

SAR 图像不确定轮廓相似度及其可信度构建方法

项德良* 陈天泽 粟毅

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: SAR 图像相似度准则是目标识别、图像匹配等研究内容的基础, 定义合理可靠的相似度将极大地提高 SAR 图像解译能力。该文针对 SAR 图像轮廓特点, 提出一种基于不确定轮廓的相似度置信区间及其可信度构建方法。首先将 SAR 图像不确定轮廓模糊化得到相似度定义, 进而通过分析模糊模型分布函数, 在给定显著性水平下得到相似度置信区间, 并给出可信度定义。实验结果表明, 该方法对轮廓定位有一定容错性, 对一定程度的断裂轮廓及多边缘轮廓也能得到合理的相似度范围和可信度, 符合人眼视觉感知。

关键词: SAR 图像; 不确定轮廓; 相似度; 置信区间; 可信度

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1356-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01129

Construction of Similarity Measure and Its Credibility of Uncertain Contours in SAR Images

Xiang De-liang Chen Tian-ze Su Yi

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

Abstract: The similarity measures between SAR images are the basis for target recognition, classification, image registration and so on. The interpretation of SAR images can be improved obviously by defining reasonable and reliably similarity measure. In this paper, a confidence interval of similarity and the method of constructing credibility are proposed based on the characteristics of image contours. Firstly, the similarity measure is obtained by fuzzifying the uncertain contours in SAR images. Then, the confidence interval of the measure as well as the definition of credibility at a given confidence level are got by analyzing the distribution function of fuzzy model. The experimental results demonstrate that the proposed similarity measure between a given pair of images is robust to the location of image contours. Besides, it can also provide reasonable similarity with credibility of the fractured and multi-edged contours, which has not been presented by other methods. Moreover, it is consistent with human visual perception.

Key words: SAR images; Uncertain contours; Similarity; Confidence interval; Credibility

1 引言

SAR 图像相似度旨在衡量两幅 SAR 图像之间的相似程度, 其不仅在仿真图像质量评估、目标识别、变化检测、图像配准等领域有非常重要的作用^[1,2], 同时对 SAR 成像数据筛选也很有意义。对于以人眼为最终信宿的图像来说, 合理的相似度应充分遵循人眼的视觉特性。由于人眼的视觉模糊性特点, 相似度准则对成像的断裂、变形、扭曲、缺失、伸展应该有一定容错性^[3]。

就图像相似度而言, 已有的研究主要基于图像灰度以及几何特征^[4-7]来定义相似度。由于 SAR 图像相干斑噪声导致基于灰度定义相似度并不能满足

视觉和分类识别需求, 所以其相似度一般针对图像特征来构建。轮廓表征了目标的局部空间结构信息, 如车辆目标边缘、坦克炮筒突起、阴影轮廓等^[8-10]。然而在 SAR 成像过程中存在很多不确定性, 如相干斑噪声导致图像产生很多断裂和虚假散射, 强散射的旁瓣对弱散射特征的遮掩, 以及旁瓣对边缘特征的干扰等都会造成 SAR 图像提取的多是一些断裂、多边缘等不确定轮廓。基于这些不确定轮廓定义相似度并分析其可信度具有更大的现实意义。

目前基于 SAR 图像轮廓定义相似度的研究均是以连续光滑等理想轮廓为基础, 利用边缘描述子来定义相似度^[9,11], 如傅里叶描述、链码描述等。这些方式对提取的轮廓质量要求比较高, 并且一般都会用形态学处理^[11], 这会影响轮廓定位精度, 从而影响相似度准则的可信性。另外由于人眼视觉上的

2011-10-31 收到, 2012-03-05 改回

国家自然科学基金(61002023)资助课题

*通信作者: 项德良 xiangdeliang@126.com

主观性，图像相似性仅用一个相似度值也不合理^[12]。目前很少有文献用相似度区间来衡量不确定轮廓相似性并给出可信度。针对上述背景，本文提出一种基于不确定轮廓的相似度置信区间来衡量 SAR 图像相似性，并定义可信度来衡量其可靠性。该准则对轮廓定位有一定容错性，对一定程度的断裂、多边缘等降质轮廓也能得到合理的相似度范围，并对给出的相似度进行可信性评估。

2 不确定轮廓相似度准则

人类的视觉感知具有很强的模糊性，评判图像相似性带有很强的主观因素^[13]。根据这一原理，首先将基准图像轮廓在空间上模糊化，然后将待比较图像轮廓与基准图像轮廓之间的相似性测度问题转化为后者在前者模糊化后的模糊子集中的隶属度问题，从而将“相似性”这个定性的问题转化为定量的问题得以处理。

2.1 隶属度函数确定

在模糊数学中，一个确定点可以根据相应的隶属度准则模糊化为点模糊集。二值轮廓图 $P(J \times K)$ 可看作轮廓点集， $P = \{p_i | p_i=(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, N\}$ ， p_i 是 P 上的轮廓点，坐标为 (x_i, y_i) ， N 为轮廓点数

目， J 和 K 为图像高度和宽度。根据模糊数学理论可以将每一个轮廓点 p_i 根据式(1)定义的隶属度函数模糊化为点模糊集，如果将模糊集中点的隶属度看作该点的像素值，那么就可以将每个点模糊集用模糊图像 p_i 表示，其大小仍为 $J \times K$ 。隶属度函数定义如下：

$$f_{p_i}(x, y) = e^{-r^2/(2\sigma^2)} \tag{1}$$

其中

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \tag{2}$$

r 表示模糊图像中某点到 p_i 的欧氏距离， σ 为隶属度函数的分布集中度。图 1(a), 1(b)所示为隶属度函数分布曲线以及单点模糊图像，其中式(1) σ 取 1.5。

将 N 个点模糊图像叠加起来，就得到轮廓图 P 的整体模糊图像 P 。 P 中坐标 (x, y) 处隶属度 $f_P(x, y)$ 取所有点模糊图像相应坐标处隶属度最大值，定义如下：

$$f_P(x, y) = \max_{i \in \{1, N\}} f_{p_i}(x, y) \tag{3}$$

$f_P(x, y)$ 表示整体模糊图像 P 的像素值。图2是3种轮廓模糊化后的结果，其中 σ 取 1.5。

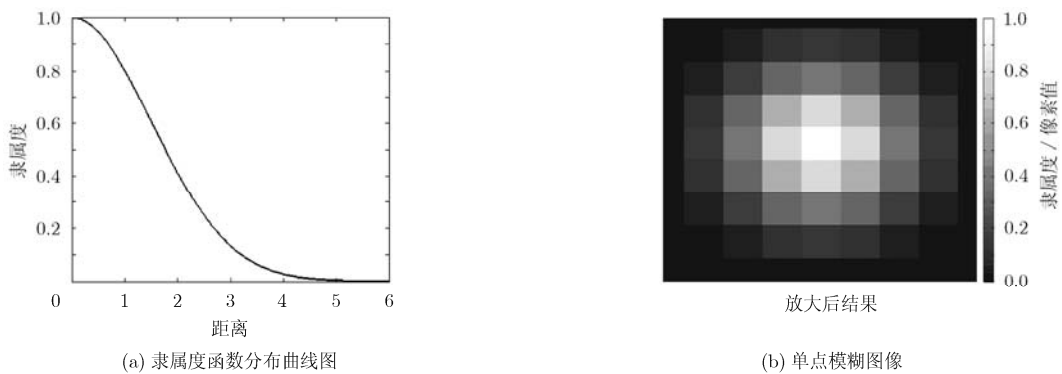


图1 隶属度函数与单点模糊化结果图

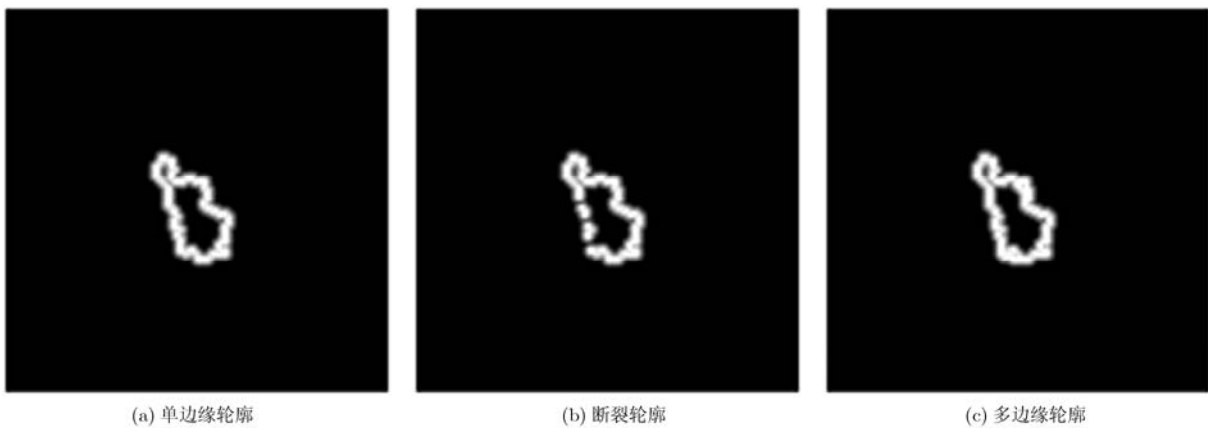


图2 MSTAR图像轮廓模糊结果图

2.2 轮廓最佳相似度

$S = \{s_i | s_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N_S\}$ 和 $M = \{m_i | m_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N_M\}$ 表示待比较的两幅MSTAR切片轮廓, N_S 和 N_M 为轮廓点数目。分别对其模糊化后得到两幅轮廓模糊图像 \underline{S} 和 \underline{M} , 定义 $\mathbf{SIM}_S(M)$ 为图像 M 上所有边缘点在图像 S 上相似度向量:

$$\mathbf{SIM}_S(M) = f_S(m_i - c_{q_{M_S}}), \quad i = 1, 2, \dots, N_M \quad (4)$$

式中 m_i 为图像 M 上的边缘点, $c_{q_{M_S}}$ 是二值图像 M 相对 S 的重心之差, 定义如下:

$$c_{q_{M_S}} = c_{q_M} - c_{q_S} = \left(\sum_{i=1}^{N_M} m_i(x) / N_M, \sum_{i=1}^{N_M} m_i(y) / N_M \right) - \left(\sum_{i=1}^{N_S} s_i(x) / N_S, \sum_{i=1}^{N_S} s_i(y) / N_S \right) \quad (5)$$

其中 c_{q_M} 和 c_{q_S} 分别为二值图像 M 和 S 的重心。同理定义 $\mathbf{SIM}_M(S)$ 为图像 S 上所有边缘点在图像 M 上相似度向量:

$$\mathbf{SIM}_M(S) = f_M(s_i - c_{q_{S_M}}), \quad i = 1, 2, \dots, N_S \quad (6)$$

$c_{q_{S_M}}$ 为图像 S 与 M 的重心之差, 也即 $-c_{q_{M_S}}$ 。式(4)和式(6)的物理意义为通过消除重心差来对准待比较的两幅轮廓, 从而降低位置差异对相似度计算的影响。

定义 \mathbf{SIM}_{S_M} 和 \mathbf{SIM}_{M_S} 作为图像 M 对图像 S 的相似度和图像 S 对图像 M 的相似度。 \mathbf{SIM}_{S_M} 按式(7)计算得到

$$\mathbf{SIM}_{S_M} = \begin{cases} \frac{1}{N_\kappa} \sum_{i=1}^{N_\kappa} \mathbf{H}^{(i)}, & N_\kappa \neq 0 \\ 0, & N_\kappa = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 N_κ 为向量 \mathbf{H} 的长度, \mathbf{H} 为对 $\rho(\mathbf{SIM}_S(M))$ 由大到小排序后的结果。函数 ρ 定义为

$$\rho(x) = \begin{cases} x, & x \geq \beta \\ 0, & x < \beta \end{cases} \quad (8)$$

β 为设定的消除轮廓遮挡因子。式(7)的物理意义为通过 β 去除向量 \mathbf{H} 中孤立点对应的元素值, 这样求部分均值后得到的相似度值 \mathbf{SIM}_{S_M} 既考虑了所有轮廓点对整体相似度的贡献, 又去除了轮廓被遮挡的影响。

同理 \mathbf{SIM}_{M_S} 也可以用同样的方法得到, 最后对 \mathbf{SIM}_{S_M} 和 \mathbf{SIM}_{M_S} 取小得到 \mathbf{SIM} , 即为图像 M 与图像 S 之间的轮廓最佳相似度。有

$$\mathbf{SIM} = \min(\mathbf{SIM}_{S_M}, \mathbf{SIM}_{M_S}) \quad (9)$$

3 不确定轮廓相似度的置信区间及可信度

一般来讲, 评判两幅图像相似度具有很强的模糊性, 即使认为相似度高, 但具体高到什么程度很难给出一个确定的值, 同时基于图像特征来计算相似度的方法依赖特征提取的有效性和准确性。本文对提取的轮廓模糊化处理, 一定程度上消除轮廓提取不准确对计算相似度带来的影响, 但给出的相似度仍然带有很强的主观性, 难以符合所有评判者的视觉需求。本文接下来构建相似度的置信区间, 该区间在给定模糊模型和显著性水平下, 以一定的概率包含最佳相似度值, 同时又包含与最佳相似度差别不大的所有可能合理的相似度值。这样综合考虑轮廓提取的不确定性以及不同观测者之间的视觉差异, 给出一个连续区间作为考察图像轮廓的相似性指标。

3.1 模糊图像联合隶属度分布

2.1 节中, 单点模糊图像隶属度(像素值)满足式(1)。对整幅轮廓图 P 而言, 是将 N 个点模糊图像叠加起来相应元素取最大得到整体模糊图像 \underline{P} 。

定义分布函数 $F_{p_i}(r)$ 满足式(10):

$$F_{p_i}(r) = 1 - f_{p_i}(x, y) = 1 - e^{-r^2 / (2\sigma^2)} \quad (10)$$

其概率密度函数 $f_{p_i}(r)$ 为

$$f_{p_i}(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2 / (2\sigma^2)} \quad (11)$$

式(11)表明 $F_{p_i}(r)$ 是瑞利分布, 而 $F_{p_i}(r)$ 的分布又由单点模糊图像灰度值决定, 因此就间接确定了单点模糊图像隶属度分布。

同理定义分布函数 $F_P(r)$ 满足式(12):

$$F_P(r) = 1 - f_P(x, y) = 1 - \max_{i \in [1, N]} f_{p_i}(x, y) = \min_{i \in [1, N]} (1 - f_{p_i}(x, y)) = \min_{i \in [1, N]} F_{p_i}(r) \quad (12)$$

已经证明 $F_{p_i}(r)$ 是瑞利分布, 又知 N 个 $f_{p_i}(r)$ 是独立同分布的, 则 $F_P(r)$ 的概率分布满足式(13):

$$F_P(r) = 1 - [1 - (1 - e^{-r^2 / (2\sigma^2)})]^N = 1 - e^{-N \cdot r^2 / (2\sigma^2)} \quad (13)$$

其概率密度函数 $f_P(r)$ 为

$$f_P(r) = \frac{N \cdot r}{\sigma^2} \cdot e^{-N \cdot r^2 / (2\sigma^2)} \quad (14)$$

式(14)表明, 由整体模糊图像的灰度值分布 $f_P(x, y)$ 构建的 $F_P(r)$ 同样是满足瑞利分布的。

3.2 相似度置信区间及可信度

2.2 节中已经得到两图像相似度向量 $\mathbf{SIM}_S(M)$ 和 $\mathbf{SIM}_M(S)$, 由 3.1 节可知, $1 - \mathbf{SIM}_S(M)$ 和 $1 - \mathbf{SIM}_M(S)$ 两个向量分别服从参数为 $\sigma / \sqrt{N_M}$ 和 $\sigma / \sqrt{N_S}$ 的瑞利分布。大量实验表明, 瑞利分布 $f(x) = (x/\theta^2) e^{-x^2 / (2\theta^2)}$ 在分布参数 θ 不大于 1 的情况下, 分布函数可以用均值为 $\sqrt{\pi/2}\theta$, 方差为 $3\theta(4 - \pi)$

/4 的正态分布近似表示, 两分布函数差值不会超过 0.04。图 3(a) 是当 $\theta = 0.2$ 时瑞利分布函数和正态分布函数曲线, 图 3(b) 是两种分布函数差值图。

一组正态分布样本, 在给定方差和一定显著性水平下可以估计出所有可拟合这组数据的不同正态分布函数。下面通过假设检验, 确定能拟合数据 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 并且方差为 $3\theta(4-\pi)/4$ 的所有正态分布的均值范围, 其中 θ 为 $\sigma/\sqrt{N_M}$ 。

构造检验统计量 R 满足下式:

$$R = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma_M / \sqrt{N_M}} \quad (15)$$

其中 σ_M 为方差 $[3 \cdot (4 - \pi) / 4] \sigma / \sqrt{N_M}$, N_M 为向量 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 的元素个数, \bar{x} 是 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 的均值, μ_0 为待求的正态分布均值。由于 $R \sim N(0,1)$, 故满足式(16)的所有 μ_0 即为待求的正态分布均值,

$$R \leq z_{\alpha/2} \quad (16)$$

其中 α 为给定的显著性水平。这样可以得出 μ_0 的取值范围为

$$\mu_0 \in \left[\bar{x} - \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}, \bar{x} + \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M} \right] \quad (17)$$

那么就可以得出 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 在 $\pm \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}$ 范围内可以被均值为 \bar{x} , 方差为 σ_M 的正态分布拟合。由于样本均值是总体均值的无偏估计, 正态分布在一定限差范围内可被瑞利分布拟合, 因此 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 在 $\pm \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}$ 范围内近似满足参数为 $\sigma_M / \sqrt{N_M}$ 的瑞利分布, 也即相似度向量 $\mathbf{SIM}_S(M)$ 在 $\pm \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}$ 都是合理的。根据式(7)那么 \mathbf{SIM}_{S-M} 在 $\pm \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}$ 范围内也都是合理的, 同理 \mathbf{SIM}_{M-S} 在 $\pm \sigma_S \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_S}$ 也是合理的, 其中 σ_S 为方差 $[3 \cdot (4 - \pi) / 4] \sigma / \sqrt{N_S}$, N_S 为 $\mathbf{1-SIM}_S(M)$ 的元素个数。这样就可以确定在显著性水平 α 下, 轮廓特征相似度置信区间为

$$\mathbf{SIM} = \bigcup \left\{ \begin{array}{l} \left[\mathbf{SIM}_{S-M} - \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M}, \right. \\ \left. \mathbf{SIM}_{S-M} + \sigma_M \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_M} \right], \\ \left[\mathbf{SIM}_{M-S} - \sigma_S \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_S}, \right. \\ \left. \mathbf{SIM}_{M-S} + \sigma_S \cdot z_{\alpha/2} / \sqrt{N_S} \right] \end{array} \right\} \quad (18)$$

式中, 相似度区间长度跟显著性水平 α 、模糊模型参数 σ 、目标轮廓点数目 N_M 和 N_S 有关。在给定 α 和 σ 情况下, 区间长度仅取决于 N_M 和 N_S 。轮廓点数目越多, 区间长度越短, 这符合实际情况。因为轮廓点数目越多, 描述目标形状越准确, 相似度定义越可信。定义可信度 RE 来描述区间长度与相似度可靠性关系如下式:

$$\text{RE} = \begin{cases} 1, & L \leq 0.04 \\ e^{-\lambda(L-0.04)}, & L > 0.04 \end{cases} \quad (19)$$

4 实验结果与分析

为了充分验证本文提出的相似度准则的准确性和适应性, 本文将从人眼视觉感知和目标分类两个方面来开展实验验证。

4.1 基于人眼视觉感知的不确定轮廓相似度区间及其可信度有效性验证实验

图4是MSTAR切片BMP2目标在入射角分别为 17° 和 15° 时同一方位角下成像轮廓, 图4(b) 从人眼视觉上与图4(a)非常相似, 图4(c), 图4(d)为图4(b)的不确定轮廓, 视觉上图4(c), 图4(d)同样与图4(a)非常相似。

采用本文方法计算图4(b), 4(c), 4(d)与图4(a)的相似度, 其中式(18)中 σ 取 1.5, $\beta = 0.5$, 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 可信度参数 $\lambda = 3.5$ 。结果如表1所示:

表1 本文方法计算相似度结果

指标	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)
图 4(a) 相似度区间	0.92-0.96	0.84-0.92	0.94-0.96
图 4(a) 可信度(%)	100	86.94	100

取 15° 的和 17° 的同一目标在对应方位角下图像各 120 幅, 对 15° 目标单边缘轮廓抽样, 抽样间隔为 1 个像素得到断裂轮廓, 抽样间隔小能保证轮廓形状不被破坏同时又能使轮廓断裂程度最大。另外对 15° 目标轮廓随机选择部分轮廓点在 3 邻域内膨胀得到多边缘轮廓。这样将 3 组 15° 目标轮廓(一组单边缘轮廓, 两组不确定轮廓)与 17° 同一目标同一方位角下轮廓用本文方法计算相似度, 结果如图5所示。

图5(a)中, 断裂轮廓区间长度最长, 其次是单边缘轮廓, 多边缘轮廓区间最短, 这符合式(18)结论。同时这也符合视觉感知, 轮廓点越多, 描述轮廓越稳定, 相似度区间越短。多边缘比单边缘含有信息更多, 描述轮廓更可靠, 断裂轮廓稳定性最差, 不确定性最大, 因此相似度区间最长。图5(b)中显示3种轮廓最佳相似度大致相同, 这表明本文的相似度准则对一定程度的断裂、多边缘不敏感。图5(c)表明多边缘轮廓得到的相似度区间最短, 可信度最高, 其次是单边缘轮廓, 断裂轮廓可信度最低。

4.2 基于目标分类识别的不确定轮廓相似度准则有效性验证实验

接下来利用实测SAR数据的不确定轮廓来验证本文提出的相似度准则在识别上的有效性和可靠性, 选择的数据为AFRL公布的MSTAR实测数据。

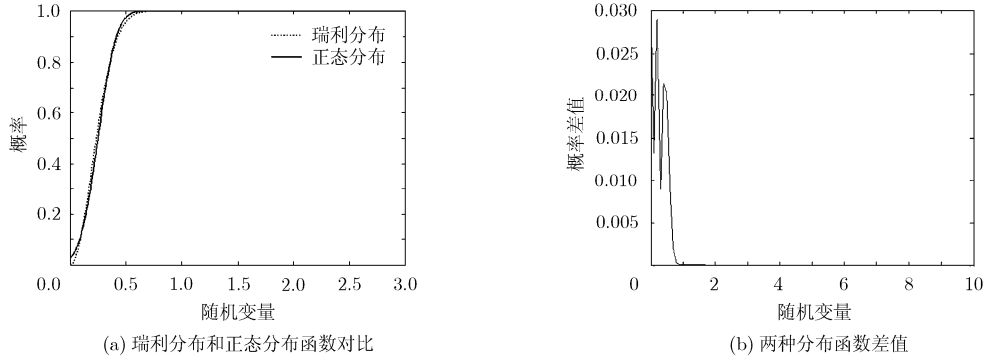


图3 正态分布和瑞利分布拟合示意图

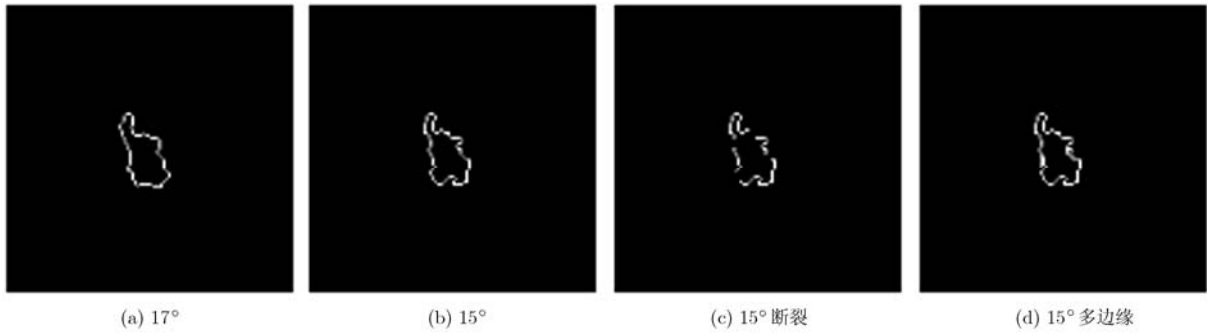


图4 不确定轮廓对比

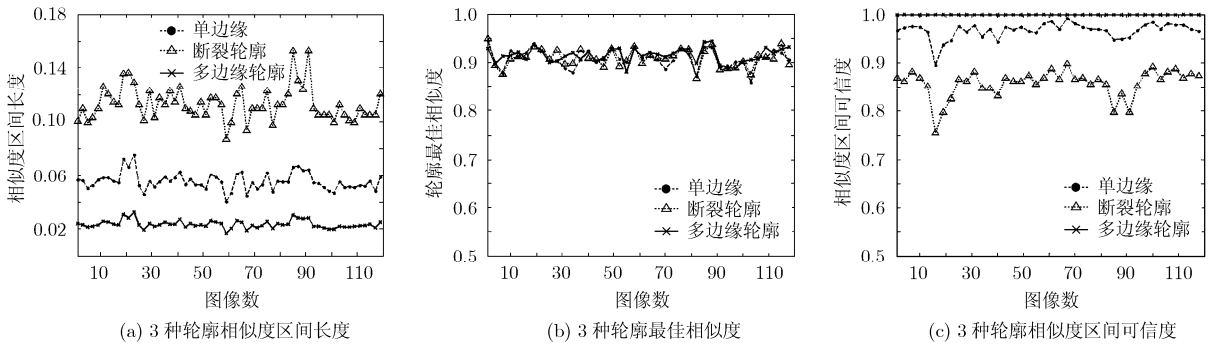


图5 不确定轮廓相似度计算结果

为便于比较实验结果，本文基本按照文献[11]的标准来组织实验数据。训练样本选择俯仰角17°时BMP2-C21, T72-132, BTR70-C71这三类目标的SAR成像数据，其方位角范围覆盖0°-360°。对上述3类目标中的每一类目标，以10°方位角为间隔将训练样本分组，将每组中所有的训练样本取平均得到的样本图像作为该组的模板，形成36个模板，3类目标共形成108个模板。待识别样本数据选择俯仰角15°时有代表性的5类目标：BMP2-9563, BMP2-C21, T72-132, T72-812, BTR70-C71，分别对单边缘轮廓、断裂轮廓和多边缘轮廓做识别实验，其中相似度取轮廓最佳相似度。文献[11]利用傅里叶描述子对单边缘轮廓识别，本文方法的结果与文献[11]对比如图6所示。

从图6结果来看，一定程度的断裂以及多边缘等不确定轮廓对分类结果影响不太大，这说明文中定义的相似度准则在不确定轮廓识别中是有效的。图6(b)中单边缘轮廓识别可信度略低于多边缘轮廓，断裂轮廓可信度最低。这是因为轮廓断裂导致其描述目标的不确定性增大，从而影响分类结果，即使能正确分类，但结果也并不足够可靠。而多边缘由于所含目标形状信息更多，所以其识别可信度最高。

从上面实验结果来看，本文方法对SAR图像提取轮廓质量要求不高，对断裂、多边缘、模糊、定位不准轮廓都有一定容错性，这符合当前大多数SAR图像边缘检测算法的现状。本文对不确定轮廓

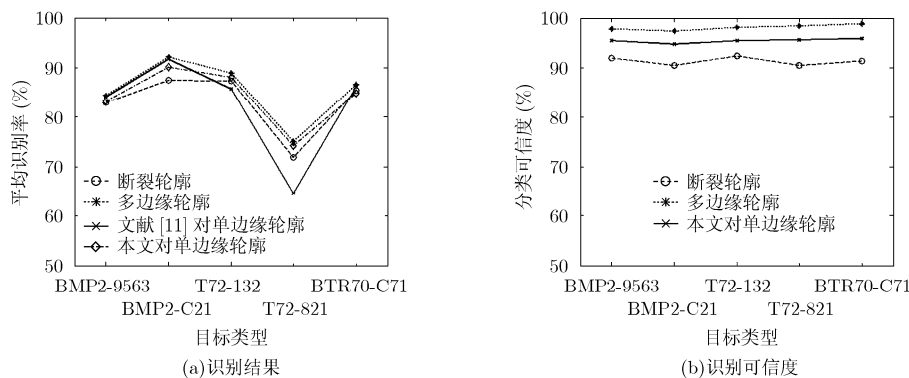


图6 不确定轮廓识别结果

定义的相似度区间是有效的,符合人眼视觉感知需求。同时对定义的相似度准则引入可信度,这使得描述 SAR 图像不确定轮廓相似性更为合理。

5 结论

对于低分辨率、模糊、噪声干扰等成像效果差的 SAR 图像提取的不确定轮廓,定义合理的相似度范围并分析其可信性是 SAR 图像解译的关键。本文研究了 SAR 图像不确定轮廓的相似性及其可信度问题。对 SAR 图像提取的不确定轮廓定义了相似度置信区间,该区间以一定的置信水平包含了所有可能合理的相似度值,同时引入可信度来阐述轮廓不确定性与区间长度关系。该相似度准则对一定程度的断裂、多边缘、模糊轮廓有容错性,符合人眼视觉感知效果。本文方法不仅适应于单边缘准确轮廓相似度定义,也适应于不确定轮廓的相似度定义,具有较好的实用性。

参考文献

- [1] Sampat M P, Wang Zhou, Gupta S, et al. Complex wavelet structural similarity: a new image similarity index[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(11): 2385-2401.
- [2] Moser B A. A similarity measure for image and volumetric data based on hermann weyl's discrepancy[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(11): 2321-2329.
- [3] Karunaseka S A. A distortion measure for blocking artifacts in image based on human visual sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(6): 713-724.
- [4] Ye Peng and Liu Fang. A implicit similarity method for multi-modal image registration[C]. 2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), Xiamen, China, 2011: 1-4.
- [5] Yu Hong-sheng and Liu Xiu-sheng. Structure similarity image quality assessment based on visual perception[C]. 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, 2011, 3: 1519-1522.
- [6] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 1-13.
- [7] 蒋刚毅, 黄大江, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 219-226.
- [8] Jiang Gang-yi, Huang Da-jiang, et al. Overview on image quality assessment methods[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 219-226.
- [9] Sofiane H and Ferdaous C. Comparison of change detection indicators in SAR images[C]. 2010 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010: 1-4.
- [10] 王斌, 舒华忠, 等. 一种基于轮廓线的形状描述与匹配方法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(4): 949-952.
- [11] Wang Bin, Shu Hua-zhong, et al. A contour-based shape description and matching method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 949-952.
- [12] Wasinphongwanit P and Phokharatkul P. Image retrieval using contour feature with rough set method[C]. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Changchun, China, 2010, 6: 349-352.
- [13] 徐牧, 王雪松, 等. 基于目标轮廓特征的SAR图像目标识别[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(12): 1812-1815.
- [14] Xu Mu, Wang Xue-song, et al. Novel SAR automatic target recognition method based on contour feature[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(12): 1812-1815.
- [15] Simonson K M, Drescher Jr S M, et al. A statistics-based approach to binary image registration with uncertainty analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(1): 112-125.
- [16] 汪洋, 卢焕章, 等. 基于空间模糊化表示的图形相似性测度[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(2): 340-342.
- [17] Wang Yang, Lu Huan-zhang, et al. Similarity measure between shapes based on spatial fuzzy representation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(2): 340-342.

项德良: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为 SAR 图像相似性。
 陈天泽: 男, 1977年生, 讲师, 研究方向为 SAR 图像不确定特征提取、SAR 图像匹配。
 粟毅: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达系统与遥感信息处理的研究。