

SAR 影像建筑物震害检测方法研究综述¹

崔丽萍 王晓青

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要 合成孔径雷达 (SAR) 凭借其全天候、全天时的优势, 在震后灾情信息的快速获取以及灾情评估上发挥着越来越重要的作用。本文分析了建筑物在 SAR 影像上的成像特征及不同震害等级的建筑物在 SAR 影像上的特点, 总结了利用 SAR 技术进行建筑物震害检测的方法, 并将其归纳为目视解译、震前震后变化检测、震后单幅影像的震害检测方法。同时分析了这些方法的特点, 并对 SAR 建筑物震害检测方法进行了展望。

关键词: SAR 地震 建筑物 震害检测

引言

地震是对人类危害最大的自然灾害之一, 地球上每天发生着成千上万次地震, 其中一些震级较大的地震严重威胁着人们的生命和财产安全。如何快速有效获取和评估灾情信息已成为降低地震损失的重点研究内容。自 1906 年劳伦斯 (G.R.Laurence) 利用风筝携带的照相机成功地拍摄到旧金山大地震后的情景后, 人类便开始利用遥感技术记录地震灾害信息。遥感技术凭借其成像范围广、成像时间短、受地面自然条件限制少等优势, 在地震应急和震后灾情获取中的应用也越来越广泛。震后灾区阴雨天气较多, 而传统的光学遥感采用可见光波段进行成像, 虽然分辨率已经达到米级、亚米级, 但因其受阴雨天气的制约还是不能及时获取灾区影像。

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 是一种利用微波波段感知地物, 从而获取地物信息的主动式雷达技术, 较光学遥感具有很多优势。SAR 是斜距成像, 能够得到地物更多的三维信息; SAR 具有较高分辨率, 随着 2007 年德国 TerraSAR 和意大利 Cosmo/SkyMed 的发射, SAR 的分辨率已经能够达到 1m, 现在的机载 SAR 实验系统已经能够达到 0.1m 的分辨率 (Brenner 等, 2008); SAR 采用的微波波段较长, 能够很容易穿透云、雾、雨, 比如 L 波段 (1.5GHz) 在雨量为 150 mm hr⁻¹ 的天气成像时, 衰减不会超过 0.01dB km⁻¹, 采用 X 波段 (10GHz) 的 TerraSAR 和 Cosmo/SkyMed 在大暴雨情况下衰减即便高达约 4.23dB km⁻¹, 但其成像效果也几乎不受影响 (Brett, 2013b)。因此 SAR 几乎不受阴雨天气的影响, 具有全

1 基金项目 高分光学遥感应急救援示范应用 (31-Y30B09-9001-13/15-15); 陕西省地震应急遥感数字地球系统示范应用研究 (2013IES0204)

[收稿时间] 2015-10-21

[作者简介] 崔丽萍, 女, 生于 1991 年。硕士研究生。主要研究方向为遥感影像震害信息的提取。E-mail: liping_cui@163.com

天时、全天候观测的优势，在地震应急中获得了越来越多的关注及应用（Dekker, 2011; Dell'Acqua 等, 2012; Dong 等, 2013; Gokon 等, 2015）。

虽然现在 SAR 影像的分辨率已经达到了米级甚至亚米级，但 SAR 成像与光学成像不同，采用的是斜距成像方式，在 SAR 影像上建筑物的成像受到透视收缩、顶底位移、叠掩、阴影等几何形变的影响，再加上 SAR 系统是一个相干系统，还受到斑点噪声的影响，使得 SAR 影像的信息解译变得较光学影像更为困难。而发展适用于 SAR 影像的建筑物震害检测方法已经成为利用遥感技术进行震害检测亟待解决的问题。

本文分析高分 SAR 影像上建筑物的成像特点，针对利用 SAR 影像进行建筑物的震害检测方法进行总结，将其分成目视解译、利用震前震后 SAR 影像的变化检测、利用震后单幅 SAR 影像的震害检测方法三大类，并对各类方法进行论述，分析其特点。

1 高分 SAR 影像建筑物成像特征分析

随着空间分辨率的提高，建筑物在 SAR 影像上的空间几何展布也越来越清晰，典型的建筑物结构会依次出现叠掩（Layover）、二次散射（Double bounce）、阴影（Shadowing）结构。结合 SAR 的成像机理，图 1 描述了一个典型平顶矩形房屋模型的距离向剖面的后向散射特性，假设这个房屋模型的表面均匀，四周平坦，其宽度为 w ，高度为 h ，SAR 传感器的入射角为 θ 。 a 表示地面的散射， b 表示由建筑物垂直墙面与地面所成的二面角反射器形成的二次散射， c 表示由面向传感器的墙面所形成的单次散射， d 表示由屋顶形成的后向散射， e 表示阴影。图 1 表示的是 $h < w \cdot \tan\theta$ 的情形。

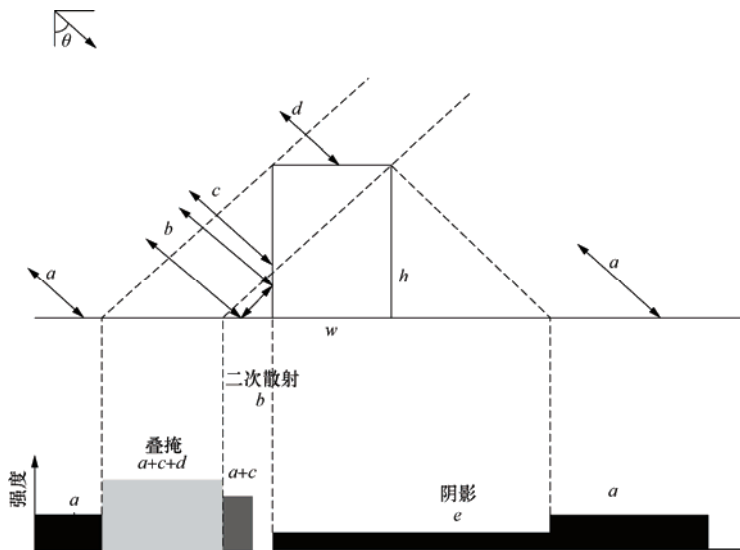


图 1 ($h < w \cdot \tan\theta$) 平顶矩形房屋模型后向散射特性 (Brunner, 2009)

Fig. 1 ($h < w \cdot \tan\theta$) Back scattering property of a flat roof rectangular building

图 2 是一个平顶建筑物在地距和斜距上的成像。面向传感器 S 一侧的墙体与地面 AB 到达传感器的距离相同，回波产生叠加，产生较亮的叠掩现象 0，同时其形成的二面角反射器，使得高亮的二次散射亮线出现。地面 CD 产生电磁波照射的盲区而产生阴影。

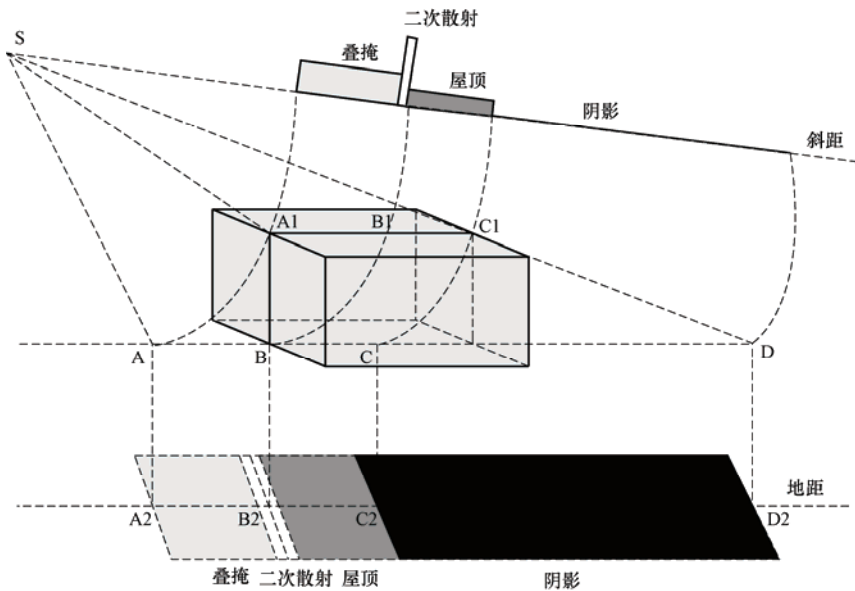


图 2 平顶建筑物在地距和斜距上的成像

Fig. 2 The projection of a flat roof building on the slant and ground rectangular range

基于高分辨率光学影像的建筑物震害等级一般分为基本完好、部分倒塌、倒塌三类（王晓青等，2013）。基本完好的建筑物（图 3a）在高分 SAR 影像上基本会表现出完整的成像特征，即存在由角反射效应形成的连续亮线，影像远距端存在规则阴影，纹理均匀；部分倒塌的建筑物（图 3b），其特征介于基本完好和倒塌建筑物之间，有可能存在阴影和二次散射亮线，但连续性较差；倒塌建筑物（图 3c）没有规则的形状，显示为杂乱的亮点，阴影消失。

2 SAR 影像建筑物震害检测方法

利用 SAR 影像进行建筑物的震害检测方法存在不同的分类方案，依据解译方式和使用数据可分为目视解译、利用震前震后 SAR 影像的震害检测、利用震后单幅 SAR 影像的震害检测方法。其中，利用震前震后 SAR 影像的震害检测分为利用 SAR 影像强度信息和相位信息；利用震后单幅 SAR 影像的震害检测分为利用影像的纹理、极化信息和借助模拟的方法。

2.1 目视解译

震害目视解译是指解译人员根据雷达影像上地物的成像特征和规律，根据自己的知识和经验人为地进行震害信息的定性或定量判读的方法。

目前目视解译方法仍然是地震灾害提取最为直接和有效且广泛应用的方法。国内早期杨喆等（1999）分别以 3m 和 6m 的机载 SAR 影像对极震区的 SAR 影像震害特征进行了分析，建立了 3 种不同类型的房屋损毁率与烈度的响应模型，确定了相应烈度房屋损坏率的阈值，最终快速确定极震区范围，为地震抢险救灾提供了重要依据。邵芸等（2008）对汶川地震灾区 SAR 影像进行了目视解译，并对安昌镇等城镇建筑物的震害程度进行了评估，得出安昌镇的损坏程度远大于花菱镇的结论。Balz 等（2010）利用震后高分 SAR 影像对 2008 年 5 月 12 日汶川地震后安昌镇、都江堰和北川进行了震害目视解译，并分析了倒塌和未倒塌建筑物在 SAR 影像上的特征。张继贤等（2010）采用 X 波段和 P 波段雷达影像，辅以光学影像对 2010

年玉树 7.1 级地震进行了灾情信息的快速判读，为判断和分析灾情提供了重要依据。

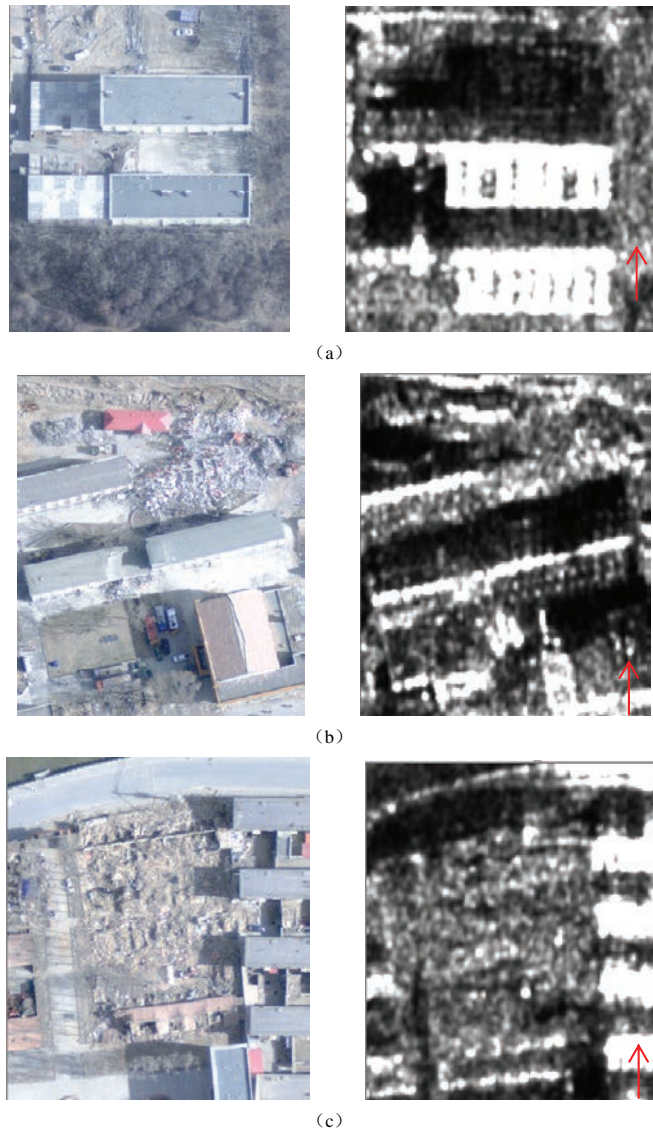


图 3 基本完好 (a) 局部倒塌 (b) 和完全倒塌 (c) 建筑物遥感影像

(左为震前 QuickBird 光学影像, 右为震后机载 SAR 影像, 红色箭头代表雷达视向)

Fig. 3 Remote sensing images of (a) non-damaged building (b) partially damaged building (c) completely damaged building (left is Quickbird image before the earthquake, right is the aerial SAR image after the earthquake, the red arrow is the radar look direction)

需要注意的是, SAR 影像成像较为复杂, 其解译标志跟光学影像的解译标志所反映的物体有所不同, 这需要解译人员有足够的解译知识和经验。另外 SAR 特殊的成像机理和斑点噪声的存在使人工判读的主观错误和理解错误不可避免, 而且完全的人工判读、理解不满足某些应用上实时性的要求 (杨文等, 2004)。

2.2 利用震前震后 SAR 影像的变化检测

利用震前震后 SAR 影像进行震害检测归根结底就是变化检测的问题。SAR 影像能够记录目标地物回波的后向散射强度和相位信息,可以利用震前震后的强度信息或者相位信息来检测建筑物的倒塌情况。在高分辨影像上可以利用建筑物成像的几何结构进行震害检测。

2.2.1 利用强度信息的建筑物震害检测

Yonezawa 等(1998, 2001)对 1995 年的日本阪神(Hyogoken-Nanbu, 或 Kobe)地震前后的 ERS-1 雷达影像进行了强度相关性和相干性研究,结果表明受地震破坏的建筑物改变了原来建筑物的后向散射特性,导致震前震后影像的去相干和强度相关性减小,并且去相干的大小与震害程度具有紧密的联系。Matsuoka 等(1999)发现 1995 年阪神地震的 JERS 和 ERS 雷达影像上严重损坏的建筑物比未损坏的建筑物区域的后向散射强度的均值低,并且震前震后的强度相关性也降低。之后,对阪神地震的研究也表明,在建筑物损坏区域,震前震后的后向散射系数差和强度相关性减小,并利用这两个指标引入了区分度,结果表明,区分度与震害等级相关,而且能够提高建筑物震害检测的精度(Matsuoka 等, 2004a)。Matsuoka 等(2004b)将这一方法应用于 2003 年的 Algeria 地震,也取得较好效果,随后又在 Bam 地震中对这一方法进行了修正(Matsuoka 等, 2005)。窦爱霞等(2003)提出采用单个相关系数空间分布检测地震破坏区域和利用多个相关系数检测建筑物破坏程度的震前震后 SAR 图像变化检测方法,并以张北地震为例进行了实验,在地面实际调查资料检验中显示了令人满意的效果。Bruzzone 等(2015)结合了条带式 and 聚束式影像,提出利用条带式高分(3—5m)影像快速检测出变化的区域,然后利用聚束式甚高分(1m)影像对每个变化区域进行分析来检测单体倒塌建筑物,并应用于拉奎拉(L' Aquila)地震的 Cosmo-SkyMed 震前震后 SAR 数据取得了高精度结果。Marin 等(2015)利用震前震后 TerraSAR-X 影像的后向散射强度差和相关性组成的区分指标,对建筑物单体的屋顶区域进行了震害分析与提取,正确率达到 75%。

利用 SAR 强度信息提取建筑物震害信息主要是利用震前震后强度的相关性与震害的联系来进行的。目前用中低分辨率 SAR 影像进行的变化检测一般基于像素级别或者邻域像素,所得结果很大程度上取决于震前震后 SAR 影像的配准精度,而 SAR 影像固有的斑点噪声等因素使得 SAR 的配准十分困难,导致最终震害检测结果出现误判。

随着 SAR 空间分辨率的提高,建筑物在 SAR 图像上的叠掩、二次散射、阴影等几何特征越来越明显,一些研究者开始探寻采用建筑物在 SAR 影像上的成像几何结构对震害建筑物进行检测。Stilla 等(2001)在分析用高分 SAR 影像检测建筑物的潜在能力时就指出,利用高分 SAR 影像的这些几何特征为建筑物的分析提供了一种可行的思路。Guida 等(2010a)提出利用二次散射特征进行建筑物的震害信息提取,将建筑物的损坏量化成与建筑物高度相关的二次散射亮线的后向散射强度的变化,并利用 2009 年意大利 Aquila 地震的前后 Cosmo/SkyMed 强度数据进行验证,结果合理有效,同时又将此方法应用于模拟影像进行了深入的探讨(Guida 等, 2010b)。之后,Guida 等又采用不同的方法得到了震前震后二次散射亮线后向散射强度的变化并进行实验(Guida 等, 2010c)。Brett 等(2013a; 2013b)提出一种自动的基于分水岭检测(Ridge Detection)的方法来提取震前震后 SAR 影像的二次散射亮线,以此提取震害信息。国内刘金玉等(2013)对基于 SAR 的成像机理和目标的后向散射特征对建筑物、道路和桥梁等的震害特征进行了细致分析,为寻找合适的目标检测和提取方法提供

了思路。

目前基于建筑物成像几何特征的震害信息提取主要是利用建筑物的二次散射特征,但是此方法主要依赖于二次散射亮线的存在与否与建筑物的倒塌之间是否具有可靠的关联。实际上,如果建筑物受到周围环境(如树木等)的影响或者建筑物背向系统发射的雷达波传播方向的墙体倒塌,将会造成二次散射亮线的非正常变化,使其与实际建筑物完好与否的对应关系受到破坏,造成错分或漏分的可能。但对于较大且孤立的建筑物效果较好。

2.2.2 利用相位信息的建筑物震害检测

利用相位信息的震害检测就是根据相位的相干性(InSAR 技术)获取灾害信息。Yonezawa (1999)发现由于地震损坏严重的建筑物的强度相干性和干涉值下降,表明干涉技术对于城市建筑物的震害检测具有重要潜力。Takeuchi 等(2000)利用台湾集集地震 ERS-2 的 SAR 影像也证明了这一点。Yonezawa 等(2002)用 JERS-1 的 SAR 影像之相干性研究了 1995 年 Hyogoken-Nanbu 地震的震害信息检测,发现建筑物倒塌率与归一化干涉系数之间具有很强相关性,认为采用 SAR 干涉进行震害信息定量评估是可行的。ITO Yosuke 等(2000)的研究表明震害区域的干涉影像有明显的时间去相干现象,对 1995 年的 Kobe 地震的多时相影像进行了干涉处理,然后用神经网络分类器对干涉影像进行分类,以此来提取震害信息。Ito 等(2003)引入相干率,定义为震前震后 SLC (Single Look Complex, 单视复)影像的相干值/两幅震前 SLC 影像的相干值,研究表明相干率与震害等级间有很强的对应关系,继而提出了一种基于相干率的灾害评估模型。Gamba 等(2007)将强度和相位信息相结合进行灾害制图,取得了相对较好的效果,但因为分辨率的限制,即使结合相位和强度信息还是不能够对震害等级进行很好的精确分类。

虽然进行干涉分析能够提取建筑物的震害信息,但是相位对例如卫星几何、波长、获取时间等参数敏感(Zebker 等, 1992),强度信息对于以上参数相对不敏感(Yonezawa 等, 2001),所以利用强度信息来提取建筑物的震害信息更加具有稳健性。但因为斑点噪声的影响不能基于单个像素进行分析,而是基于邻域像素,因此在利用强度信息进行建筑物震害检测前应该进行去噪滤波处理并且需要考虑滤波窗口大小对结果的影响。

利用震前震后高分 SAR 影像进行变化检测虽然能够获得建筑物震害信息,但是高分 SAR 系统的发展时间相对不长,并且高分 SAR 数据大多采用刈幅有限的聚束模式,而许多地方还没有高分 SAR 数据覆盖,虽然常常能够得到震后的高分 SAR 数据,但是却缺少震前的高分 SAR 数据,所以利用震前震后高分 SAR 影像进行震害检测的方法往往不能够满足地震应急的需求。

2.3 利用震后单时相 SAR 影像的震害检测

2.3.1 利用 SAR 影像纹理信息的建筑物震害检测

SAR 影像具有丰富的纹理信息,基于纹理的分析方法是对像素空间分布关系进行研究,体现了地物的组织排列结构以及与周围环境的关系。常用的纹理提取方法包括:灰度共生矩阵(GLCM)、马尔科夫随机场(MRF)、分形法、小波方法等。基于 GLCM 方法的纹理测度有:同质性、异质性、熵、方差、均值等。纹理特征提取的目标是提取的纹理特征维数不大、鉴别能力强、稳健性好,提取过程计算量小,能够指导实际应用。但目前仍然缺乏实用的、稳健的纹理特征提取方法(刘丽等, 2009)。

Dell'Acqua 等(2009)采用 2008 年汶川地震映秀镇的震后 Cosmo/SkyMed 和 Terra SAR-X

影像, 计算城区的纹理测度同质性 (Homogeneity) 和震害等级的相关性, 相关系数都没有达到 0.25, 但同质性随建筑物损坏程度增大而减小的趋势仍然很明显。Polli 等 (2010) 计算了 8 个不同纹理测度 (均值、方差、同质性、对比度、异质性、熵、二阶距、相关性) 与震害等级之间的相关性, 结果表明熵和同质性与震害等级具有相对较好的相关性, 并且震后熵值 (同质性) 相对震前有增大 (减小) 的趋势, 其增大 (减小) 的幅度与震害等级成正相关。Dell'Acqua 等 (2011a) 将 GLCM 的纹理测度同质性和熵分为三类, 对应三个不同的震害等级, 并对 2008 汶川地震、2009 年意大利 L'Aquila 地震和 2010 海地地震的震后单幅 SAR 影像进行了震害检测, 虽然结果对于一些街区的震害程度有过高的估计, 但也是一次基于单幅 SAR 影像进行震害检测的尝试, 对后续研究具有重要意义。之后, Dell'Acqua 等 (2011b) 又采用 Hati 地震的 Cosmo-SkyMed 数据, 选取了更加精确的定量参考数据——高分航空影像, 基于面积的震害面积指数 (DAR) 所得的三类震害等级, 对比基于目视解译的定性参考数据, 提高了震害检测的精度, 有助于分析基于纹理测度检测震害时引起错分的原因。分维值可以直接度量影像的粗糙度, 金鼎坚等 (2012) 对机载 SAR 影像分维分析方法进行了初步探索和 2010 年玉树地震实例分析, 得到了较好的震害检测结果。Shi 等 (2015) 首次利用了中国的双波段机载 SAR 系统 (CASMSAR) 在 X、P 波段下的干涉、极化模式数据对玉树地震进行评估。分析了 40 个极化特征、3 个干涉特征和 138 个纹理特征来区分倒塌建筑物和完好建筑, 并对这些特征进行评价, 得出纹理特征是量化玉树建筑物震害的较好指标。

基于纹理的震害检测方法大多是以街区 (block) 为尺度的。因为以街区为尺度能够抑制单个像素水平上噪声的影响, 而且同一街区的建筑物通常具有相似的形状, 在统计意义上亦有同质性。

2.3.2 利用 SAR 影像极化信息的建筑物震害检测

在垂直于电磁波传播方向的平面上有电场强度和磁场强度两个垂直的分量。平面波的极化, 描述了电磁场中电场矢量顶端在垂直于传播方向的平面上在一个周期内随时间变化的轨迹, 极化波按轨迹形状的不同可分为三类: 线性极化波、圆极化波和椭圆极化波, 其中线性极化波又可分解为水平极化波 (H) 和垂直极化波 (V) (郭华东, 2000)。散射体由于自身特性、几何结构等会引起入射电磁波极化特性的改变, 所以绝大多数地物在不同的极化态下的表现形式不同。利用极化的这种优势, 可以基于震后的单幅 SAR 影像进行震害信息检测。

Ainsworth 等 (2008) 的研究表明, 圆极化相关系数对于人工建筑物具有很高的敏感性, 可用于建筑物的检测。Guo 等 (2009) 采用汶川地震北川和都江堰作为研究区域, 采用多极化影像对比分析了倒塌建筑物和完好建筑物的极化特征, 结果表明 SAR 的一些极化参数能够用来区分倒塌和完好建筑物, 可利用 HH 极化的后向散射系数的变化进行倒塌建筑物的检测。郭华东等 (2010) 基于玉树地震后的 Radarsat-2 精细模式极化数据, 提出了基于震后单幅极化雷达影像提取倒塌建筑物的 $H-\partial-\rho$ 方法, 其中, H (熵) 反映目标散射机制的随机程度, ∂ 代表目标平均散射机制类型, ρ 是圆极化相关系数, 未倒塌房屋比倒塌房屋有较高的 ρ 值。Sato 等 (2013) 采用 2011 年日本大地震的 ALOS-PalSAR 全极化数据对震害信息进行了判读, 结果验证了全极化数据能够更好地理解地物散射模型, 能有效地提高获取目标信息的能力。

多极化 SAR 虽然能够帮助检测损毁建筑物, 但是提供双极化或者多极化的高分辨率 SAR

是以牺牲空间分辨率为代价的。如果从极化和高分辨率中选一个作为附加条件的话,应该选择高空间分辨率。因为识别震害建筑物的最重要的特征还是形状和纹理(Balz 等, 2010)。

2.3.3 利用 SAR 影像模拟的建筑物震害检测

为了弥补震前 SAR 影像的缺少、满足地震应急震害监测评估的需求, Brunner (2009) 采用基于射线追踪和朗伯反射混合模型的雷达建筑物成像模拟的方法, 根据从震前光学影像上提取的建筑物三维参数, 对震前的 SAR 影像进行模拟, 再将模拟 SAR 影像与震后 SAR 影像做相似性计算, 根据 Bayesian 分类器进行分类来提取震害信息。将此方法用于汶川地震映秀镇 30 栋建筑物的震后 TerraSAR 和 Cosmo/SkyMed 影像分析, 结果显示采用基于最大期望算法的监督分类, 对于倒塌建筑物和未倒塌建筑物的区分精度能达到 90%, 非监督分类精度也能达到 80%。采用此方法进行 SAR 影像的模拟时没有考虑建筑物周围的树木、车辆等地物对后向散射系数的影响, 是影响震害分类结果的不准确的重要原因之一。Wang 等 (2009) 在国内应用高分 SAR (分辨率优于 1m) 对地震灾害进行评估, 通过对汶川地震的建筑物进行模拟分析, 对比实际机载高分 SAR 影像, 总结了高分辨率 SAR 图像中建筑物震害损毁的特征与规律。温晓阳等 (2009) 采用射线跟踪的电磁计算方法和图像域积分的成像模拟方法得到不同受灾程度的建筑物 SAR 模拟图像, 与实际获取的机载 X 波段 SAR 图像对比表明, 模拟图像能有效辅助实际 SAR 图像进行城区特征分析。通过模拟的方式虽然弥补了震前 SAR 数据的不足, 但模拟影像和实际影像之间还是存在很大差距, 造成分析结果的误差, 需要通过进一步的研究减少模拟的偏差。

基于单幅建筑物的震害检测虽然能够满足应急的需求, 但是仅仅基于单幅震后 SAR 影像来检测建筑物的震害是很困难的, 需要尽可能多地辅以其他信息, 如 GIS 数据、光学影像等, 来提高震害解译的精度与可靠性。

3 讨论

综上所述, 目视解译虽然能够直接有效地进行震害解译, 且应用广泛, 但对解译人员的经验和专业知识的依赖性较大; 基于震前震后影像进行变化检测的方法目前研究的比较多, 但是震前高分 SAR 数据的匮乏往往不能满足地震应急的需求; 基于震后单幅 SAR 影像进行震害检测虽然能够满足地震应急的需求, 但是由于 SAR 影像解译的困难性, 仅基于震后单幅 SAR 影像容易出现较大的不确定性。虽然目前用 SAR 影像进行建筑物震害评估的方法很多, 但大部分方法主要是针对中低分辨率的影像, 没有具体到建筑物单体上。

虽然米级分辨率 SAR 影像仍然不能对建筑物进行震害等级的分类, 仅仅能区分倒塌和未倒塌建筑物 (Brunner 等, 2011), 但随着 SAR 空间分辨率的逐步提高, SAR 的分辨率已经能够达到亚米级, 建筑物在 SAR 影像上呈现的几何展布也越来越清晰, 传统的震害检测方法已经不能完全适应高分、甚高分 SAR 影像, 研究者们开始探寻利用建筑物在 SAR 影像上独特的成像特征 (比如高亮二次散射亮线特征) 来对建筑物震害进行识别。不论是利用震前震后 SAR 数据还是仅利用震后 SAR 数据, 从建筑物的成像几何特征上进行震害分析都将是未来研究的重要方向之一。对 SAR 影像丰富的极化信息和纹理信息的挖掘也是重要的提高建筑物震害解译精度的手段。震后单幅 SAR 影像的震害提取难度大、误判率高, 未来应综合利用震后 SAR 数据与 GIS 数据、DEM (数字高程模型)、光学影像等数据来提高所提取的震害信息的精度。

参考文献

- 窦爱霞, 张景发, 王晓青等, 2003. SAR 图像在震害变化检测中的应用. 2003 年第六届海峡两岸空间资讯与防灾科技研讨会.
- 郭华东, 2000. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社.
- 郭华东, 王心源, 李新武等, 2010. 多模式 SAR 玉树地震协同分析. 科学通报, (13): 1195—1199.
- 金鼎坚, 2012. 高分辨率 SAR 影像建筑物震害信息提取方法研究. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 刘丽, 匡纲要, 2009. 图像纹理特征提取方法综述. 中国图像图形学报, (4): 622—635.
- 刘金玉, 张景发, 刘国林, 2013. 基于高分辨率 SAR 图像成像机理的震害信息分析. 国土资源遥感, (3): 61—65.
- 邵芸, 宫华泽, 王世昂等, 2008. 多源雷达遥感数据汶川地震灾情应急监测与评价. 遥感学报, 12 (6): 865—870.
- 王晓青, 窦爱霞, 孙国清等, 2013. 基于综合震害指数的玉树地震烈度遥感评估研究. 地震, 33 (2): 1—10.
- 温晓阳, 张红, 王超, 2009. 地震损毁建筑物的高分辨率 SAR 图像模拟与分析. 遥感学报, 1 (1): 169—176.
- 杨文, 孙洪, 徐新等, 2004. SAR 图像目标解译算法研究. 系统工程与电子技术, (10): 1336—1339.
- 杨喆, 任德凤, 1999. 利用机载 SAR 震害影像特征快速圈定极震区. 地震地质, 21 (4): 452—458.
- 张继贤, 黄国满, 刘纪平, 2010. 玉树地震灾情 SAR 遥感监测与信息服务系统. 遥感学报, 5 (5): 1038—1052.
- Ainsworth T.L., Schuler D.L., Lee J.S., 2008. Polarimetric SAR characterization of man-made structures in urban areas using normalized circular-pol correlation coefficients. Remote Sensing of Environment, 112 (6): 2876—2885.
- Balz T., Liao M., 2010. Building damage detection using post-seismic high-resolution SAR satellite data. International Journal of Remote Sensing, 31 (13): 3369—3391.
- Brenner A.R., Roessing L., 2008. Radar imaging of urban areas by means of very high-resolution SAR and interferometric SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46 (10): 2971—2982.
- Brett P.T.B., Guida R., 2013a. Earthquake damage detection in urban areas using curvilinear features. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions, 51 (9): 4877—4884.
- Brett P.T.B., 2013b. Urban damage detection in high resolution amplitude SAR images. University of Surrey.
- Brunner D., 2009. Advanced methods for building information extraction from very high resolution SAR data to support emergency response. University of Trento.
- Brunner D., Schulz K., Brehm T., 2011. Building damage assessment in decimeter resolution SAR imagery: A future perspective. Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint: 217—220.
- Bruzzone L., Marin C., Bovolo F., 2015. Damage detection in built-up areas using SAR images. Encyclopedia of Earthquake Engineering, 473—500.
- Dell'Acqua F., Lisini G., Gamba P., 2009. Experiences in optical and SAR imagery analysis for damage assessment in the wuhan, May 2008 earthquake. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, IV-37-IV-40.
- Dell'Acqua F., Gamba P., Polli D.A., 2011a. Earthquake damage assessment from post-event VHR radar data: From

- Sichuan, 2008 to Haiti, 2010. Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint. IEEE: 201—204.
- Dell'Acqua F., Polli D.A., 2011b. Post-event only VHR radar satellite data for automated damage assessment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **77**: 1037—1043.
- Dell'Acqua F., Gamba P., 2012. Remote sensing and earthquake damage assessment: experiences, limits, and perspectives. *Proceedings of the IEEE*, **100**: 2876—2890.
- Dekker R.J., 2011. High-resolution radar damage assessment after the earthquake in Haiti on 12 January 2010. *Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing IEEE Journal*, (4): 960—970.
- Dong L., Shan J., 2013. A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **84** (7): 85—99.
- Gamba P., Dell'Acqua F., Trianni G., 2007. Rapid damage detection in the Bam area using multitemporal SAR and exploiting ancillary data. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions*, **45** (6): 1582—1589.
- Gokon H., Post J., Stein E. et al., 2015. A method for detecting buildings destroyed by the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using multitemporal TerraSAR-X Data. *Geoscience & Remote Sensing Letters IEEE*, (6): 1277—1281.
- Guida R., Iodice A., Riccio D., 2010a. An application of the deterministic feature extraction approach to COSMO-SKyMed data. *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on. VDE*, 2010: 1—4.
- Guida R., Iodice A., Riccio D., 2010b. Fast change detection algorithm for single post-earthquake SAR images of urban areas, XVIII Riunione Nazionale di Elettromagnetismo, Benevento.
- Guida R., Iodice A., Riccio D., 2010c. Monitoring of collapsed built-up areas with high resolution SAR images. *Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, **38** (5): 2422—2425.
- Guo H., Li X., Zhang L., 2009. Study of detecting method with advanced airborne and spaceborne synthetic aperture radar data for collapsed urban buildings from the Wenchuan earthquake. *Journal of Applied Remote Sensing*, (1): 131—136.
- Ito Yosuke, Hosokawa M., Lee H., Liu J.G., 2000. Extraction of damaged regions using SAR data and neural networks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. (B1): 156—163.
- Ito Yosuke, Hosokawa M., 2003. A degree-of-damage estimation model of earthquake damage using interferometric SAR data. *Electrical Engineering in Japan*, **143** (3): 49—57.
- Marin C., Bovolo F., Bruzzone L., 2015. Building change detection in multitemporal very high resolution SAR images. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, **53** (5): 2664—2682.
- Matsuoka M., Yamazaki F., 1999. Characteristics of satellite images of damaged areas due to the 1995 Kobe earthquake. *Proc. of 2nd Conference on the Applications of Remote Sensing and GIS for Disaster Management*. 1999: The George Washington University, CD-ROM.
- Matsuoka M., Yamazaki F., 2004a. Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes. *Earthquake Spectra*, **20** (3): 975—994.
- Matsuoka M., Yamazaki F., 2004b. Damage detection for the 2003 Algeria earthquake using SAR intensity images. *Proc. 1st Asia Conf. Earthq. Eng., Manila, Philippines, Mar. 2004*: 227—236.
- Matsuoka M., Yamazaki F., 2005. Building damage mapping of the 2003 Bam, Iran earthquake using Envisat/ASAR intensity imagery. *Earthquake Spectra*, **21** (Suppl 1): S285—S294.
- Polli D.A., Dell'Acqua F., Lisini G., 2010. Automatic Mapping of Earthquake Damage Using Post-Event Radar

- Satellite Data: The Story Goes on. Proceedings of 30th EARSeL Symposium, Paris, May 31–June 3: 565–572.
- Sato M., Chen S.W., 2013. Detection of damaged area by polarimetric SAR. Synthetic Aperture Radar (AP SAR), 2013 Asia-Pacific Conference on. IEEE, 2013: 451–454.
- Shi L., Sun W., Yang J. et al., 2015. Building collapse assessment by the use of postearthquake chinese VHR airborne SAR. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, **12**: 2021–2025.
- Stilla U., Soergel U., Thoennessen U., 2001. Potential and limits of InSAR data for the reconstruction of buildings. Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Ieee/isprs Joint Workshop, 64–68.
- Takeuchi S., Suga Y., Yonezawa C. et al., 2000. Detection of urban disaster using InSAR. A case study for the 1999 Great Taiwan Earthquake. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. IEEE, **1**: 339–341.
- Wang C., Zhang H., Wu F. et al., 2009. Disaster phenomena of Wenchuan earthquake in high resolution airborne synthetic aperture radar images. Journal of Applied Remote Sensing, (1): 031690-031690-16.
- Yonezawa C., Takeuchi S., 1998. Detection of damaged built-up areas by the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake using ERS-1/SAR intensity images. Journal of the Japan Society of Photogrammetry, **37**: 57–61.
- Yonezawa C., Takeuchi S., 1999. Detection of urban damage using interferometric SAR decorrelation. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. IEEE, (2): 925–927.
- Yonezawa C., Takeuchi S., 2001. Decorrelation of SAR data by urban damages caused by the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake. International Journal of Remote Sensing, (8): 1585–1600.
- Yonezawa C., Tomiyama N., Takeuchi S., 2002. Urban damage detection using decorrelation of SAR interferometric data. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International. IEEE, (4): 2051–2053.
- Zebker H.A., Villasenor J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, **30** (5): 950–959.

A Survey on the Earthquake Induced Building Damage Detection Using SAR Imagery

Cui Liping and Wang Xiaoqing

(Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract With its advantages, synthetic Aperture Radar plays an increasing importance role in the application of damage acquirement and assessment after an earthquake. Firstly, the characteristic of buildings classified into different damage level on SAR image is analyzed. Then a summary of the methodology of building damage detection is discussed, which including visual interpretation, change detection using before and after image and damage detection technic using post-event image only. Ultimately, a future expectation is addressed.

Key words: SAR; Earthquake; Building; Damage detection