

一种基于局部梯度比率特征度量 SAR 图像相似性的新方法

项德良, 粟 毅, 赵凌君, 唐 涛, 陆 军

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文针对 SAR 图像相干斑噪声和图像局部梯度特性, 提出一种基于局部梯度比率特征的相似性准则. 首先提取 SAR 图像各个像素的梯度比率特征, 进而构建局部梯度比率特征直方图 LGRPH, 并进一步分析多尺度 LGRPH, 最后通过计算多尺度 LGRPH 的 K-L 距离定义相似性. 基于 SAR 仿真和实测图像的实验结果表明, 本文提出的相似性准则对 SAR 图像上相干斑噪声和局部梯度变化不敏感, 能有效应用于 SAR 图像的目标识别.

关键词: SAR 图像; 局部梯度比率; 相似性; 目标识别

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)01-0009-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.01.002

A New Algorithm for SAR Imagery Similarity Measure Based on Local Gradient Ratio Pattern

XIANG De-liang, SU Yi, ZHAO Ling-jun, TANG Tao, LU Jun

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

Abstract: In this paper, a new similarity measure for SAR imagery based on local gradient ratio pattern is proposed. Firstly, we extract the gradient ratio pattern for each pixel. Secondly, the local gradient ratio pattern histogram (LGRPH) is computed. Finally, the similarity is obtained by utilizing K-L discrepancy to measure the distance of LGRPH. Experimental results based on simulated and real SAR images demonstrate that the proposed similarity measure is robust to the speckle noise and local gradient variation in SAR images.

Key words: SAR image; local gradient ratio; similarity measure; target recognition

1 引言

SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像相似性旨在衡量两幅 SAR 图像之间的相似程度, 在 SAR 图像目标分类与识别、变化检测等应用中具有非常重要的作用^[1]. 由于 SAR 图像特殊的成像机制, 合理的相似性应该对 SAR 图像乘性相干斑噪声、剧烈的局部梯度变化有一定鲁棒性.

就图像相似性构建而言, 已有的研究主要基于图像灰度以及几何特征. 针对光学图像, Dong 利用图像小波变换系数定义局部能量直方图, 通过直方图差异比较图像相似性, 纹理分类精度能达到 95% 以上^[2]. 针对 SAR 图像, 龙泓琳等利用基向量非负加权组合的形式构建 SAR 目标图像, 充分利用目标局部空间结构信息提取特征矢量, 定义特征矢量的相似性应用于 SAR 目标识别,

识别精度很高. Dai 通过提取 SAR 图像多尺度局部特征直方图构建相似性应用于 SAR 图像分类, 精度达到 85% 以上^[3,4]. 总体而言, 上述的相似性定义方法都是基于信噪比高、成像质量好的 SAR 图像. 然而, 这一前提在实际应用中往往难以满足. SAR 成像过程中严重的相干斑噪声会导致灰度直方图统计与真实情况不一致, 恶劣的成像环境会导致图像局部梯度变化剧烈, 目标和背景有时难以区分, 这都会影响特征提取的稳定性、完整性和准确性. 因此, 基于低信噪比、局部梯度变化剧烈的 SAR 图像定义相似性具有更大的实用价值.

针对上述背景, 本文提出一种基于局部梯度比率特征的相似性准则. 该准则提取 SAR 图像局部梯度比率特征, 进而构建局部梯度比率特征直方图 LGRPH (Local Gradient Ratio Pattern Histogram), 并进一步讨论多尺度 LGRPH (MultiScale-LGRPH). 通过计算不同 SAR 图像

MLGRPH 之间的 K-L 距离定义其相似度. 该准则并不直接依赖 SAR 图像灰度, 对梯度变化有一定鲁棒性, 同时采用比值方法, 因此对乘性相干斑噪声也不敏感. 理论和实验验证了本文提出的相似度准则对 SAR 图像相干斑和局部梯度变化是鲁棒的, 能有效应用于 SAR 图像目标识别.

2 SAR 图像相似度构建

2.1 LGRPH 构建方法

LBP 算法是 Ojala 在 1996 年首次提出的^[5], 由于其对全局图像像素灰度变化不敏感并且计算简便, 已在纹理特征描述和纹理分类中得到非常广泛的应用. 然而 LBP 算法对乘性相干斑噪声是不鲁棒的, 此外, 其对图像局部梯度变化不敏感, 例如在边缘、角点处 LBP 特征描述并不有效^[6]. 因此, 在 LBP 算法基础上, 我们提出利用局部梯度比率特征直方图 LGRPH 来作为 SAR 图像目标特征描述, 该特征描述方法充分利用了局部梯度信息和像素比率特征.

LGRPH 首先计算每个邻域像素与中心像素灰度差值的绝对值作为该邻域像素的梯度值, 将该梯度值与其像素比值作为该邻域像素梯度比率特征值 GRP (Gradient Ratio Pattern). 如式 (1) 所示. 将所有邻域像素的 GRP 均值分配给中心像素作为其 GRP, 然后计算每个邻域像素与中心像素 GRP 之差, 该差值由判别函数生成二值编码串, 计算该编码串的值作为中心像素的 LGRP 值, 如式 (2)(3) 所示.

$$G_{\text{ratio}}(g_p) = \frac{|g_p - g_{i,j}|}{g_p} \quad (1)$$

$$\overline{G_{\text{ratio}}(g)} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P G_{\text{ratio}}(g_p) \quad (2)$$

$$LGRP_{P,R}(g_{i,j}) = \sum_{p=0}^{P-1} s(G_{\text{ratio}}(g_p) - \overline{G_{\text{ratio}}(g)}) 2^p \quad (3)$$

其中 $g_{i,j}$ 为邻域的中心像素, g_p 为邻域第 p 个像素, P 为邻域像素个数, R 为邻域半径. $G_{\text{ratio}}(g_p)$ 为第 p 个像素的梯度比率特征值. $\overline{G_{\text{ratio}}(g)}$ 为所有邻域像素梯度比率的均值. $s(\cdot)$ 为判别函数, 定义如式 (4) 所示.

$$s(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

统计所有像素的 LGRP 值形成的灰度直方图即为 LGRPH. 对一幅 $N \times M$ 大小的图像, 计算 LGRPH 如式 (5) 所示.

$$LGRPH(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M f(LGRP_{P,R}(g_{i,j}), k) \quad (5)$$

其中

$$k \in [0, K], \quad f(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

K 为 LGRP 的最大编码值, k 为 LGRPH 的具体灰度级.

2.2 MLGRPH 构建方法

LGRPH 虽然能对 SAR 图像相干斑噪声不敏感, 并且不受图像局部梯度变化影响, 能有效保持角点, 边缘等信息特征, 但是该特征矢量维数很大. Ojala 在 2002 年指出, 一个 LBP 编码串, 如果其中 0 和 1 交替出现的次数最多不超过 2 次就称为一致编码串. 这种一致编码串出现频率很高 ($\geq 90\%$), 但种类又很少, 只有 $P+1$ 维, 描述了微小特征的主要信息, 对分类识别贡献也最大^[7,8]. 受此启发, 我们在计算 LGRPH 时, 同样将非一致编码串计算得到的编码值归并到一个灰度级, 一致编码串保持不变, 这样就大大缩减了 LGRPH 的特征维数. 此外, 我们进一步计算多尺度 LGRPH, 算法如下:

(1) 取定邻域像素个数 P , 设置邻域半径 R 的取值范围 $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$, 以及邻域半径收缩步长 d ;

(2) 从 $R_1 = R_{\max}$ 开始, 计算图像中每个像素的 LGRP, 根据 LGRP 是否一致可将图像像素分为一致部分和非一致部分, 分别用 P_{U1} 和 P_{-U1} 表示. 对 P_{U1} 部分像素计算得到的一致编码值构建灰度直方图 $LGRPH_1$;

(3) 缩小尺度, $R_2 = R_{\max} - d$, 对 (2) 中得到的 P_{-U1} 部分像素重新计算 LGRP, 根据 LGRP 的一致性重新将 P_{-U1} 部分像素划分为一致部分和非一致部分, 分别用 P_{U2} 和 P_{-U2} 表示. 对 P_{U2} 部分像素计算得到的一致编码值构建灰度直方图 $LGRPH_2$;

(4) 重复上述步骤, $R_k = R_{\max} - (k-1) * d$, 得到 $LGRPH_k$;

(5) 当 $R_k < R_{\min}$ 或者 $P_{-Uk} = \text{NULL}$ 时算法截止; 将所有的 $LGRPH_k$ 连接起来 $[LGRPH_1 LGRPH_2 \cdots LGRPH_k]$, 就构成整幅图像的 MLGRPH.

2.3 K-L 准则构造相似度

本文采用对称 KL 准则 SKLD (Symmetry Kullback-Leibler Divergence)^[9] 来比较两幅图像的 MLGRPH. 对两个局部梯度比率直方图 H 和 Q , 定义 SKLD 如下:

$$SKLD(H, Q) = \sum_{n=1}^N p_n \log\left(\frac{p_n}{q_n}\right) + \sum_{n=1}^N q_n \log\left(\frac{q_n}{p_n}\right) \quad (6)$$

其中, p_n 和 q_n 分别为 H 和 Q 的 MLGRPH 特征矢量, N 为特征矢量的维数. 采用高斯隶属度函数将计算得到的 SKLD 映射到 $[0, 1]$ 区间, 如下所示:

$$\text{Similarity} = \exp\left(-\frac{[SKLD(H, Q)]^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

其中, σ 为控制高斯函数宽度的参数.

3 实验结果与分析

本节实验数据包括 SAR 仿真图像和实测图像: 仿真图像由对机动目标建模、进行非相干仿真后得到; 实测图像为美国国防高级研究计划署和空军研究室对外

发布的 MSTAR(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition)SAR 数据集.

3.1 相似度准则参数讨论

本文提出的相似度准则包含以下参数,邻域像素个数 P ,邻域半径最大值 R_{max} ,最小值 R_{min} ,邻域半径收缩步长 d ,控制高斯隶属度函数宽度的 σ .这里将 R_{min} 设为 1,即最小邻域半径.将 d 也设为 1,这是最小的收

缩步长.本文主要讨论 P 、 R_{max} 和 σ 对 MLGRPH 的影响.当 $R = R_{min}$ 时,邻域像素个数一般只取 $P = 4$ 或 $P = 8$.实验数据为经过非相干仿真后的 SAR 图像.图 1 是坦克目标仿真图,图 1(a)为无噪声仿真图,图 1(b)~图 1(f)中噪声方差依次设置为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,噪声采用 Gamma 分布.

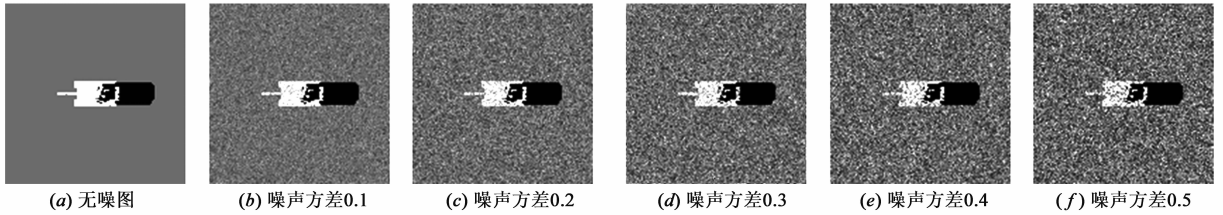


图1 坦克目标仿真图

固定 R_{max} 和 σ ,分别计算 $P = 4$ 、 $P = 8$ 时图 1(a)与图 1(b)~图 1(f)的 MLGRPH 相似度,如图 2(a)所示.从图 2(a)看出, $P = 4$ 、 $P = 8$ 时计算得到的 MLGRPH 相似度都对噪声有一定鲁棒性,但 $P = 8$ 时相似度曲线波动性更小,这是因为邻域选择 8 个点比选择 4 个点所利用局部信息更丰富,从而对噪声鲁棒性更强,因此本文在后面的实验中将 P 设为 8.固定 P 和 σ ,当 $R_{max} = 3$,

4,5 时同样计算这几幅图像 MLGRPH 相似度如图 2(b)所示,可以看出, R_{max} 为 4 和 5 时相似度曲线都比为 3 时波动性小, R_{max} 等于 4 和 5 时两者相似度曲线波动性近似相等,而当 $R_{max} = 5$ 时需要计算的尺度数增多,计算量增大,因此本文将 R_{max} 设为 4. σ 的选取根据视觉效果而定,这里设为 2.

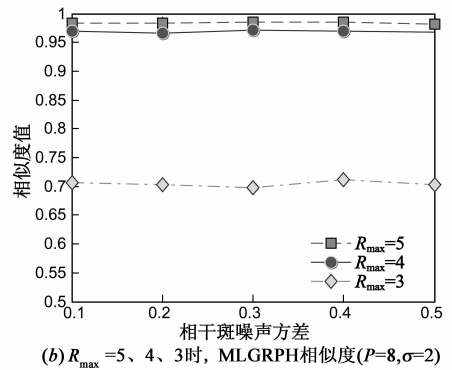
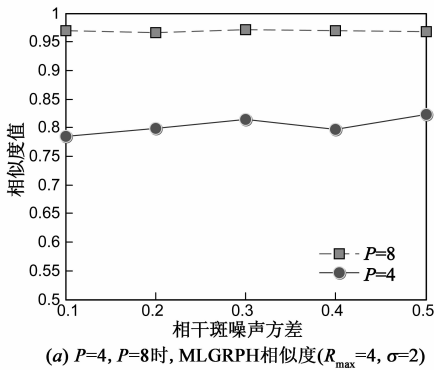


图2 不同噪声强度下相似度曲线

图 3 为局部亮度变化不同的 SAR 图像,其噪声方差均为 0.5.我们采用 MLGRPH、LGRPH ($P = 8, R = 1$)、灰度直方图法(Hist)、LBP 算法、GLCM 分别对图 1 和图

3 中的图像计算相似度,特征矢量的相似度计算均采用 K-L 准则,结果如图 4(a)、(b)所示.

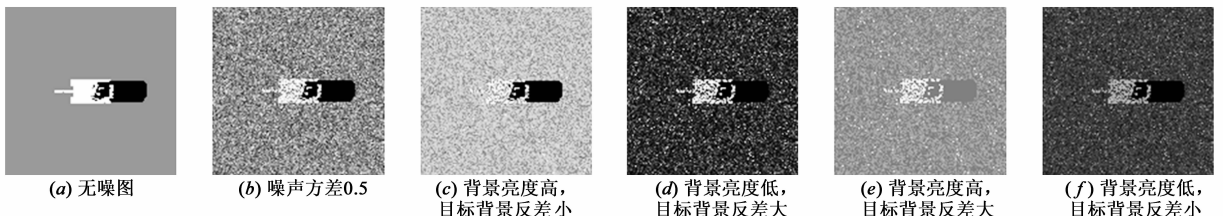


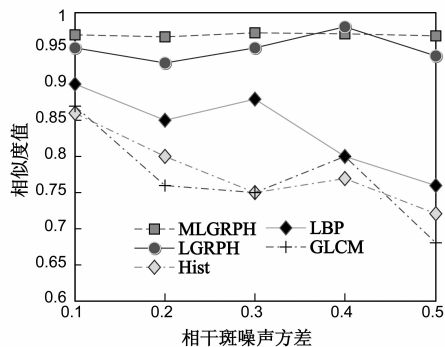
图3 局部梯度变化情况不同的仿真SAR图像

从上面两幅图可以看出,MLGRPH 相似度曲线非常稳定,这说明 MLGRPH 对相干斑噪声和图像局部亮度

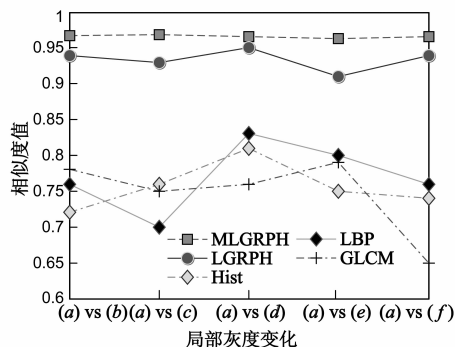
变化是鲁棒的.LGRPH 和 MLGRPH 相比,由于只利用单一尺度信息,稳定性稍差,但仍比 Hist、LBP 和 GLCM 算

法要稳定的多,这说明本文提出的利用多尺度局部梯

度比率特征直方图构建相似度是有效的。



(a) 不同噪声强度下相似度曲线



(b) 不同梯度变化下相似度曲线

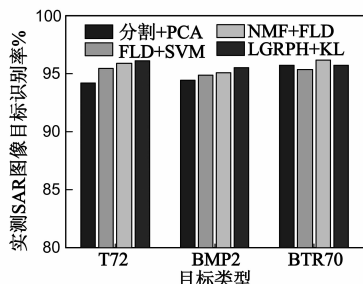
图4 噪声情况和梯度变化情况不同的SAR图像相似度曲线

3.2 SAR 仿真和实测目标识别

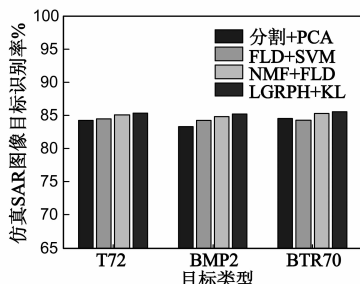
本部分选择的数据包括电磁散射仿真数据集和MSTAR 实测 SAR 数据集,如表 1 所示.训练样本选择俯仰角 17° 时 BMP2-C21(装甲车)、T72-132(主战坦克)、BTR70-C71(装甲运兵车)三类目标的 MSTAR 实测 SAR 数据,其方位角范围覆盖 $0^\circ - 360^\circ$.待识别样本分为三组,一组为 MSTAR 实测数据,选择俯仰角 15° 时有代表性的三类目标(其中 BMP2 和 T72 各有两种型号):BMP2-9563、BMP2-C21、T72-132、T72-812、BTR70-C71.另外两组为俯仰角 17° 时的仿真数据集,包括三类目标:T72、BMP2、BTR70,噪声方差分别为 0.3 和 0.5.

表 1 训练样本、测试样本种类及样本数

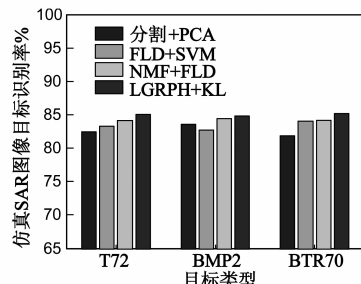
训练样本 (实测,俯仰 角 17°)	样 本 数	测试样本 (实测 MSTAR, 俯仰角 15°)	样 本 数	测试样本 (仿真 SAR,噪声 方差 0.3 和 0.5)	样 本 数
T72-132	233	T72-132 T72-812	190 195	T72	286
BMP2-C21	238	BMP2-9563 BMP2-C21	196 193	BMP2	252
BTR70-C71	234	BTR70-C71	185	BTR70	187



(a) 实测SAR图像目标识别率



(b) 仿真SAR图像目标识别率(噪声方差0.3)



(c) 仿真SAR图像目标识别率(噪声方差0.5)

图5 仿真和实测SAR图像目标识别结果

4 结束语

本文研究了 SAR 图像相似度构建问题,提出一种

基于局部梯度比率特征的 SAR 图像相似度准则.该准则通过提取 SAR 图像像素局部梯度比率特征,进而构造像素 LGRP 特征,并进一步分析 MLGRP,利用 K-L 准

则比较 MLGRP 相似性从而定义 SAR 图像相似度. 仿真和实测 SAR 图像的视觉对比实验以及分类识别实验表明本文算法能有效衡量 SAR 图像相似性, 对 SAR 图像相干斑噪声以及局部梯度变化不敏感, 能有效适用于目标分类、识别等基于相似度准则的应用.

参考文献

- [1] Inglada J, Mercier G. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1432 – 1445.
- [2] Dong Yongsheng, Ma Jinwen. Wavelet – based image texture classification using local energy histograms [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(4): 247 – 250.
- [3] 龙泓琳, 皮亦鸣, 等. 基于非负矩阵分解的 SAR 图像目标识别[J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1425 – 1429.
Long Hong-lin, Pi Yi-ming, et al. Non-negative matrixfactorization for target recognition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1425 – 1429. (in Chinese)
- [4] Dai Dengxin, Yang wen, Sun hong. Multilevel local pattern histogram for SAR image classification[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(2): 225 – 229.
- [5] Ojala T, Pietikainen M, et al. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions[J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(1): 51 – 59.
- [6] Jun B J, Kim D J. Robust face detection using local gradient patterns and evidence accumulation [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(2): 3304 – 3315.
- [7] Ojala T, Pietikainen M, et al. Multiresolution grayscale and rotation invariant texture classification with local binary patterns [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971 – 977.
- [8] Guo Z H, Zhang L, et al. Hierarchical multiscale LBP for face

and palmprint recognition[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing [C]*. Hong Kong: IEEE, 2010. 4521 – 4524.

- [9] Li L, Tong C S, et al. Texture classification using refined histogram[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(5): 1371 – 1378.
- [10] He Z G, Lu J, Kuang G Y. A fast SAR target recognition approach using PCA features[A]. *Proceedings of the Fourth International Conference on Image and Graphics [C]*. Washington, 2007. 580 – 585.
- [11] 韩萍, 吴仁彪, 王兆平. 基于 KFD 准则的 SAR 目标特征提取与识别[J]. *现代雷达*, 2004, 26(7): 27 – 30.
Han Pin, Wu Ren-biao, Wang Zhao-ping. SAR target feature extraction and automatic recognition based on KFD criterion [J]. *Modern Radar*, 2004, 26(7): 27 – 30. (in Chinese)

作者简介



项德良 男, 1989 年出生于河南信阳. 2010 和 2012 年分别在武汉大学和国防科技大学获得工学学士和工学硕士学位. 现为国防科技大学博士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像处理.
E-mail: xiangdeliang@gmail.com



栗毅 男, 1961 年出生于山东泰安, 国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 主要从事信号处理、遥感信息处理的研究.
E-mail: y. su@yeah.net