

# 高分辨率 SAR 图像桥梁自动提取算法

赵冠雄<sup>1,2</sup>, 沈 汀<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像中桥梁的特征, 提出一种基于高分辨率 SAR 图像的桥梁自动提取算法。利用改进的 Otsu 阈值法将图像二值化, 针对面积属性, 利用连通域标记法和 Otsu 算法思想自适应地剔除非河流区域; 通过提取河流主干线与河流边界的交点初步锁定桥梁的位置与搜索区域; 利用边界集合间最小距离法提取出桥梁边界集合, 通过最小二乘法拟合出桥梁两侧的边界直线。对真实的 SAR 图像进行处理并取得了良好的提取效果。

**关键词:** 合成孔径雷达; 最大类间方差; 图像分割; 桥梁提取; 模式识别

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2014) 08-2793-05

## Automatic bridge extraction algorithm from high-resolution SAR image

ZHAO Guan-xiong<sup>1,2</sup>, SHEN Ting<sup>1</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A bridge extraction method from high resolution SAR (synthetic aperture radar) images was presented. Firstly, the improved Otsu thresh method was employed to segment the image to a binary image with the river and the background. Secondly, the connected domain notation method was used to mark the connected regions and to compute their area, and then the Otsu idea was applied to the area property instead of the grayscale so as to reject the false alarm area automatically. Thirdly, the bridge location was confirmed by extracting the river trunk and boundary. Finally, the bridge edge was extracted using the min-distance of the river boundary, and two straight lines of the bridge boundary were fitted using least square estimation. Experimental results on obtained real SAR images confirm the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** SAR; Otsu; image segmentation; bridge extraction; pattern recognition

## 0 引 言

目前合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像桥梁提取算法已经有一些优秀的成果。如: Lv 等<sup>[1]</sup>提出一种用模糊支持向量机对图像进行分类, 再对所有分类的区块构建距离空间, 通过在距离空间中设定阈值来定位桥梁。Zhang 等<sup>[2]</sup>人出了一种结合多尺度分解和区域分析的方法提取桥梁。Guiting Wang 等<sup>[3]</sup>基于孔隙率并利用 Canny 算子边缘修补算法来提取河流边界, 再利用河流与桥梁的空间关系提取出桥梁。Han 等<sup>[4]</sup>首先利用纹理分析将河流分割出来, 再根据桥梁形状和位置的先验知识将桥梁检测出来。Luo 等<sup>[5]</sup>基于高斯马尔科夫法随机场模型支持向量机分类方法对河流进行提取, 再在处理后的图像中提取桥梁主干。需要指出的是, 大部分算法都需要人为的干预性或者阶段性的中断处理, 如样本区的训练、面积阈值

的选取等, 不能保证算法的自动化提取, 因此, 不能满足批量处理的要求。本文提取算法在灰度阈值和面积阈值方面都做了改进, 并做到根据不同图像自动化处理, 在桥梁提取阶段缩小了搜索区域, 减少了计算的复杂度, 更符合实际工程化需求。

## 1 高分辨率 SAR 图像中的桥梁特征

桥梁的灰度特征。桥梁一般由钢筋水泥构成, 介电常数较高, 加上垂直于桥梁入射会形成二面角反射, 这些都会导致桥梁的后向散射增强, 使其灰度值在 SAR 图像中呈现接近于白色的高亮度特征。

桥梁的空间几何特征。桥梁多位于河流之上, 并将河流分割成不连续的片段, 桥梁两侧呈现出 2 条平行的直线并与河流主干线垂直, 两端多连接陆上交通, 两侧则是水体。

收稿日期: 2013-10-15; 修订日期: 2013-12-20

作者简介: 赵冠雄 (1988-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 研究方向为 SAR 图像处理; 沈汀 (1965-), 男, 北京人, 正高级工程师, 研究方向为机载稳定平台技术、通信与信息系统、信号与信息处理。E-mail: herozgx@126.com

由于 SAR 图像中地物种类繁多, 不同地物的灰度值范围会有交叉, 仅仅通过单一的灰度特征是无法将桥梁或河流提取出来的。因此本文采用灰度特征与空间几何特征相结合的方法提取河流与桥梁。

## 2 技术流程

针对桥梁在 SAR 图像中的灰度特征和空间几何特征, 本文的桥梁提取方法分为以下步骤: ① SAR 图像预处理; ② 河流分割; ③ 河流边界及主干线的提取; ④ 搜索区域的确定; ⑤ 桥梁边界集合的提取; ⑥ 桥梁边界拟合。算法流程如图 1 所示。

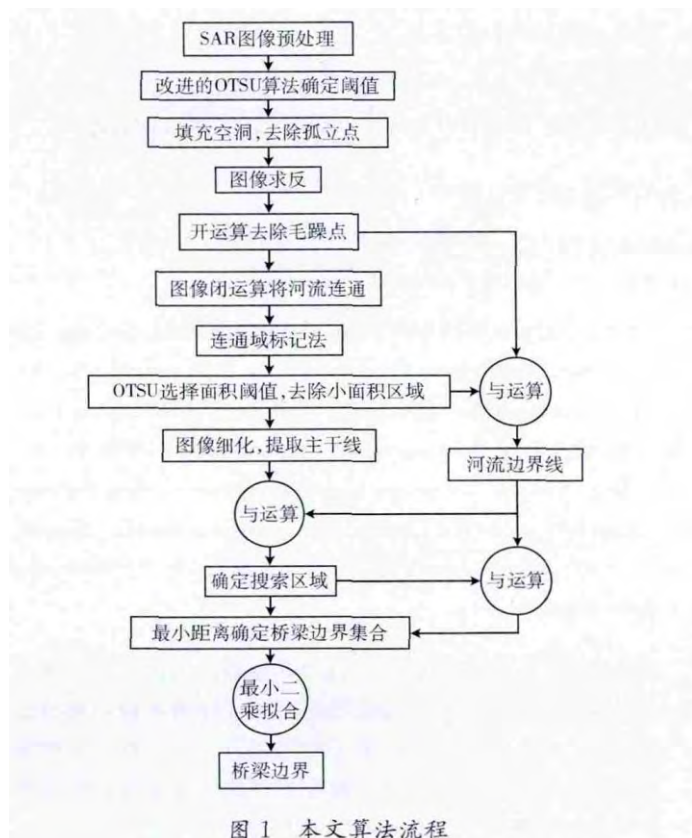


图 1 本文算法流程

### 2.1 图像预处理

图像分割是整个桥梁提取过程的基础, 而 SAR 图像的斑点噪声对分割效果有明显的干扰作用, 分割前要对图像进行预处理。兼顾算法效率和准确度的情况下, 本文采用了中值滤波进行去噪, 取得了较好的效果和执行效率。为了得到更好的分割效果, 采用直方图均衡化处理来增强图像的对比度。

### 2.2 提取河流

根据桥梁是建立在河流之上的这一先验知识, 提取桥梁的第 1 步是先把河流分割出来。由于在 SAR 图像的成像过程中, 水体的后向散射系数很低, 导致水体在 SAR 图像中表现为接近黑色的低灰度区域, 根据水体的这一特征可

以进行图像分割处理。目前的图像分割方法有阈值分割, 区域分割, 面向对象的分割方法, 还有一些利用图像的纹理特征, 梯度特征等的分割方法, 如 ZHANG<sup>[6]</sup> 基于梯度特征和费舍尔准则对图像进行分割, 张绍明<sup>[7]</sup> 等利用图像的纹理特征进行图像的分割。

#### 2.2.1 改进的 Otsu 阈值

为了满足自动化提取的要求, 本文针对水体在 SAR 图像中的特征, 采用改进的 Otsu (最大类间方差) 阈值分割方法, 可以根据不同的图像自适应地选取分割阈值。

Otsu 算法也称最大类间方差法, 是一种自适应的阈值选取方法, 它根据图像的灰度特性, 将图像分成目标和背景 2 类。目标和背景之间的类间方差越大, 就说明分割出的 2 部分的差别越大, 因此, 取使目标与背景的方差最大时的灰度值作为分割阈值。许向阳<sup>[8]</sup> 用理论推导表明了 Otsu 算法得到的最佳阈值是以该阈值分割出的 2 类的均值的平均值。表明对于目标和背景类内方差差别较大的图像来说, Otsu 阈值将偏向方差较大的一类。

如图 2 所示, 根据河流在 SAR 图像中的灰度特征, 可以知道河流的灰度值多集中在灰度直方图中灰度较低的狭窄区域, 那么造成 Otsu 阈值会偏向于类内方差较大的背景区域 (如图 2 中灰度值 93 处), 使许多非河流区域被错分到水域来, 造成大量虚警。

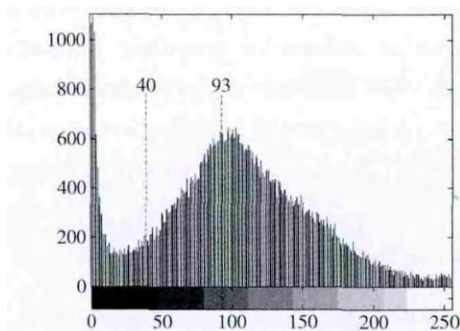


图 2 Otsu 算法的阈值

方庆<sup>[9]</sup> 对 Otsu 阈值做了一种简单的处理, 它使 Otsu 算法得到的阈值  $T$  缩小一倍后再减去一个平移参数  $K$  得到最终的阈值, 如下所示

$$T' = \frac{T}{2} - K \quad (1)$$

但是, 这个平移参数  $K$  的选取人为因素较大, 针对不同图像自适应性较低。许向阳<sup>[8]</sup> 提出了一种限定灰度范围的 Otsu 方法。设用 Otsu 方法找出的阈值为  $T$ 。将灰度值大于  $T$  的像素分到背景中。对于灰度级在  $[0, T]$  的像素, 再次使用 Otsu 准则求出分割阈值  $T'$  作为最终的分割阈值。该方法能较好地提取出方差较小的目标, 并且没有人为选取因素的影响, 做到了针对不同图像的自适应选取。例如, 对原始图像  $f(x, y)$  进行分割, 记  $g(x, y)$  为分

割后的二值图像, 则分割结果如下所示

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > T' \\ 0 & f(x, y) \leq T' \end{cases} \quad (2)$$

通过河流在 SAR 图像直方图中的表现, 发现这种方法很适用来分割水体, 因此, 本文将这种用 2 次 Otsu 算法得到的灰度值  $T'$  作为分割阈值来初步分割水体, 得到的二值图像如图 3 (b) 所示。

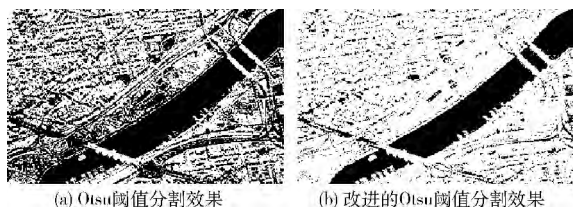


图 3 图像阈值分割效果

### 2.2.2 形态学处理

2.2.1 节得到的灰度阈值可以初步地分割出河流, 但是仅灰度特征无法将河流与其他地物区完全分开, 例如 SAR 图像中的阴影区域, 它们的灰度特征与河流极其相似, 无法通过灰度特征将其区分开。

本文使用连通区块的面积特征来进一步处理。初步分割的结果是河流呈现大片的连续区域, 而阴影等干扰信息则是琐碎的小块区域。首先用形态学的开运算去除毛糙点, 并将相邻很近的小碎块连通起来。然后通过面积阈值将河流与小区块区分开。面积阈值的选取是个难点, 这里既要保证自动化的选取要求, 又要保证剔除干扰的准确性, 由于河流中也可能存在较小的区域, 如图 3 (b) 右上方的 2 条桥梁间的河流面积就比较小, 很容易和阴影区域面积相混淆。为此, 本文首先利用形态学的腐蚀膨胀算法将河流连通起来, 使整条河流作为一个整体, 而非单独的片段。这一步是很有必要的: 一是去除了孤立的极小干扰, 如几个像素大小的干扰区域; 二是在面积维度上最大程度地区分了干扰信息和河流信息; 三是为后续提取河流的主干线做准备。

### 2.2.3 连通域标记

为了计算河流和干扰信息的面积, 首先要将各个连通区域标记起来, 再统计它们的面积和坐标信息。在二值图像中, 2 个像素连通是指它们相邻且灰度值相等。2 个像素相邻叫做邻接, 邻接性一般有 2 种: 4 邻接和 8 邻接 (如图 4 所示), 由此得到连通性也有 2 种: 4 连通和 8 连通。设一个坐标为  $(x, y)$  的像素  $p$  有 2 个水平和垂直的相邻像素, 他们的坐标分别是  $(x+1, y)$ ,  $(x-1, y)$ ,  $(x, y+1)$  和  $(x, y-1)$ 。若  $q \in N_4(p)$ , 则  $p$  和  $q$  称为 4 邻接, 同样  $q \in N_8(p)$ , 则  $p$  和  $q$  称为 8 邻接。连通域标记法就是在此基础上, 将各个连通区域标识为唯一的 ID 值。

对于任意前景像素  $p$ , 与其相连的所有前景像素的集合称为包含  $p$  的连接分量。采用 4 邻接的称为 4 连接分量,

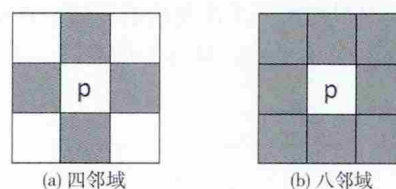


图 4 连通域标记

采用 8 邻接的称为 8 连接分量。

本文通过连通域标记法对分割后的图像进行连通域标记, 分别统计出它们各自的面积。

### 2.2.4 自适应选取面积阈值

通过连通域标记法将图像中的前景色标记为各个独立的连接分量并计算它们的面积。对这些面积进行 Otsu 分析, 得到一个面积阈值, 通过该面积阈值剔除小的连通域。实现了面积阈值选取的自动化。得到的图像与 2.2.2 节闭运算处理后的图像做“逻辑与”运算得到如图 5 所示的河流区域。



图 5 河流分割效果

### 2.3 河流主干线和边界的提取

对连通后的整条河流作形态学的图像细化运算, 将河流减小为单个像素宽的线。细化操作的每次应用都会从二值图像物体的厚度中删除 1 个或 2 个像素, 重复执行细化操作直到图像停止变化为止。最终得到河流的主干线, 如图 6 (a) 所示。

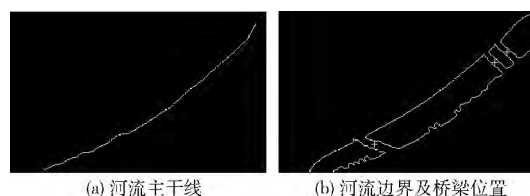


图 6 河流主干线及桥梁位置

对图 5 做边缘检测, 得到河流边界线并与河流主干线做图像的逻辑与运算得到若干交点, 根据交点间的距离信息对交点进行配对儿处理, 通过每对儿交点的中点即可确定桥梁的中心位置。如图 6 (b) 所示为河流边界线和得到的桥梁中心点位置。

### 2.4 定位桥梁位置并确定搜索区域

河流主干线和河流边界的交点即为桥梁所在的点, 通



过这 2 个交点可以确定一个矩形搜索区域, 首先计算出过这 2 点的直线及其中垂线, 通过平移得到一个搜索区域, 如图 7 所示。

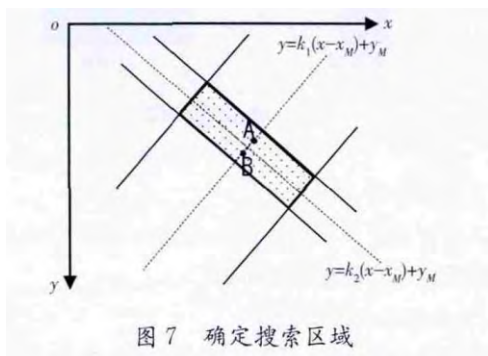


图 7 确定搜索区域

图 7 中通过交点  $A(x_a, y_a)$ ,  $B(x_b, y_b)$  分别确定了 2 条直线, 一条过  $A, B$  的直线和一条中垂线, 它们的斜率分别记为  $k_1$  和  $k_2$ , 则得到的直线分别为

$$\begin{aligned} y &= k_1(x - x_M) + y_M \\ y &= k_2(x - x_M) + y_M \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $(x_M, y_M)$  ——  $A, B$  的中点, 并且

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(y_A - y_B)}{(x_A - x_B)} \\ k_2 &= \frac{-(x_A - x_B)}{(y_A - y_B)} \end{aligned} \quad (4)$$

对这 2 条直线分别进行左右或上下平移, 得到一个闭合区域, 即为桥梁的搜索区域, 若交点距离为  $d$ , 则矩形的宽设置为  $3d$ , 矩形的长设置为  $10d$ , 如图 8 所示为得到的搜索区域。



图 8 搜索区域

## 2.5 集合间最小距离法提取桥梁

### 2.5.1 计算最小距离

在桥梁的邻域内, 河流的边界间以接近于最小距离的宽度呈现出 2 条近似平行的直线。首先提取河流的主干线, 它与河流边界的交点附近可以确定边界集合对儿, 从而缩小了搜索区域, 同时解决了如何使河流边界间两两配对儿的问题。

在搜索区域内确定 2 个边界集合, 记为  $S_A$  和  $S_B$ , 定义  $dist(A, B)$  为集合  $A, B$  的距离, 则集合间的最小距离如下所示

$$d_{\min} = \text{Min}(dist(S_A, S_B)) \quad (5)$$

然后根据集合间最小距离法, 计算桥梁边界集合  $S_a$  和

$S_b$ , 即  $S_A$  和  $S_B$  集合间距离与其最小距离相接近的边界点的集合, 如下所示

$$\begin{aligned} S_a &= \{p \mid dist(p, S_B) \leq d_{\min} + \lambda, p \in S_A\} \\ S_b &= \{p \mid dist(q, S_A) \leq d_{\min} + \lambda, q \in S_B\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$ ——距离容差, 一般取 1~3 个像素。

### 2.5.2 最小二乘法拟合出桥梁边界线

由 2.5.1 节中通过边界间最小距离得到了桥梁两侧的边界点集合  $S_a$  和  $S_b$ , 我们可以通过对集合  $S_a$  和  $S_b$  做最小二乘线性拟合, 得到桥梁的边界直线。最小二乘拟合即通过“最小化误差的平方和”来寻找数据的最佳函数匹配, 式 (7) 为最小二乘的公式化描述。

$$\min_x \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \quad (7)$$

在本应用中要拟合的是直线, 所以我们取直线方程如下所示

$$y = a_1 x + a_2 \quad (8)$$

$$\min \left\| \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \right\|_2 = \min_a \|Xa - Y\|_2 \quad (9)$$

在数值计算领域, 我们通常计算  $\min \|Ax - b\|$  的方法是对  $A$  进行 QR 分解  $A = QR$ , 解出其中的  $x$ 。在式 (9) 中我们用该方法解出其中的  $a_1$  和  $a_2$ , 从而得到所求的拟合直线方程。

## 3 实验结果

本文使用 Sandia 实验室的真实 SAR 图像作为实验用图, 如图 9 (a) 所示, 分辨率为  $1m \times 1m$ 。桥梁边界点集合提取效果如图 9 (b)、图 10 所示, 桥梁边界直线的拟合结果如图 11 所示。图中可以看出, 本论文所提出的算法可以较好的提取出桥梁边界, 并且整个过程是自动化完成的, 无需人工干预。

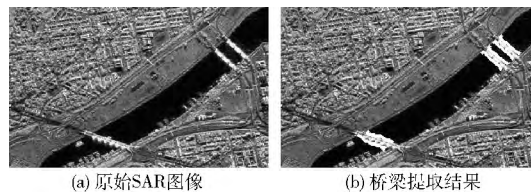


图 9 原始 SAR 图像与桥梁提取结果

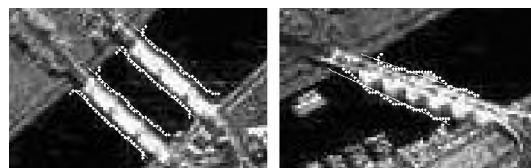


图 10 提取结果细节展示



图 11 桥梁边界直线拟合结果

#### 4 结束语

论文针对高分辨率 SAR 图像中桥梁的灰度特征和空间几何特征, 提出了一种高分辨率 SAR 图像桥梁自动提取算法, 该算法的优点: ①该算法在灰度阈值和面积阈值 2 方面保证了算法的自动化; 连通的河流保证了剔除阴影干扰的准确性; ②该算法通过提取河流主干线, 缩小了搜索区域, 提高了算法执行效率; ③同时在主干线区域内搜索增强了算法的鲁棒性, 即使一些非河流区块存在也不影响最终的提取效果; 但是该算法也存在一些局限性, 比如该算法仅适用于高分辨率影像, 并没有对不同分辨率做特殊处理, 一种解决办法可以参考戴光照<sup>[10]</sup>采用的中值图像抽取算法, 通过抽取比例来自适应图像分辨率。总体来将, 对与高分辨率 SAR 图像桥梁的提取, 该算法可以取得较好的效果, 针对不足之处, 将在后续工作中改进。

#### 参考文献:

- [1] Lv Wentao, Yu Wenxian, Wang Junfeng, et al. Automatic bridge detection in SAR images based on fuzzy support vector machine and distance space [C] //Chengdu: IEEE CIE International Conference on Radar (Radar), 2011: 1847-1849.
- [2] Zhang Xiongmei, Song Jianshe, Yi Zhaoxiang, et al. Extraction and recognition of bridges over water in high resolution SAR image [J]. Advances in Multimedia, Software Engineering and Computing, 2012, 128: 19-24.
- [3] Wang Guiting, Huang Shan, Jiao Licheng. An automatic bridge detection technique for high resolution SAR images [C] //2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2009: 498-501.
- [4] Han Yu, Zheng Hong, Cao Qiong, et al. An effective method for bridge detection from satellite imagery [C] //2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007: 2753-2757.
- [5] Luo J, Ming D, Liu W, et al. Extraction of bridges over water from IKONOS panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28 (16): 3633-3648.
- [6] ZHANG Liping, HE Jinqi, Dai Hongliang, et al. A study of automation recognition of bridge in SAR image [C] //International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010: 391-394.
- [7] ZHANG Shaoming, HE Xiangchen, ZHANG Xiaohu, et al. Auto-interpretation for bridges over water in high-resolution spaceborne SAR imagery [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33 (7): 1706-1712 (in Chinese). [张绍明, 何向晨, 张小虎, 等. 高分辨率星载 SAR 图像水上桥梁解译 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33 (7): 1706-1712.]
- [8] XU Xiangyang, SONG Enmin, JIN Lianghai. Characteristic analysis of threshold based on Otsu criterion [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37 (12): 2716-2719 (in Chinese). [许向阳, 宋恩民, 金良海. Otsu 准则的阈值性质分析 [J]. 电子学报, 2009, 37 (12): 2716-2719.]
- [9] FANG Qing, ZHANG Shunsheng, DUAN Chang. Dilation and erosion operation based bridge detection in SAR image [J]. Fire Control Radar Technology, 2011, 40 (3): 37-41 (in Chinese). [方庆, 张顺生, 段昶. 基于腐蚀和膨胀运算的 SAR 图像桥梁目标检测方法 [J]. 火控雷达技术, 2011, 40 (3): 37-41.]
- [10] DAI Guangzhao, ZHANG Rong. A study of bridge recognition in high resolution SAR images [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11 (2): 177-184 (in Chinese). [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): 177-184.]