

基于 RaySAR 软件的上海外滩建筑群合成孔径雷达图像模拟

赵婧文^{1,2}, 伍吉仓¹, 丁晓利²

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯系, 香港)

摘要: 利用 RaySAR 软件对上海市外滩建筑群进行合成孔径雷达(SAR)成像模拟. 绘制了不同反弹次数信号对应的反射率图、信号反弹次数分布图. 结合目标的几何物理信息, 分析了模拟 SAR 图像中的点、线状特征、不同反弹次数信号和建筑具体结构之间的对应关系. 试验表明, 雷达信号的反弹次数与建筑物结构细节密切相关. 基于真实雷达影像序列, 按 PSInSAR 方法选取的永久散射体点的位置及其分布与 SAR 模拟图像中的二次、尤其是三次反弹信号的成像吻合度较高, 初步实现永久散射体点在建筑物上的精确定位.

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 图像模拟; RaySAR 软件; 外滩; 光线追踪

中图分类号: TN955⁺. 2

文献标志码: A

Synthetic Aperture Radar Image Simulation of the Bund Building Group in Shanghai Based on RaySAR Software

ZHAO Jingwen^{1,2}, WU Jicang¹, DING Xiaoli²

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: SAR (synthetic aperture radar) image simulation of the Bund building group in Shanghai was conducted with RaySAR software. The reflectivity maps corresponding to different signal bounce levels and signal bounce level distribution map were plotted. Combined with the geometric and physical information of the targets, the relationship between punctate/linear signatures in simulated SAR image and building structure, different signal bounce level and building structure were analyzed. Seen from the experiment results, the bounce level of radar echo signal was closely

related to the structural details of targets. The location and distribution of the Permanent Scatterers (PS) selected by PS InSAR on the real radar image sequences were in good agreement with the double, especially the triple bounce signals in the simulated SAR image. Therefore, the initial precise positioning of PSs on the buildings are realised.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); image simulation; RaySAR software; the Bund; ray tracing

城市是人类赖以生存的空间,也是现代文明的载体. 对城市道路、桥梁、高楼等大型基础设施的定期健康监测十分必要. 而 InSAR (interferometric synthetic aperture radar)作为一种较为新兴的、能够全天候、高精度、自动化、大面积获取地形、形变信息的空间对地观测新技术,在城市地表和基础设施监测应用中具有独特优势.

随着 SAR 空间分辨率的提高, COSMO-SkyMed、TerraSAR-X/TanDEM-X 等 SAR 传感器已经实现了米级的高分辨率,单个建筑物目标可能成像在多个像元内, SAR 影像中的点、线、面、高亮、阴影等特征完全可以和真实地物结构对应起来,这为利用 InSAR 形变观测成果分析建筑物结构变形提供了新的机遇. 但如何确定 InSAR 图像中的像元点对应实际建筑物上的精确位置,目前还是一个没有解决的难题.

SAR 模拟成像是近几年发展起来的一种新的雷达成像仿真技术,有助于 SAR 系统的分析设计和验证、辅助 SAR 图像解译、SAR 图像处理算法验证以及 SAR 图像几何校正等,因而具有重要的理论意

收稿日期: 2017-07-31

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB733304); 国家自然科学基金(41674003)

第一作者: 赵婧文(1990—),女,博士生,主要研究方向为合成孔径雷达监测城市地表沉降、SAR 成像多路径等.

E-mail: mnls891@163.com

通讯作者: 伍吉仓(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为空间大地形变监测网数据时空分析、合成孔径雷达干涉测量、断层位错模型参数反演等. E-mail: jcwu@tongji.edu.cn

义和实用价值^[1-4]. 目前 SAR 模拟手段基本可分为 2 种: 基于原始回波信号的 SAR 成像模拟和基于目标几何特征的 SAR 图像模拟^[5]. SAR 成像模拟着重于成像原理和建筑的散射电磁场模型. 代表研究有 Franceschetti 等^[6] 开发的基于城市 SAR 原始信号模拟器和应用基尔霍夫近似法计算多次反射成像^[7]. SAR 图像模拟着重利用建筑物的高质量三维模型和成像几何原理. 代表研究有 Brunner 等^[8] 用光线追踪法来缩短成像模拟计算时间. 此外, Balz 等^[9-10] 开发了基于光栅法的高分辨率 SAR 图像模拟软件 SARVIZ; Hammer 等^[11] 开发了基于光线追踪的 CohRaS 软件; Auer 等^[1,12-13] 开发了用光线追踪法模拟反射率图以实现 SAR 图像模拟的 RaySAR 软件. SARVIZ、CohRaS 和 RaySAR 这 3 种模拟软件的对比分析可以参考文献^[14].

首先阐述 SAR 模拟的相关原理, 利用 RaySAR 软件对上海外滩几栋历史建筑物进行 SAR 图像模拟, 并探索高分 SAR 强度影像与地物三维几何特征之间的对应关系.

1 SAR 模拟原理

SAR 是一种主动式微波遥感技术, 通过接收发射微波信号的回波对地物成像. 对于中低分辨率的 SAR 数据而言, 影像的分辨率通常在几十米, 比大多数的地物对象尺度更大, 用一个散射系数就可以表示该对象^[15-16]. 但对于高分辨率 SAR 图像模拟, 单个对象的信号响应可能分布在众多像素中, 必须考虑目标场景的几何形状. 此外, 要进行 SAR 成像模拟, 必须首先给定成像场景的三维几何模型. Bamler 等^[17] 的研究表明, 对于 C 波段的 Envisat-ASAR 影像, 边长大于 20 cm 的目标对象可以形成点状散射体, 而对于 X 波段的 TerraSAR 影像, 边长大于 8 cm 的目标对象就可以形成点状散射体. 因此, 对于高分辨率 SAR 图像模拟, 一个厘米级的高精度建筑三维模型是必须的, 这样才有可能区分雷达信号的多次反弹.

根据回波信号的反弹次数可以将目标散射分为如下几类:

(1) 直接散射. 直接散射是指回波信号只经过一次反弹后即被接收. 在城市地区, 一次反弹的情况占绝大多数.

(2) 二次反弹. 在城市地区, 信号的二次反弹通常对应于“雷达—建筑物外墙—地面—雷达”这样的

传播路径. 理想的二次反弹角是一个包含 2 个互相垂直立面的二面角(图 1). 作为 SAR 强度影像上的一个明显特征, 二次反弹形成的亮线经常被用于建筑物轮廓提取、平坡屋顶的建筑物高度估算等^[18-21].

(3) 三次反弹. 在城市地区, 信号的三次反弹通常对应于建筑物外立面的窗角、墙角. 理想的三次反弹角是一个包含 3 个互相垂直立面的角反射器(图 2). 如果角反射器大致面向雷达扫描的视线方向, 三次反弹也会携带很强的信号强度, 对应 SAR 强度影像上非常明亮的点特征.

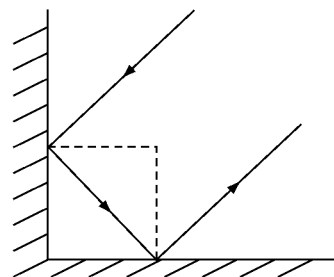


图 1 对应二次反弹的理想二面角

Fig.1 Ideal dihedral corresponding to double bounce

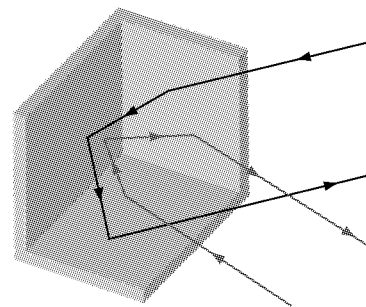


图 2 对应三次反弹的理想角反射器

Fig.2 Ideal corner reflector corresponding to triple bounce

(4) 四次及更多次反弹. 由于雷达接收到的回波信号是叠置在一个像素里面的多个反射信号的总和, 一般既包括直接散射信号, 也包括那些经过多次反弹的信号. 如图 3 所示, 雷达信号经过屋顶坡面和相邻建筑物的阳台多次反射、散射作用, 所传播的距离远大于该阳台与雷达之间的真实距离, 而基于光线的直线传播定律, 阳台上的点会被直接逆向定位在地下, 造成所谓的鬼影散射点(ghost scatterers), 见图 3 中地下点.

因此, 如果已知地面建筑物的精确三维模型, 结合表面材料反射、散射物理特征参数(如反射率、粗糙度、散射系数等), 就可以采用光线跟踪法模拟 SAR 图像上各类反射点. 然而在实际模拟中, 正如

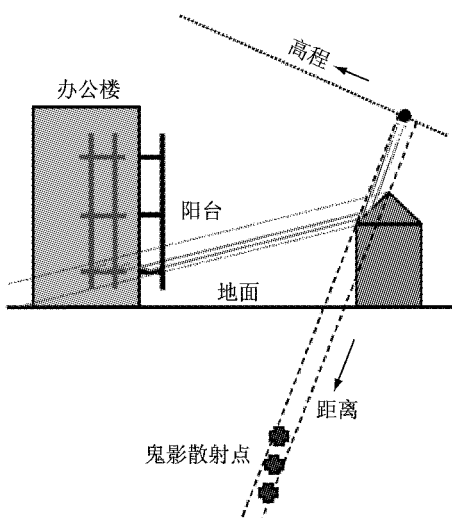


图 3 坡屋顶和相邻建筑的阳台间多次反射造成的鬼影散射点^[11-12]

Fig.3 Ghost scatterers due to multipath between pitched roof and adjacent balcony^[11-12]

文献[22]所述,完全符合实际情况的仿真参数是很难获得的.因此,模拟 SAR 图像只能是实际情况的近似.模拟方法是否有效在于该方法能否满足预期的辅助目标识别和解译工作.

2 模拟结果及讨论

2.1 研究区域和模拟数据

如图 4 所示,实验区域选在有万国建筑博览群之称的上海外滩.这里有 52 幢风格各异的大厦,包括著名的中国银行大楼、和平饭店、海关大楼、汇丰银行大楼等.

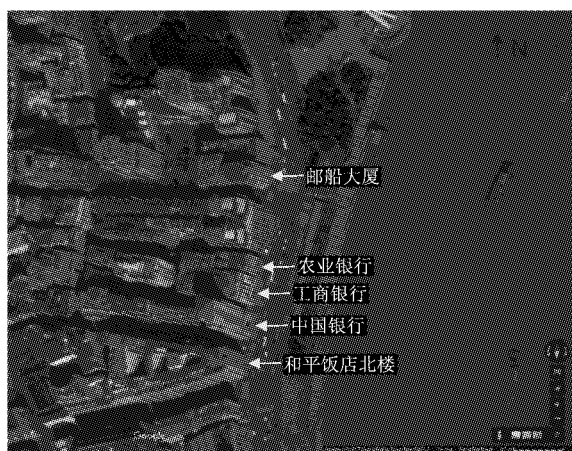


图 4 五栋已知三维模型的建筑物(来自百度地图)

Fig.4 Five buildings with 3D models (Cr. Baidu map)

试验采用的 5 栋建筑物(名称、位置见图 4 标注)的三维模型由上海市测绘院提供.模型采用无人

机和地面三维激光扫描方法得到,故而建筑物立面如窗台、凸起、栏杆等细节精确到厘米.图 5 为和平饭店模型的整体和局部放大图,其中 a 为窗、栏杆、立面花岗岩装饰,b 为门、屋檐、落地窗、旗杆.

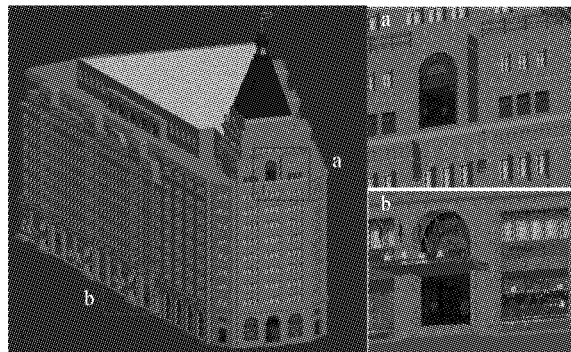


图 5 和平饭店模型的整体和局部放大图

Fig.5 Whole model and local enlargements of Heping Hotel

实验中的 35 景真实 SAR 影像来自于意大利的 COSMO-SkyMed 卫星.从 2008 年到 2010 年跨度约为 2 年的 35 景重复 SAR 影像的成像几何参数基本一致.为了最大程度上减弱斑点噪声,采用这 35 景影像的平均强度图与 SAR 图像模拟结果进行对比分析.

2.2 模拟过程与结果

Auer 等开发的 RaySAR 软件主要目的是辅助高分辨率雷达影像中建筑物显著特征的解译.具体讲,结合目标几何、物理信息,RaySAR 软件通过三维光线追踪来模拟“SAR 传感器发射电磁波—电磁波与地物作用—携带地物信息的电磁波回到 SAR 传感器—合成 SAR 影像”的全过程,能同时记录散射次数、反射与散射模式,进而分析散射体的几何特征.

试验中用 RaySAR 软件进行 SAR 图像模拟的过程分为 3 步:建模、采样和结果输出.具体流程如图 6 所示.

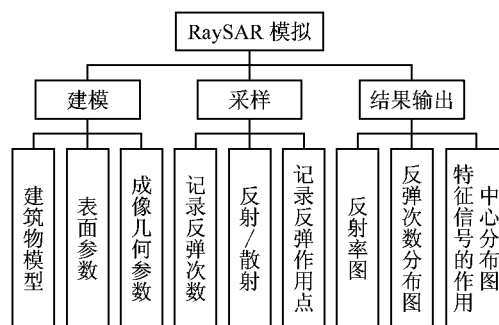


图 6 RaySAR 模拟流程

Fig.6 RaySAR simulation workflow

(1) 建模. 包括三维建筑的模型编辑和表面参数设置以及成像几何设置. 模型编辑包括模型的格式转换、去掉贴图纹理、根据建筑物各部件的材料删除、修整、合并和重命名各个分层、最后存成 pov 格式(Pov-Ray 软件的编辑器格式)供 RaySAR 模拟使用. 为了简化地物反射、散射模型, 表面参数设置主要采用镜面反射系数、后向散射系数、粗糙度等参数来表示不同材料的物理特性. 以中国银行为例, 其三维模型最终可整理成 4 个层, 分别对应建筑表面(大理石)、窗(玻璃)、门(紫铜涂漆)和栏杆(铝合金). 另外, 需要添加一个散射系数适中、反射系数较低的简单平面(地面)来完成全部信号回波模拟. 表 1 为 5 个分层对应的反射、散射模型参数. 各种材料的反射系数区间参考网上资料《常用材料反射系数表》^[23], 粗糙度区间参考《表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值 GB/T 1031—2009》, 散射系数由经验值给定. 对其他 4 栋建筑物做类似的分层和材料参数设置分析, 限于篇幅这里不逐一列出. 成像几何参数设置指根据卫星坐标参数(入射角、影像分辨率、卫星飞行方向等)修改虚拟正射相机的方位向与高度, 保证相机对于建筑物目标的相对位置与实际 SAR 传感器对地面扫描时一模一样. 具体由软件根据设置的成像几何参数对建筑群进行旋转、平移等变换来实现.

(2) 采样. 首先利用光线追踪技术渲染出一幅雷达传感器视角的目标图(图 7), 验证建筑模型、模

表 1 中国银行大楼各分层对应的反射参数
Tab.1 Reflection parameters of each layer in Bank of China

层名	材料	反射系数	散射系数	粗糙度/m
地面	水泥	0.3	0.3	0.005 00
建筑表面	大理石	0.4	0.3	0.004 00
窗	玻璃	0.7	0.2	0.000 85
门	紫铜渡漆	0.6	0.3	0.001 50
栏杆	铝合金	0.6	0.3	0.000 85

型间相对位置、雷达扫描角度等几何参数的设置正确. 然后采用表 1 中的参数, 并去掉所有环境光源, 根据表 2 所示的雷达影像的分辨率和入射角进行采样, 模拟生成与实际 SAR 强度影像分辨率一致的二维反射率图.



图 7 Pov-Ray 渲染出的雷达传感器视角的外滩建筑图(放大至目标建筑部分)

Fig.7 View of the Bund buildings from the radar sensor perspective rendered by Pov-Ray (enlarged to the target building section)

表 2 RaySAR 模拟用到的主要参数

Tab.2 Main parameters during the RaySAR simulation

入射角/ (°)	卫星飞行向(与北方向 夹角, 顺时针为正)/(°)	Pov-ray 渲染的 影像尺寸/像素		反射率、反弹次数 分布图区间/m		距离向分 辨率/m	方位向 分辨率/m	最大反弹 次数	三维分析中作用点 显示边长/m
		宽	高	方位向	距离向				
40	-168.774	6 000	4 000	(-100,300)	(7 900,8 250)	0.975	1.800	3	0.2

(3) 输出模拟结果. 绘制上述模拟生成的二维反射率图(图 8b)并按照信号的反弹次数绘制二、三次反弹对应的信号反射率图(图 8c, 8d)和所有反弹次数的分布图(图 9).

在模拟反射率图中, 灰度值代表回波信号的强度. 由于假定了一个无限大的地面, 故而除了建筑物阴影(图 8b—8d 中全黑部分)外的所有像素都有至少一次的回波信号. 值得注意的是, 很多时候, 来自于建筑墙体的直接回波较弱, 而对应窗、栏杆等的点特征太亮, 如果绘制在同一张图里, 太亮的信号会掩盖太弱的信号. 因此, 为了更加清晰地显示感兴趣的信号, 需要选定一个反射率阈值, 对反射率峰值进行

适当裁剪, 对反射率区间进行适当拉伸. 在本次模拟中, 图 8b 的反射率阈值为 10, 图 8c, 8d 的反射率阈值为 4.

图 9 是所有反弹次数点的分布图和局部放大图. 用不同灰度代表该像素所接收到信号的反弹次数(如果一个像素同时接收到一、二、三次反弹的信号, 采用最高次数的颜色绘制), 一、二、三次反弹分别对应黑色、浅灰、深灰. 前面已经提到, 除了对应建筑物阴影外的所有像素都有至少一次的回波信号(黑色), 由于 SAR 一维成像的局限性而照射不到的区域(无信号到达)体现为阴影(白色)、二面角对应明显的线特征(浅灰)、角反射器对应明显的点特征

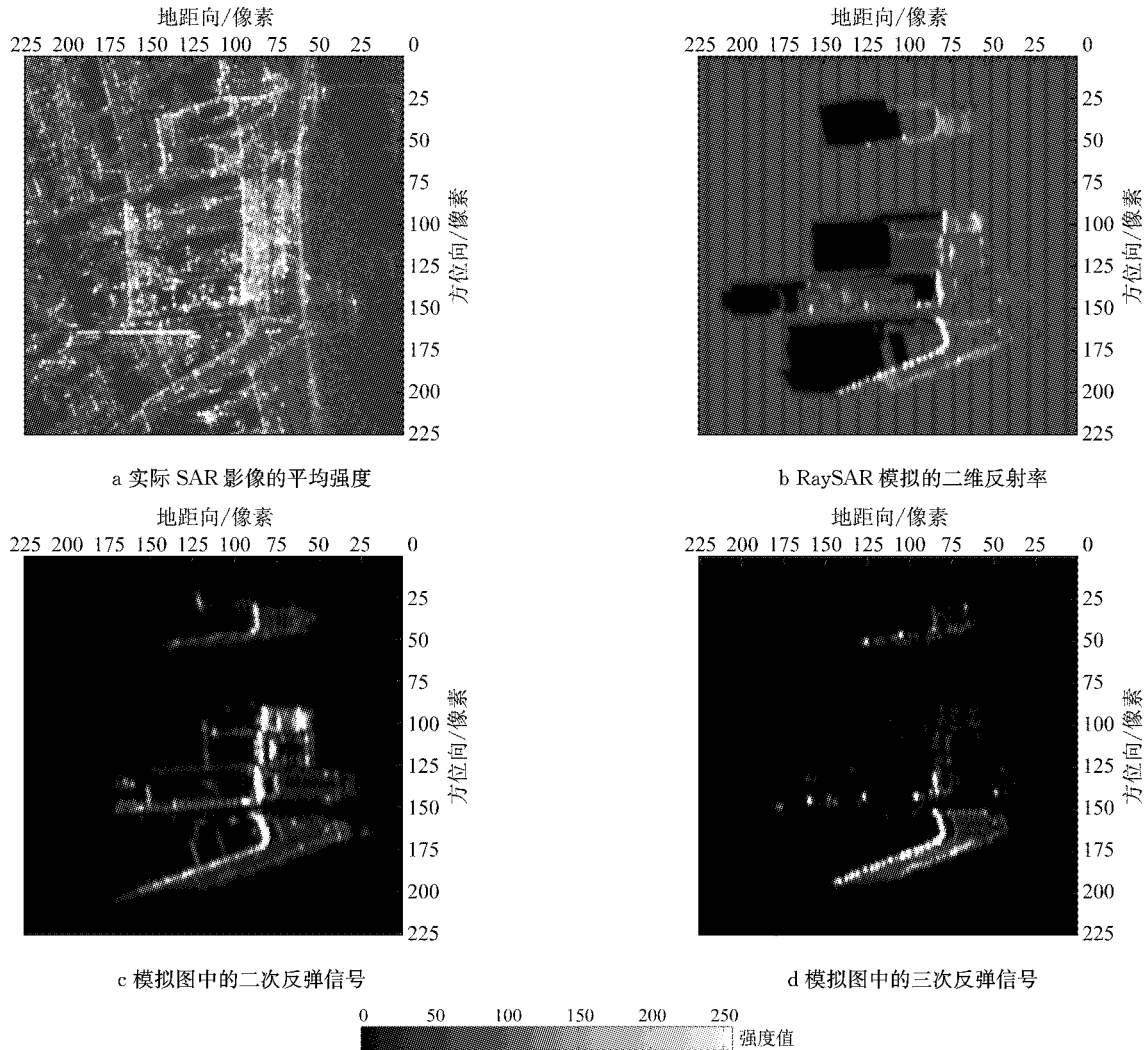


图 8 实际 SAR 影像的平均强度与 RaySAR 模拟的二维反射率对比

Fig.8 Comparison between the averaged SAR intensity image and the simulated 2D reflectivity map by RaySAR

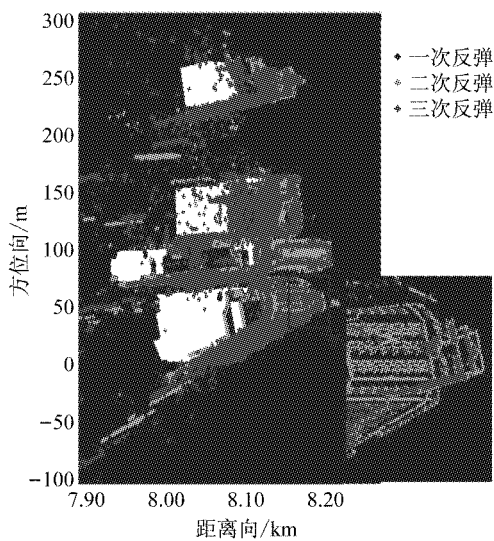


图 9 RaySAR 模拟图中的反弹次数分布及局部放大
Fig.9 Simulated signal distribution of RaySAR and local enlargement

(深灰). 为了防止信号过于杂乱,最高反弹次数设置为 3.

RaySAR 软件可以模拟在方位向、距离向和高程上具有无限分辨率的理想 SAR 系统,不同反弹次数的信号都可以被逆向定位到建筑的模型坐标系里,可以用于定位模拟图像上的点在具体地物上的位置.为了可视化,按照表 2 的参数设置,将逆向定位的作用点绘制成边长 0.2 m 的小立方体.图 10 显示了农业银行大楼上用白色和黑色的小立方体表示的二、三次反弹信号对应的作用点位置,其中 A、B 对应局部放大的部分.

2.3 模拟结果分析与讨论

RaySAR 软件假定来自地面的散射是朗伯散射,即具有各向同性.然而,真实散射信号普遍与入射角相关,故而模拟结果中地面散射被高估,造成如图 9 左侧一些远离建筑物的杂点.表 1 中,金属表面对应较高的反射性,玻璃对应较强的穿透性,而地

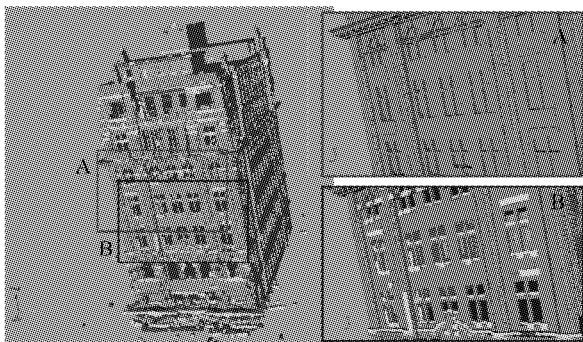


图 10 建筑模型坐标系中农业银行的二次、三次反弹作用点中心

Fig. 10 Phase centers corresponding to double bounce and triple bounce on the Agricultural Bank of China

面主要以散射为主. 另外, 为了能够得到和真实 SAR 图像中斑点噪声类似的效果, RaySAR 软件模拟时在图像上添加了乘性噪声.

如图 4 所示, 所选建筑与黄浦江之间隔着一条马路, 由于雷达向右侧视、降轨飞行, 加上车行道与人行道间的台阶、道路两边的花坛等地物都对应较强的、沿马路延伸方向的回波, 导致这条马路的信号与 5 栋建筑均造成了不同程度的叠置(图 8a), 对影像解译带来了不小的困难.

尽管如此, 仍然可以通过 SAR 模拟的手段得到真实 SAR 平均强度影像中的特征信号(点、线、阴影等)和建筑物几何结构之间的独特关系:

(1) 模拟 SAR 反射率图(图 8b)中 5 栋已知模型建筑的大致轮廓、位置均与真实 SAR 平均强度影像一致.

(2) 模拟时用简单平面表示的地面与建筑物立面形成了理想的二面角, 对应图 8b 和 8c 中非常明亮的建筑物 L 形、一字型轮廓, 而真实情况是地面有汽车、行人、植被等各种地物遮挡, 并且每一景 SAR 影像对应的地面情况都不尽相同, 导致图 8a 真实 SAR 平均强度影像中二面角信号被大大削弱.

(3) 真实 SAR 平均强度影像(8a)中看不到模拟 SAR 反射率图(图 8b 和 8d)中大块的黑色阴影. 这是由于试验所选区域建筑非常密集, 基本每个像素都有对应的回波信号, 而阴影对应收不到回波信号的盲区.

(4) 规则的特亮点阵信号出现在各建筑物朝向马路即面向雷达扫描视线的外立面(图 8a 和 8d 右半部分), 而侧视的外立面上这种信号弱化很多(如图 8a 和 8d 最下方和平饭店的侧面).

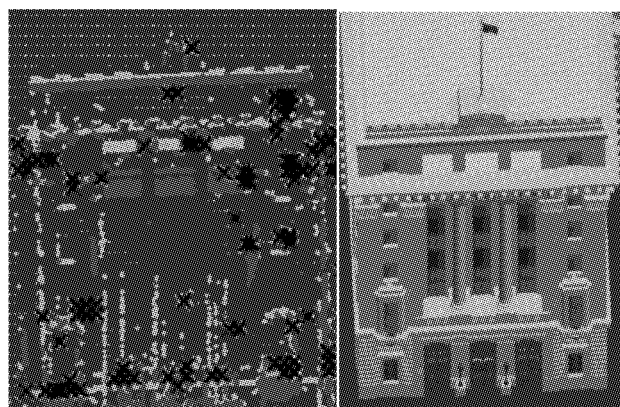
(5) 图 9 中, 受限于图像的分辨率, 加上一、二、

三次反弹是按顺序叠加绘制, 三次反弹严重遮盖住了二次反弹. 事实上, 如局部放大图所示, 二次反弹(浅灰)占主导的像素数目远大于三次反弹(深灰). 二次反弹主要对应二面角(建筑外立面和地面、建筑外立面上的凸起棱、窗沿、房檐等), 呈线状分布; 而三次反弹主要对应角反射器(窗角)等明显的点特征(图 10).

2.4 SAR 模拟与 PSInSAR 应用

PSInSAR 是一种基于永久散射体的时序 InSAR 分析方法^[24], 已经广泛应用于地面沉降、滑坡、地震和火山运动等地表形变观测中^[25-26]. 利用 PSInSAR 技术处理前文提到的外滩 35 景 COSMO-SkyMed 卫星雷达影像序列, 选出区域内具有稳定散射特性的 PS 点, 这些雷达影像坐标系下的 PS 点经坐标校正后, 绘制在 RaySAR 模拟的反弹次数分布图中(图 11a), 与雷达扫描视角下的建筑模型(图 11b)对照分析, 图中浅灰表示二次反弹, 深灰表示三次反弹, 黑色十字表示 PS 点. 表 3 列出了图 11 所示的中国工商银行大楼面向马路外立面上 PS 点、反弹次数、建筑结构之间的对应关系.

首先分析图 11a 中 79 个 PS 点与模拟的一次、二次、散射反射中心点之间的关系. 值得注意的是, 尽管模拟过程中, 反弹次数二维分布图的方位向、距离向分辨率均设置成与实际 SAR 影像一致, 但经过坐标矫正和转换后, PS 点与反弹中心点之间仍存在微小偏差. 为了解决这个问题, 以每个 PS 点为中心, 设置 3 个像素的缓冲区. 若该区域内可以检索到多个反弹中心点, 以最近的反弹中心点为准. 最后经统计, 一次、二次、三次反弹点各对应 12、35、32 个 PS



a RaySAR 模拟的反弹次数分布

b 建筑模型

图 11 中国工商银行的 RaySAR 模拟的反弹次数分布与建筑模型

Fig. 11 Bounce level distribution map and 3D model of Industrial and Commercial Bank of China

表3 图11中PS点、反弹次数、建筑结构之间的对应关系
Tab.3 Relationship among the PS points, the bounce level and the building structure in Fig.11

反弹情况	PS点数	所占分数/%	对应明确建筑结构的PS点数
一次反弹	12	15	不明确
二次反弹	35	44	墙体与凸起棱交线:13;窗棱:8;凸起的窗檐:7;凸起的大理石装饰:7
三次反弹	32	41	墙体与凸起棱交线:9;窗角:6;凸起的窗檐:8;墙面凸起的大理石装饰:9

点,占PS点总数的15%、44%和41%。

接下来分析PS点与建筑结构之间的关系。所采用的SAR影像的方位向和距离向分辨率分别为1.800 m和0.975 m(表2)。经统计,二次反弹点对应的PS点分别与13处墙体与凸起棱交线、8处窗棱、7处墙面凸起的大理石装饰吻合;三次反弹点对应的PS点分别与9处墙体与凸起棱交线、6处窗角、8处凸起的窗檐、9处墙面凸起的大理石装饰吻合;而一次反弹对应的建筑结构并不明确。从图11a中可以看出,实际模拟出的反弹中心数目远远大于基于雷达影像选出的PS点数。究其原因,其一是实际成像环境复杂,建筑物特征点不能保证都是PS点;其二是尽管二次及三次反弹对应稳定的反射结构(可与建筑结构相对应),但模拟时并没有考虑时间维度上的变化,使得模拟得到的二、三次反弹点远多于实际的PS点;其三是模拟时部分参数只能通过经验假定,与实际情况存在一定偏差。尽管如此,SAR模拟结果仍然可以在一定程度上佐证PS选点,还原PS点在建筑物上的位置。

3 结语

受城市地物目标的复杂性、SAR侧视斜距成像特点和斑点噪声的影响,城市地物反射目标在高分辨率SAR图像上的散射特性极为复杂,从而阻碍了SAR在城区建筑物结构变形监测中的应用。本文基于RaySAR软件对上海市外滩5座历史建筑进行了SAR图像模拟试验。详细介绍了试验步骤和相关反射、散射模型参数的选取方法。试验结果表明地面与建筑物立面形成了理想的二面角,在模拟SAR图像上呈现白色L型亮线。在朝向SAR卫星的建筑立面分布着有规律的二、三次反弹点阵,对应墙面上的窗角、侧棱等结构。基于光线追踪技术给出了SAR模拟图像二次、三次反弹点在建筑物表面的分布情况,揭示了SAR强度影像中的特征信号(点、线、阴影等)和建筑物几何结构之间的对应关系,对实际应用

中的SAR图像解译、目标识别以及确定永久散射体在地物目标上的精确位置有参考价值。

参考文献:

- [1] AUER S. 3D synthetic aperture radar simulation for interpreting complex urban reflection scenarios[D]. München: Technische Universität, 2011.
- [2] 张朋,黄金,郭陈江,等. SAR图像模拟方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(3): 26.
ZHANG Peng, HUANG Jin, GUO Chenjiang, et al. A simulation method of SAR imaging[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science), 2006, 7(3): 26.
- [3] 王国军,邵芸,张凤丽. 城市建筑物SAR图像模拟综述[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 116.
WANG Guojun, SHAO Yun, ZHANG Fengli. Review of SAR image simulation for urban buildings [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(4): 116.
- [4] 吴涛,王超,张红,等. 基于图像特征的星载SAR图像模拟研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 214.
WU Tao, WANG Chao, ZHANG Hong, et al. Space-borne SAR image simulation based on image characteristics[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 214.
- [5] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D. The SAR simulation: An overview[C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS 1995). Firenze: [s. n.], 1995: 2283-2285.
- [6] FRANCESCHETTI G, IODICE A, RICCIO D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1787.
- [7] FRANCESCHETTI G, IODICE A, RICCIO D, et al. SAR raw signal simulation for urban structures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 1986.
- [8] BRUNNER D, LEMOINE G, GREIDANUS H, et al. Radar imaging simulation for urban structures[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1): 68.
- [9] BALZ T. Real-time SAR simulation on graphics processing units [C/CD]// 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2006). Dresden: [s. n.], 2006.
- [10] BALZ T, STILLA U. Hybrid GPU-based single- and double-bounce SAR simulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3519.
- [11] HAMMER H, SCHULZ K. Coherent simulation of SAR images [C]// Proceedings of SPIE on Image and Signal Processing for Remote Sensing XV. San Jose: [s. l.], 2009: 74771G.
- [12] AUER S, GERNHARDT S, BAMLER R. Ghost persistent scatterers related to multiple signal reflections [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 919.
- [13] AUER S, GERNHARDT S, BAMLER R. Ghost persistent scatterers related to signal reflections between adjacent buildings [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2011). Vancouver: [s. n.], 2011: 1485-1488.
- [14] BALZ T, HAMMER H, AUER S. Potentials and limitations of

- SAR image simulators—A comparative study of three simulation approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 101(101):102.
- [15] HOLTZMAN J C, FROST V S, ABBOTT J L, *et al.* Radar image simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1978, 16(4): 296.
- [16] SPECK R, HAGER M, GARCIA M, *et al.* An end-to-end-simulator for spaceborne SAR systems [C]// 4th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2002). *Eusar*;[s. n.], 2002: 237-239.
- [17] BAMLER R, EINEDER M, ADAM N, *et al.* Interferometric potential of high resolution spaceborne SAR [J]. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2009 (5): 407.
- [18] THIELE A, CADARIO E, SCHULZ K, *et al.* Building recognition from multi-aspect high-resolution InSAR data in urban areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45 (11): 3583.
- [19] XU F, JIN Y Q. Automatic reconstruction of building objects from multi-aspect meter-resolution SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 44 (11): 3219.
- [20] FRANCESCHETTI G, GUIDA R, IODICE A, *et al.* Building feature extraction via a deterministic approach: Application to real high resolution SAR images [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007). Barcelona;[s. n.], 2007: 2681 - 2684.
- [21] GUIDA R, IODICE A, RICCIO D. Assessment of TerraSAR-X products with a new feature extraction application: Monitoring of cylindrical tanks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(2): 930.
- [22] 张月婷,仇晓兰,丁赤飏,等. 高分辨率 SAR 图像桥梁目标仿真与特性分析[J]. *雷达学报*, 2015, 4(1): 78.
ZHANG Yueting, QIU Xiaolan, DING Chibiao, *et al.* The simulation and characteristics analysis on high resolution SAR images of bridges[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 78.
- [23] 常用材料反射系数表 [EB/OL]. [2015-04-07]. <http://wenku.baidu.com/view/ecb5e575f12d2af90242e6c2.html>.
Reflection coefficient table of common materials. [EB/OL]. [2015-04-07]. <http://wenku.baidu.com/view/ecb5e575f12d2af90242e6c2.html>.
- [24] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1999, 39(1):8.
- [25] 张丽娜,伍吉仓,李涛,等. 基于短基线差分干涉法的上海地面沉降分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40 (10): 1564.
ZHANG Lina, WU Jicang, LI Tao, *et al.* Ground subsidence analysis in Shanghai based on short baseline differential interferometry[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(10): 1564.
- [26] 何平,许才军,温扬茂,等. 利用 PALSAR 数据研究长白山火山活动性[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(2): 214.
HE Ping, XU Caijun, WEN Yangmao, *et al.* Using PALSAR data to study the activity of volcanic rocks in Changbai Mountain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 214.

~~~~~

(上接第 556 页)

- [9] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.  
FENG Wenhao. *Close-range photogrammetry* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [10] CHENG P, KELLER J, KUMAR V. Time-optimal UAV trajectory planning for 3D urban structure coverage [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. Nice: IEEE, 2008:2750-2757.
- [11] 张祖勋,潘励,王树根. 摄影测量学[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.  
ZHANG Zuxun, PAN Li, WANG Shugeng. *Photogrammetry* [M]. 2th ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [12] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2010, 32(8):1362.
- [13] LABATUT P, PONS J P, KERIVEN R. Efficient multi-view reconstruction of large-scale scenes using interest points, delaunay triangulation and graph cuts [C]// IEEE, International Conference on Computer Vision. Rio de Janeiro: IEEE, 2007:1-8.
- [14] NGUYEN H M, WÜNSCHE B, DELMAS P, *et al.* High-definition texture reconstruction for 3d image-based modeling [C]// 21st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision in Cooperation with Eurographics Association. [s. l.]: Vaclav Skala Union Agency, 2013:39-48.
- [15] GRÖGER G, KOLBE T H, NAGEL C, *et al.* OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard, version 2.0[EB/OL]. [2017-03-01]. <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.