

地震损毁建筑物的高分辨率 SAR 图像模拟与分析

温晓阳^{1,2}, 张红¹, 王超¹

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100101;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要: 为了分析汶川地震震后高分辨率合成孔径(SAR)图像的城区建筑物特征, 基于实际获取的机载 X 波段 SAR 图像, 采用电磁模拟方法进行分析和研究。通过对城区的完整建筑和毁损建筑进行三维建模, 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。与真实 SAR 图像对比分析, 提出的算法能够分析建筑物结构变化对 SAR 图像的影响, 模拟主要的强散射点, 能有效辅助 SAR 图像进行城区特征分析。

关键词: 合成孔径雷达 SAR, 建筑物, 电磁模拟

中图分类号: TP79/TP732.1 **文献标识码:** A

1 引言

随着合成孔径雷达(SAR)分辨率的不断提高, 我们可以获得越来越多的人造目标的细节特征。并且由于其不受日夜和恶劣天气的影响, 使得高分辨率 SAR 在灾害监测应用中越来越受到人们的关注。在小于 1m 分辨率情况下, 建筑物的各个细节在 SAR 图像中清晰可见。但由于 SAR 特殊的成像几何, 使得大量建筑物淹没在阴影中, 因此如何对 SAR 影像中的建筑物特征进行分析, 已经成为高分辨率遥感应用中的一个重要问题。

在光学图像中, 通过目视观察可以直接获取建筑物的细节, 而 SAR 图像则必须通过其基本的散射特征来解释, 例如二面角反射、角反射器等。由于复杂的环境的干扰, 在 SAR 图像中很难将具体的散射点和建筑物上发生散射的结构联系起来。因此, 在真实场景中, 由于城区建筑复杂, 互相之间的散射影响大, 通过电磁模拟方法, 灵活地将建筑物的各结构去除或者叠加, 从而分析出每个强散射点的贡献的起因, 从而对图像中的特征进行解释。

通常所采用的建筑物 SAR 图像模拟方法如下: 将墙面与地面, 屋顶作为两个独立的散射体, 分别计算散射。完整的建筑物的表面比较平整, 采用粗

糙度可以描述; 但对于特别构造, 例如倒塌的房屋, 本身存在断裂面, 表面构造存在不规整现象, 这样采用复杂模型来构造建筑物很有必要。

并且 SAR 图像的模拟在各个尺度上有各自的方法, 大范围的场景集中考虑传感器的成像影响 (Franceschetti, 1992), 在自然场景主要考虑了地形的起伏 (吴涛等, 2007), 在植被密集的区域考虑植被的散射影响 (徐丰 & 金亚秋, 2006), 但是由于应用的不同, 单一的方法无法满足实际的需求。SAR 图像的模拟方法有 2 种: 第一种首先模拟原始信号, 然后通过成像滤波器得到模拟图像 (Franceschetti, 1992); 第二种方法, 通过图像域积分直接得到模拟图像 (Bhalla & Ling, 1995)。具体到建筑物图像的模拟, 有 2 种不同的策略: 一种对整个建筑物模拟; 另一种, 首先将建筑物分割为不同的面, 分别成像, 然后组合到一起得到模拟图像。第一种策略需要细致的考虑面元之间的互相作用, 还需要考虑入射角、表面粗糙度, 这需要大量的时间, 模型也需要很精确 (Franceschetti *et al.*, 2003; 2002)。第二种策略没有考虑物体表面之间的互相作用, 但是也能对叠掩以及阴影进行模拟, 实现快速的应用。例如, 通过观察不同飞行路线下的模拟图像, 可以设置合适的任务路线 (Balz & Haala, 2006), 这时候第一种策略虽然精度高, 但由于计算量大, 无法应用。但对于角反射器这

收稿日期: 2008-09-10; 修订日期: 2008-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40501044) 和 (编号: 40601058)。

第一作者简介: 温晓阳 (1981—), 男, 2006 年毕业于北京交通大学, 获光学硕士学位, 现于中国科学院攻读博士学位。目前主要从事 SAR 图像模拟研究工作。E-mail: wenxyg@gmail.com。

样的结构来说,第二种策略不考虑面元之间的交互作用,所以根本无法获取这一重要的散射机制。所以根据实际任务的要求,我们采用了第一种策略,对整个建筑物建模,采用射线跟踪法(Baldauf *et al.*, 1991; Ling *et al.*, 1989; Hazlett *et al.*, 1995)计算面元之间的相互作用,选择了第二种成像方式图像域积分,进行了城区 SAR 图像的模拟。

采用射线跟踪法和图像域积分的成像方式模拟了建筑物的高分辨率 SAR 图像,并基于实地考察资料,对城区和农村的建筑物进行模拟分析,并一一分析强散射点的形成机制,利用模拟图像辅助分析城区特征,为解译复杂的灾区城市 SAR 图像积累经验,为进一步评估大范围城区房屋损伤情况奠定了基础。

2 图像特征

SAR 图像的主要特征包括叠掩、阴影,多次反射等。在城区的散射中,这些特征影响了对图像的正确解释。为了说明这些基本现象在建筑物成像中的反映,以一个平顶的建筑物为例,根据 SAR 成像几何来描述这些特征。场景细节见图 1。一面垂直的墙 AB,水平屋顶 BC,从传感器发出平行射线到达建筑物,各个散射点按照回波到达接收 SAR 的顺序出现在图像中。这样,AB 在图像上显示为 B'A', BC 在图像上显示为 B'C', B'A' 为 BE 和 AB 2 个部分的散射的贡献叠加,为叠掩区,在 SAR 图像中叠掩区会显得更亮一些。图中墙面与地面形成由二次反射构成的二面角反射,在 SAR 图像中表现为在墙角位置的一条沿着方位向的亮线。在建筑物的另一侧,由于遮挡会形成阴影 C'D',由于在这个位置没有信号返回在图像上会表现为黑色。

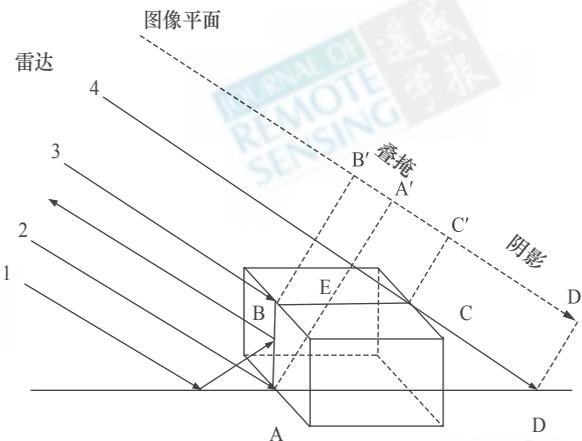


图 1 建筑物成像的投影情况

Fig. 1 Projection of building imaging

3 模拟方法

本文采用射线跟踪法和图像域积分的成像方式模拟了城区的高分辨率图像。

射线跟踪方法被广泛的应用于预测复杂目标的散射。基于射线跟踪法,可以计算由 CAD 模型描述的复杂物体的全极化 SAR 回波。为了计算多次反射的贡献,用一簇平行射线沿着入射方向射向目标,跟踪每条射线由物体上一个面反射到下一个面,直到射出物体,如图 2。在每次反射时用几何光学计算光束场强;若射点与观察点之间无遮挡,使用物理光学积分求取远场贡献,所有射线的散射贡献叠加得到最后的散射场。

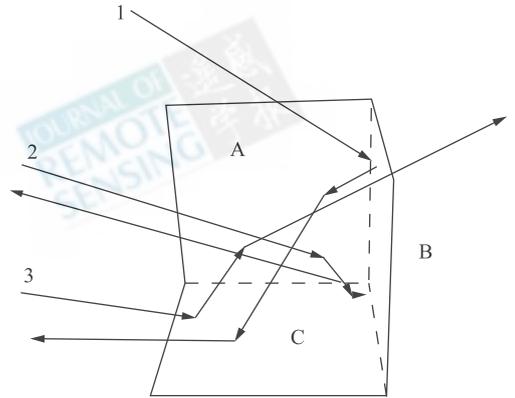


图 2 射线跟踪效果图

Fig. 2 Ray tracing sketch

几何光学近似如下:使用菲涅尔系数对反射强度进行求解。对于金属介质直接按照导体进行计算,其他介质物体根据介电常数计算。

物理光学近似如下:由于物体由三角面元来建模,表面被近似为平面,因此可以将积分转换为代数式计算。最后叠加所有射线的贡献得到整个物体的散射贡献。

SAR 成像通过处理一个范围的频率和角度的信号来分析目标各部分的散射分布。对于模拟来说,在不同角度,需要大量的时间来进行几何的射线跟踪处理。在小角度情况下,相邻角度的 SAR 截面积变化可以忽略,可以使用射线与图像的对应关系来实现成像过程,即图像域积分。基本概念是用每一条射线的点扩散函数更新图像。使用小角度收发分置近似,目标 ISAR 图像,由下面公式得到。

$$O(r, xr) = -\frac{2k_0\theta_0\Delta k}{\pi^2} \sum_{i=1}^m g_i(\Delta A)_{exit} e^{j2k_0(r-r_i)} \times \sin c[\Delta k(r-r_i)] \times \sin c[k_0\theta_0(xr-xr_i)]$$

式中 r 表示距离向, xr 表示方位向, m 表示入射线的数目。 $r_i = d'_i/2$ 是总的距离向偏移。 xr_i 为最初入射点的方位向坐标和最后的出射点方位向坐标的均值, g_i 是与几何光学有关的第 i 条光束的系数, ΔA_{exit} 是光束的截面积。在 k 空间, 带宽表示为 $\Delta k = \Delta w/c$, 中心频率为 $k_0 = w_0/c$, 角窗口为 θ_0 。

4 建筑物的 SAR 图像模拟与分析

在地震灾区实地考察阶段, 我们将 SAR 图像中特征比较明显的建筑物作为研究重点。在这次汶川大地震中, 城市地区大部分建筑物外形保持较为完整, 农村地区则建筑物倒塌比较严重, 大多数的房顶在地震中遭到了破坏。在我们的模拟中, 分别选取了 2 个具有代表性的建筑物进行模拟。

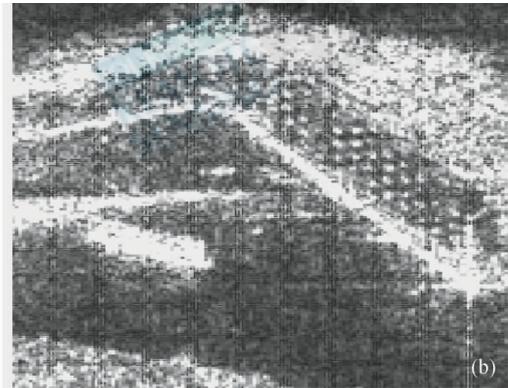


图3 (a)茂县国际大酒店;(b)X波段 SAR 图像

Fig.3 (a) Maixin international hotel;(b) X band SAR image

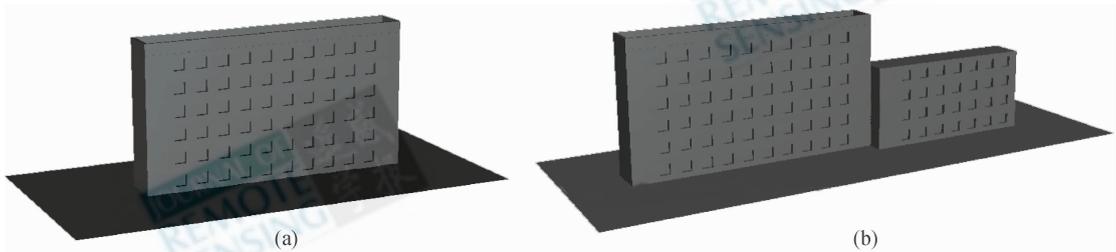


图4 建筑物模型

(a)模型 1;(b)模型 2

Fig.4 CAD model of building

(a)Model 1;(b)Model 2

根据真实图像的分辨率 0.5m 和 X 波段的信息, 以及分析建筑物成像的方位角为 45° 俯仰角为 45° , 设置了模拟图像的成像参数(表 1)。模拟中计算对应射线在多次反射后的散射贡献值, 采用直接将射线对应到图像域积分的方法获取图像 (Bhalla

4.1 外形完整的建筑物的模拟

图 3 是茂县国际大酒店的实地照片和实际获取的 X 波段 SAR 图像, 图 4 根据茂县国际大酒店的外形特征制作的 2 个模型。房屋模型 1 见图 4(a), 它的总尺寸为: $36\text{m} \times 5\text{m} \times 18\text{m}$ 。窗户大小 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$, 间隔 3m, 一排共有 10 个窗户。将其复制六层, 组成建筑的主体结构。地面采用平板构成, 使其足够大从而包围主体结构。顶层制作了 1.5m 高的围栏。模型 2 如图 4(b), 在模型 1 的基础上, 另外构建一个四层房屋, 每层有 7 个窗户, 无围栏。

玻璃以及建筑物主体混凝土的相对介电常数在 4—11 之间 (Franceschetti *et al.*, 2002)。本程序中墙面以及窗户表面按照光滑平面处理, 相对介电常数都选取 5。

& Ling, 1995)。首先模拟了模型 1 的 HH, VV, HV 极化图像, 如图 5(a), (b), (c) 所示, 通过 Pauli 分解得到奇数次反射和偶数次反射及其余分量的分解图 5(d) (Margarit *et al.*, 2006; Margarit *et al.*, 2008)。

表 1 成像参数
Table 1 Imaging parameters

参数	值
波段	X 波段
分辨率	0.5m
采样数	256
射线密度	0.3 条/波长
方位角	45°
俯仰角	45°

在图 5(d) 中,绿色代表二面角散射贡献,红色代

表角反射器贡献,黄色代表上述两者的混合贡献。为了分析各强散射点的散射机制,将把 SAR 图像中的散射点与模型 1 的结构对应起来,叠加结果见图 6。由图 6 可以看出,最下面一排为绿色,表征为二面角反射,这主要是由墙壁与地面反射形成;上面整齐的五排色调主要为红色,表征为角反射器反射,这是由玻璃与窗棱形成的反射造成;在图中还有一个黄色亮点,表明该处既有二面角反射又有角反射器反射,该处主要是屋顶上的围栏一角与楼顶面形成的角反射器。

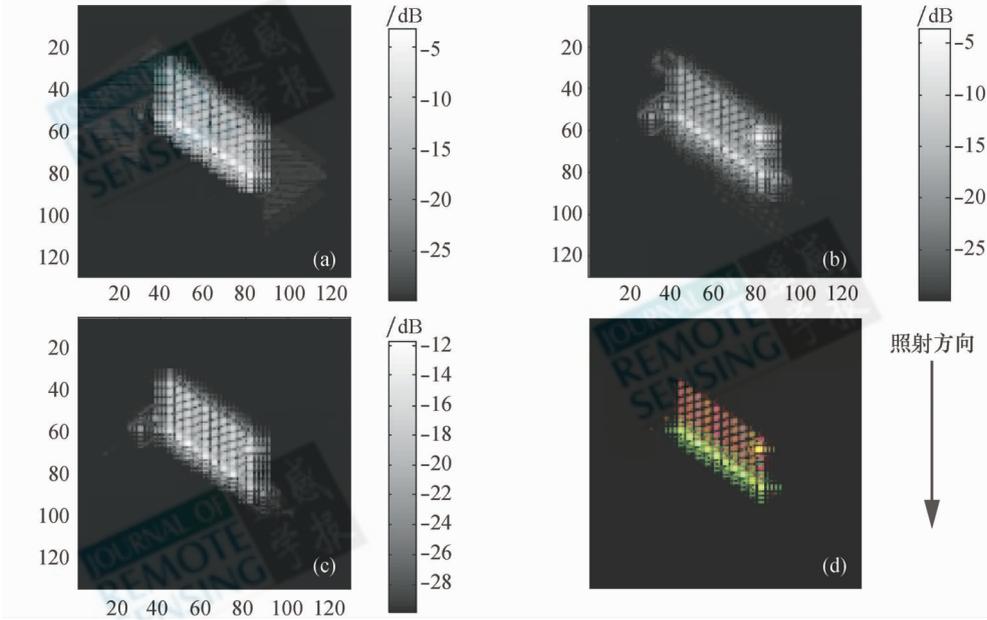


图 5 模型 1 的模拟图像
(a)HH 极化;(b)VV 极化;(c) HV 极化;(d)Pauli 分解图
Fig. 5 Simulated image of model 1
(a)HH;(b)VV;(c)HV;(d)Pauli scattering map

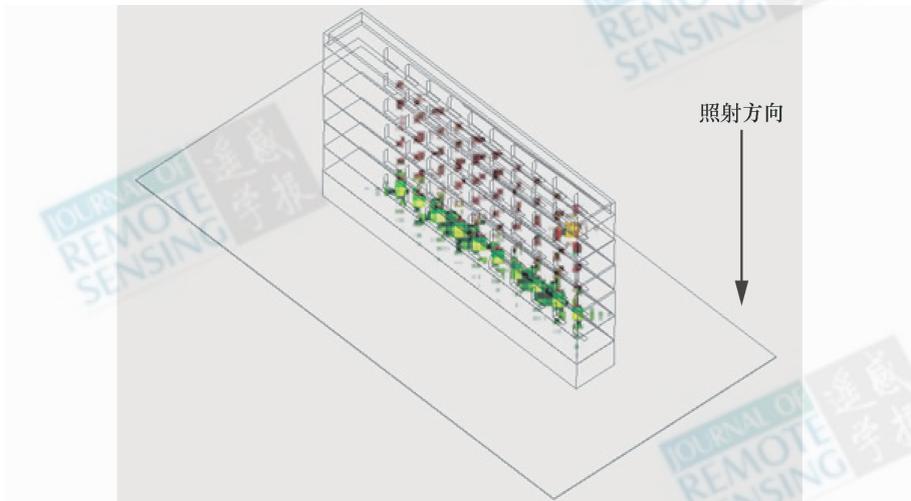


图 6 模型 1 模拟图像的 Pauli 分解图与模型的叠加图
(绿色代表二面角反射贡献,红色代表角反射器反射贡献,黄色代表上述两者的混合贡献)

Fig. 6 Overlay of Pauli scattering map on the CAD of Model 1
Green is corresponding to dihedral reflection, red is corresponding to trihedral reflection, yellow is corresponding to the mixture of both

接着,我们模拟了模型 2 的 HH, VV, HV 极化图像,如图 7(a), (b), (c), 并通过 Pauli 分解得到

奇数次反射和偶数次反射及混合 2 种反射分量的分解图 7(d)。

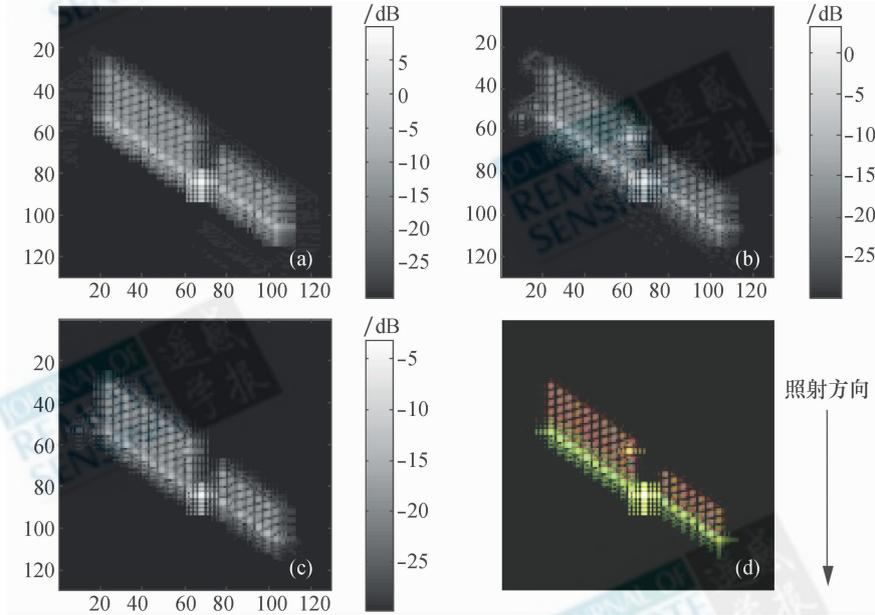


图 7 模型 2 的模拟图像

(a) HH 极化; (b) VV 极化; (c) HV 极化; (d) Pauli 分解图

Fig. 7 Simulated image of Model 2

(a) HH; (b) VV; (c) HV; (d) Pauli scattering map

主要的散射点与房屋的结构叠加图见图 8(a)。为了验证模拟图像的正确性,我们与实际场景下获取的 SAR 图像图 8(b)进行了对比,分析它们强散射点的对应情况。从图 8 可以看出,在模拟图像和真实图像中,点 1 主要是建筑拐角与地面形成的三面角反射贡

献;点 2 和点 3 为墙面与地面形成的二面角的反射贡献;点 4 为屋顶的围栏一角与房顶构成的三面角反射贡献;点 5、点 6 为玻璃与窗棱形成的角反射器反射贡献。通过对比表明,强散射点的形成机制清晰,实际图像与模拟图像的这些散射点取得了一致。

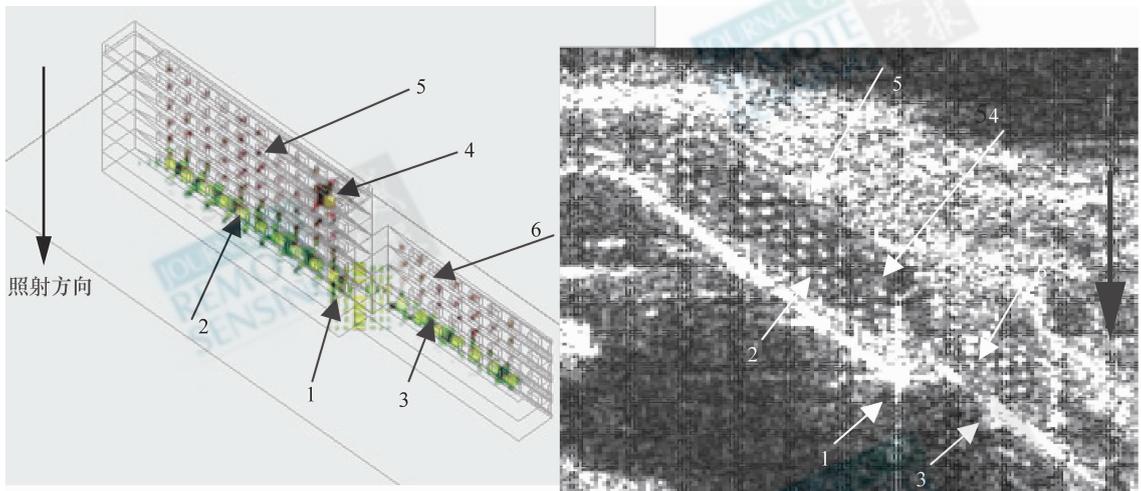


图 8 模型 2 模拟图像的 Pauli 分解图与模型叠加图(a)和 SAR 图像(b).

Fig. 8 Overlay of Pauli scattering map on the CAD of model 2 (a) and relevant real SAR image (b)

表 2 给出了模拟 SAR 图像与真实 SAR 图像强度差异。结果显示,在模拟图像和真实图像中,同极化间,交叉极化与同极化的差异相似,并且强散射点(点 1)与墙面的散射值(点 2)的比值相似,因此模拟图像在建筑物区域取得了很好的模拟效果。

表 2 模拟 SAR 图像与真实 SAR 图像强度差异

Table 2 Intensity difference between the simulated SAR image and real SAR image

	同极化间差异	同极化与交叉极化差异	强散射值(点 1)/墙面散射值(点 2)
真实图像	HH 稍大于 VV	5—7dB	15dB
模拟图像	HH 稍大于 VV	10dB	8dB

4.2 损毁建筑的模拟

图 9 为农村地区建筑物毁损的 SAR 图像。为了分析破损建筑物的散射机制,我们构建了如图 10 所示的建筑物破损模型,在该模型中,构建了 4 个独立的小型建筑,这些建筑有 2 个有屋顶,有 2 个没

有屋顶。屋顶分别为人字形如图 10(A),或者带有围栏的平屋顶如图 10(B)。没有屋顶的建筑以人字形房屋为基础,去除屋顶以及一面墙如图 10(C),或者仅去除屋顶如图 10(D)。为了模拟屋顶垮塌后,两个墙面形成的断裂痕迹,采用了 0.2m 的立方体铺设在墙面的上沿。房屋的长宽为 10m 和 5m,人字形屋顶高 1.5m,平屋顶上围栏高 1.5m。



图 9 农村地区建筑物毁损的 SAR 图像

Fig. 9 SAR image of the damaged building in the county

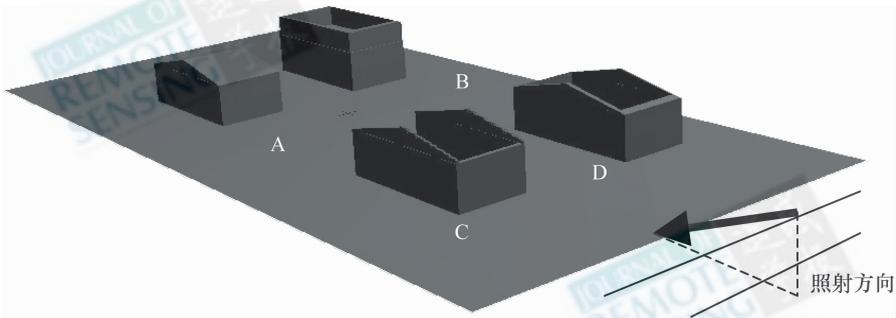


图 10 损毁建筑示意图

Fig. 10 CAD model of the damaged building

模拟结果如图 11, A、B、C、D 在模拟图像中产生了较强的亮线,为墙体与地面的二面角所形成。A、B 为有屋顶的房子,其散射在图像中表现为靠近 SAR 方向的一半的位置有较强的散射,这是因为屋顶将另外的一边遮挡形成了阴影。而 D 由于屋顶的破坏,两面墙与地面形成了二面角,从而产生两道亮线。对比图像方框中的两个图像有三道亮线,对应于房顶和一面墙倒塌的模型 C。方框中与方位角平行的亮线为墙面与地面二面角形成的,在亮线前面还有一条比较暗的线是墙头形成的。另外 2 条线对应于沿着距离向的两面墙,由屋顶和墙面断裂后墙头不规则凸起形成。

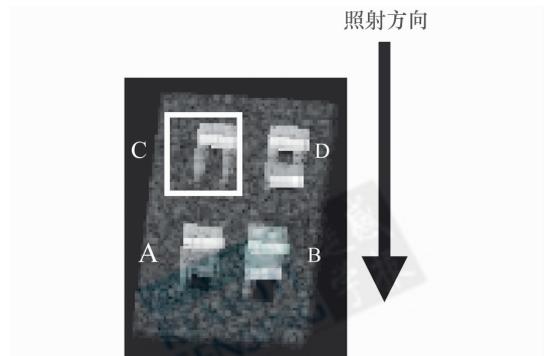


图 11 损毁建筑模拟图像

Fig. 11 Simulated SAR image of damaged building

在 60°方位角,对模型 3 成像如图 12(a)所示。

图 12(a) 有 2 个强散射点分别对应 B 的房顶的围墙与房顶形成的角反射器以及 D 的墙壁与地面形成的角反射器。如图 13, 当地房顶的建设形式比较特殊, 围栏与楼顶以及附属的尖形结构形成了角反射

器形式。观察图 13 方框中的房屋在真实图像形成了方框中的强散射点。根据图 12(a) 中 B 的模拟图像, 可以推断图 12(b) 中的强散射点对应围栏与屋顶以及附属尖形结构组成角反射器的散射。

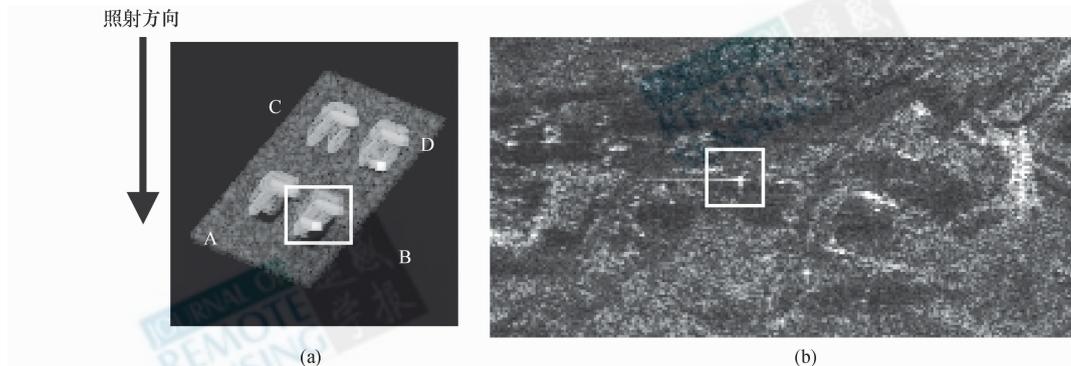


图 12 强散射点建筑真实图像(a)与模拟图像(b)对比

Fig. 12 The real SAR image (a) and simulated SAR image (b) of building with strong scatterer



图 13 茂县北变电站南侧居民区照片

Fig. 13 Picture of residential area in the North of MaoXian

5 结论

采用了射线跟踪的电磁计算方式、图像域积分的成像模拟方式对城区和农村的建筑物进行 SAR 图像模拟, 有效地将叠掩, 阴影, 多次反射等 SAR 图像基本特征表征出来。在对建筑物实地考察的基础上, 结合真实 SAR 影像开展了一系列的解译和验证工作, 实验结果表明建筑物的 SAR 特征与光学特征有很大差别, 有些不容易看到的小结构会产生强的散射点, 相反一些大的表面在图像中特征不明显。建筑物的强散射点主要来自角反射: (1) 墙面与地面形成的二面角反射; (2) 窗

户处形成的三面角反射; (3) 房屋之间及地面形成的三面角反射, 在各自的角点形成强反射。墙面处或者其他不构成角结构的地方没有强散射, 但对于不规则的墙体, 或者地震后的破损房屋, 也会形成特殊的角结构, 从而在墙面处的角点形成强反射点。

随着 SAR 系统的广泛应用, SAR 图像由于其不受天气时间限制的优势, 逐步成为灾害监控的有力手段。利用模拟图像辅助分析城区特征, 为解译复杂的灾区城市 SAR 图像积累了经验, 为进一步评估大范围城区房屋损伤情况奠定了基础。此外, 利用模拟图像辅助分析城区特征也是继模拟图像应用于识别后的又一个有实际意义的方向。

REFERENCES

- Baldauf J, Lee S W, Lin L, *et al.* 1991. High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets; SBR versus experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **39**(9): 1345—1351
- Balz T, Haala N. 2006. Improved real-time SAR simulation in Urban areas. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)
- Bhalla R, Ling H. 1995. Fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **43**(7): 727—731
- Franceschetti G, Iodice A, Riccio D. 2002. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(8): 1787—1801
- Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, Ruello G. 2003. SAR raw signal simulation for urban structures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(9 PART I): 1986—1995
- Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, *et al.* 1992. SARAS: A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**(1): 110—123
- Hazlett M, Anders D J, Lee S W, *et al.* 1995. XPATCH: a high-frequency electromagnetic scattering prediction code using shooting and bouncing rays. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*
- Ling H, Chou R C, Lee S W. 1989. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **37**(2): 194—205
- Margarit G, Mallorqui J J, Lopez-Martinez C. 2008. GRECOSAR, a SAR simulator for complex targets: Application to urban environments. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)
- Margarit G, Mallorqui J J, Rius J M, *et al.* 2006. On the usage of GRECOSAR, an orbital polarimetric SAR simulator of complex targets, to vessel classification studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**(12): 3517—3525
- Wu T, Wang C, Zhang H. 2007. Space-borne SAR image simulation based on image characteristics. *Journal of Remote Sensing*, **11**(2): 214—220
- Xu F, Jin Y Q. 2006. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm. *Progress in Natural Science*, **16**(11): 1459—1471

附中文参考文献

- 吴涛,王超,张红. 2007. 基于图像特征的星载 SAR 图像模拟研究. *遥感学报*, **11**(2): 214—220
- 徐丰,金亚秋. 2006. 基于映射投影(MPA)的复杂地面场景极化 SAR 成像模拟. *自然科学进展*, **16**(11): 1459—1471

The high resolution SAR image simulation and analysis of the damaged building in earthquake

WEN Xiao-yang^{1,2}, ZHANG Hong¹, WANG Chao¹

1. Center for Earth Observation and Digitized Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

Abstract: Based on the airborne X band SAR images, the electromagnetic method was used to analyze the characteristics of the buildings after Wenchuan earthquake in the urban district of high resolution Synthesize Aperture Radar (SAR) images. After the undamaged buildings and damaged building were constructed by 3D models, the ray-tracing electromagnetic method and Image-Domain-Integration imaging simulation method were used to simulate SAR images of buildings with different damage degrees. Comparing with the real SAR image, the algorithm presented in this paper can analyze the backscatter change due to building structure, simulate the main scattering points, and effectively assist the analysis of the urban district SAR image characteristics.

Key words: SAR, building, simulation