式如表 1 所示.

表 1 影像参数

Tab.1 Symbols of the parameters of image

参数	表达式
斜距分辨率	R_{sl}
卫星成像高度	H_s
影像最小斜距像素入射角	β_{min}
桥梁兴趣区在成像距离向的坐标(像素)	X
桥梁兴趣区像素入射角	β_0

根据图 9 所示的多次回波模型与各参数的几何关系, 可推导出桥梁主要参数的计算公式, 如表 2 所示.

表 2 桥梁参数计算方法和公式

Tab.2 Computational formula of parameters of bridge

参数	符号	计算公式
桥梁与雷达距离向的夹角	α_{dir}	$\alpha_{dir} = \arctan k$
桥梁宽度	W	$W = l_{12} R_{sl} \sin \alpha_{dir} / \sin \beta_0$
兴趣区入射角余弦值	$\cos \beta_0$	$\cos \beta_0 = H_s / (H_s / \beta_{min} + X R_{sl})$
上桥面距水面高度	H_t	$H_t = l_{13} R_{sl} / \cos \beta_0$
下桥面距水面高度	H_b	$H_b = l_{34} R_{sl} / \cos \beta_0$
桥体厚度	H_{bo}	$H_{bo} = H_t - H_b$
桥梁跨越水面长度	l_b	直线 L 与兴趣区最小包络矩形的两个交点的间距

4 试验结果与结论

本文使用杭州地区 TerraSAR-X 斜距影像进行了试验, 试验选用的影像斜距分辨率为 0.909 m, 图幅大小为 $17\ 408 \times 29\ 894$, 影像最小入射角为 27.19° , 成像高度为 513 800 m. 上述数据均由卫星影像自带的参数文件获得. 共检测到大型桥梁七座, 没有漏检和误检.

对图 8a 所示的钱塘江大桥进行的参数估计结果如表 3 所示.

表 3 钱塘江大桥解译结果

Tab.3 Result of the parameters estimation of Qiantangjiang Bridge

属性	结果
$\alpha_{dir}/(^{\circ})$	76.92
l_b/m	872.28
W/m	10.51
H_t/m	16.98
H_b/m	12.74
H_{bo}/m	4.24

钱塘江大桥为铁路公路两用桥, 上桥面为公路, 车道宽度为 6 m, 两侧人行道宽度各为 1.5 m, 梁宽度约为 9~10 m. 大桥通航高度为 13 m, 桥面高度约为 13 m. 大桥下层为火车通道, 一般火车车厢高度为 3.8 m, 即上桥面高度约为 17 m. 解译结果与实际情况具有较好的一致性.

试验结果表明, 基于 TerraSAR-X 影像对水上桥梁目标继续精确解译是可行的. 本文提出的先对影像进行多分辨率分割, 然后使用 LSD 确定桥梁方向, 最后基于卫星成像模型、多次反射回波模型和多目标自动分离和提取的参数估计方法是有效的.

参考文献:

- [1] YIN Dong, MIAO Yuqing, LI Guiqin, et al. Multi-scale feature analysis method for bridge recognition in SAR images[C]// Proceedings of IEEE 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Huangshan: IEEE Press, 2007: 517-520.
- [2] PEI Deli, SUN Fuchun, WANG Hongqiao, et al. Model-based bridge recognition in high resolution SAR image [C]// Proceedings of SPIE 6th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. Yichang: SPIE Press, 2009: 211-218.
- [3] WU Wenyu, YIN Dong, ZHANG Rong, et al. Bridge recognition of median-resolution SAR images using pun histogram entropy[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(7): 572.
- [4] 于大洋, 周露, 杨健, 等. 基于极化合成孔径雷达数据的桥梁检测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(7): 888.
YU Dayang, ZHOU Lu, YANG Jian, et al. Highway bridge detection based on polarimetric SAR data [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(7): 888.
- [5] 戴光照, 张荣. 高分辨率 SAR 图像中的桥梁识别方法研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 177.
DAI Guangzhao, ZHANG Rong. A study of bridge recognition in high resolution SAR images[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 177.
- [6] WANG Wenguang, SUN Jinping, HU Rui, et al. Knowledge-based bridge detection from SAR image[J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2009, 20(5): 929.

- [7] 王子路,李智勇,栗毅. 利用规则化热扩散方程的 SAR 影像桥梁检测[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 46.
WANG Zilu, LI Zhiyong, SU Yi. SAR Image bridge detection using regularized heat diffusion equation[J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 46.
- [8] 童涛,杨桃,崔震,等. 基于纹理特征的 SAR 图像水上桥梁目标检测[J]. 中国体视学与图像分析, 2012, 17(2): 107.
TONG Tao, YANG Guang, CUI Zhen, et al. Target detection of bridge over the water in SAR images based on texture feature[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2012, 17(2): 107.
- [9] Robalo J, Lichtenegger J. ERS-SAR images a bridge[J]. ESA Earth Observation Quarterly, 1999, 64: 7.
- [10] Soergel Uwe, Cadario Erich, Gross Hermann, et al. Bridge detection in multi-aspect high-resolution interferometric SAR data[C/CD]// Proceedings of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Dresden: DLR Press, 2006.
- [11] WANG Haipeng, XU Feng, JIN Yaqiu, et al. Estimation of bridge height over water from polarimetric SAR image data using mapping and projection algorithm and de-orientation theory[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92-B(12): 3875.
- [12] Cortes C, Vapnik V. Support vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273.
- [13] 程明跃,叶勤,张绍明. 基于树型小波和 FW-SVM 的 SAR 图像水体自动检测[J]. 计算机工程, 2009, 35(2): 219.
CHENG Mingyue, YE Qin, ZHANG Shaoming. Water automatic detection from SAR image based on fuzzy weighted SVM[J]. Computer Engineering, 2009, 35(2): 219.
- [14] Gabor D. Theory of communication[J]. Journal of IEE, 1946, 93: 429.
- [15] Robert M. Haralick, K. Shanmugam, et al. Textural features for image classification[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(6): 610.
- [16] Baraldi A, Parmiggiani F. An investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 293.
- [17] Grompone R, Jakubowicz J, Morel M J, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722.



(上接第 546 页)

- [7] Fell B V, Kanvinde A M. Recent fracture and fatigue research in steel structures[J]. Structure Magazine, 2009(2): 14.
- [8] Kanvinde A M, Deierlein G G. Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures[R]. Stanford: Stanford University Press, 2004.
- [9] Kanvinde A M, Deierlein G G. Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2007, 133(6): 701.
- [10] Kanvinde A M, Deierlein G G. Validation of cyclic void growth model for fracture initiation in Blunt Notch and Dogbone Steel specimens[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008, 134(9): 1528.
- [11] Fell B V, Myers A T, Deierlein G G, et al. Testing and simulation of ultra-low cycle fatigue and fracture in steel braces[C]//Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 2006: Paper No. 587.
- [12] Myers A T, Deierlein G G, Kanvinde A M. Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments[R]. Stanford: Stanford University Press, 2009.
- [13] LIAO Fangfang, WANG Wei, CHEN Yiyi. Parameter calibrations and application of micromechanical fracture models of structural steels[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2012, 42(2): 153.
- [14] Lemaitre J, Chaboche J L. Mechanics of solid materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [15] 熊俊. 强震作用下钢框架焊接节点损伤性能和计算模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
XIONG Jun. Research on the damage behavior and calculation model of welded connections in steel frames under earthquakes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.