

引用格式: Du Yankai, Gong Lixia, Li Qiang, *et al.* Earthquake Induced Building Damage Assessment on SAR Multi-texture Feature Fusion[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 865-872. [杜妍开, 龚丽霞, 李强, 等. 基于多纹理特征融合的震后 SAR 图像倒塌建筑物信息提取[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 865-872.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0865

# 基于多纹理特征融合的震后 SAR 图像 倒塌建筑物信息提取

杜妍开, 龚丽霞, 李强, 詹森, 张景发  
(应急管理部自然灾害防治研究院, 北京 100085)

**摘要:** 合成孔径雷达(SAR)凭借其全天候观测能力以及 SAR 图像中丰富的纹理信息, 在震后建筑物倒塌评估中发挥了重要作用。针对 SAR 图像中倒塌建筑物纹理特征多样但利用率较低, 且特征信息冗余的问题, 提出一种基于主成分分析的 SAR 图像多纹理特征分类方法。该方法基于灰度直方图、灰度共生矩阵、局部二值模式、Gabor 滤波器提取了 26 种纹理特征信息, 构建主成分变量进行多维特征优选与降维融合, 通过随机森林分类算法提取建筑物的倒塌信息。以 2016 年日本熊本地震为例验证了该方法的有效性, 结果显示其提取精度高达 79.85%, 倒塌建筑物的识别效率有所提高, 分类结果优于单种纹理特征提取方法及多种纹理特征组合提取法, 可用于震后建筑物震害信息的快速提取。

**关键词:** 地震; 倒塌建筑物评估; SAR; 多纹理特征; 主成分分析

**中图分类号:** P237; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)04-0865-08

## 1 引言

近年来, 随着遥感技术的不断发展, 高分辨率合成孔径雷达(SAR)凭借其全天候、穿透性强等优势, 被广泛应用于震区建筑物破坏情况的快速调查与评估。然而, 由于建筑物在 SAR 图像中的特征信息较多, 实际应用中基于多纹理特征震害提取的信息冗余度高, 识别效率较低等问题亟待解决。

基于 SAR 图像的倒塌建筑物提取主要有单时相图像变化检测与多时相数据提取两种方法。基于 SAR 图像的多时相震害信息提取建筑物信息在国内外已得到广泛应用。其中, 基于后向散射强度相关性和相位相干性变化是 SAR 影像震害建筑物变化检测最主要的两种方法<sup>[1-3]</sup>; 一些学者基于震前震后 SAR 影像上的成像几何结构对震害建筑物进

行检测<sup>[4-7]</sup>; 李强等<sup>[8]</sup>利用日本熊本地震的 ALOS-2 PALSAR 数据, 基于纹理特征主成分的相关性对建筑物震害信息进行变化检测, 根据实地调查数据将提取结果划分为网格单元为 57 m 的数据, 其提取精度达到 87.2%。利用多时相 SAR 数据提取的震害建筑物信息往往更加准确, 但由于难以取得有效数据, 使得数据处理更加复杂。而单时相震后 SAR 数据比多时相 SAR 数据更易获取, 处理数据效率更高。

采用单时相 SAR 数据提取震害建筑物信息的方法有很多<sup>[9-11]</sup>, 其中基于 SAR 图像纹理特征极化特征的信息提取方法是应用最多的两种方法<sup>[12-14]</sup>。对于 SAR 图像中的倒塌建筑物, 纹理特征比极化、干涉等特征更为重要<sup>[15]</sup>。基于纹理特征分析识别震害建筑物可减少取向角对建筑物的影响, 是单时

收稿日期: 2020-05-19; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(ZDJ2018-14)。

作者简介: 杜妍开(1995—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事遥感震害评估研究。E-mail: du\_yankai@163.com

通讯作者: 龚丽霞(1981—), 女, 湖北仙桃人, 副研究员, 主要从事高分辨率 SAR(合成孔径雷达)在震害信息识别算法与应用方面的研究。  
E-mail: xiaolongzhu1900@hotmail.com

相SAR影像提取震害信息的重要研究方向之一。在震害纹理信息的统计分析中常用的方法为灰度共生矩阵(GLCM),还有灰度直方图、马尔科夫随机场(MRF)、局部二值模式(LBP)以及Gabor滤波器等。多数学者采用基于GLCM的纹理特征分析方法来提取震害建筑物的纹理信息<sup>[16]</sup>。早期,Poli等<sup>[17]</sup>利用GLCM方法证明了基于多个纹理特征提取效果比单一的纹理特征提取效果好;Gong等<sup>[18]</sup>基于北川震后的亚米级SAR影像,同时结合建筑物轮廓图,采用4个一阶纹理统计特征和8个二阶纹理统计特征,分别通过SVM、KNN、RF分类器提取震害建筑物信息,其精度均达到80%以上;陈启浩等<sup>[19]</sup>采用玉树震后RadarSat-2数据和东日本地震后的ALOS-1数据进行实验,通过极化分解后的多纹理特征评估震害建筑物,结果显示其建筑物损毁评估的总体精度可达到74.39%以上;Ge等<sup>[20]</sup>基于纹理特征采用随机森林分类器,提取出2015年尼泊尔地震的震后TerraSAR-X卫星图像中建筑物的损毁信息,实验结果表明,利用纹理特征中的范围值和标准差等参数评估建筑损伤效果良好。而基于单种特征提取的方法所获取的纹理信息不够全面,研究其他纹理特征分析方法的学者较少。Sun等<sup>[21]</sup>采用5种纹理特征的方法(灰度直方图、GLCM、RILBP、GMRF、Gabor滤波器)对玉树地震的震害建筑物信息进行识别,结果表明基于灰度直方图、GLCM、Gabor滤波器和RILBP的纹理特征提取方法各有优势,且对震害建筑物信息提取均有效。但由于所提取的纹理特征较多,未进行特征融合优选,易造成特征冗余,从而降低提取效率。

针对以上问题,以2016年日本熊本地震后的ALOS-2 PALSAR影像为数据源,利用灰度直方图、GLCM、LBP、Gabor滤波器4种纹理特征提取方法对震害建筑物信息进行提取,并采用主成分分析,在保证精度的同时避免特征冗余及复杂计算,实现有效的多纹理特征信息融合,通过随机森林进行分类识别,从而寻求一种最佳的多纹理特征分类来提取倒塌建筑物信息的方法,有效地识别SAR影像中的建筑物震害信息。

## 2 研究方法

实验主要流程包括数据预处理、纹理特征提取与分类,如图1所示,在提取完所有特征后展开两组实验,实验1主要基于4种纹理特征方法分别提取

建筑物的震害信息,与组合后的多种特征提取方法所得到的结果进行了对比;实验2在实验1的基础上,利用经主成分分析后的多纹理特征降维融合与随机森林分类的方法进行建筑物震害信息提取。旨在通过两组实验对4种方法所提取的多种纹理特征进行分析探索,从而优化震害建筑物的纹理特征信息提取,避免形成特征冗余等问题。

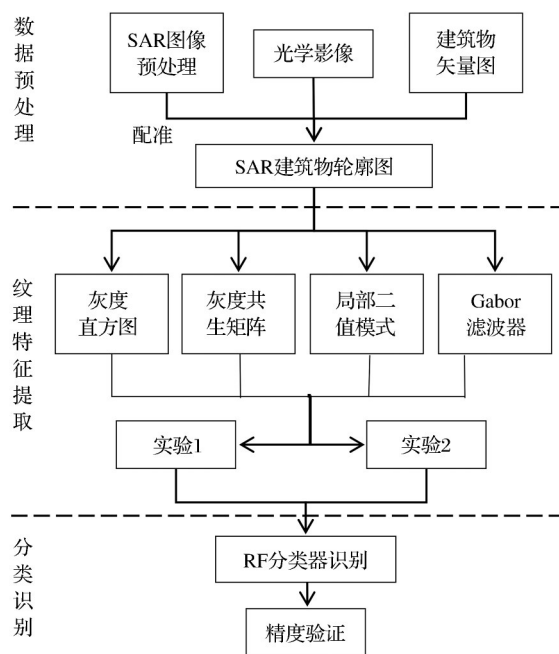


图1 研究方法流程图

Fig.1 Flow chart of research method

### 2.1 纹理特征提取方法

#### (1) 灰度直方图

灰度直方图统计是最直观的统计分析方法之一,通过对每个灰度值的频率大小进行计数得到统计结果。实验在此基础上对灰度直方图进行了特征计算。

#### (2) 灰度共生矩阵

灰度共生矩阵方法(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)是计算二阶纹理特征最常用的方法之一,在一幅图像中,它通过计算一定距离内两点的灰度之间的相关性来反映图像在方向、变化幅度等方面的综合信息。

#### (3) LBP

局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)是一种广泛被应用的纹理分析方法,可以较好地识别图像纹理的局部结构特征。该算法(图2)利用一个 $3 \times 3$ 窗口中心像素的灰度值,对邻域进行阈值化,从而得到一个LBP值,然后对归一化处理后各区域

的统计直方图进行连接,得到的最终的LBP纹理特征向量,算法简单且效率较高,计算公式为式(1)。之后有许多研究人员对原始LBP特征进行了改进,主要有旋转不变LBP特征(Rotation Invariant, LBP),等价模式或均匀模式LBP特征(Uniform Pattern, LBP)等。RILBP具有旋转不变的特性,在灰度变化方面具有很强的鲁棒性,其LBP值为旋转圆形邻域后得到的不同的初始LBP值中的最小值<sup>[22]</sup>,计算公式为式(2)。Ojala提出的ULBP模式实际上是对LBP产生的多种二进制模式降维,从而提高统计性,计算公式为式(3)。

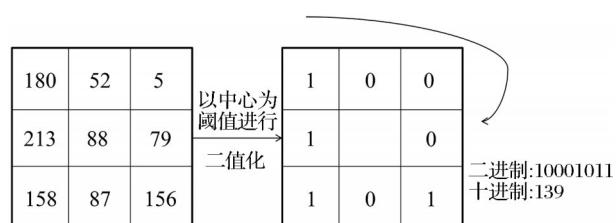


图2 基本LBP算子

Fig.2 Basic LBP operator

$$LBP_{p,R} = \sum_{p=1}^R s(I(p) - I(c)) * 2^p \quad (1)$$

(当 $x$ 大于等于0时, $s(x)$ 等于1,其小于0时, $s(x)=0$ )

$$\begin{aligned} LBP_{p,R}^r &= \min \{ ROR(LBP_{p,R}, i) | i=0, 1, \dots, P-1 \} \\ LBP_{p,R}^U &= |s[I(P-1) - I(c)] - s[I(0) - I(c)]| + \\ &|\sum_{p=1}^{P-1} s[I(p) - I(c)] - s[I(p-1) - I(c)]| \end{aligned} \quad (2)$$

(3)

其中: $p$ 为窗口中第 $p$ 个像素点(除了中心像素点); $I(c)$ 为中心像素点的灰度值; $I(p)$ 为领域内第 $p$ 个像素点的灰度值; $ROR(x, i)$ 为沿顺时针方向将第 $p$ 个像素点 $x$ 移动 $i$ 次。

#### (4) Gabor滤波器

二维Gabor滤波器由Dennis Gabor首次提出,属于一种短时傅立叶变换,适用于纹理特征提取与识别<sup>[23]</sup>。在空间域上,二维Gabor滤波器是正弦平面波调制的高斯核函数,其计算公式为式(4)。由于函数参数设置(比例、方向和频率)比较复杂,没有太多的先验知识可以找到合适的频率。依据张斌<sup>[24]</sup>在处理SAR图像中所设置的高低中心频率,实验将正弦函数的频率设为0.4和0.1, $x$ 轴和 $y$ 轴的方差分别设定为0.5,1,所选取的角度方向分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ ,组成了8个滤波器波段来进行实验。

$$Gabor(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(u^2 + v^2)}{2\sigma^2}} [\cos\omega u + j \sin\omega u] \quad (4)$$

其中: $\omega$ 为调制频率; $\sigma$ 为标准差; $\theta$ 为滤波器方向。

## 2.2 主成分分析

在描述纹理特征时,当提取的纹理特征过多,分类的复杂程度也会增加,并且最后的识别效果可能也会降低,对图像信息提取造成影响。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)又称主分量分析,可以有效地解决这些问题。其基本思想是将很多个数据集转化成几个主成分分量,在保留大部分特征信息的前提下,通过降维的方式来提高信息识别效率,最后进行融合<sup>[25]</sup>。

## 2.3 随机森林分类

随机森林分类器(Random Forest, RF)广泛应用于SAR图像分类,在机器学习领域中也研究热点。RF属于监督分类,由一系列人工采样生成的决策树和来自原始样本集和特征空间的随机特征子空间构成,每棵树利用测试样本得到一个分类结果,最终输出一个基于所有决策树投票数最多的集合结果,使RF具有很强的鲁棒性<sup>[26]</sup>。詹森等<sup>[27]</sup>在利用震后SAR影像提取震害建筑物特征时对比了SVM和RF分类器,结果表明RF分类器的识别性能在整体上都高于SVM分类器。为了保证公平性,本文所有实验都基于RF分类器来实现倒塌建筑物的信息提取,其中随机森林树的数量默认为100,最小的节点样本为1。

## 3 研究区及数据预处理

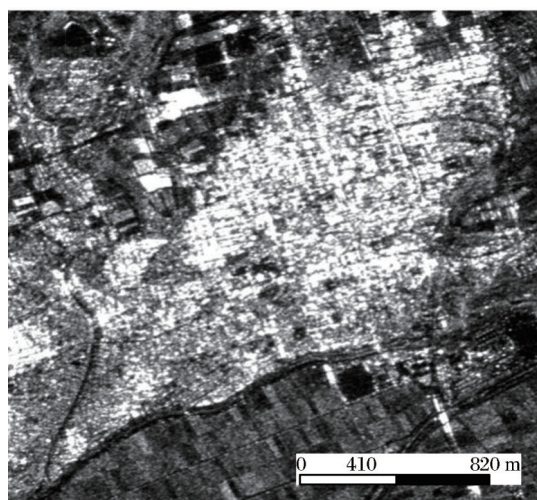
### 3.1 研究区概况

自2016年4月14日起,日本熊本县发生了一系列地震,经日本气象厅确认,4月14日为6.2级(Mw)前震,4月16日为7.0级(Mw)主震,其中益城町地区的损毁最为严重,根据光学遥感影像的观察,主震后中等损毁建筑物被蓝色的塑料布遮盖(用于隔热,阻止任何来自损坏建筑物屋顶的气流,以避免因雨水引起泄漏而造成进一步破坏,同时确保周围其他居民的安全),对震后SAR数据的分析产生一定影响,因此实验所采用的数据为4月14日的益城町地区震后ALOS-2 PALSAR单极化数据,分辨率为3 m,入射角为 $32.4^\circ$ ,视线向为左视,对SAR数据进行预处理(配准、地理编码、多视、滤波)后的图像及光学遥感影像如图3所示。

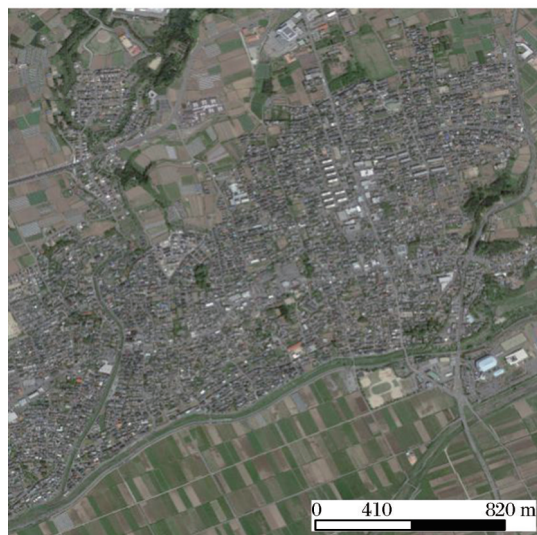
### 3.2 验证数据

实验采用的验证数据为益城町地区建筑物损





(a) ALOS-2 PALSAR影像(预处理后)



(b) Google Earth高分光学影像

图3 益城町地区遥感影像

Fig.3 Remote sensing image of Mashiki area

坏情况目视解译图(图4),矢量数据来源于Open Street Map,由于所获取的SAR数据的分辨率属于中高分辨率,未能准确提取中等破坏、完全损毁和基本完好建筑物的纹理特征,将建筑物分为倒塌建筑物和未倒塌建筑物,若中等破坏建筑物中存在倒塌区域则归为倒塌建筑物,其余归为未倒塌建筑物。

#### 4 建筑物震害信息提取与结果分析

SAR影像中的建筑物拥有散射、成像几何、纹理等特征。在SAR影像中,基本完好建筑物的形状一般表现为长方形或L形,分布较为规整,建筑物屋顶形成的镜面反射使其在图像中呈现出亮条纹,拥有较清晰的纹理特征。地震使得建筑物大量倒塌或损毁,变为废墟,形成的粗糙表面使得后向散射

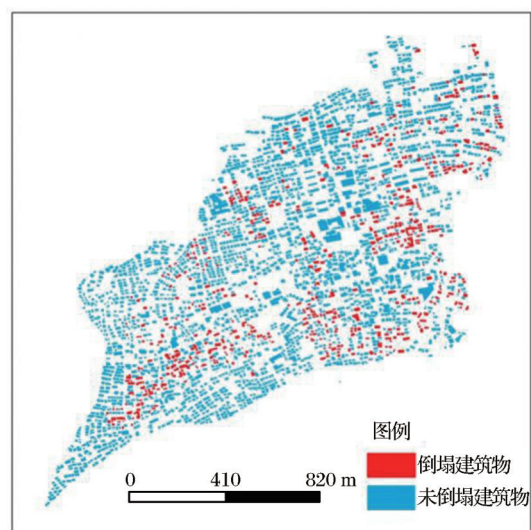


图4 益城町地区震后建筑物目视解译结果

Fig.4 Visual interpretation of buildings in Mashiki area after earthquake

强度信息变弱,叠掩、二次散射、阴影等特征消失,在SAR影像中的灰度较低,无规则的几何形态,纹理特征杂乱,同时建筑物倒塌后形成的多个角反射器在图像中反映为小的强反射亮斑。

在提取纹理特征时,为了确保大多数建筑物在纹理提取窗口中,需要设定合适的计算窗口,因为窗口过大或过小都将出现误分割现象,对纹理特征提取影响较大。在使用灰度直方图和GLCM纹理特征提取方法时,基于前人经验<sup>[7,28]</sup>,同时综合考虑了影像分辨率及所要识别的建筑物类别信息,选取 $11 \times 11$ 的窗口大小进行纹理分析。

##### 4.1 基于单种纹理特征方法提取

实验分别基于灰度直方图、GLCM、LBP、Gabor滤波器4种方法对震后单时相SAR影像进行了纹理信息提取,共26个纹理特征(表1),其中 $G_1 - G_8$ 分别设定的频率为0.4和0.1,所选取的角度方向分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 。分别对4种方法进行随机森林分类与精度评价,同时,将4种方法所获得的26个特征组合后也进行随机森林分类与精度评价。

由表1可知,基于单种纹理特征提取方法的总体精度均达到69%以上,均可满足倒塌建筑物震害信息提取的基本要求,其中基于GLCM和Gabor滤波器提取方法的提取精度较高,分类效果较为明显,而基于灰度直方图和LBP的特征提取方法的精度较低,分类后生成的细小碎斑较多,进行掩膜处理后分类效果较差。将4种方法中的26个纹理特

表1 五种方法所用的纹理特征及提取精度

Table 1 Texture features and extraction accuracy of five methods

方法	纹理特征	提取精度/%
灰度直方图	均值、方差、偏度、峰度、熵	69.13
GLCM	反差、相异度、同质性、角二阶矩、熵、GLCM均值、方差、相关性。	74.06
LBP	基本LBP、RILBP、ULBP	69.75
Gabor滤波器	$G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8$	74.94
所有特征组合		75.93

征组合后的分类精度为75.93%,较每种方法单独提取的精度略有提高。可能由于提取的纹理特征过多反而会造成特征冗余,在增加了计算的时间与复杂性的同时,并未使建筑物震害信息提取的精度有大幅度提高。因此,需要一种降低特征维度的方法来筛选出最合适的纹理特征组合进行倒塌建筑物的纹理信息提取。

#### 4.2 基于PCA的多种纹理特征方法提取

由4.1节可知,在利用纹理特征进行描述时,联合多种特征分析会造成信息冗余,当纹理特征数目越来越多,其分类复杂性也越来越大,并且不一定能得到较好的分类效果。因此本实验将4.1节中所获取的26个纹理特征进行了主成分分析与降维融合,以期达到在信息量最大化保留的同时降低数据集的维度。

经过主成分变换后的新波段排序表示所含信息量在逐级减少,表2选取了前10个主成分变换结果的特征值及累积贡献率,在第九主分量时其累计贡献率已达到100%。常规的标准为特征值 $\geq 1$ 或方差累积贡献率 $\geq 85\%$ ,由表可见第一主分量包含了大部分的纹理信息量,涵盖了高达89.57%的特征信息,所占比例较大,是数据的最大变化量,其值为1 881 537.27,前4个主分量的累积贡献率已经达到99.49%,仅剩0.51%的纹理特征信息未能表达,第五主分量及后续的主成分分量所包含的信息量减少较多并逐渐趋于零,其累积贡献率已经接近于100%。分别对前五维特征进行实验提取震害建筑物信息,结果如图5,可见当选择5个主分量进行分类时,其精度已经趋于不变,因此本实验设置4个主成分分量。然后采用RF分类器对经过主成分分析的纹理特征信息进行了倒塌建筑物与未倒塌建筑物的分类。

#### 4.3 结果分析

基于单种纹理特征方法提取震害建筑物信息

表2 前10个主成分的特征值和累积贡献率

Table 2 The eigenvalues and cumulative contribution rates of the first 10 principal components

主分量序号	特征值	累积贡献率/%
1	1 881 537.27	89.57
2	175 685.82	97.93
3	17 462.06	98.76
4	15 293.76	99.49
5	4 399.40	99.70
6	2 548.56	99.82
7	1 947.59	99.92
8	1 118.27	99.97
9	595.78	100.00
10	58.27	100.00

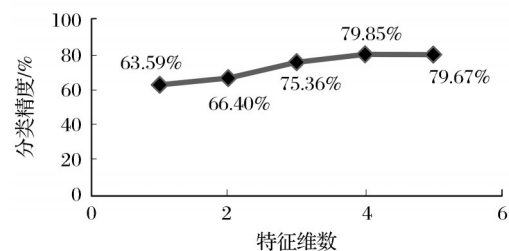


图5 融合后的特征在不同维数下的分类精度

Fig.5 The classification accuracy of the fused features in different dimensions

结果分别如图6(a)~6(d)所示。结合所有特征进行震害建筑物信息提取结果以及经过主成分分析的结果分别如图6(e)和6(f)所示,结合验证数据,分别统计倒塌与未倒塌建筑物的像元分布数目,构建混淆矩阵,计算两种方法建筑物的总体精度、制图精度(PA)及用户精度(UA),见表3、表4。无论从混淆矩阵还是建筑物震害信息提取的目视结果来看,两种方法的分类结果与目视解译的矢量数据结果均存在一定的误差,提取的倒塌建筑物信息偏少。但经过主成分分析的分类结果与解译结果较为接近,而所有特征融合后的倒塌建筑物分类效果不是很理想,很多倒塌建筑物未能准确分类。

对两种方法的分类效率与精度进行对比后(表5)发现,经过主成分分析的多纹理特征融合提取比未经过主成分分析的训练时间提高了25 s,提取结果精度也提高了3.92%,从而证明了本实验的有效性,在利用降维的方式提高效率的同时,保证了倒塌建筑物信息提取的准确性。但由于益城町地区的建筑物较为密集,存在很多遮挡现象,而4月15日的前震后也有部分中等破坏的建筑物被蓝色塑料布所遮盖,未能准确提取SAR图像中的纹理特



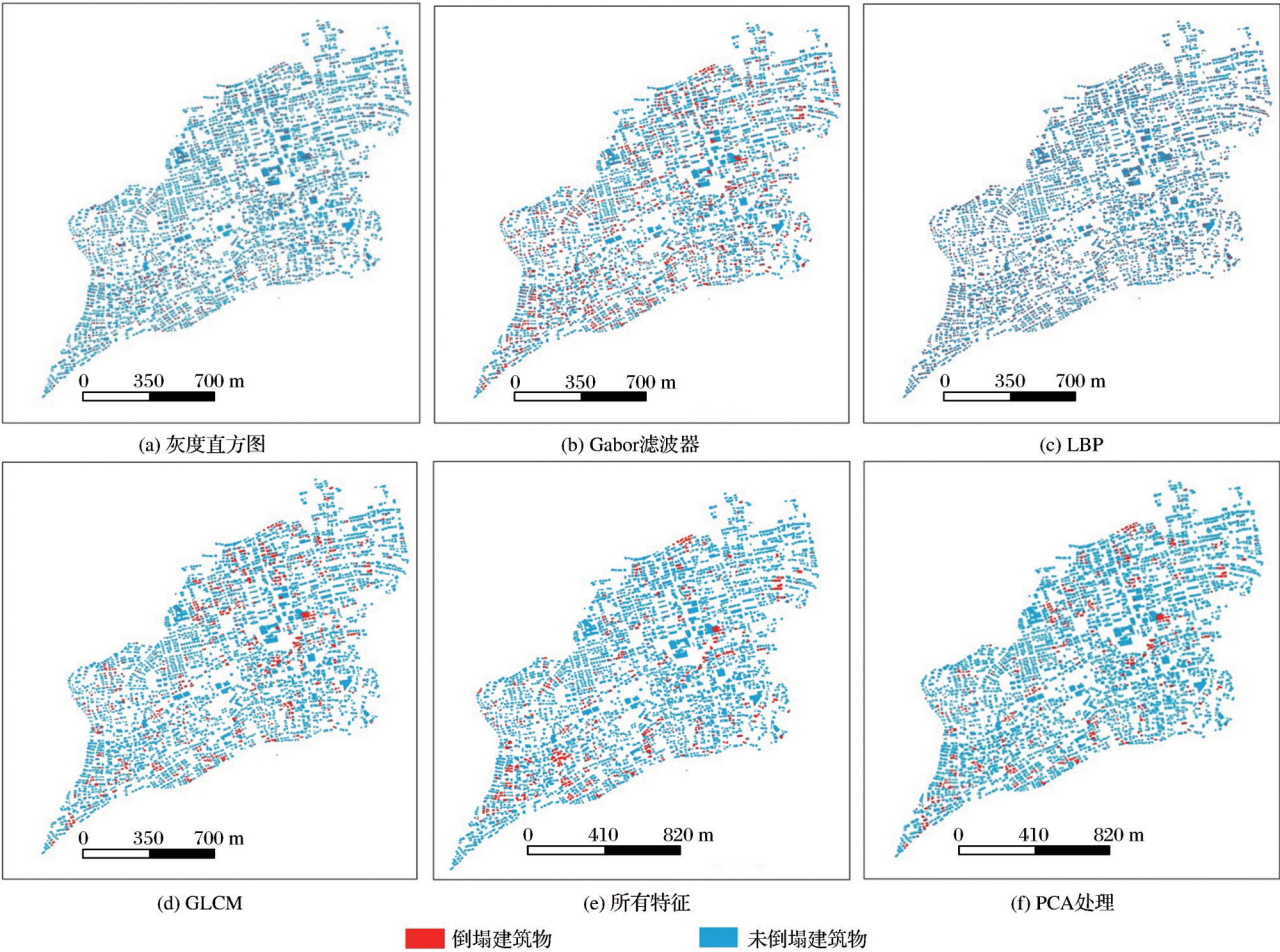


图 6 建筑物震害信息提取结果图

Fig.6 Damage building information extraction result

表 3 基于所有纹理特征提取精度分布

Table 3 The extraction accuracy based on all texture features

震害类型	验证数据		总计	UA/%
	倒塌	未倒塌		
倒塌	8 166	14 299	22 465	36.35
未倒塌	5 782	55 179	60 961	90.52
总计	13 948	69 478	83 426	—
PA/%	58.55	79.42	—	75.93

表 4 基于主成分分析后的多纹理特征提取精度分布

Table 4 The extraction accuracy of multi-texture feature based on PCA

震害类型	验证数据		总计	UA/%
	倒塌	未倒塌		
倒塌	10 930	13 794	24 724	44.21
未倒塌	3 018	55 684	58 702	94.88
总计	13 948	69 478	83 426	—
PA/%	78.36	80.15	—	79.85

征,可能会致使建筑物存在部分错分现象;同时由于目视解译结果存在人为因素的干扰,也可能是降

低最终分类效果的影响因素之一。

表 5 基于两种方法分类效率精度对比

Table 5 The efficiency and accuracy of classification are compared based on two methods

	特征维数	训练时间/s	提取精度/%
所有特征	26	66	75.93
主成分分析	4	41	79.85

5 结 语

以 2016 年日本熊本县益城町地区震后单时相的 ALOS-2 POLSAR 数据为研究对象,通过两组实验,基于灰度直方图、GLCM、LBP、Gabor 滤波器 4 种方法提取了倒塌建筑物的纹理特征信息。实验 1 分别利用 4 种纹理特征提取方法单独提取建筑物震害信息,并与 4 种方法组合提取建筑物震害信息的提取精度进行对比,结果表明基于多种纹理特征方法提取震害建筑物信息效果优于单种纹理特征方法的提取效果,提取精度为 75.93%,相较于 4 种纹

理特征单独提取的方法均有所提高;实验2将4种方法中所提取的26种纹理特征进行主成分分析实现了纹理特征信息的降维融合,结果表明经过主成分分析的多纹理特征提取方法比所有纹理特征融合提取的方法分类效果更优,提取精度为79.85%。实验结果进一步表明该方法适用于倒塌建筑物的震害识别,能较好地满足地震应急、评估的需求。

目前,建筑物震害信息提取在SAR影像中的应用研究仍是一个值得探讨的科学问题,实验对利用SAR影像中的纹理特征在建筑物震害信息提取中的作用进行了研究与探讨,基于主成分分析的方法对震害建筑物信息进行了提取,证明了该方法的有效性,但从整体进程来看,仍然存在一些问题需要改进。例如将LBP和Gabor滤波器的纹理特征提取方法应用于倒塌建筑物信息提取的方法尚未成熟,可能会对最后的分类精度产生影响;主成分分析虽然能提高分类效率,降低分类所需要的特征数目,但它在计算过程中仅将特征空间作为依据来划分成分,可能会丢失一些关键信息,从而使分类精度降低。在下一步研究中,将尝试通过自动化的特征筛选优化的算法来实现多种纹理特征的组合与分析,并将该方法应用于更多实例以证明其适用性。

#### 参考文献(Reference):

- [1] Xue Tengfei. Extraction of seismic buildings based on SAR multi-feature change detection [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. [薛腾飞. 基于SAR多特征变化检测的震害建筑物提取研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.]
- [2] Natsuaki R, Nagai H, Tomii N, *et al.* Sensitivity and limitation in damage detection for individual buildings using InSAR Coherence—a case study in 2016 Kumamoto earthquakes [J]. *Remote Sensing*, 2018(10): 245. DOI: 10.3390/rs10020245.
- [3] Zhan Sen, Zhang Jingfa, Wang Jianfei, *et al.* Earthquake induced building damage extraction based on multi-temporal and dual-polarized Sentinel-1A data [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 220–228. [詹森, 张景发, 王建飞, 等. 基于多时相双极化 Sentinel-1A 数据的震害建筑物提取 [J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 220–228.]
- [4] Guida R, Lodice A, Riceio D. An application of the deterministic feature extraction approach to COSMO-SkyMed data [C]// *Proceedings of the 2010 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. Aachen, Germany: VDE, 2010: 1–4.
- [5] Brett P T B. Urban damage detection in high resolution amplitude images [D]. Surrey: Surrey Space Centre, University of Surrey, 2013.
- [6] Liu Jinyu, Zhang Jingfa, Liu Guolin. An analysis of earthquake damage information based on imaging mechanism of the high resolution SAR image [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(3): 61–65. [刘金玉, 张景发, 刘国林. 基于高分辨率 SAR 图像成像机理的震害信息分析 [J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 61–65.]
- [7] Cui Liping, Wang Xiaoqing, Dou Aixia, *et al.* Building damage analysis based on high resolution Synthetic Aperture Radar imaging geometry [J]. *Earthquake Science*, 2016, 38(2): 272–282. [崔丽萍, 王晓青, 窦爱霞, 等. 基于高分辨率合成孔径雷达影像建筑物成像几何结构的震害特征分析 [J]. *地震学报*, 2016, 38(2): 272–282.]
- [8] Li Qiang, Zhang Jingfa, Gong Lixia, *et al.* Extraction of earthquake-collapsed buildings based on correlation change detection of multi-texture features in SAR images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(Sup.1): 128–138. [李强, 张景发, 龚丽霞, 等. SAR 图像纹理特征相关变化检测的震害建筑物提取 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(增刊1): 128–138.]
- [9] Guo Huadong, Wang Xinyuan, Li Xinwu, *et al.* Yushu earthquake synergic analysis study using multi-model SAR datasets [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(31): 1195–1199. [郭华东, 王心源, 李新武, 等. 多模式 SAR 玉树地震协同分析 [J]. *科学通报*, 2010, 55(13): 1195–1199.]
- [10] Sato M, Chen S W. Detection of damaged area by polarimetric SAR [C]// *Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. Tsukuba, Japan: IEEE, 2013: 451–454.
- [11] Karimzadeh S, Matsuoka M. Building damage characterization for the 2016 amatrice earthquake using ascending descending COSMO-SkyMed data and topographic position index [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018(8): 1–15. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2825399.
- [12] Zhai Wei, Shen Huanfeng, Huang Chunlin. Collapsed buildings extraction from the PolSAR image based on the analysis of texture features [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(5): 975–982. [翟玮, 沈焕锋, 黄春林. 结合 PolSAR 影像纹理特征分析提取倒塌建筑物 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(5): 975–982.]
- [13] Yaqi J, Josaphat S S, Ming C, *et al.* Earthquake/Tsunami damage assessment for urban areas using post-event PolSAR data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1088. DOI: 10.3390/rs10071088.
- [14] Romaniello V, Piscini A, Bignami C, *et al.* Earthquake damage mapping by using remotely sensed data: the Haiti case study [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 11(1): 016042. DOI: 10.1117/1.JRS.11.016042.
- [15] Shi L, Sun W, Yang J, *et al.* Building collapse assessment by the use of post-earthquake Chinese VHR airborne SAR [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(10): 2021–2025. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2443018.
- [16] Wu F, Gong L, Wang C, *et al.* Signature analysis of building damage with TerraSAR-X new staring spotlight mode data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016(99): 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2604841.
- [17] Dell'Acqua F, Polli D A. Postevent only VHR Radar satellite data for automated damage assessment [J]. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 2011, 77(10): 1037–1043.

- [18] Gong L X, Wang C, Wu F, *et al.* Earthquake induced building damage detection with post-event submeter VHR terraSAR-X staring spotlight imagery [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(12):887. DOI: 10.3390/rs8110887.
- [19] Chen Qihao, Nie Yuliang, Li Linlin, *et al.* Buildings damage assessment using texture features of polarization decomposition components [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 955-965. [陈启浩, 聂宇靓, 李林林, 等. 极化分解后多纹理特征的建筑物损毁评估 [J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 955-965.]
- [20] Ge P, Gokon H, Meguro K. Building damage assessment using intensity SAR data with different incidence angles and longtime interval [J]. *Journal of Disaster Research*, 2019, 14(3):456-465. DOI: 10.20965/jdr.2019.p0456.
- [21] Sun W, Shi L, Yang J, *et al.* Building collapse assessment in urban areas using texture information from post-event SAR data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3792-3808. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580610.
- [22] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns [C] // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7):971-987.
- [23] Sandler R, Lindenbaum M. Gabor filter analysis for texture segmentation [C] // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, CVPRW '06. Conference on. IEEE*, 2006.
- [24] Zhang Bin, Gao Xin. A Multi-feature joint SAR texture image classification method based on Gabor filter bank and LBP [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(17): 4196-4201. [张斌, 高鑫. 一种基于 Gabor 滤波器组和 LBP 的多特征联合 SAR 纹理图像分类方法 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(17):4196-4201.]
- [25] Deng Lei, Li Jing, Nie Juan. A method fusing SAR with multi-spectral image and reducing speckle noise [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(6): 87-90. [邓磊, 李京, 聂娟, 孙洪泉. 抑制斑点噪声的 SAR 与多光谱图像融合方法 [J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(6):87-90.]
- [26] Chen Miaojin, Wang Xiaoqin, Wu Siying. Importance analysis of soil erosion influencing factors based on random forest [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 209-219. [陈妙金, 汪小钦, 吴思颖. 基于随机森林算法的水土流失影响因子重要性分析 [J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4):209-219.]
- [27] Zhan Sen, Zhang Jingfa, Gong Lixia, *et al.* Seismic damage identification of single buildings in high resolution Synthetic Aperture radar image based on texture features [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(31): 47-54. [詹森, 张景发, 龚丽霞, 等. 基于纹理特征的高分辨率合成孔径雷达影像单体建筑物震害信息识别 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(31):47-54.]
- [28] Li Q, Gong L, Zhang J. A correlation change detection method integrating PCA and multi-texture features of SAR image for building damage detection [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, 52(1): 435-447. DOI: 10.1080/22797254.2019.1630322.

## Earthquake Induced Building Damage Assessment on SAR Multi-texture Feature Fusion

Du Yankai, Gong Lixia, Li Qiang, Zhan Sen, Zhang Jingfa

(National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Synthetic Aperture Radar (SAR) plays an important role in building collapse assessment after earthquake with its all-weather observation capability and rich texture information in SAR images. In order to solve the problems of multi-texture features of collapsed buildings in SAR images, such as low utilization rate and redundant feature information, a multi-texture feature classification method based on Principal Component Analysis (PCA) is proposed. This method extracts 26 kinds of texture feature information based on gray-level histogram, gray level co-occurrence matrix, Local Binary Pattern (LBP) and Gabor filters, constructs principal component variable for multi-dimensional feature selection and dimension reduction fusion, and extracts collapse information of buildings through Random Forest classification algorithm. Taking the Kumamoto earthquake in Japan in 2016 as an example to verify the effectiveness of this method, the results show that the extraction accuracy is up to 79.85%, the identification efficiency of collapsed buildings is improved, and the classification results are superior to each texture feature extraction method and multi-texture feature combination extraction method, which can be used for the rapid extraction of earthquake damage information of buildings.

**Key words:** Earthquake; Building damage assessment; SAR; Multi-texture feature; Principal component analysis