

建筑物Ku波段极化SAR成像仿真及损毁评估特征分析

庞 雷^{①②③} 张风丽^{*①②③} 王国军^{①③} 刘 娜^{①②③} 邵 芸^{①②③}
张家萌^④ 赵钰川^④ 庞 蕾^④

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

^③(中科卫星应用德清研究院浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室 湖州 313200)

^④(北京建筑大学 北京 100044)

摘 要: 建筑物损毁评估在灾害应急监测中十分重要。近年来,随着SAR硬件多极化能力的增加,极化SAR为建筑物损毁评估提供了更多的可能性,基于极化特征的建筑物损毁评估方法逐渐成为了研究的重点。然而,由于极化SAR数据获取的限制,当前的研究主要集中在L, C, X等有限波段内。为了进一步加深对SAR图像损毁建筑物极化特征的理解并丰富其它波段下SAR图像损毁建筑物的极化特征应用,该文进行了建筑物Ku波段极化SAR仿真实验,并通过SAR图像极化分解的方法进行了损毁评估特征分析。该文首先制作了真实材料的建筑物缩比模型,利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台对损毁前后的建筑物目标进行SAR仿真成像,获取了建筑物损毁前后的Ku波段极化SAR图像。然后,借助 $H/A/\alpha$ 分解、Yamaguchi分解、Touzi分解等极化分解方法分析了Ku波段建筑物目标损毁前后的极化散射特征,分析表明,Yamaguchi分解得到的去定向后的体散射分量、二次散射分量占比以及Touzi分解得到的 α_{s1} 分量对于Ku波段建筑物损毁评估具有较好的指示意义;通过与X波段实验测量结果的对比,发现Ku波段对建筑物损毁评估更敏感,这对于未来雷达遥感应用具有重要的启发意义。

关键词: 极化SAR; 仿真成像; 极化分解; 建筑物; 损毁评估

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)03-0578-10

DOI: 10.12000/JR20061

引用格式: 庞雷,张风丽,王国军,等. 建筑物Ku波段极化SAR成像仿真及损毁评估特征分析[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 578-587. doi: 10.12000/JR20061.

Reference format: PANG Lei, ZHANG Fengli, WANG Guojun, *et al.* Imaging simulation and damage assessment feature analysis of Ku band polarized SAR of buildings[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 578-587. doi: 10.12000/JR20061.

Imaging Simulation and Damage Assessment Feature Analysis of Ku Band Polarized SAR of Buildings

PANG Lei^{①②③} ZHANG Fengli^{*①②③} WANG Guojun^{①③} LIU Na^{①②③}
SHAO Yun^{①②③} ZHANG Jiameng^④ ZHAO Yuchuan^④ PANG Lei^④

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(China Science and Technology Satellite Application Deqing Research Institute, Zhejiang key laboratory of microwave target characteristic measurement and remote sensing, Huzhou 313200, China)

^④(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

收稿日期: 2020-05-13; 改回日期: 2020-06-24

*通信作者: 张风丽 zhangfl@aircas.ac.cn

*Corresponding Author: ZHANG Fengli, zhangfl@aircas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502504), 国家自然科学基金(41671359), 北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”项目(编号17)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2016YFB0502504), The National Natural Science Foundation of China (41671359), The “Practical Training Plan” Project for Cross Training of High Level Talents in Beijing Colleges and Universities (No. 17)

责任编辑: 陈思伟 Corresponding Editor: CHEN Siwei

Abstract: Building damage assessment is important in disaster emergency monitoring. In recent years, with the increase of multi-polarization capability of Synthetic Aperture Radar (SAR), Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) provides more possibilities for building damage assessment, and the polarization-characteristic-based building damage assessment method has gradually become the focus of research. However, because of the limitations of data acquisition in PolSAR, current research mainly focuses on the L, C, X, and other limited bands. To obtain an in depth understanding of the polarization characteristics of damaged buildings in SAR images and develop the application of the polarization characteristics of damaged buildings to other bands, this study conducted a simulation experiment of Ku band polarized SAR of buildings, and performed damage assessment feature analysis using the SAR image polarization decomposition method. In this study, a scale model of real materials was built and the “microwave characteristic measurement and simulation imaging scientific experiment platform” was used to conduct SAR simulation imaging of the target buildings. The Ku band polarized SAR images before and after building damage were obtained. Then, the polarization scattering characteristics of buildings before and after damage were analyzed using various common polarization decomposition methods such as $H/A/\alpha$ decomposition, Yamaguchi decomposition and Touzi decomposition. Results show that the disoriented volume scattering component and the proportion of the disoriented secondary scattering component obtained by the Yamaguchi decomposition and the α_{s1} component obtained by the Touzi decomposition have good indicative significance for building damage assessment in the Ku band. Compared with the X band measurement results, the Ku band is more sensitive to building damage assessment, which has important implications for future radar remote sensing applications.

Key words: Polarimetric SAR(PolSAR); Image simulation; Polarimetric decomposition; Building; Damage assessment

1 引言

建筑物损毁评估在灾害应急监测中十分重要。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)凭借其不受光照和天气条件影响的特点,在灾害应急监测与灾后救援应用中具有明显的优势^[1]。利用SAR进行建筑物损毁评估,能够敏感地识别受灾区域目标的几何结构,获取粗糙元的空间分布及高度维特征,从而对建筑物损毁程度进行描述。然而,由于SAR图像成像机理的特殊性,以及城市目标、场景几何结构与空间关系的复杂性,SAR图像解译与城市损毁目标损毁信息的提取仍有较大的困难^[2]。

近年来,随着SAR硬件多极化能力的增加,极化SAR为建筑物损毁评估提供了更多的可能性。与传统SAR相比,极化SAR极大地提高了对目标散射信息的获取能力,为更加深入地研究目标散射机理提供了重要依据。因此,基于极化特征的建筑物损毁评估方法逐渐成为了研究的重点^[3-7]。当前,研究人员已经基于各类极化分解方法开展了广泛的研究并取得了丰硕的成果。比如,Sato等人^[8]应用Cloude-Pottier分解方法分析了2011年东日本大地震中石卷地区建筑物的受损情况,从整体上揭示了损毁地区的极化散射机理。Watanabe等人^[9]利用ALOS和PiSAR数据对地震前后的极化参数和散射机制做了对比分析,通过实验提出了一系列能够检测灾害信息的极化参数和极化特征。Zhai等人^[10,11]

还利用改进的Yamaguchi分解方法分别对2010年玉树地震主要震区与东日本大地震主要震区进行了快速建筑物损毁制图研究。Guo等人^[12]结合 $H-\alpha$ 分解与圆极化相关系数对玉树地震建筑物受损情况进行了评估。而Sun等人^[13]基于双波段(X与P波段)的CASMASAR影像探讨了损毁建筑物的纹理特征,并引入了5种常见的纹理描述符。Zhao等人^[14]则进一步探讨了圆极化相关系数与纹理特征结合的损毁评估方法。

总的来说,当前基于极化特征的建筑物损毁评估研究已经涵盖了各种各样的极化分解模型与方法^[15],但由于极化SAR数据获取的限制,当前的研究主要集中在L波段^[16]与C波段^[3],部分研究探讨了P波段^[10]以及X波段^[8]的损毁建筑物极化特征情况。为了进一步加深对SAR图像损毁建筑物极化特征的理解并丰富其它波段下SAR图像损毁建筑物的极化特征应用,本文进行了建筑物Ku波段极化SAR仿真实验。

本文利用中国科学院遥感与数字地球研究所研建的微波特性测量与仿真成像科学实验平台进行仿真成像实验,获取了Ku波段极化SAR图像。通过对SAR图像进行极化分解,分析了建筑物损毁前后的极化散射特征。实验结果表明,Yamaguchi分解得到的去定向后的体散射分量、二次散射分量占比,以及Touzi分解得到的 α_{s1} 分量对于建筑物损毁评估具有较好的指示意义。

2 Ku波段极化SAR成像仿真实验及数据获取

2.1 实验平台

Ku波段极化SAR成像仿真利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台实现。该实验平台由中国科学院遥感与数字地球研究所研建，位于浙江省德清县，是目前亚洲唯一、性能先进、功能高度集成的大型微波遥感基础实验科学装置。其在 $24\text{ m}\times 24\text{ m}\times 17\text{ m}$ 空间内构建了纯净无干扰的微波测试环境，精确的轨道系统可以实现天线与待测目标之间量化的相对位置与相对运动控制，能够获取待测目标在 $0.8\sim 20\text{ GHz}$ 频率范围内的连续微波波谱特征，同时可以完成对典型组件-目标-场景的微波特性全要素(多波段、全极化HH/HV/VH/VV、多角度 $0^\circ\sim 90^\circ$ 、全方位向 $0^\circ\sim 360^\circ$)微波特性测量与SAR成像仿真。平台的内部照片和具体参数如图1和表1所示。

2.2 建筑物损毁前后Ku波段仿真成像实验

首先，本文利用近似真实建筑物材料制作了某真实建筑物目标的三维缩比模型，如图2所示。该建筑物实际长 130 m ，宽 75 m ，高 50 m ，具有轴对称结构。为了契合实验平台的大小，以便于进行仿真成像模拟实验，本文按照1:50倍缩比制作建筑物目标三维缩比模型。在实际灾害中，建筑物的损毁情况会十分复杂，仅凭一个三维缩比模型无法概括

所有的损毁情况。因此，本文参照实际灾害中建筑物损毁的一些典型特征，如二面角结构破坏、垂直裂纹、水平裂纹、局部破碎、整体倒塌等对建筑物缩比模型进行了破坏，以较好地模拟建筑物目标真实的损毁状态。

接着，利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台进行了建筑物目标Ku波段SAR仿真成像。实验中，入射角定义为微波馈源相对于转台水平方向的夹角(本实验中固定为 50°)，方位角定义为目标模型与转台北方向的夹角，如图3所示。首先把完好的建筑物目标缩比模型放置到转台上，通过转台的 360° 旋转进行成像，同时对方位角与模型位置做好标记，完成一个方位角的测量后接下来变换方位角进行下一次测量。然后，对模型进行破坏，将损毁模型放置在对应标记处，依次进行测量。损毁前后的两次测量，通过具体的标记，确保了模型空间状态的一致性，即确保了两次测量下建筑物的损毁状态为唯一变量。

2.3 建筑物损毁前后Ku波段极化SAR仿真图像

实验获取了 50° 入射角下，建筑物损毁前后不同方位角($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$)下的Ku波段全极化SAR仿真图像。仿真图像的各项参

表 1 实验平台功能及性能参数

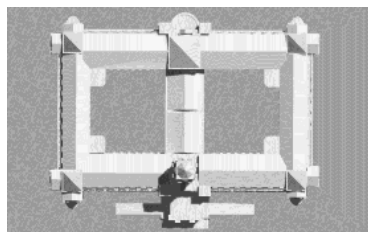
Tab. 1 The function and performance parameters of experiment platform

功能	参数
波段范围	$0.8\sim 20\text{ GHz}$
极化方式	单极化/双极化/全极化
入射角	$0^\circ\sim 90^\circ$
方位向	$0^\circ\sim 360^\circ$
轨道精度	mm级精确控制
成像模式	SpotLight/StripMap/ISAR等模式
	双天线InSAR成像技术
	3D层析SAR成像技术
被测目标尺寸	$1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\sim 4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$



图 1 微波特性测量与仿真成像科学实验平台内景

Fig. 1 Microwave characteristic measurement and simulation imaging science experiment platform interior view



(a) 完好建筑物俯视图
(a) Top view of intact building



(b) 损毁建筑物图像
(b) Image of damaged building

图 2 完好与损毁建筑物缩比模型(1:50倍缩比)

Fig. 2 Scale model of intact and damaged buildings (1:50)

数如表2所示。实验测量分辨率为5 cm，等效分辨率为2.5 m，过采样2倍，即图像像元大小2.5 cm，对应实际分辨率1.25 m。

图4—图6分别展示了建筑物损毁前后0°，30°与60°方位角的Ku波段SAR图像。其中，每幅图像自左上至右下分别为HH, HV, VH, VV极化，图像亮度反映了建筑物表面的后向散射系数(Radar Cross Section, RCS)值，RCS值的范围如右侧图例

所示。为了便于对比，同一方位角下建筑物损毁前后的图例范围被调整为一致。从整体上可以看到，实验测量得到的仿真SAR图像质量良好，完全符合建筑物一般散射特征，能够被用于建筑物损毁有关的进一步分析。

通过对比同一方位角下建筑物损毁前后的仿真SAR图像可以发现：完好建筑物图像纹理特征明显，图像灰度层次分明，与建筑物墙地结构具有较

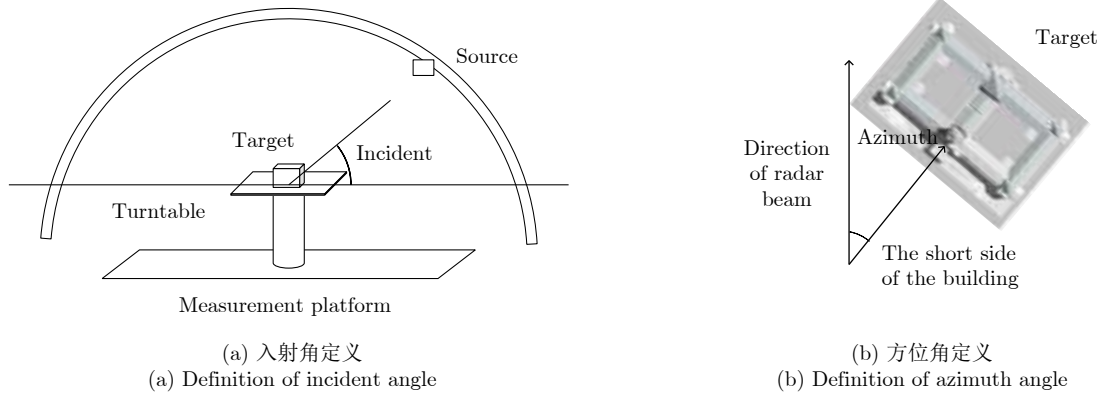


图3 入射角与方位角定义

Fig. 3 Definition of incidence angle and azimuth angle

表2 仿真图像指标参数

Tab. 2 Simulation image index parameters

序号	波段	极化方式	入射角(°)	方位角(°)	像元大小(cm)	实际分辨率(m)
1	Ku	HH, HV, VH, VV	50	0	2.5	1.25
2	Ku	HH, HV, VH, VV	50	30	2.5	1.25
3	Ku	HH, HV, VH, VV	50	60	2.5	1.25
4	Ku	HH, HV, VH, VV	50	90	2.5	1.25
5	Ku	HH, HV, VH, VV	50	120	2.5	1.25
6	Ku	HH, HV, VH, VV	50	150	2.5	1.25
7	Ku	HH, HV, VH, VV	50	180	2.5	1.25

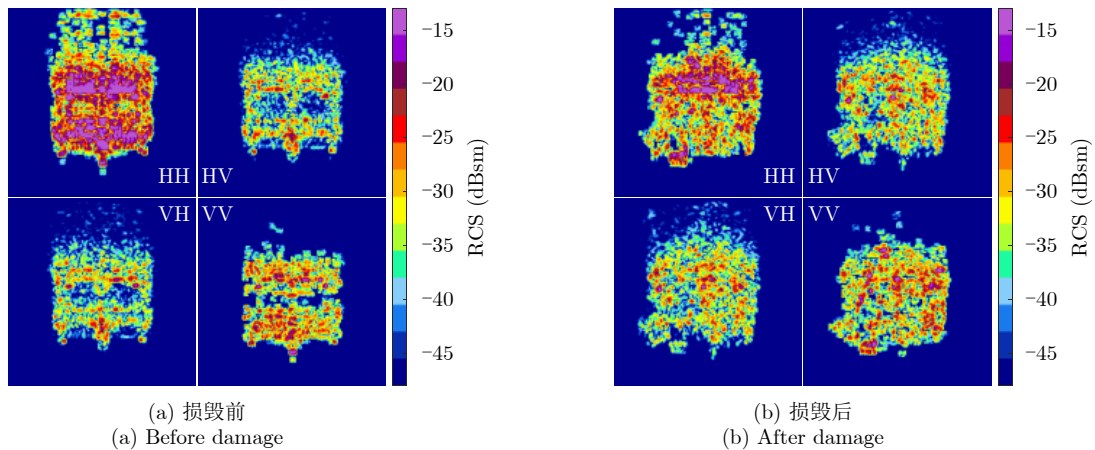


图4 0°方位角测量结果对比

Fig. 4 Comparison of measurement results of 0° azimuth angle

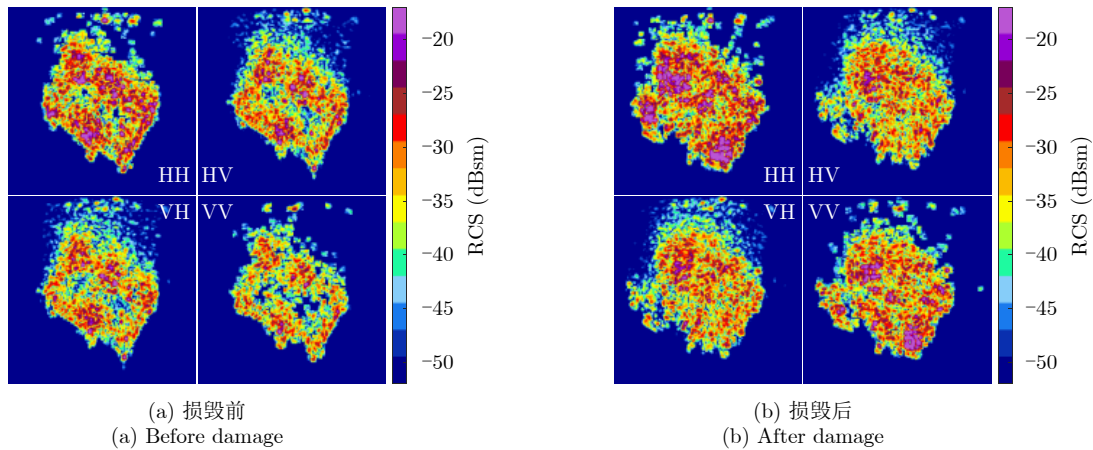


图 5 30°方位角损毁前后测量结果对比

Fig. 5 Comparison of measurement results of 30° azimuth angle

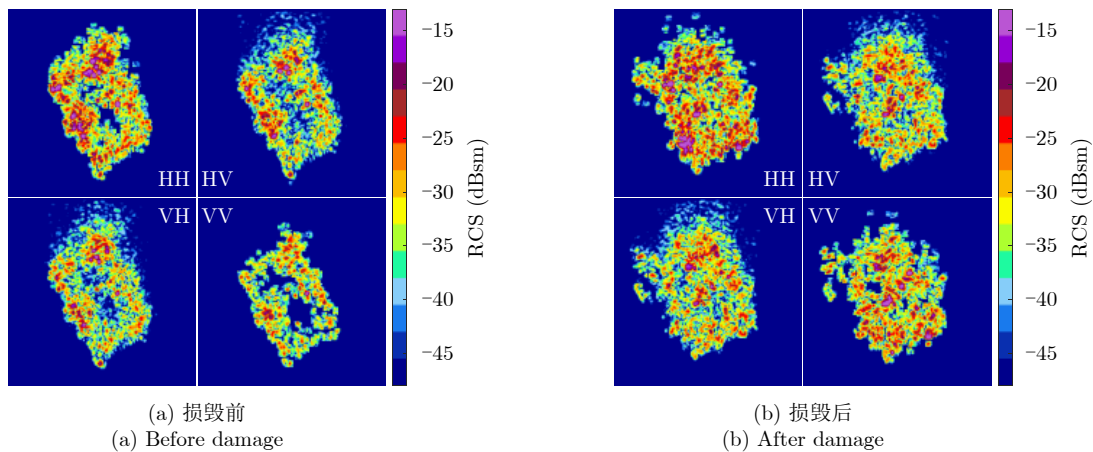


图 6 60°方位角损毁前后测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measurement results of 60° azimuth angle

好的对应关系；损毁建筑物图像则没有明显的纹理特征，呈现为杂乱、随机的亮点与墙地具有较好的对应关系，与完整建筑物的结构没有对应关系。

通过对不同极化下建筑物损毁前后的仿真 SAR 图像可以发现：建筑物在不同极化方式下的图像特征具有明显的差异。损毁前后的建筑物 RCS 值都呈现出 $HH > VV > HV/VH$ ，其中 HH 与 VV 图像特征更加鲜明，HV 与 VH 图像则更具有相似性。同时，在各极化方式下，损毁后的建筑物 RCS 值较损毁前都有显著的下降。这意味着采用多极化 SAR 图像能更完整地描述目标建筑物的结构特征，更有利于进行建筑物损毁检测。

通过对不同方位角下建筑物损毁前后的仿真 SAR 图像可以发现：建筑物目标在不同方位向上的图像特征差异明显，但总体上完整建筑物都具有相似的图像特征，损毁建筑物则各不相同。这是由于损毁建筑物墙面结构破损，导致反射截面随方位角改变发生了较大变化。同时，在不同方位角下

损毁后的建筑物 RCS 值也都较损毁前显著下降，并且下降程度各不相同。

3 极化分解与损毁评估指数提取方法

极化 SAR 通过收发极化状态正交的电磁波，能够获取目标的全极化信息。通过对目标电磁散射特性的建模与分析，能够更准确地理解目标极化散射机理，有助于准确反演目标物理参数。极化目标分解理论在近年不断发展，成为极化 SAR 散射机理解译的主流理论工具^[17]。对于建筑物而言，由于建筑物损毁的散射过程可以看作是一个随机、不确定的过程，通常采用非相干目标分解方法进行研究。常见的方法有 Freeman-Durden 分解^[18]、Yamaguchi 分解^[19]、Cloude-Pottier 分解^[20]、 $H/A/\alpha$ 分解^[21]以及 Touzi 分解^[22]等方法。

本文利用 $H/A/\alpha$ 分解、Yamaguchi 分解、Touzi 分解等常见的极化分解方法进行了试验，分析了相比特征值分解参数、归一化圆极化相关系数

(Normalized Circular polarization Correlation Coefficient, NCCC)以及各类极化分解参数。鉴于Yamaguchi分解充分考虑了城市与复杂地形的反射不对称性, Touzi分解则充分考虑了旋转不变性, 更能有效反映建筑物目标损毁前后的散射特征, 因此着重对二者结果进行了分析与论述。

Yamaguchi分解是一种可用于非方位向对称地物的四分量模型, 其考虑了城市和其他复杂地形的反射不对称情况^[19], 常被用于建筑物结构和损毁的表述。Yamaguchi分解的模型为

$$\mathbf{C} = f_s \mathbf{C}_s + f_d \mathbf{C}_d + f_v \mathbf{C}_v + f_h \mathbf{C}_h \quad (1)$$

式中, \mathbf{C} 为该像元的协方差矩阵; \mathbf{C}_s , \mathbf{C}_d , \mathbf{C}_v , \mathbf{C}_h 分别为表面散射、二次散射、体散射和螺旋体散射协方差矩阵; f_s , f_d , f_v , f_h 分别为表面散射分解系数、二次散射分解系数、体散射分解系数和螺旋体散射分解系数。

由于地形起伏或人造建筑物方位布局会引起极化方位角偏移, 而受此影响, 量测到的极化相干矩阵又会对极化参数分解造成影响。因此, 要想去除上述影响, 往往需要对Yamaguchi分解做极化方位角补偿处理, 又称去定向处理^[23,24]。从 \mathbf{S} 矩阵到 \mathbf{S}_0 矩阵的去定向旋转公式为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \mathbf{S}_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yamaguchi分解得到的四分量结果分别为二次散射、螺旋散射、面散射与体散射分量。本文对各分量进行了试验, 以探讨其在建筑物损毁评估应用中的潜力。为了消除建筑物目标缩比模型在试验平台中方位布局的影响以及衡量极化方位角补偿在损毁评估指数提取中的有效性, 试验还对比分析了去定向处理和未去定向处理的四分量结果。

鉴于二次散射主要源于完整的墙-地结构, 而损毁的建筑物则会由于不同的损毁程度造成不同破损状态的墙-地结构, 从而产生其他各类散射。若定义二次散射分量占比为二次散射分量占总的四分量的比值:

$$R_s = \frac{\text{Dbl}}{\text{Dbl} + \text{Hlx} + \text{Odd} + \text{Vol}} \quad (3)$$

式中, Dbl, Hlx, Odd, Vol分别代表二次散射分量、螺旋散射分量、面散射分量、体散射分量。由于二次散射分量占比描述了完整的墙-地结构在建筑物中的占比状况, 那么随着建筑物的损毁, 二次散射分量占比应该随之下降。本文对二次散射分量占比进行了试验, 以验证真实情况下的二次散射分量占比与猜想是否一致。

Touzi分解则是一种针对Cloude-Pottier分解对

于特定散射机制散射类型的模糊性提出的一种旋转不变(roll-invariant)的非相干分解方法^[22]。Touzi分解的模型为

$$\text{ICTD}_i = (\alpha_{si}, \phi_{\alpha si}, \tau_i, \lambda_i) \quad (4)$$

其中 $i=1, 2, 3$, 包括了主要、中等和低散射成分。其中每一个相干散射机制都可以用散射角 α_s , 散射相位 $\phi_{\alpha s}$ 和代表目标散射对称度的 τ 的极坐标轴来表示。归一化特征值 λ_i 表示每一个相应的特征向量 i 所代表的散射机制的相对能量。

Liu等人^[25]基于ALOS PALSAR数据研究了Touzi分解各分量在L波段的分布规律, 结果表明 α_{s1} , $\phi_{\alpha s1}$ 与 $|\tau_2|$ 对建筑物区域比较敏感。因此, 本文重点分析了 α_{si} , $\phi_{\alpha si}$, τ_i ($i=1, 2, 3$)等九分量结果, 以同L波段结果进行对比。

4 结果与分析

通过对建筑物损毁前后Ku波段50°入射角不同方位仿真SAR图像进行不同的极化分解, 得到了相应的极化分量。为了便于分析, 我们在各方位向上取了各分量的平均值。实验结果表明, 相比特征值分解参数、NCCC, $H/A/\alpha$ 分解, Yamaguchi分解与Touzi分解结果规律性显著, 更能有效反映Ku波段建筑物目标损毁前后的散射特征。

4.1 Yamaguchi分解结果分析

总的来说, 同一建筑物在Ku波段的极化方位角平均值在不同方位上各不相同, 但损毁后的极化方位角明显都更趋于0。这是由于极化方位角反映了一定的地形信息, 随着建筑物的损毁, 地形坡度趋于平缓。就四分量结果而言, 在去定向前, 损毁前后的四分量结果在各方位向上都不具有明显的规律性; 在去定向后, 损毁前后的四分量结果在各方位向上开始呈现出一定的规律性。其中, 体散射分量分布与和二次散射分量占比分布尤为显著。

从图7可以看到去定向后的体散射分量的值在损毁前后都较去定向前的值大, 同时经去定向处理后的体散射分量在各方位上都呈现出损毁后大于损毁前的状态。这是由于去定向处理消除了极化方位角的影响, 而建筑物在损毁后墙-地结构破损、组织破碎化、各类建筑介质愈加混合、多路径效应增加, 导致损毁后的建筑物体散射增加。所以在实际应用中, 体散射分量分布也对建筑物损毁有指示意义。

相较体散射分量, 从图8可以看到去定向后的二次散射分量占比在各个方位上都呈现出损毁后明显低于损毁前的状态, 即与体散射分量相反。这与本文一开始预计的结果一致, 是由于建筑物损毁

后,完整的二面角减少,二次散射减少,二次散射分量占比理应降低。但是因为极化方位角的影响,去定向前无法较好地表现出来,而去定向后有了良好的表现。事实上,简单地旋转去定向,不能有效实现大方位角下建筑物偶次散射分量的补偿。这就是为什么图8(b)损毁后曲线在90°出现了很大的下降。总而言之,在实际的建筑物损毁评估应用中,应该先对目标建筑物数据进行去定向处理,然后再进行Yamaguchi分解,以利用二次散射分量占比进行损毁评估。

4.2 Touzi分解结果分析

总的来说,虽然同一建筑物在Ku波段损毁前后的九分量整体分布规律性并不强,但是其中的 α_{s1} 分量表现出了显著的规律性,能够有效地被用于建筑物损毁评估应用中。图9展示了 α_{s1} 分量与 $|\tau_2|$ 分量的分布情况。

建筑物在损毁前后的 α_{s1} 平均值在各方位向上都明显表现出损毁前大于损毁后的特点,这与Liu等人[25]利用L波段ALOS POLSAR数据取得的研究结果相一致。这是由于 α_{s1} 反映了区域雷达信号与

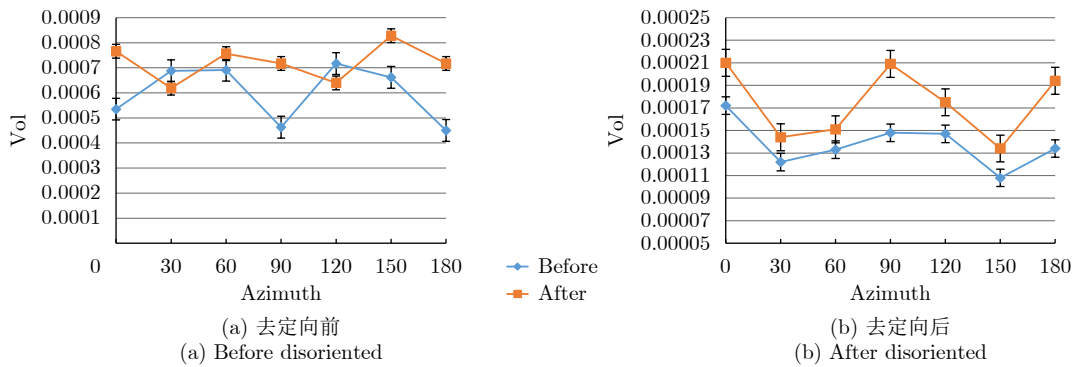


图 7 去定向前后的体散射分量分布
Fig. 7 Distribution of Vol before and after disoriented

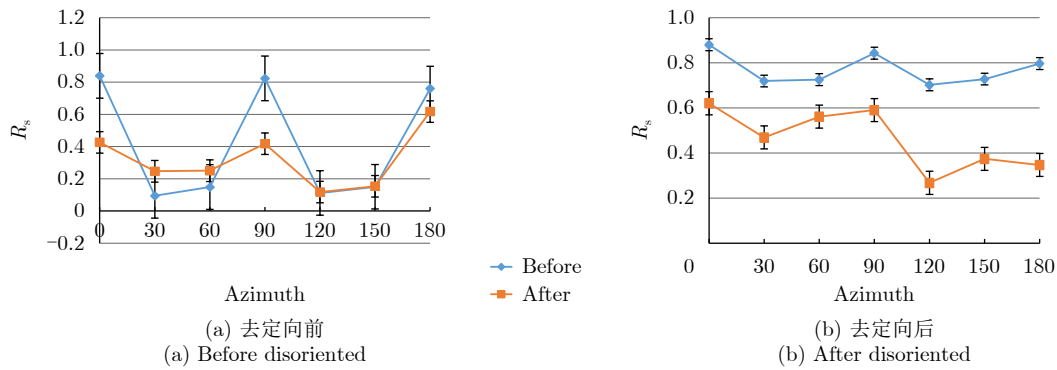


图 8 去定向前后的二次散射分量占比分布
Fig. 8 Distribution of R_s before and after disoriented

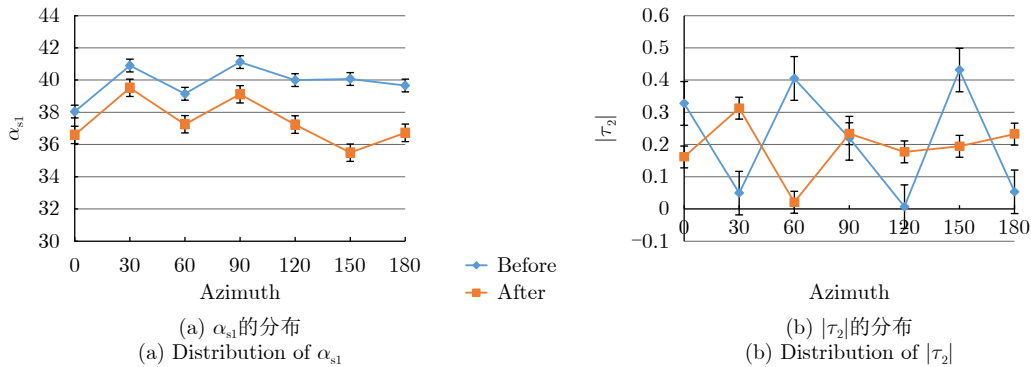


图 9 建筑物损毁前后 α_{s1} 与 $|\tau_2|$ 的分布
Fig. 9 Distribution of α_{s1} and $|\tau_2|$ before and after building damage

建筑物结构交互时的主要散射类型，而二次散射作为交互时最主要的散射机制在建筑物损毁后有着显著的降低。所以，反映在 α_{s1} 的平均值上时，就是各方位向上建筑物损毁前后 α_{s1} 平均值的显著降低。实验还发现， $|\tau_2|$ 虽然在各方位向上有一定的波动，但平均值都显著小于 $|\tau_1|$ 、 $|\tau_3|$ ，并趋于0。这也与L波段已有的研究结果^[25]趋于一致，原因是实验采用了纯建筑物模型，而在纯建筑物区域中， $|\tau_2|$ 的值会较小并趋于0。因此， $|\tau_2|$ 虽然无法较好地指示建筑物损毁评估，但是有利于纯建筑物区域的识别。

4.3 与X波段结果的对比分析

本文实验测量所用的微波特性测量与仿真成像

科学实验平台具有多波段工作能力，在进行Ku波段观测时，本文也进行了X波段的散射测量。图10为X波段建筑物损毁前后去定向Yamaguchi分解体散射分量、二次散射分量占比和Touzi分解 α_{s1} 分量的分布规律。通过与图7—图9所示的Ku波段有关结果对比可以看出，Ku波段提取得到的体散射分量、二次散射分量占比和 α_{s1} 分量比X波段更敏感地反映了建筑物损毁情况，这是因为Ku波段波长较短，相比长波长观测，对细小结构特征更敏感。

对比结果还可以看到，去定向的二次散射分量占比在Ku波段与X波段的分布特征都十分显著，这也表现了去定向后的二次散射分量占比在两个波段具有较好的泛化性，十分适合多波段的应用。

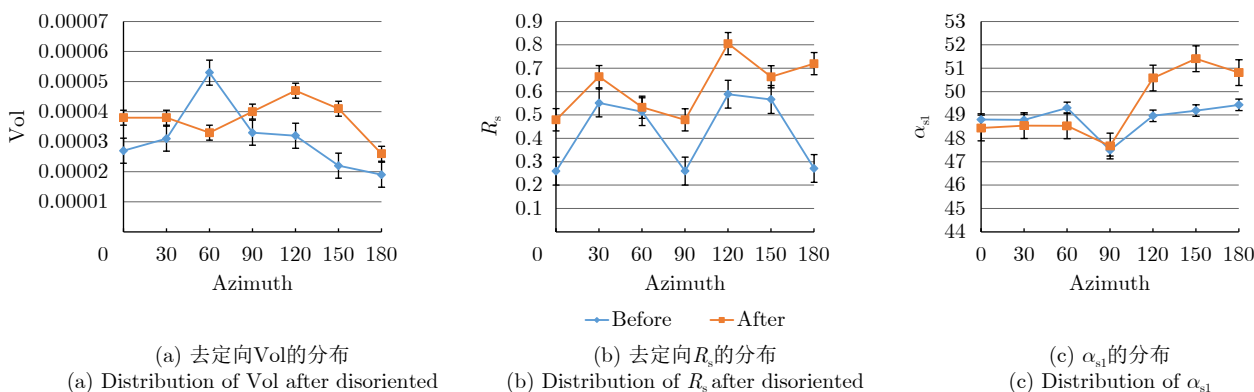


图 10 X波段建筑物损毁前后体散射分量、二次散射分量占比与 α_{s1} 分量的分布

Fig. 10 Distribution of Vol, R_s and α_{s1} before and after building damage in X band

5 结论

本文利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台进行了Ku波段极化SAR仿真成像实验，在简要分析了建筑物损毁前后的图像特征之后，借助H/A/ α 分解、Yamaguchi分解、Touzi分解等极化分解方法探讨了建筑物损毁前后Ku波段极化特征的分布规律。

实验表明，就Yamaguchi分解而言，去定向后的体散射分量分布和二次散射分量占比分布相比去定向前在各方位向上都呈现出损毁前后差异明显的规律，特别是去定向后的二次散射分量占比在各方位向上损毁后都显著低于损毁前。这意味着，去定向的Yamaguchi分解的体散射分量与二次散射分量占比能被较好地应用于建筑物损毁评估。对于Touzi分解而言，实验室仿真得到的损毁前后Ku波段的极化参数分布与星载L波段的极化参数分布有着一致的规律性。其中， α_{s1} 分量较好地反映了建筑物损毁前后的状况。实验还表明，Ku波段比X波段的极化特征规律性更强，同时去定向的二次散射

分量占比在两个波段具有较好的泛化性。在接下来的研究中，我们会进一步研究探讨如何将仿真实验研究结果用于SAR卫星图像的分析以更好地进行建筑物损毁评估。

参考文献

- [1] Tadono T, Ohki M, and Abe T. Summary of natural disaster responses by the Advanced Land Observing Satellite-2(ALOS-2)[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, Kyoto, Japan, 2019: 69–72. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W7-69-2019.
- [2] 张凤丽, 邵芸. 城市目标高分辨率SAR遥感监测技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 415–422. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.3.415.
ZHANG Fengli and SHAO Yun. Urban target monitoring using high resolution SAR data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(3): 415–422. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.3.415.
- [3] CHEN Qihao, LI Linlin, JIANG Ping, et al. Building collapse extraction using modified freeman decomposition from post-disaster polarimetric SAR image[C]. 2016 IEEE

- International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016: 5769–5772. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7730507](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730507).
- [4] WANG Xiaoqing, DOU Aixia, JIN Dingjian, *et al.* Study on the comparison of building damage extracted from different RS images acquired after 2010 M = 7.1 Yushu, Qinghai, China earthquake[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 935–938. doi: [10.1109/IGARSS.2012.6351401](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351401).
- [5] ZHANG Haizhen, WANG Qing, ZENG Qiming, *et al.* A novel approach to building collapse detection from post-seismic polarimetric SAR imagery by using optimization of polarimetric contrast enhancement[C]. 2015 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015: 3270–3273. doi: [10.1109/IGARSS.2015.7326516](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326516).
- [6] PARK S E, YAMAGUCHI Y, and KIM D J. Polarimetric SAR remote sensing of the 2011 Tohoku earthquake using ALOS/PALSAR[J]. *Remote sensing of Environment*, 2013, 132: 212–220. doi: [10.1016/j.rse.2013.01.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.018).
- [7] ZHAI Wei, SHEN Huanfeng, HUANG Chunlin, *et al.* Building earthquake damage information extraction from a single post-earthquake PolSAR image[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 171. doi: [10.3390/rs8030171](https://doi.org/10.3390/rs8030171).
- [8] SATO M, CHEN Siwei, and SATAKE M. Polarimetric SAR analysis of tsunami damage following the March 11, 2011 East Japan earthquake[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(10): 2861–2875. doi: [10.1109/JPROC.2012.2200649](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2200649).
- [9] WATANABE M, MOTOHKA T, MIYAGI Y, *et al.* 2012. Analysis of urban areas affected by the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake and tsunami with L-Band SAR full-polarimetric mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 472–476. doi: [10.1109/LGRS.2011.2182030](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2182030).
- [10] ZHAI Wei and HUANG Chunlin. Fast building damage mapping using a single post-earthquake PolSAR image: A case study of the 2010 Yushu earthquake[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 86. doi: [10.1186/s40623-016-0469-2](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0469-2).
- [11] ZHAI Wei, HUANG Chunlin, and PEI Wansheng. Two new polarimetric feature parameters for the recognition of the different kinds of buildings in earthquake-stricken areas based on entropy and eigenvalues of PolSAR decomposition[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1613. doi: [10.3390/rs10101613](https://doi.org/10.3390/rs10101613).
- [12] LI Xinwu, GUO Huadong, ZHANG Lu, *et al.* A new approach to collapsed building extraction using RADARSAT-2 polarimetric SAR imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 677–681. doi: [10.1109/LGRS.2011.2178392](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2178392).
- [13] SUN Weidong, SHI Lei, YANG Jie, *et al.* Building collapse assessment in urban areas using texture information from postevent SAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3792–3808. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2580610](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2580610).
- [14] ZHAO Lingli, YANG Jie, LI Pingxiang, *et al.* Damage assessment in urban areas using post-earthquake airborne PolSAR imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(24): 8952–8966. doi: [10.1080/01431161.2013.860566](https://doi.org/10.1080/01431161.2013.860566).
- [15] GE Pinglan, GOKON H, and MEGURO K. A review on synthetic aperture radar-based building damage assessment in disasters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111693. doi: [10.1016/j.rse.2020.111693](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111693).
- [16] CHEN Siwei, WANG Xuesong, and SATO M. Urban damage level mapping based on scattering mechanism investigation using fully polarimetric SAR data for the 3.11 East Japan earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 6919–6929. doi: [10.1109/TGRS.2016.2588325](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2588325).
- [17] 王雪松, 陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的进展与展望[J]. *雷达学报*, 2020, 9(2): 259–276. doi: [10.12000/JR19109](https://doi.org/10.12000/JR19109).
- WANG Xuesong and CHEN Siwei. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: Advances and perspectives[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 259–276. doi: [10.12000/JR19109](https://doi.org/10.12000/JR19109).
- [18] FREEMAN A and DURDEN S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 963–973. doi: [10.1109/36.673687](https://doi.org/10.1109/36.673687).
- [19] YAMAGUCHI Y, SATO A, BOERNER W M, *et al.* Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2251–2258. doi: [10.1109/TGRS.2010.2099124](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2099124).
- [20] JI Kefeng and WU Yonghui. Scattering mechanism extraction by a modified cloude-pottier decomposition for dual polarization SAR[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7447–7470. doi: [10.3390/rs70607447](https://doi.org/10.3390/rs70607447).
- [21] CHIEN L L C, EWE H T, and SAW S H. Understanding the correlation in scattering mechanisms between H-Alpha decomposition and theoretical modelling[C]. 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), Toyama, Japan, 2018: 1198–1203. doi: [10.23919/PIERS.2018.8597662](https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597662).
- [22] TOUZI R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters[J]. *IEEE Transactions on*

Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1): 73–84. doi: [10.1109/TGRS.2006.886176](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176).

- [23] AN Wentao, XIE Chunhua, YUAN Xinzhe, *et al.* Four-component decomposition of polarimetric SAR images with deorientation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1090–1094. doi: [10.1109/LGRS.2011.2157078](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2157078).
- [24] 孙翔, 宋红军, 王宇, 等. 基于高分辨率全极化SAR图像的取向角校正方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 465–474. doi: [10.12000/JR18026](https://doi.org/10.12000/JR18026).

[JR18026](https://doi.org/10.12000/JR18026).

- SUN Xiang, SONG Hongjun, WANG R, *et al.* POA correction method using high-resolution full-polarization SAR image[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 465–474. doi: [10.12000/JR18026](https://doi.org/10.12000/JR18026).
- [25] LIU Shan, ZHANG Fengli, WEI Shiyong, *et al.* Building damage mapping based on Touzi decomposition using quad-polarimetric ALOS PALSAR data[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020: 1–12. doi: [10.1007/s11707-019-0779-3](https://doi.org/10.1007/s11707-019-0779-3).

作者简介



庞雷(1996–), 男, 四川人, 中国科学院大学硕士研究生, 研究方向为微波遥感、SAR图像处理。
E-mail: panglei18@mailsucas.ac.cn



邵芸(1961–), 女, 中国科学院空天信息创新研究院研究员, 中共十八大、十九大代表。长期从事雷达遥感机理与应用研究, 发表论文260余篇。
E-mail: shaoyun@aircas.ac.cn



张凤丽(1978–), 女, 山东人, 博士, 中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 研究方向为雷达遥感机理与方法、国产SAR卫星数据处理和应用。发表论文70余篇, 出版专著2部, 获发明专利授权6项。

E-mail: zhangfl@aircas.ac.cn



张家萌(1996–), 女, 河北人, 北京建筑大学硕士研究生, 研究方向为摄影测量与遥感、微波遥感、SAR图像处理。
E-mail: 2108521519003@stu.bucea.edu.cn



王国军(1986–), 男, 湖北人, 博士, 中国科学院空天信息创新研究院助理研究员, 研究方向为SAR遥感应用及数据分析。

E-mail: wanggj@radi.ac.cn



赵钰川(1997–), 男, 北京人, 北京建筑大学本科, 研究方向为微波遥感、SAR图像处理。

E-mail: 847733296@qq.com



刘娜(1994–), 女, 辽宁人, 中国科学院大学硕士研究生, 研究方向为微波遥感、SAR图像处理。

E-mail: liuna@radi.ac.cn



庞蕾(1971–), 女, 博士, 北京建筑大学副教授, 主要研究方向为多基线干涉SAR数据处理与应用。

E-mail: panglei@bucea.edu.cn