

## 高分辨率星载 SAR 图像水上桥梁解译

张绍明<sup>\*①</sup> 何向晨<sup>②</sup> 张小虎<sup>①</sup> 孙义威<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(同济大学遥感与空间信息技术研究中心 上海 200092)

<sup>②</sup>(中国航天科工集团二十五所 北京 100854)

**摘要:** 该文提出一种高分辨率星载 SAR 图像水上桥梁解译方法。首先计算图像分类特征的纹理描述量, 包括 Gabor 滤波器响应、树形小波参数和灰度共生矩阵。然后利用支持向量机对图像进行分类, 将 SAR 图像分为低反射率区域、城市建筑区和植被覆盖区。在低反射率区域中, 利用目标的形状、拓扑关系和目标与背景的灰度分布完成桥梁兴趣区检测。最后利用雷达成像参数和多次回波模型计算桥梁的方向、长度、宽度、水面高度、桥体厚度和正射投影位置。利用 TerraSAR-X 图像进行的实验表明了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 纹理分析; 图像分类; 桥梁检测; 桥梁参数估计

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1706-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01341

## Auto-interpretation for Bridges over Water in High-resolution Space-borne SAR Imagery

Zhang Shao-ming<sup>①</sup> He Xiang-chen<sup>②</sup> Zhang Xiao-hu<sup>①</sup> Sun Yi-wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Research Center of Remote Sensing and Space Information Tongji University, Shanghai 200092, China)

<sup>②</sup>(25th Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

**Abstract:** An automatic method for detecting and interpreting bridges over water in high-resolution space-borne synthetic aperture radar imagery is proposed. Firstly, the textual features for image classification are computed, including response for Gabor filter, tree-structure wavelet coefficient and statistics of gray level co-occurrence matrix. Then the SAR imagery is classified to low-reflection area, vegetation covered area and built-up area using support vector machine classifier. By analyzing targets' space distribution, shape and gray characteristic in low-reflection area, the Regions Of Interested (ROI) are detected. For each ROI, five key parameters of bridge are estimated based on imaging model of radar, including direction, length over water, width, elevation over water, thickness of body and the real position for orthographic projection. Experiment with TerraSAR-X image indicates that the method is effective.

**Key words:** SAR; Textural analysis; Image classification; Bridge detection; Estimation of parameters for bridge

### 1 引言

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 图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, 如: 基于 SAR 图像的自然灾害情况评估和救灾路径选取、基于计算机视觉和目标识别的武器末制导等。针对星载 SAR 图像的桥梁自动解译主要包含两个问题: (1) 桥梁兴趣区自动检测; (2) 桥梁属性定量计算。

目前, 桥梁解译的研究大部分集中于第(1)个问题, 一般采用水体分割、兴趣区搜索、目标识别 3 个步骤组成的技术路线。如: 文献[1]中描述了一种多分辨率桥梁检测算法, 在下采样后的图像中提取水体, 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]中给出了一种基于图像分布模型进行水体提取, 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[4-7]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图像分割方法, 进而基于分割得到的水体目标完成桥梁检测。由于高分辨率星载 SAR 图像幅幅很大, 并且地物复杂, 需要更为稳健的低反射率目标提取方法。

对于第(2)个问题, 随着星载 SAR 传感器的图像分辨率不断提高(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。相对于第(1)个问题, 这方面的研究较少, 文献

[8]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[9]阐述了 InSAR 数据中的桥梁高度估计原理。文献[10]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，本文提出了一种利用图像分类方法确定水体区域，利用目标空间位置关系和兴趣区灰度模型检测桥梁，最后基于对雷达成像模型的解释完成桥梁参数估计的方法。在分类过程中，将 SAR 图像分为水体、建筑区和植被覆盖区 3 类，有效地减少了非水体目标和孤立小目标对桥梁兴趣区检测的影响。基于对多次反射回波模型的解释和各次回波目标的精确自动提取，完成桥梁参数估计，包括：桥梁方向、桥梁长度、桥面宽度、上桥面高度、桥体厚度和真实投影位置。

## 2 基于多尺度纹理特征和支持向量机的 SAR 图像分类

本文利用 Gabor 响应、树形小波参数统计量和灰度共生矩阵统计量来描述 SAR 图像多尺度纹理。

2 维 Gabor 基函数<sup>[11]</sup>具有方向和尺度选择性，是典型的带通滤波器。并且在  $\chi^2$  检测意义下，2 维 Gabor 基函数能够拟合哺乳动物视觉细胞的 2 维感知域模型。因此可以利用多通道 Gabor 滤波器组对图像纹理参数描述。为了纹理计算的方便，本文将 2 维 Gabor 基函数简化为如下形式：

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

式中  $T$  为尺度参数， $\lambda$  为长宽比， $x' = x \cos \theta + y \sin \theta$ ， $y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$ ， $\theta$  为方向角。图 1 给出了式(1)的实部、虚部和傅里叶变换幅度谱。

小波变换的塔式算法不适用于图像的纹理分

析，因为该方法关注图像的逼近成分，而对纹理能量集中的中频成分没有进行细分。文献[12]中提出的树形小波分解算法对图像的每个频率成分都进行分析，非常适合描述图像的纹理。文献[13]利用树形小波对 SAR 图像进行了分类研究，表明该方法对 SAR 图像中纹理分类是有效地。

灰度共生矩阵<sup>[14]</sup>是图像纹理描述的经典方法，文献[15]的研究表明灰度共生矩阵中的能量、非相似性、熵和均质性 4 个统计量对 SAR 图像纹理描述最为有效。

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 4 个方向，尺度为 3, 5, 9 和 15 的 Gabor 滤波器响应值，共 16 个系数；图像一次小波后的中频成分的低频和中频成分，共 6 个系数；灰度共生矩阵的 4 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 38 维特征进行主成分分析后，选择能量最高的 6 维作为图像分类的特征向量。

在图像纹理特性描述的基础上，本文利用支持向量机方法<sup>[16]</sup>构建图像分类器。支持向量机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，因此在本文中支持向量机方法完成 SAR 图像分类。图 2 给出了分类结果实例。图 2(a) 为杭州地区 TerraSAR 图像，斜距分辨率为 0.909 m。图 2(b) 为用本文方法进行分类的结果，黑色为低反射率区域、灰色为植被覆盖区、白色为城市建筑区。由该结果可以看到使用纹理分析和支持向量机方法能够有效地对 SAR 图像进行分类。

## 3 基于空间位置关系的桥梁兴趣区检测

SAR 图像分类结果包括 3 个部分：低反射率区

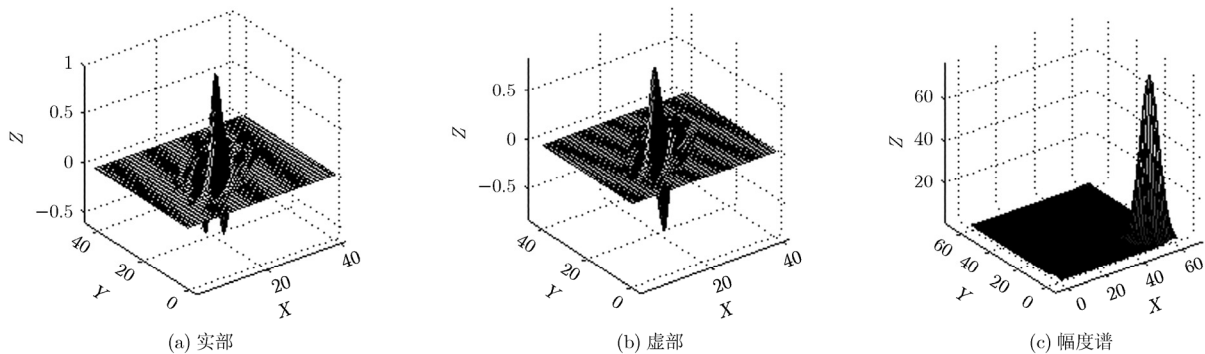


图 1 2 维 Gabor 基函数实部、虚部和傅里叶变换幅度谱

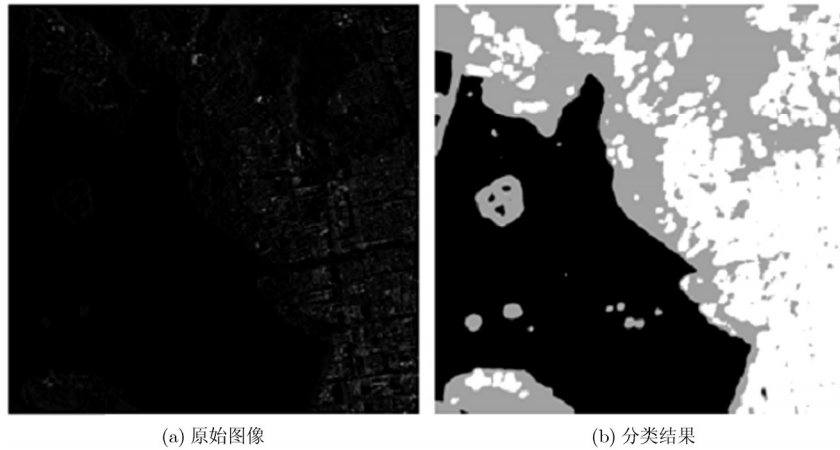


图 2 杭州西湖地区 TerraSAR 图像分类结果

域、植被覆盖区域和城市建筑区域。通过对低反射率区域目标及其空间关系进行分析可实现桥梁兴趣区的检测。水上桥梁横跨于河流之上，而在 SAR 图像中，被桥梁分割的河流表现为具有一定面积的连通低反射率区域。

在兴趣区搜索的过程中，首先在低反射区域分类结果中找到所有连通体，每个连通体作为一个目标。然后计算每个目标的面积，将孤立的小目标排除。

SAR 图像中的河流一般表现为带状目标，而其他低反射率区域如湖泊、水塘等则表现为面状目标。因此要对目标的形状进行分析，进一步排除面状目标的干扰。本文中对所有目标进行数学形态学细化，计算细化后的骨架长度作为目标形状的度量，保留骨架长度较大的目标作为候选兴趣目标。

如果面状目标当中存在岛屿等地物时，会在分类结果中出现空洞。这种空洞会破坏形态学细化的结果。本文中对每个目标中的空洞进行分析，如果空洞面积与目标面积的比值远小于 1，则将该空洞填补。图 3 给出了带有空洞的面状目标、空洞填补后的面状目标和带状目标的细化结果。由图 3 可以看到：带有空洞的面状目标细化结果具有闭环结构，对细化结果长度影响很大；正常的面状目标与带状

目标相比，其细化结果的距离要小的多。

对于检测得到的河流兴趣目标，通过目标边缘间的距离分析可最终确定桥梁兴趣区。如果兴趣区中确实为桥梁目标，则其两侧的部分应为水体。因此兴趣区像素灰度均值应远高于其两侧窗口的灰度均值，可利用这一特性进一步降低虚警率。图 4 给出了典型桥梁兴趣区及其两侧在 SAR 图像中的分布。

整个检测过程的计算过程如下：

(1)目标搜索，计算每个目标的面积，去除面积不满足条件的目标。

(2)检查目标内部结构，填补小的空洞，对目标进行数学形态学细化。

(3)计算目标细化结果的长度，保留长度满足阈值条件的目标，筛选条件为细化结果长度不小于目标周长的 1/3。

(4)对保留的目标，计算目标间的最小距离  $d_{min}$ ，并记录构成最小距离的像素点  $p_1$  和  $p_2$ 。

(5)如果  $d_{min}$  小于给定的阈值则检测与  $p_1$  和  $p_2$  的相邻的目标边缘点，将距离与  $d_{min}$  接近的像素都归为兴趣像素点，记录兴趣像素的最小包络矩形。

(6)在兴趣区两侧取与兴趣像素最小包络矩形相同的两个窗口，计算兴趣区灰度均值  $m_c$  和两侧窗口灰度均值  $m_1$  和  $m_2$ 。如果  $m_c$  远大于  $m_1$  和  $m_2$  则将该兴趣区判断为水上桥梁兴趣区。

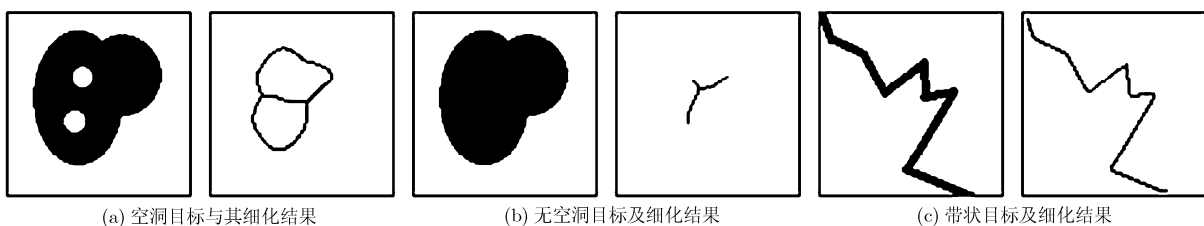


图 3 各类目标的细化结果比较

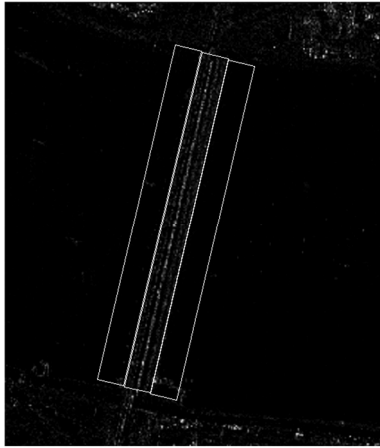


图4 桥梁兴趣区及两侧窗口

### 4 基于 SAR 成像几何参数的桥梁参数估计

在桥梁兴趣区确定之后，需要对桥梁的参数做进一步估计才能完成目标的最终解译。本文中对桥梁的方向、长度、宽度、上桥面高度、桥体厚度和真实投影位置进行精确估计。

#### 4.1 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，一座桥梁在 SAR 图像中表现为多个线性目标。图 5 给出了桥梁目标成像时的多次反射回波示意图。图 5 中，成像平台位于桥梁左侧， $B1_{left}$ ， $B1_{right}$ ， $B1_{bottom}$  分别为桥梁上桥面左边缘、右边缘和桥梁底部左边缘的雷达一次反射回波，即直接反射结果。 $B2$  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。 $B3$  为桥梁底部的三次反射回波，即雷达波达到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。 $Width$  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。 $H_{body}$ ， $H_{top}$  和  $H_{bottom}$  分别为桥体厚度、上桥面距水面高度和底部距水面高度。 $\alpha$  为雷达成像入射角。

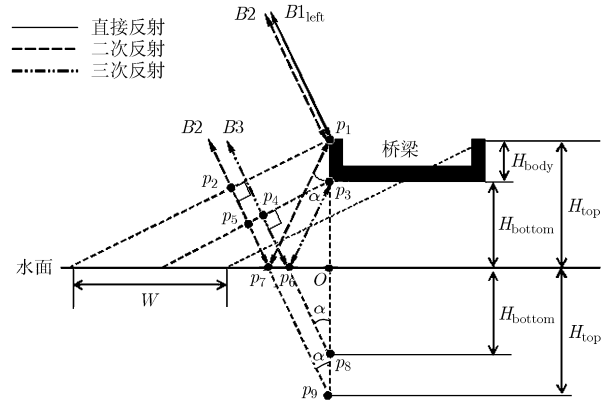
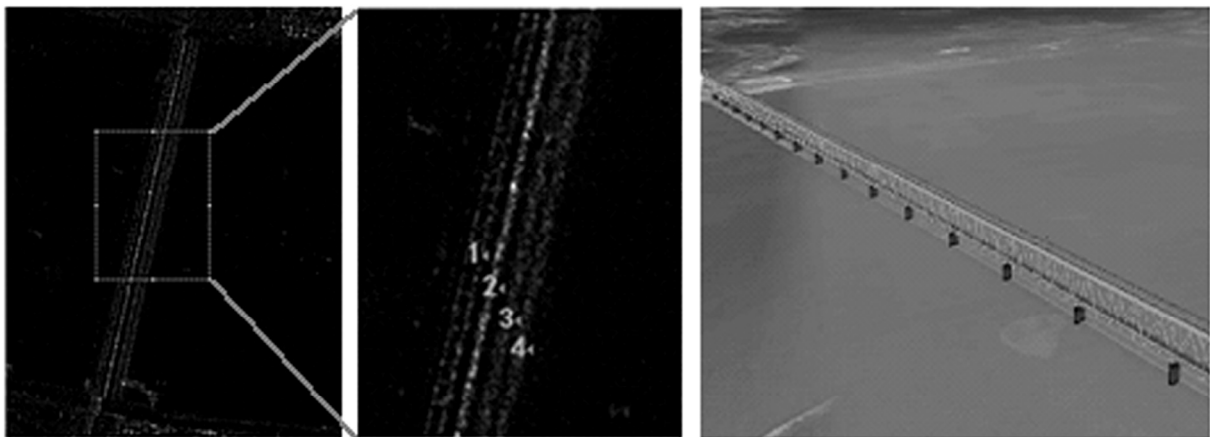


图5 桥梁方向与成像平台方位向平行情况下的多次反射回波示意图

图 6 给出了高分辨率星载 SAR 图像中的桥梁多次反射回波情况。图 6(a)为 TerraSAR 图像中的钱塘江大桥成像情况，卫星成像波段为 X 波段，斜距分辨率 0.909 m，卫星运动方向与大桥方向夹角小于  $30^\circ$ ；图 6(b)为图 6(a)的局部；图 6(c)为钱塘江大桥的 3 维示意图。从图 6(a)和图 6(b)中可以看到钱塘江大桥在图像中表现为 4 个平行的线性目标。图 6(b)中标号为 1 的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。图 6(b) 中的 1 号目标的两条边缘的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



(a) 钱塘江大桥图像

(b) 局部图

(c) 钱塘江大桥 3 维示意图

图6 钱塘江大桥 SAR 在图像中的成像情况

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3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5给出的多次回波模型和图6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5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 $D_{12}$ 为

$$D_{12} = (|p_7 - p_2| + |p_1 - p_7|)/2 \quad (2)$$

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7可知二次和三次反射目标的斜距差 $D_{23}$ 为



图7 拱形桥梁的成像结果

$$D_{23} = (|p_6 - p_4| + |p_3 - p_6|)/2 \quad (3)$$

由微波的反射和折射性质可推得

$$\left. \begin{aligned} |p_1 - p_7| &= |p_7 - p_9| \\ \angle p_7 p_9 O &= \angle p_7 p_1 O = \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

点 $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_9$ 构成直角三角形,并且其斜边的长度为 $2H_{\text{top}}$ ,  $D_{12}$ 可表示为

$$\begin{aligned} D_{12} &= (|p_2 - p_7| + |p_7 - p_9|)/2 \\ &= |p_1 - O| \cdot \cos \alpha = H_{\text{top}} \cos \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

同理可推得

$$\begin{aligned} D_{23} &= (|p_4 - p_6| + |p_6 - p_8|)/2 \\ &= |p_3 - O| \cdot \cos \alpha = H_{\text{bottom}} \cos \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

利用式(5)和式(6)能够计算桥梁的 $H_{\text{top}}$ ,  $H_{\text{bottom}}$ 和 $H_{\text{body}}$ 。

#### 4.2 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。本文中使用的首先确定桥梁方向,进而计算桥梁方向上直线像素灰度累加值确定各个目标空间位置的方法。

本文利用二次反射回波目标作为桥梁方向估计的依据。由图5和图6可知桥梁的真实投影位置为二次反射回波所形成的目标,其亮度明显高于其他目标,有利于检测。并且,拱形桥梁则非二次反射的目标为弧形,不能用于方向判断。典型的拱形桥梁成像情况如图7所示,该图像为杭州钱塘江上的高速公路桥,图像为TerraSAR星载SAR图像,斜距分辨率0.909 m。图中共有3个目标,从左至右分别为一次、二次和三次反射目标。可以看到只有二次反射目标能够保持直线形,因为根据折射原理,所有二次反射回波的斜距相等,该目标反映桥梁的正射投影位置。而其他目标根据距离成像原理都表现为弧形。因此选择二次反射回波检测桥梁方向是合理的。

本文在桥梁兴趣区中沿雷达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8所示。图8(a)中的两条水平方向白色线为图像第30行和第40行,另外一条白色线为方向直线拟合结果;图8(b)为第30行的灰度分布,图8(c)为第40行像素灰度分布。图8(b)和图8(c)中最大值都对应二次回波反射目标。

获取桥梁的方向拟合直线后,在整个兴趣区内,计算桥梁方向的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8(a)所在的兴趣区的能量分布曲线如图9所示。图9中最大的5个极大值从左到右记为{peak1, peak2, peak3, peak4, peak5},各极大值的意义如下:

- (1) peak1为上桥面左边缘的一次反射回波成像结果。
- (2) peak2为上桥面右边缘的一次反射回波成像结果。
- (3) peak3为桥梁桥体左侧二次反射回波成像结果。

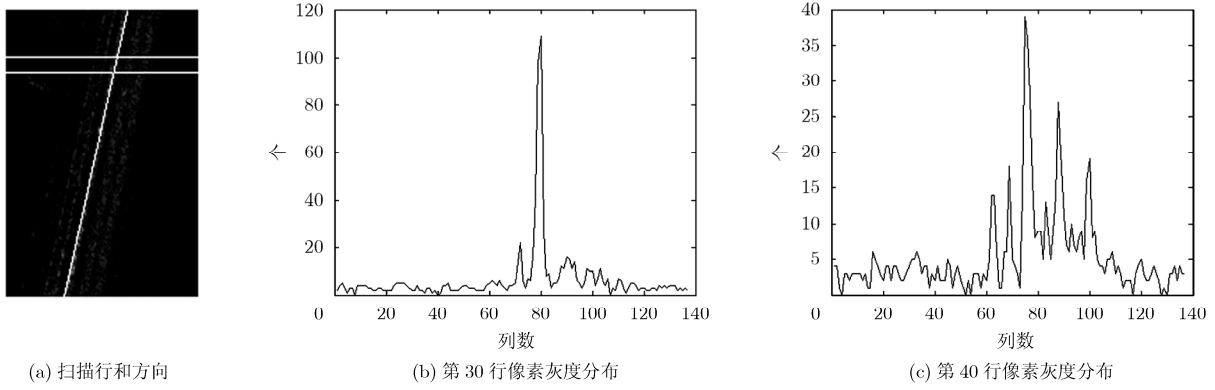


图8 桥梁方向直线拟合示意图

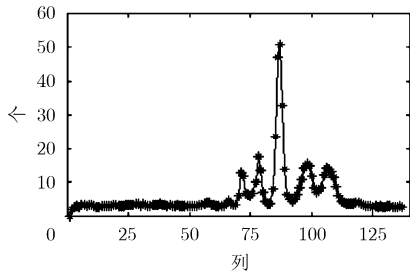


图9 兴趣区中桥梁方向所有直线的能量分布图

(4) peak4 为桥梁底部三次反射回波成像结果。

(5) peak5 为桥梁底部高次反射回波成像结果。

计算 peak1 和 peak2 的间距  $dist_{12}$ , peak1 和 peak3 的间距  $dist_{13}$ , peak3 和 peak4 的间距  $dist_{34}$ 。设桥梁方向拟合直线  $L$  的方程为  $y = a_0x + b_0$ , 图像参数如表 1 所示。则斜距 SAR 图像桥梁参数可按照表 2 所示的公式和方法进行计算。

### 5 实验结果与结论

本文使用杭州地区 TerraSAR 斜距图像进行了实验, 实验图像大小为  $17408 \times 29894$  像素; 图像最小入射角为  $27.188^\circ$ ; 斜距分辨率为  $0.9094\text{ m}$ ; 成像高度为  $513800\text{ m}$ 。检测图像的缩略图和检测结果如图 10 所示。图 10(a)为待检测图像, 图 10(b)为检测结果, 图中白色框为桥梁所在区域。图 10(c)为钱塘江大桥的检测结果放大显示, 图中接近垂直方向的白色轮廓线为所有兴趣像素点, 接近水平方向的白色断线为最小距离点连线。图 10(d)是钱塘江大桥为中心的  $1600 \times 1600$  大小的局部窗口。图 10(e)为图 10(d)对应的图像分类结果。使用本文方法进行检测, 共检测到主要水上桥梁 10 座, 漏检桥梁 2 个, 虚警 1 个。对图 10(c)所示的钱塘江大桥进行的参数估计结果如表 3 所示。钱塘江大桥为铁路公路两用桥, 上桥面为公路, 车道宽度为  $6\text{ m}$ , 两侧人行道宽度各为  $1.5\text{ m}$ , 及桥梁宽度约为  $9$  到  $10\text{ m}$ 。大桥通航高度为  $13\text{ m}$ , 及下桥面高度约为  $13\text{ m}$ 。大桥

表 1 图像参数

参数	符号
斜距分辨率	$Rsl$
卫星成像高度	$H_{Sat}$
图像最小斜距像素入射角	$\theta_{Min}$
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	$\theta_0$

表 2 桥梁参数计算方法和公式

参数	符号	计算公式
桥梁与雷达距离向的夹角	$A_{dir}$	$A_{dir} = \arctan a_0$
桥梁宽度	$W$	$W = dist_{12} \cdot Rsl / \sin \theta_0 \cdot \sin A_{dir}$
兴趣区入射角余弦值	$\cos \theta_0$	$\cos \theta_0 = H_{Sat} / (H_{Sat} / \theta_{Min} + X \cdot Rsl)$
上桥面距水面高度	$H_{top}$	$H_{top} = dist_{13} \cdot Rsl / \cos \theta_0$
下桥面距水面高度	$H_{bottom}$	$H_{bottom} = dist_{34} \cdot Rsl / \cos \theta_0$
桥体厚度	$H_{body}$	$H_{body} = H_{top} - H_{bottom}$
桥梁跨越水面长度	$L$	直线 $L$ 与兴趣区最小包围矩形的两个交点的间距

下层为火车通道, 一般火车车厢高度为  $3.8\text{ m}$ , 即上桥面高度约为  $17\text{ m}$ 。解译结果与实际情况具有较好的一致性。

实验结果表明基于高分辨率星载 SAR 图像对水上桥梁目标继续精确解译是可行的。本文提出的先对图像进行分类, 然后在低反射率区域中利用目标位置关系和目标灰度分布特性进行兴趣区检测的方法是可靠的。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。

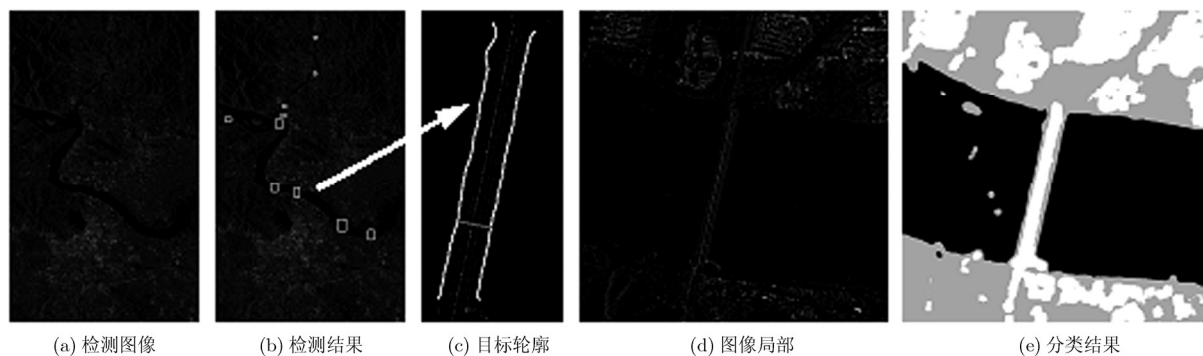


图10 桥梁检测实验数据

表3 钱塘江大桥解译结果

属性	方向夹角( $^{\circ}$ )	长度(m)	宽度(m)	上桥面高(m)	下桥面高(m)	厚度(m)
结果	76.92	872.28	10.51	16.98	12.74	4.24

### 参考文献

- [1] Yin Dong, Miao Yu-qing, and Li Gui-qin, *et al.* Multi-scale feature analysis method for bridge recognition in SAR images. *Proceedings of IEEE First Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan*, 2007: 517-520.
- [2] Pei De-li, Sun Fu-chun, and Wang Hong-qiao, *et al.* Model based bridge recognition in high resolution SAR image. *Proceedings of SPIE Sixth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition*. Yichang, 2009, 7495: 211-218.
- [3] Wu Wen-yu, Yin Dong, and Zhang Rong, *et al.* Bridge recognition of median-resolution SAR images using pun histogram entropy. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(7): 572-575.
- [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. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(7): 888-891.
- [5] Yu Da-yang, Zhou Lu, and Yang Jian. Highway bridge detection based on polarimetric SAR data. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(7): 888-891.
- [6] 戴光照, 张荣. 高分辨率SAR图像中的桥梁识别方法研究. *遥感学报*, 2007, 11(2): 177-184.
- [7] Dai Guang-zhao and Zhang Rong. A study of bridge recognition in high resolution SAR images. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 177-184.
- [8] Wang Wen-guang, Sun Jin-ping, and Hu Rui, *et al.* Knowledge-based bridge detection from SAR image. *Journal of System Engineering and Electronics*, 2009, 20(5): 929-936.
- [9] 王子路, 李智勇, 粟毅. 利用规则化热扩散方程的SAR图像桥梁检测. *现代雷达*, 2009, 31(1): 46-49.
- [10] Wang Zi-lu, Li Zhi-yong, and Su Yi. SAR image bridge detection using regularized heat diffusion equation. *Modern Radar*, 2009, 31(1): 46-49.
- [11] Robalo J and Lichtenegger J. ERS-SAR images a bridge. *Earth Observation Quarterly, ESA Technical Report*, 1999: 7-10.
- [12] Uwe S, Erich C, and Hermann G, *et al.* Bridge detection in multi-aspect high-resolution Interferometric SAR data. *Proceedings of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden 2006, CDROM*, 4 pages.
- [13] Wang Hai-peng, Xu Feng, and Jin Ya-qiu, *et al.* Estimation of bridge height over water from polarimetric SAR image data using mapping and projection algorithm and de-orientation theory. *IEICE Transactions on Communications*, 2009, E92-B(12): 3875-3882.
- [14] Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, 1946, 93(26): 429-457.
- [15] Chang Tian-hong and Kuo C C J. Texture analysis and classification with tree-structured wavelet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 2(4): 429-441.
- [16] 程明跃, 叶勤, 张绍明等. 基于模糊加权SVM的SAR图像水体自动检测. *计算机工程*, 2009, 35(2): 219-221.
- [17] Cheng Ming-yue, Ye Qin, and Zhang Shao-ming. Water automatic detection from SAR image based on fuzzy weighted SVM. *Computer Engineering*, 2009, 35(2): 219-221.
- [18] Haralick R B and Shanmugam K, *et al.* Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, 3(6): 610-621.
- [19] Baraldi A and Parmiggiani F. An investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 293-304.
- [20] Cortes C and Vapnik V. Support vector networks. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.

张绍明: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为SAR图像处理和模式识别、嵌入式程序设计。

何向晨: 男, 1975年生, 高级工程师, 研究方向为SAR图像处理和模式识别。

张小虎: 男, 1986年生, 硕士, 研究方向为图像处理、模式识别、GPU架构与计算。

孙义威: 男, 1989年生, 本科生, 研究方向为遥感图像处理。