

引用格式: Wang Guojun, Zhang Fengli, Shao Yun. High Resolution SAR Image Simulation for Building[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(4): 594-603. [王国军, 张风丽, 邵芸. 建筑物目标高分辨率 SAR 图像模拟方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 594-603.]

建筑物目标高分辨率 SAR 图像模拟方法

王国军^{1,2}, 张风丽¹, 邵 芸¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着 TerraSAR-X、Cosmo-SkyMed 和 Radarsat-2 等高分辨率合成孔径雷达(SAR)卫星系统的升空, 星载 SAR 图像空间分辨率达到了米级。在这些高空间分辨率 SAR 图像中, 单个建筑物结构的散射特征能够得到明显的展现, 推动了 SAR 在城市监测中的应用。而城市环境的复杂性给 SAR 图像的解译和应用带来了巨大的挑战, 由于 SAR 图像模拟有助于图像的解译和应用, 因此城市目标高分辨率 SAR 图像模拟成为一个研究热点。提出了一种基于射线追踪法的图像模拟方法, 它能够模拟城市目标 SAR 图像上叠掩、阴影和多次散射等主要特征, 非常有利于 SAR 图像的解译。该模拟方法首先构建虚拟 SAR 传感器, 发射电磁波射线与场景中三维模型相互作用, 并接收回波信号成像, 电磁波的传播以及与场景的多次散射在整个过程中都能够被追踪。为了评价该模拟方法的有效性, 首先通过模拟平顶屋、尖顶屋模型的 SAR 图像, 然后选择国家体育馆和大场景小区三维模型作为输入, 将生成的模拟图像与真实 TerraSAR-X 聚束模式图像进行比较。结果表明: 该模拟器能够模拟城市目标的散射特征并应用于图像的理解和变化检测。

关 键 词:建筑物目标; 合成孔径雷达; 图像模拟; 射线追踪; 解译

中图分类号: P 23; TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)04-0594-10

1 引 言

2007 年以来, TerraSAR-X、Cosmo-SkyMed 和 RadarSat-2 等米级分辨率的 SAR 卫星系统的发射^[1-3], 开启了超高分辨率(VHR)星载 SAR 应用的新时代, 丰富的星载高分辨率 SAR 图像为城市监测提供了新的技术手段^[4-6]。与低分辨率 SAR 图像相比, VHR SAR 图像上的建筑物目标由大量分辨率单元组成, 其散射特征可以得到表现, 使得建筑物目标的识别和重建成为可能^[7]。但城市目标的复杂性、SAR 侧视斜距成像特性和斑点噪声等使得城市目标在高分辨率 SAR 图像上的散射特性极为复杂, 给 SAR 图像的理解和应用带来了巨大的挑战。

作为 SAR 遥感正向研究, SAR 图像模拟能够

简单高效地模拟建筑物目标在不同成像条件(不同入射角、方位角等)的散射特征, 在 SAR 图像解译人员培训^[8]、散射机制研究^[9-10]、SAR 图像几何校正^[11]、建筑物目标信息提取和三维重建^[12-13]等方面具有重要作用。针对不同的应用, 城市目标 SAR 图像模拟在后向散射模型和模拟技术上有所不同。常用后向散射模型主要有基于 Kirchhoff 物理光学(PO)和几何光学(GO)近似^[14-15], 时域有限差分模型(FDTD)^[16], 积分方程模型(IEM)^[17]等, 在计算回波能量时考虑了建筑物表面的粗糙度和介电常数参数; 此外图形学中 Phong 反射和散射模型也被引入 SAR 图像模拟中^[9, 18]。然而大多数情况下, 建筑物表面的粗糙度参数和介电常数是未知的, 因此这类模拟方法将不再实用。在模拟大范围场景图像

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-10-23

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-320), 国家自然科学基金项目(41001213), 国家 863 计划项目(2011AA120403), 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(Y0S04400KB)。

作者简介: 王国军(1986—), 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 主要从事高分辨率 SAR 图像模拟、城市雷达遥感应用研究。

E-mail: wanggj@irsa.ac.cn.

时,通常将散射模型与射线追踪算法相结合,首先模拟传感器发射电磁波,然后追踪电磁波与场景相互作用并返回传感器的整个过程^[9,14]。在计算机图形学中,标准射线追踪算法仅仅追踪镜面反射线,忽略了粗糙表面非镜面反射方向的散射能量,在 SAR 图像模拟中仅仅适用于非常平整的金属表面。与射线追踪法不同,光栅法也被用于开发快速 SAR 图像模拟器,但在模拟大于二次散射信号时存在一定困难^[18],而在城市目标 SAR 图像中,多次散射是最为明显的特征。

本文介绍了一种简单高效的建筑物目标 SAR 图像模拟方法,该方法是基于改进射线追踪算法,可以模拟目标的叠掩、阴影特征,还可以模拟相邻目标间的多次散射特征;辐射特性与目标表面材质类型相关,为表面镜面反射和朗伯体散射的综合。为了验证模拟方法的有效性,首先模拟了简单平顶屋、尖顶屋模型的 SAR 图像,然后将国家体育馆和大范围场景模型分别输入模拟器,将生成的模拟图像与真实 Terra-SAR-X 图像进行比较,结果表明该方法能够有效模拟出建筑物目标的叠掩、阴影和多次散射等主要特征,非常有利于复杂图像的解译。此外,还说明通过比较模拟图像和真实图像可以进行变化检测。

2 模拟方法

与光学成像系统的中心透视投影不同,SAR 系统是主动侧视距离成像,而且电磁波发射源与接收器在同一位置。本文发展的 SAR 图像模拟器采用一种融入 SAR 侧视成像几何模型的扩展射线追踪算法,可以快速高效模拟不同城市目标在各种成像条件下(入射角、方位角)的 SAR 图像。为了提高模拟的计算效率,在模拟器中不考虑合成孔径效应,而是假设雷达波照射范围为一个分辨单元(距离向分辨率×方位向分辨率)。此外还假设在整个模拟过程

中,传感器的航高和航向是定值。如图 1 为模拟方法的流程,首先建立建筑物目标和地面的三维模型,经三角化处理后得到大量三角面元集合,并根据目标表面属性给每个面元附上不同类型。加入成像几何条件后,经过几何模型构建、辐射模型构建、射线追踪和图像生成 4 个步骤后将得到模拟 SAR 图像。

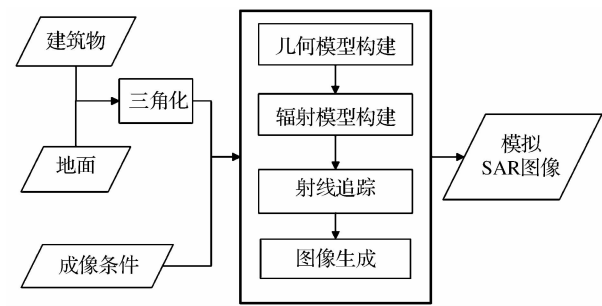


图 1 SAR 图像模拟流程
Fig. 1 The flow chart of the simulation

2.1 几何模型

假设目标场景三维模型是建立地面的场景坐标系 $OENH$,其中 O 为场景中地面一点, E 指向东, N 指向北, H 为高度。SAR 图像为二维图像坐标系 OXY , O 为图像坐标原点, X 指向距离向, Y 指向方位向。如图 2(a)所示,两个坐标系往往存在一定的夹角,亦即方位角 φ 。因此首先需要预处理,过程如图 2 所示。首先将 OEN 坐标系旋转到 OXY 坐标系,然后平移目标场景使 X 、 Y 坐标最小值都为 0,转换公式为(1)。此外,模拟过程中假定天线右视照射目标,对于左视情况只需将三维模型经水平镜像处理即可转换成右视情况。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_{\min} \\ N_{\min} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用 SAR 的“停—走—停”模型^[19],传感器沿距离向剖面发射并接收电磁波信号,然后沿着运动

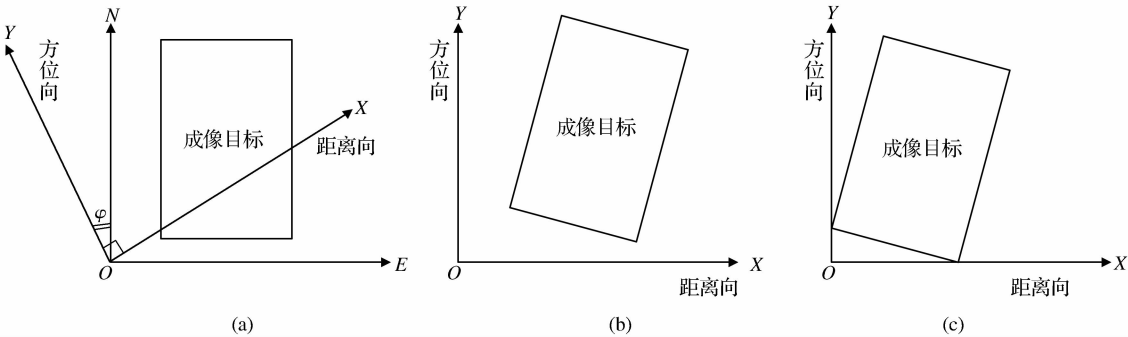


图 2 目标场景的旋转和平移过程
Fig. 2 Procedure of rotation and translation of the scene

方向移动到下一个距离线后再发射并接受电磁波。图 3 为成像几何模型,传感器高度为 H_s ,近距入射角为 θ_{\min} ,方位向和距离向分辨率分别为 ΔA 和 ΔR ,传感器初始点为 $\vec{S}_0 = (-H_s \cdot \tan\theta_{\min}, 0, H_s)$,保证了模拟过程中距离和方位坐标都是正值,最小斜距 $R_0 = H_s / \cos\theta_{\min}$ 。在第 j 个距离线内,从近距到远距第 i 个射线表示为 \vec{r}_{ij} , $\{i = 1 \wedge I, j = 1 \wedge J\}$, I 和 J 分别为距离向和方位向采样数,射线起点为传感器坐标 \vec{S}_{ij} ,方向为 \vec{d}_{ij} ,如式(2)。距离向采样数 I 由

目标场景距离向幅宽 X_I 、距离向分辨率 ΔR 和入射角 θ_{\min} 决定,并且应该考虑叠掩和阴影等散射现象,如图 3 中,最远距离端能够被射线 \vec{r}_I 照射到,则采样数应该满足 $I \geq X_I \sin\theta_{\min} / \Delta R$ 。

$$\begin{cases} \vec{S}_j = (-H_s \cdot \tan\theta_{\min}, Y_j, H_s) \\ \vec{d}_{ij} = (\sin\theta_{\min}, 0, \cos\theta_{\min}) \\ Y_j = j \cdot \Delta A \\ \theta_i = \arccos\left(\frac{H}{H/\cos(\theta_{i-1} + \Delta R)}\right) \end{cases} \quad (2)$$

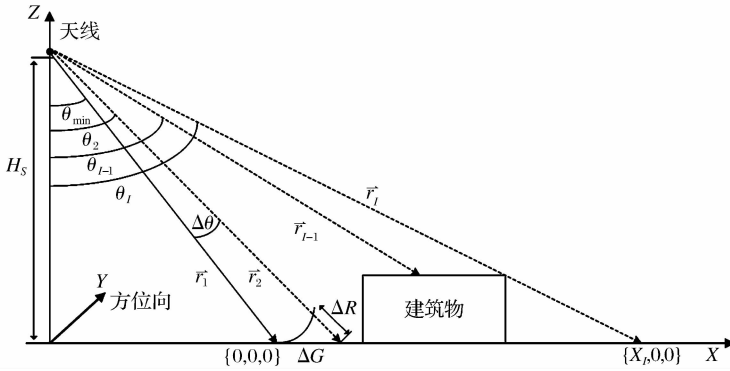


图 3 成像几何模型(一个距离线剖面)

Fig. 3 The geometrical model of the simulation in range direction

2.2 辐射模型

由于人工目标的结构和表面类型异常多样,而精确的散射模型需要的输入参数(表面粗糙度和介电常数等)一般难以获得。因此该模拟方法采用一种简单辐射模型,该模型与表面参数无关。如图 4 所示,该散射模型包含朗伯体散射和镜面反射两部分,其中朗伯体散射模型用于计算后向散射能量 I_{rec} ,镜面反射模型用于追踪多次散射并计算镜面反射能量 I_{sp} ,计算公式分别为(3)和(4)。

$$I_{\text{rec}} = k \cdot I_{\text{in}} \cdot A_e \cdot \cos^p \omega \quad (3)$$

$$I_{\text{sp}} = F_s \cdot A_e \cdot (\cos\omega)^{1/F_r} \quad (4)$$

其中: I_{in} 为入射能量,漫反射系数 k 与表面粗糙性有关,参数 p 与表面材质有关, ω 为局部入射角,有效面积 $A_e = |\vec{r}| \cdot \Delta\theta_i \cdot \Delta A \cdot \cos\omega$, $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ 。镜面反射系数 F_s 与表面粗糙度和材质有关, F_r 为粗糙度调节系数,决定了反射能量沿着反射方向的集中程度。

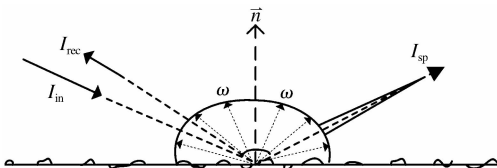


图 4 表面散射模型示意图

Fig. 4 Scattering model of the surface

2.3 基于射线追踪的采样

作为模拟方法的核心步骤,射线追踪是模拟并跟踪天线发射的电磁波及其与地物相互作用并生成回波的过程。将传感器发射的每一根射线称为主射线,主射线及其后续多次散射线的集合称为一个射线族,追踪整个射线族的传播,并判断其与场景中的三角面元集合的相互作用,直到最后一根反射线不与场景中任何三角面元相交或者到达最大追踪次数,则停止该射线族的追踪。整个流程如图 5 所示。具体算法如下:

(1) 目标三维模型的矢量表示为三角面元几何:

$$F_i = \{V_{1i}, V_{2i}, V_{3i}\}, i = 1, 2, 3, \dots, N_{\text{tri}} \quad (5)$$

其中: V_{1i} 、 V_{2i} 和 V_{3i} 分别是第 i 个面元 F_i 对应的 3 个顶点, N_{tri} 为三角面元总数。

(2) 根据目标场景及成像参数确定主射线根数 $I \times J$ 。

(3) 主射线生成:主射线尚未产生完毕,则利用式(2)计算新的主射线的参数;如果主射线产生完毕,则转到(9)。

(4) 射线传播:如图 6 所示,从点 $\vec{P}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 发射一根射线,入射方向为 $\vec{d} = (dx, dy, dz)$,则发射该条射线的过程可表示为:

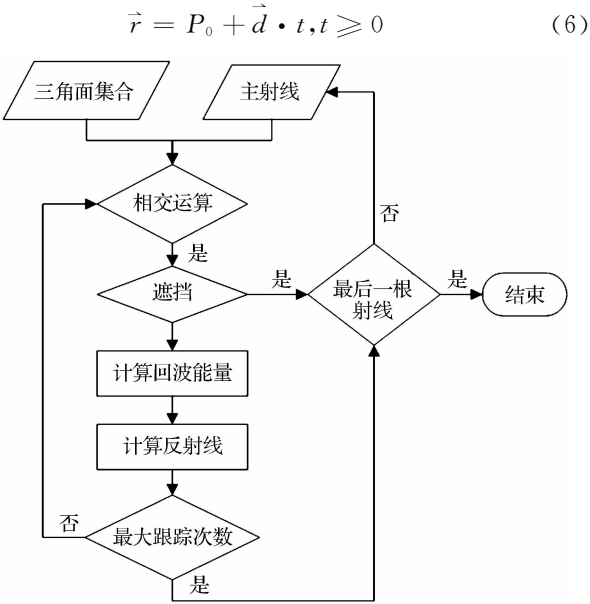


图 5 射线追踪算法流程

Fig. 5 The procedure of ray tracing

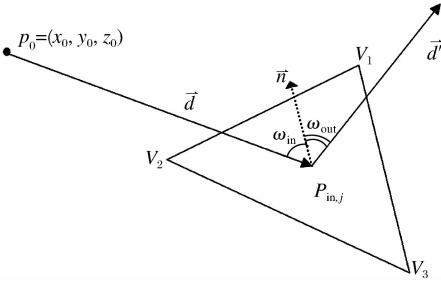


图 6 射线与目标之间的作用

Fig. 6 The rays and the interaction with objects

(5) 射线与场景求交运算: 对于每一条射线 $\vec{r}_j = P_0 + \vec{d} \cdot t$, 如果满足 $t = t_{in}$, 使得 $P_{in,j} = P_0 + \vec{d} \cdot t_{in}$ 在三角面元 $F_i = \{V_{1i}, V_{2i}, V_{3i}\}$ 内, 则判定该条射线 \vec{r}_j 与面 F_i 相交与点 $\vec{P}_{in,j} = (x_{in,j}, y_{in,j}, z_{in,j})$; 若射线与场景中多个三角面元相交, 则取距离射线起点最近的交点, 该条射线的追踪距离 $R = t_{in}$; 如果

射线不与任何三角面元相交, 对该射线族的追踪结束, 转到步骤(3)。

(6) 遮挡检测及能量计算: 以点 $\vec{P}_{in,j}$ 为原点产生一条测试射线, 指向传感器方向, 如果该测试射线不与场景中其他三角面元相交, 则表明该点未被遮挡, 其回波能量能够被传感器接收, 然后利用式(3)计算该照射点的后向散射能量; 如果测试射线与三角面元相交, 则表明该点位于阴影中。

(7) 计算反射射线: 如图 6 所示, 反射射线的传播满足菲涅尔反射定律, 反射线在入射线 \vec{r} 与相交三角面元表面法向量 \vec{n} 构成平面内, 反射角 ω_{out} 等于入射角 ω_{in} , 反射线的方向矢量 \vec{d}' 为:

$$\vec{d}' = \vec{d} - 2(\vec{d} \cdot \vec{n})\vec{n}$$
 (7)

其中: $(\vec{d} \cdot \vec{n})$ 表示矢量 \vec{d} 与 \vec{n} 的点乘。则反射线可表示为(8), 其能量大小为(4), 追踪次数增加 1。

$$\vec{r}_{out} = P_{in,j} + \vec{d}' \cdot t, t \geq 0$$
 (8)

(8) 是否最大追踪次数: 因为超过 3 次散射的回波能量较弱, 所以一般设置最大跟踪次数为 3。如果新产生的反射线的追踪次数已经达到最大追踪次数, 表明对该条主射线对应射线族追踪完毕, 转到步骤(3); 否则继续追踪该反射线与场景的相互作用, 转到步骤(5)。

(9) 结束。

在城市建筑物目标 SAR 图像中, 墙壁与地面之间的二次散射是非常重要的特征, 所以对二次散射的模拟将是非常重要的一个方面。本模拟方法只考虑发生在一个距离线上二次散射(即只考虑 X-Z 平面的二次散射), 因为对于 X-Z 平面之外的射线, 其回波能量不能被传感器接收, 只有在表面非常粗糙时, 才会有较弱的回波信号被传感器接收, 因此忽略微弱的多次散射。如图 7, 射线 \vec{r} 与场景中相交于点 \vec{p}_1 的 3 种情况: ① 二次散射射线 \vec{r}_{12} 与目标相交于

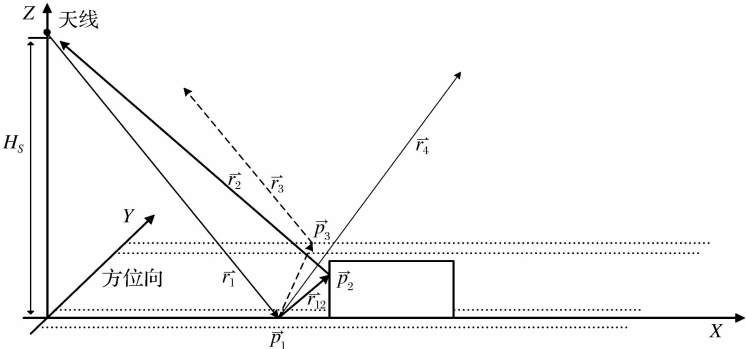


图 7 二次散射的情况

Fig. 7 Sketch map of double bounce

点 \vec{p}_2 , 反射线 \vec{r}_2 在 X-Z 平面, 沿原方向反射回传感器; ② 二次散射线与场景相交于 \vec{p}_3 , 则反射线 \vec{r}_2 不在 X-Z 平面, 不能被传感器接收; ③ 反射线 \vec{r}_4 不与场景中任何目标相交, 则没有发生二次散射。

由于 SAR 是斜距成像, 则二次散射信号的传播距离为射线 \vec{r}_1 、 \vec{r}_{12} 和 \vec{r}_2 的长度之和, 斜距 r_d 可用式 (9) 表示:

$$r_d = \frac{|\vec{r}_1| + |\vec{r}_{12}| + |\vec{r}_2|}{2} \quad (9)$$

其中: $|\vec{r}_1|$ 、 $|\vec{r}_{12}|$ 和 $|\vec{r}_2|$ 分别是 3 条射线的长度。更多次散射的斜距采用同样方式计算。

2.4 图像生成

要生成模拟 SAR 图像, 需要将所有射线按照方位向坐标和斜距坐标投影在斜距-方位向平面上。首先利用式 (10) 和 (11) 计算图像的高度 N_{Height} 和宽度 N_{Width} 。然后建立 $N_{\text{Height}} \times N_{\text{Width}}$ 大小的空白图像, 分别将单次散射和多次散射线按照方位向坐标和距离向坐标值映射到空白图像中对应的像素点, 当多个回波能量映射到一个像元内, 则将它们进行非相干叠加。最终生成了单次散射和多次散射模拟图像, 将单次和多次散射图像叠加在一起可以得到完整模拟图像。生成的模拟图像往往会出现灰度分布不连续现象, 这是由于离散化过程中欠采样的缘故, 经窗口为 3 的双线性滤波后可以得到平滑的模拟 SAR 图像。此外, 由于入射角已知, 经过斜距转地距过程可以得到目标场景的地距 SAR 模拟图像。

$$N_{\text{Height}} = \left\lceil \frac{Az_{\text{max}} - Az_{\text{min}}}{\Delta A} \right\rceil + 1 \quad (10)$$

$$N_{\text{Width}} = \left\lceil \frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{\Delta R} \right\rceil + 1 \quad (11)$$

其中: Az_{max} 和 Az_{min} 分别为方位向坐标的最大值和最小值, R_{max} 和 R_{min} 分别为距离向坐标的最大值和最小值。

3 实验结果和分析

为了验证模拟方法的有效性, 下面首先通过设计简单平顶屋和尖顶屋的三维模型, 分别生成不同方位向的模拟地距图像并分析图像特征; 然后选择国家体育馆和北京某小区三维模型作为输入, 将得到的模拟图像与真实 TerraSAR-X 图像进行对比分析。其中输入的 3D 模型是利用地面实测三维参数, 由 3DS Max 制作完成。

3.1 平顶屋和尖顶屋图像模拟

如图 8 为 3DS Max 制作的简单三维模型, 图 8 (a) 中是长宽高为 60 m×40 m×30 m 的平顶屋, 包含 12 个三角面元, 地面用 2 个三角面元表示; 图 8 (b) 中是长宽高为 60 m×40 m×30 m 的尖顶屋, 屋顶倾角为 30°, 包含 16 个三角面元。对于两种不同类型的简单目标, 分别模拟 3 种不同方位向的图像。图 9 (a)、(c)、(e) 分别为平顶屋在方位角为 0°、22.5°和 45°的模拟地距图像, 图 9 (b)、(d)、(f) 分别为尖顶屋在方位角为 0°、22.5°和 45°的模拟地距图像, 成像参数见表 1。二面角反射线为电磁波经过墙面与地面的二次散射形成, SAR 斜距成像方式导致二次散射信号的相位中心为墙角, 因此二次散射线可用于提取建筑物目标。由图 9 (a)、(c)、(e) 可以看到, 随着方位角增大, 二次散射线从直线变为 L 型亮线, 并且亮度有所减弱, 与文献中结论一致^[20-21]。叠掩和阴影随着方位角增大的变化趋势与预期一致。图 9 (b)、(d)、(f) 中, 近距端较亮区域是由倾斜屋顶的透视收缩引起, 当屋顶的倾角等于入射角时, 整个屋顶面到传感器的距离相等, 回波信号为镜面强反射, 导致尖顶建筑物常常表现为两条亮线^[22]。可见该模拟方法可以较好地模拟简单建筑物的叠掩、阴影、二次散射等效应, 并且散射特征与文献中的结论一致。

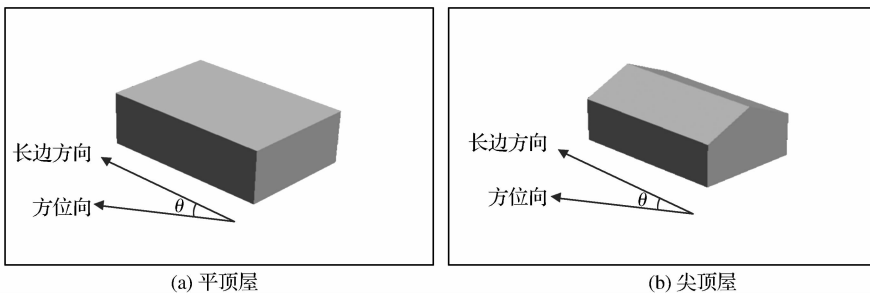


图 8 单目标模拟的三维模型(方位角为长边与方位向夹角)

Fig. 8 3D models of the simulated building

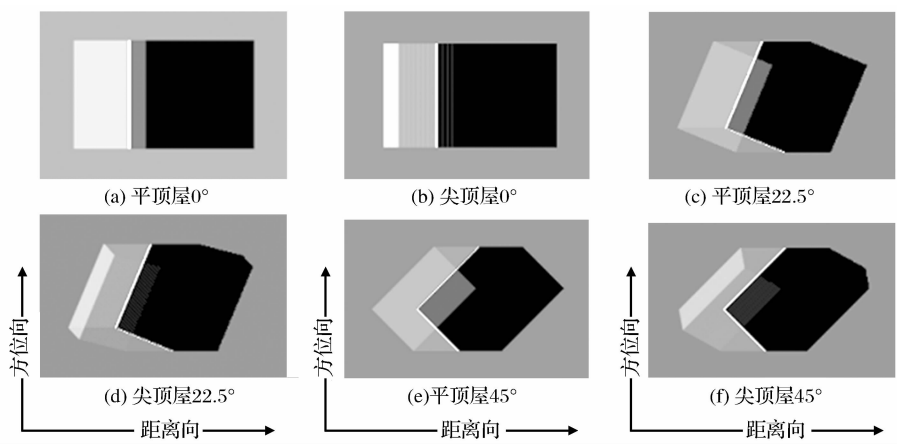


图 9 平顶屋和尖顶屋分别在方位角为 0°、22. 5°和 45°情况的模拟图像

Fig. 9 Simulations of the plane roof building and gable roof one under three different aspect angles

表 1 TerraSAR-X 成像参数及模拟输入参数

Table 1 Acqisition parameters and simulation parameters

卫星	成像模式	数据级别	成像时间	卫星高度/km	入射角/°	轨道倾角/°	像元采样间隔/m
TerraSAR-X	聚束	MGD/地距	2010-04-16	514	45, 6	97. 4	0. 75

3.2 国家体育馆

国家体育馆位于奥林匹克公园中心区的南部，与“鸟巢”、“水立方”和国家会议中心比邻而居，其光学图像和三维模型如图 10 所示，其中三维模型的视角与 SAR 传感器视角一致。建筑物屋顶为钢结构，侧面为玻璃外墙，还有大量细微结构。为了减少计算量，建模时忽略微小几何结构，最终模型包含 458 个三角面元。图 11 为真实图像与模拟图像的对比，其中图 11(a)为 TerraSAR-X 聚束模式图像，(b)和 (c)分别为单次散射和二次散射模拟图像，(d)为(b)和(c)的合成，真实 SAR 图像成像参数和模拟输入参数见表 1。比较图 11(a)的真实图像和图 11(b)单次

散射模拟图像，可以明显看出建筑物各部分的散射贡献，两幅图像对应叠掩和阴影非常相似。模拟图像中屋顶明显，而真实图像中屋顶只能大致分辨其轮廓，这是因为屋顶为光滑的钢板结构，回波能量非常弱，而模拟中朗伯体散射模型对屋顶回波能量的模拟偏大。但总体来说，模拟方法可以有效模拟建筑物的典型散射特征，如叠掩、阴影，辅助图像的解译。比较图 11(a)真实图像和图 11(c)二次散射模拟图像，模拟图像二次散射亮线明显少于真实图像。二次散射由二面角结构产生，与真实建筑物目标相比，简化后的三维模型缺少一些二面角结构，导致多次散射特征模拟不完全。主要分析模拟图11(c)中4个典

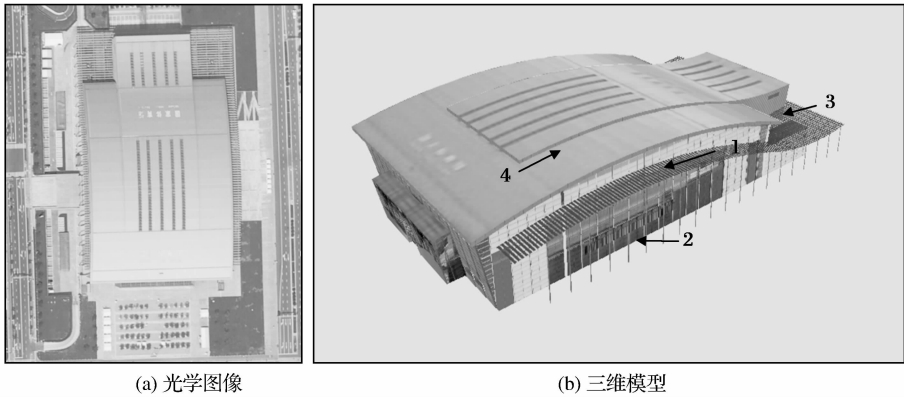


图 10 国家体育馆 (a) 光学图像, (b) 三维模型, 其视角同 SAR 传感器照射视角

Fig. 10 Optical image and 3D model of National Gymnasm, optical image and 3D model,a perspective view onto the building as seen by a spectator located located at the location of the SAR sensor

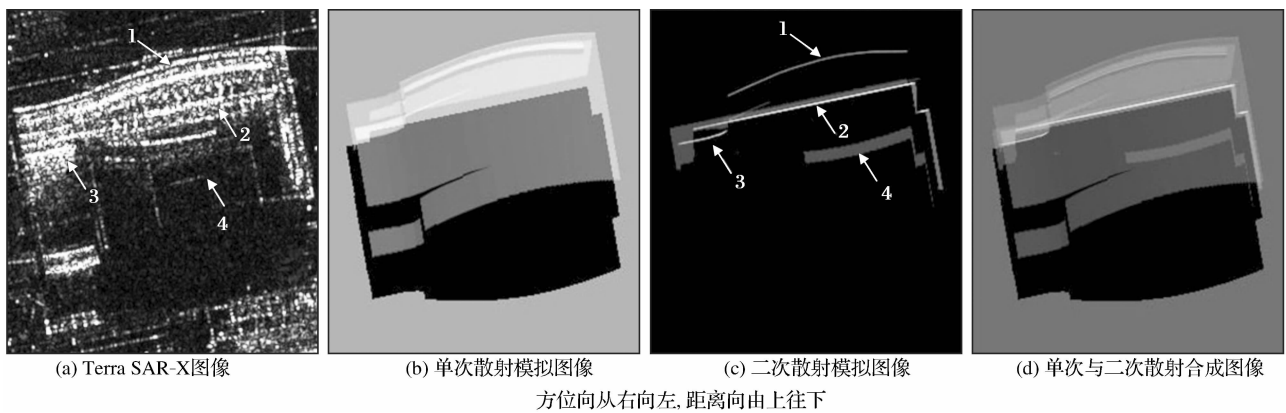


图 11 国家体育馆 TSX 图像与模拟图像

Fig. 11 TerraSAR-X image and simulation of National Gymnasim

型的二次散射特征,特征 1 是由墙壁上伸出来的结构与墙壁构成二面角反射器形成的亮线,由于 SAR 的斜距成像导致该亮线位于近距端;特征 2 为墙面与地面组成二面角反射器形成的亮线;特征 3 形成原因和特征 1 一样,并且两者拼接在一起组成一条完整曲线;特征 4 在模拟图像中比在真实图像中明显,因为真实建筑物的特征 4 对应的台阶高差非常小导致二次散射不明显,而建立三维模型时错误地将高差增大了,导致模拟图像上特征 4 较为明显。

通过上述比较分析表明,该方法模拟的图像非常有助于复杂建筑物目标的高分辨率 SAR 图像解译,不仅可以分析建筑物目标的叠掩、阴影等几何特征,还能分析多次散射特征的形成原因。此外模型的精确程度决定于模拟结果的好坏,而建立精细三维模型的耗时量巨大,而且精细模型必然会导致模拟过程中计算量增大,导致效率降低,因此三维模型的精确度取决于需求。

3.3 大场景模拟

除了能够有效模拟单个建筑物目标的 SAR 图

像,该方法还能够模拟大范围场景的 SAR 图像。下面以北京市朝阳区安翔里小区为实验区,并将模拟图像和真实图像进行比较。图 12 为安翔里小区的光学图像和三维模型,三维模型的视角与 SAR 传感器视角一致。小区东西跨度 600 m,南北跨度 1 000 m,包含各类建筑物目标 57 个,三维模型中省略了停车场、花坛等附属设施,包含了 2 328 个面元。图 13 展示了真实 SAR 图像和模拟图像,其中图 13(a)为 TerraSAR-X 聚束模式图像,(b)和(c)分别为单次散射和二次散射模拟图像,(d)为(b)和(c)的合成图像,真实 SAR 图像成像参数和模拟输入参数如表 1。由图 13 可以看出 TerraSAR-X 图像与二次散射模拟图像更相似,小区内部包含大量树和花坛结构,其回波与房屋的信号混在一起,导致房屋叠掩和阴影不明显,此外真实图像中斑点噪声也会降低建筑物目标的可识别度,而只有二次散射特征最为明显,因此真实图像与二次散射模拟图像更相似。

图 13 中红色箭头为真实图像和模拟图像之间两处典型差异,其中第一个差异(箭头 1)主要说明

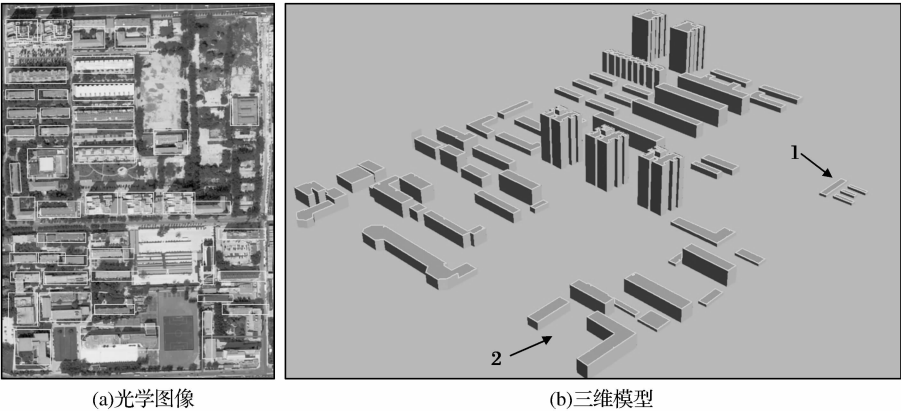


图 12 安翔里小区光学图像与三维模型

Fig. 12 Optical image and 3D model of Anxiangli strict

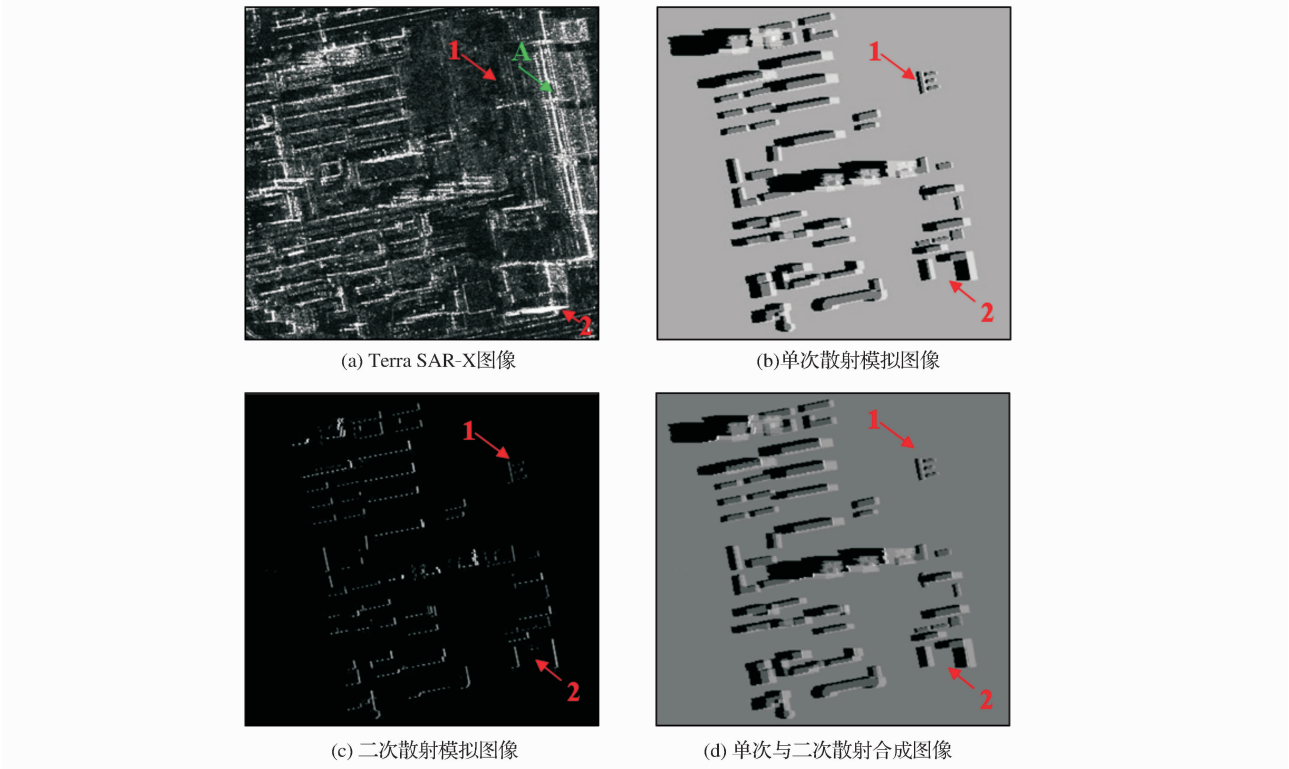


图 13 安翔里小区真实 Terra SAR-X 图像与模拟图像对比 (方位向从右向左,距离向由右往左)

Fig. 13 TerraSAR-X image and simulation of Anxiangli Strict. Azimuth direction:Right to left. Range direction:Top down

遮挡效应,第二个差异(箭头 2 主要说明利用 SAR 图像模拟可以进行变化检测)。图 13(a)中真实图像上箭头 1 处没有建筑物,而在图 13(b)中模拟图像上该位置存在建筑物,这是由于在其右侧有一个高大的建筑物 B,图 13(a)中绿色箭头处,并且箭头 1 处建筑物刚好在建筑物 B 的阴影内,所以在真实图像中体现不出来;而图 12(b)中三维模型不包含建筑物 B,不会形成遮挡。图 13(a)中真实图像上箭头 2 处有非常亮的

条带,是由侧面分布着大量的空调和金属结构的建筑物导致,该建筑物位于图 12(a)和图 14(a)红色矩形框内,侧面照片见图 14(b)。在将小区三维模型输入模拟器时,故意删除该建筑物的模型,如图 12(b)中三维模型中箭头 2 所指,则在模拟图像不存在对应的亮条带,如图 13(b)箭头 2 处。因此将已有三维模型作为 SAR 图像模拟器的输入,比较模拟图像和真实图像,可以进行快速变化检测。

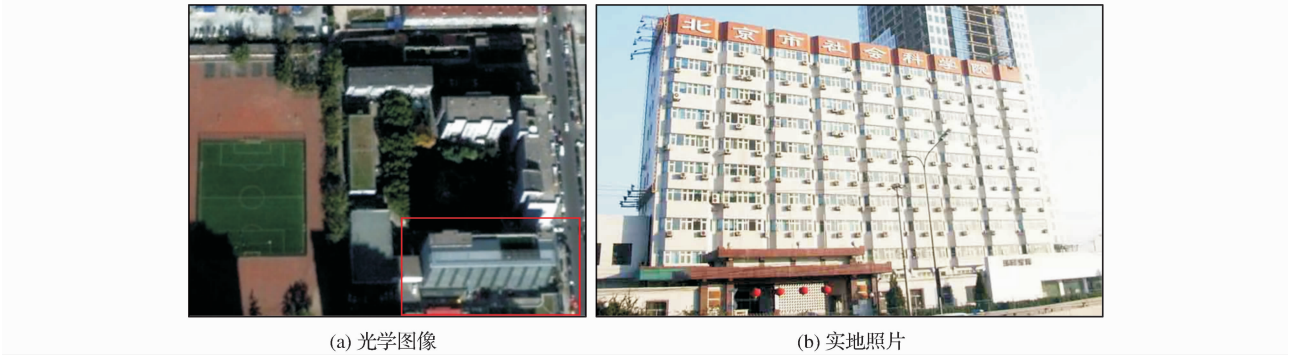


图 14 缺失建筑物的光学图像和照片 (SAR 入射方向为从右往左)

Fig. 14 The optical image and photograph of the absent building(SAR view direction from right to left)

4 结 语

本文介绍了一种基于射线追踪法的 SAR 图像

模拟方法,该方法能够有效模拟城市目标 SAR 图像;散射模型包含了镜面反射和朗伯体散射,并与表面材质类型相关。在经过几何模型构建、辐射模型

构建、射线追踪和图像生成 4 个步骤之后生成给定目标的单次散射和多次散射模拟 SAR 图像。模拟了简单建筑物模型、复杂建筑物和大范围场景的 SAR 图像,并与真实 SAR 图像进行比较。结果表明该模拟方法中使用的辐射模型能够表现出叠掩、阴影和多次散射特性,将模拟图像和真实图像进行比较,有利于复杂图像解译和变化检测。此外,输入三维模型的精确程度对于模拟结果影响非常大,而精细模型会增大模拟过程中的计算量,所以需要根据实际情况和应用需求选择模型的精确度。当需要精确解译目标散射特征时,选择精细的三维模型是必须的;而在实时性要求高时,可以选择稍微粗略的三维模型。该模拟方法暂未考虑电磁波的极化特性、穿透特性和边界衍射现象,这些将是下一步研究的重点。

参考文献 (References):

- [1] Roth A. Status of the TerraSAR-X Mission[C]// IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. :Denver, Colorado, USA, 2006:1918-1920.
- [2] Lombardo P. A Multichannel Spaceborne Radar for the COSMO-Skymed Satellite Constellation [C]//IEEE Proceedings Aerospace Conference; Big Sky, Montana, 2004:111-119.
- [3] Ochs S, Pitz W. The TerraSAR-X and TanDEM-X Satellites [C]//RAST '07. 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies. : Istanbul, Turkey, 2007: 294-298.
- [4] Soergel U, Michaelsena E, Thoennessena U, *et al.* Potential of High-resolution SAR Images for Urban Analysis[C]//3rd International Symposium on Urban; Citeseer, 2005.
- [5] Stilla U. High Resolution Radar Imaging of Urban Areas [C]//Photogrammetric Week, Heidelberg, Germany, 2007, 149-158.
- [6] Zhang Fengli, Shao Yun. Urban Target Monitoring Using High Resolution SAR Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(3):415-422. [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.].
- [7] Stilla U, Soergel U, Thoennessen U. Potential and Limits of InSAR Data for Building Reconstruction in Built-up Areas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 58(1-2):113-123.
- [8] Balz T, Fritsch D. High-performance SAR Simulation on Retail Video Gaming Consoles for Education and Training Purposes[J]. International Archives of the of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2008, 37 (B6a):213-219.
- [9] Auer S, Hinz S, Bamler R. Ray-Tracing Simulation Techniques for Understanding High Resolution SAR Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48 (3):1445-1456.
- [10] Auer S, Hinz S, Bamler R. Ray Tracing for Simulating Reflection Phenomena in SAR Images[C]// IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, USA, 2008.
- [11] Balz T. SAR Simulation based Change Detection with High-resolution SAR Images in Urban Environments[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2004, 35:472-477.
- [12] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L, *et al.* Building Height Retrieval from VHR SAR Imagery based on an Iterative Simulation and Matching Technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3):1487-1504.
- [13] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L. Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5):2403-2420.
- [14] Mametsa H, Rouas F, Berges A. Imaging Radar Simulation in Realistic Environment Using Shooting and Bouncing Rays Technique[C]//Proceedings SPIE SAR Image Analysis Modeling Techniques. IV; Toulouse, France, 2001, 34-40.
- [15] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D. SAR Raw Signal Simulation for Urban Structures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2003, 41(9):1986-1995.
- [16] Delliery J, Maitre H, Maruani A. SAR Measurement Simulation on Urban Structures Using a FDTD Technique[C]//Urban Remote Sensing Joint Event, 2007; Shanghai, China, 2007, 1-8.
- [17] Feng X, Jin Y Q. Imaging Simulation of Polarimetric SAR for a Comprehensive Terrain Scene Using the Mapping and Projection Algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(11):3219-3234.
- [18] Balz T, Stilla U. Hybrid GPU-based Single and Double Bounce SAR Simulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10):3519-3529.
- [19] Cheng H, Feifeng L, Wenfu Y, *et al.* Modification of Slant Range Model and Imaging Processing in GEO SAR[C]//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Hawaii, 2010, 4679-4682.
- [20] 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):1787-1801.
- [21] Ferro A, Brunner D, Bruzzone L, *et al.* On the Relationship between Double Bounce and the Orientation of Buildings in VHR SAR Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(99):612-616.
- [22] Thiele A, Cadario E, Schulz K, *et al.* Analysis of Gable-Roofed Building Signature in Multiaspect InSAR Data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1):83-87.

High Resolution SAR Image Simulation for Building

Wang Guojun^{1,2}, Zhang Fengli¹, Shao Yun¹

(1. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: After Very High Resolution(VHR) radar satellite missions like TerraSAR-X, Cosmo-Skymed and RadarSat-2 have been launched in 2007, spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) images reach spatial resolution below 1 m in azimuth and range in spotlight mode. In such kind of data, radar signals representing single building are disturbed over a high number of resolution cells, which makes SAR to monitor urban areas possible. However, due to the complexity of urban environment, interpretation and application of SAR data still turns out to be challenging and time consuming. SAR images simulation, which can reduce the difficulty, is becoming increasingly popular. A novel method of SAR images simulation based on extended ray tracing procedure was introduced. The simulator, which has an important role in analysis of images, can effectively simulate scattering effects of SAR images, such as layover, shadow and multiple bounce. Firstly, a virtual SAR system was formed. For the sensor, rays were transmitted and received. The paths of the rays and the interaction with objects were traced by the simulator. Signals from different reflection levels could be stored in separated image layers. For evaluating the effectiveness of the simulation approach, simulated images were compared with real TerraSAR-X images for several models like a building with plane-roof and gable-roof, National Gymnasium and an extended scene containing numbers of building models. The results show that the simulation can provide very valuable information to detect interpret complex SAR images changes.

Key words: Buildings; SAR; Image simulation; Ray tracing; Interpretation