

文章编号:2095-6134(2018)06-0788-07

建筑物的高分辨率 SAR 图像仿真方法^{*}

任苗苗^{1,2}, 潘 卓¹, 徐向辉^{1†}, 苏海涛³

(1 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国人民解放军 62026 部队, 西安 710032)

(2017 年 8 月 12 日收稿; 2018 年 1 月 24 日收修改稿)

Ren M M, Pan Z, Xu X H, et al. Very high resolution (VHR) SAR image simulation for buildings[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(6): 788-794.

摘 要 提出一种基于建筑物几何特征的高分辨率(VHR)SAR 图像仿真方法。该方法首先构建成像场景模型,以改进的光学着色模型近似散射模型;然后在场景间进行射线追踪,得到目标的散射强度信息和位置信息;为使仿真图像更加真实,引入后处理过程;最后经二维成像,得到逼真的建筑物 SAR 仿真图像。分析和仿真结果表明,该方法准确高效地仿真建筑物在 SAR 图像中的几何特征和辐射特征,可为理解和解译 SAR 建筑物图像提供有效的数据支撑。

关键词 SAR 图像;图像仿真;几何特征;射线追踪

中图分类号:TP753 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.06.010

Very high resolution (VHR) SAR image simulation for buildings

REN Miaomiao^{1,2}, PAN Zhuo¹, XU Xianghui¹, SU Haitao³

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3 62026 PLA Troops, Xi'an 710032, China)

Abstract In this study a very high resolution SAR (VHR SAR) simulation method is proposed based on the geometrical signatures of buildings. Firstly, the imaging scene model is constructed, and an improved Phong Shading model is used as approximate scattering model. Then, the scattering and coordinate information is obtained by tracing rays in the scene. To make the simulation images more realistic, a post process is completed. Finally, a real VHR SAR building image is obtained by two-dimensional imaging. Analysis and simulation results validate that the proposed method describes the geometrical and radiant signatures correctly and efficiently in SAR image. The simulated images provide effective database for understanding SAR images.

Keywords SAR images; image simulation; geometrical signature; ray tracing

建筑物的 SAR 图像仿真技术是根据建筑物的三维模型和雷达的成像参数,仿真电磁波在目标场景中的散射作用,生成逼真的 SAR 图像的过

程^[1]。仿真 SAR 图像与真实 SAR 图像在几何特征和辐射特征方面保持一定的一致性^[2]。通过改变目标模型和成像参数,即可简单高效地预测

^{*} 国家自然科学基金(61471340)和中国科学院电子学研究所“优秀青年人才计划”基金

[†] 通信作者, E-mail: xhxu@mail. ie. ac. cn

出多角度、不同分辨率的 SAR 图像,为建筑物的分类、识别及三维重建等研究提供大量的 SAR 图像。因此对 SAR 图像仿真技术的研究具有重要的现实意义。

根据后向散射模型和模拟技术的不同,仿真方法可分为两种^[3]。一种是模拟 SAR 原始回波信号的仿真方法。Franceschetti 等^[4-6]通过物理光学(PO)^[7]和几何光学(GO)^[8]理论近似电磁波在目标表面的散射过程,得到回波信号;Xu 和 Jin^[9]采用积分方程模型(IEM)计算电磁散射矩阵,获得回波信号;Delliere 等^[10]提出时域有限差分模型(FDTD)近似电磁波的后向散射过程以得到回波信号。这种仿真方法计算复杂,且仿真精度的提高强烈依赖目标建模精度,对建筑物中不可忽视的多次散射难以计算。另一种方法是基于几何特征的仿真方法,通过直接建立目标场景与二维 SAR 图像间的几何映射关系得到 SAR 仿真图像。Stefan^[11]设计的 RaySAR 仿真器用 Phong Shading 模型计算散射强度。Balz 和 Stilla^[12]提出的 SARVIZ 仿真器用光栅法计算几何映射关系。Bolter^[13]提出针对建筑物几何特征的仿真方法,并且对图像几何畸变和斑点噪声的特性进行深入研究。建筑物的外墙、窗户等部件易形成二、三面角结构,在 SAR 图像中形成明显的几何特征^[14-16]。基于特征的仿真方法不仅能够简洁高效地实现对 SAR 图像特征的仿真,还能建立目标空间结构与图像散射现象之间的对应关系,成为近年来的研究热点^[17-18]。

本文介绍一种基于图像几何特征的高分辨率 SAR 图像仿真方法。该方法首先由 3D 模型和雷达参数构建成像几何模型;其次,通过改进光学着色模型计算电磁波的散射特性;然后根据 SAR 成像原理改写 Pov-Ray(persistence of vision ray),在雷达与场景间展开射线追踪,建立三维场景与二维图像之间的映射关系,得到电磁波在场景中的散射点的位置、强度等信息;根据强度和位置进行二维成像,形成初步的 SAR 图像强度图;最后,对强度图进行系统卷积、添加噪声、插值等后处理过程,得到逼真的仿真 SAR 图像。

1 仿真模型

1.1 成像几何模型

成像几何模型在同一坐标系中描述 SAR 图像仿真中虚拟雷达的位置以及三维目标的几何位

置。SAR 系统采用主动侧视斜距成像模型,传感器在同一位置发射和接收电磁波。在同一场景范围内,雷达的航向和飞行高度不变。在远场的条件下,认为雷达在局部场景范围内以平行波入射,射线与水平面夹角均为 θ 。建立局部直角坐标系,如图 1 所示。

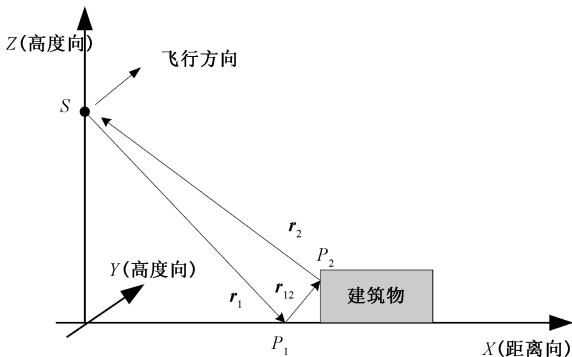


图 1 成像场景模型
Fig. 1 Model of imaging scene

以雷达飞行方向为 Y 轴(方位向),水平面内垂直于飞行方向的为 X 轴(距离向),高度向为 Z 轴。电磁波由虚拟雷达 S 发出,经路径 r_1 与目标场景产生第一个交点 P_1 ,若电磁波直接反射回接收传感器,此时产生一次散射回波;若电磁波在 P_1 发生镜面反射,经路径 r_{12} 到达建筑物表面 P_2 ,再由路径 r_2 到达接收器,则此时产生二次散射。

在传感器发射电磁波进行采样时,同一方位向的采样线数目 n 应满足 $n \geq X \sin \theta / \Delta R$,其中 X 表示距离向场景范围, ΔR 表示距离向分辨率,取等号时,每个分辨单元有一个采样点。图像仿真中,可以根据需求增加每个分辨单元的采样点数,即增加每个单元的散射点数目,提高图像精度。在射线追踪的过程中,假设每条采样线照射在一个散射点内,相邻的分辨单元没有叠加。后续将得到的散射强度图与点扩散函数进行卷积处理,以接近雷达电磁波带宽有限的事实。

1.2 散射模型

由散射模型可以得到仿真 SAR 图像的强度。本文采用改进的光学着色模型 Phong Shading 作为电磁散射模型。在 Phong Shading 模型中,各点的光学着色通过顶点插值计算,逼真度较高,光强由环境光、镜面反射和漫反射光构成。在 SAR 成像中,雷达接收到环境散射的电磁波忽略不计,即对目标表面的漫反射只计算一次,不追踪漫反射的多次反射。在 SAR 图像仿真中,电磁波在目标

表面的散射特性由镜面反射和朗伯体散射两部分近似,镜面反射和朗伯体散射强度的和值代表图像灰度大小。两种散射的计算公式为:

$$I_d = k_d I_{in} (N \cdot L), \quad (1)$$

$$I_s = p_i k_s (N \cdot H)^n. \quad (2)$$

式中: I_d 表示漫反射能量强度; k_d 表示漫反射系数,取值在 $(0,1)$ 之间; I_{in} 表示一个分辨单元内信号的入射强度; L 表示入射向量; N 是入射平面的法向量; I_s 表示目标表面发生的镜面反射强度; H 是入射向量与视点方向的半角向量,发生镜面反射时, H 与 N 重合; k_s 表示镜面反射系数,取值在 $(0,1)$ 之间; n 是反射光的空间分布因子, n 值越大,目标表面的散射空间分布越集中; p_i 是控制因子,随着镜面反射次数 i 的增加, p_i 减小,当 i 达到设定的最大镜面反射追踪次数(本文 i 最大值为 5) 时, p_i 为 0,认为反射回波能量太弱不能被接收到。当回波向量与镜面反射向量之间的夹角 $\Delta\alpha$ 小于 1° 时,认为发生的散射都是镜面散射。镜面散射中,反射向量 S 的计算公式为

$$S = R - 2N \cdot (N \cdot R). \quad (3)$$

式中: S 表示反射向量, R 表示由天线指向目标表面交点 P 方向的初始射线。

1.3 基于射线追踪的采样模型

射线追踪模拟雷达发射电磁波,跟踪电磁波与目标之间的相互作用过程。由射线追踪建立目标与二维 SAR 图像之间的映射关系。在仿真中,射线追踪部分借助 Pov-Ray 光学渲染软件实现。不同于光学成像原理,在 SAR 成像中,雷达发射与接收电磁波位于同一位置,且成像方式为斜距成像,因此要根据成像原理修改成像程序。具体流程如下:

1) 在同一坐标系下导入目标的三维模型及表面特征、雷达的位置及近距入射角。

2) 根据成像场景及仿真参数确定射线的数量。场景距离向幅宽为 X ,方位向为 Y ,分辨率为 $\Delta x, \Delta y$,则射线数目为 $n_x = N \cdot X / \Delta x$, $N = 1, 2, 3, \dots, N$ 的取值表示采样时每个分辨单元内散射点数目, N 取整数使得仿真图像更加平滑逼真。方位向同理。

3) 在雷达与场景间进行射线追踪。以雷达的位置 S 为原点,雷达电磁波的入射方向为射线方向生成射线族,对每条射线的追踪结果用一个数组 $P_n = [x_n z_n r_n I_n b_n f_n X_n Y_n Z_n]$ 记录 x_n, z_n 和 r_n 表示采样点的回波相位中心方位向、高度向及斜

距距离坐标, I_n 是雷达接收到的信号强度,由散射模型计算, b_n 记录反射次数, f_n 标记是否发生镜面散射, X_n, Y_n, Z_n 为射线与场景目标第一次相交的交点坐标。以射线在目标表面发生二次散射为例,如图 1 所示,射线在场景中的交点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$,根据斜距成像的原理,射线的回波相位中心距离向坐标 r_n 为射线路径 r_1, r_{12} 及 r_2 路径之和的一半,更多次散射计算同理。方位向 x_n 及高度向 z_n 的计算也采取各交点坐标平均的方式,即

$$\begin{cases} y_n = \frac{y_1 + y_2}{2}, \\ z_n = \frac{z_1 + z_2}{2}, \\ r_n = \frac{|r_1| + |r_{12}| + |r_2|}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

每发生一次镜面反射, f_n 置 1, b_n 值加 1。当射线不再与场景有交点或反射次数达到最大设定值、回波能量达到最小阈值,对本射线的追踪停止。

1.4 后处理模型

在采样的过程中,认为电磁波的能量照射到一个分辨单元内,信号被聚焦为一个像素点,相邻的分辨单元内没有相互影响,在这种假设下得到的是带宽无限的理想反射强度图。此时,需要引入点扩散函数与强度图进行卷积,点扩散函数选用 Hamming 窗函数:

$$W(n, \alpha) = \alpha + (1 - \alpha) \cos\left(\frac{2\pi n}{N - 1}\right), \quad 0 \leq n \leq N - 1. \quad (5)$$

式中: N 表示信号长度; α 的值决定窗的陡峭程度,工程实践中一般取 $\alpha = 0.54$ 。将散射强度图进行傅里叶变换,在频域对二维的散射强度图和 Hamming 窗函数进行卷积,最后再将所得结果进行傅里叶逆变换,得到空域的散射强度图。

另外,采样过程选取的是像素点的散射模型,在将采样点的坐标按斜距成像映射到成像平面时,会出现多个采样点映射到单个分辨单元,也会出现有些分辨单元没有映射的情况。这便导致一次散射图像中易出现明暗相间的条纹特征。增加采样率可以减缓条纹,但采样率增加使得运算量大幅增加。故本文采用在一次反射矩阵中插值的方法来解决。插值选用三次样条插值,保证数据有良好的稳定性和收敛性,减少仿真误差的引入。

仿真过程采用的是非相干方式的 SAR 仿真方法,得到的散射强度图没有噪声,然而斑点噪声是 SAR 图像的一个显著特征,需要对图像添加噪声以接近仿真图像。相干斑在统计意义上可以用乘性噪声模型进行描述,本文采用瑞利相干斑模型为图像添加乘性噪声。瑞利噪声的二维分布密度函数为

$$p_R(x,y)=\begin{cases}\frac{x}{\mu_1^2}e^{\frac{-x}{\mu_1^2}}\cdot\frac{y}{\mu_2^2}e^{\frac{-y}{\mu_2^2}}, & x\geq 0, \\ 0, & x<0.\end{cases}\quad (6)$$

式中: μ_1 μ_2 分别为图像在距离向和方位向的强度均值。

对于强度图中的每一个分辨单元,首先产生一个服从瑞利分布的均值为 1 的随机数,得到噪声的强度值。然后将分辨单元的强度值与噪声的值相乘,即可得到本分辨单元带有斑点噪声的散射强度值,最终得到含有斑点噪声的仿真 SAR 图像,计算公式为

$$\Delta\hat{\gamma}(x,y)=\gamma(x,y)*n(x,y).\quad (7)$$

式中: $\gamma(x,y)$ 表示散射强度图中 (x,y) 处的散射强度值; $n(x,y)$ 是对应的噪声强度; $\hat{\gamma}(x,y)$ 是添加噪声后的像素点强度。

2 仿真方法

基于图像几何特征的高分辨率 SAR 图像仿真流程如图 2 所示。

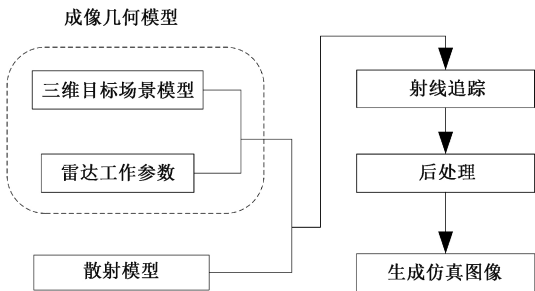


图 2 高分辨率 SAR 图像仿真流程图
Fig. 2 Flowchart of VHR SAR image simulation

1) 首先,建立仿真目标的三维模型,借助图形学的建模软件如 Auto CAD、3DS Max 等制作完成。然后根据雷达工作参数建立局部 O-XYZ 直角坐标系,明确雷达的飞行高度、飞行方向、姿态角、分辨率、目标的三维坐标,以及方位向距离向与 X 轴、Y 轴的对应关系。至此,成像几何模型建立。

2) 其次,在雷达与目标场景间展开射线追

踪,仿真电磁波的反射过程。射线追踪结束,输出一个多行的矩阵,矩阵的每一行代表一个采样点的信息,包含采样点的位置、强度、散射类型、散射次数等。根据散射次数的不同,将采样点信息矩阵分层存储为一次散射矩阵、二次散射矩阵等。

3) 然后,根据雷达成像原理,生成散射强度图。散射强度图的高度 N_H 和宽度 N_W 的计算公式为

$$\begin{cases}N_H=\frac{X}{\Delta x}+1, \\ N_W=\frac{Y}{\Delta y}+1,\end{cases}\quad (8)$$

$$\begin{cases}N_{Wn}=\frac{N_W}{r_{\max}-r_{\min}}\cdot(r_n-r_{\min}), \\ N_{Hn}=y_n.\end{cases}\quad (9)$$

根据斜距 r_n 和方位 y_n 求得散射点在散射强度图中的位置,由于雷达工作在正侧视条件下,故方位向坐标 $N_{Hn}=y_n$ 。将散射强度 I_n 映射到空白图像中对应的分辨单元,当有多个回波能量映射到同一个分辨单元时,对这些能量进行非相干叠加。最后对整幅图像进行灰度归一化处理,得到各层的散射强度图。也可以根据发生镜面反射与否作为标志,生成镜面散射图与非镜面散射图。

4) 最后,对散射强度图进行后处理。根据后处理模型,对一次散射矩阵进行三次样条插值,再将各散射层级的图像叠加,得到全层级的散射图像;接着在频域对点扩散函数与散射图进行卷积,傅里叶逆变换得到时域图像,在图像中添加乘性噪声。最终,得到高分辨率的 SAR 仿真图像。

3 仿真结果及分析

为验证本文所提方法的有效性,选取 4 组具有代表性的目标进行实验。前 3 组实验中,雷达的工作参数如表 1 所示。

表 1 高分辨率 SAR 仿真参数	
Table 1 VHR SAR simulation parameters	
参数	取值
波段	Ku
中心频率/GHz	15.6
带宽/MHz	600
俯仰角/(°)	45
像素间距/m	0.2

第 1 组实验以三面角反射器为目标,仿真模型及结果如图 3 所示。角反射器对入射电磁波有

汇聚作用,在建筑物目标中,窗台、窗框及与地面垂直的墙壁等结构极易构成三面角反射器。本文选取边长 20 cm 的角反射器作为测试目标。图 3 (b)、3(c)分别是单个角反射器的仿真 SAR 图像与实测 SAR 图像。从仿真图像同实际 SAR 图像的对比可得,三面角反射器在 SAR 图像中以点目标的形式呈现,表现为一个边缘扩散的高亮度分辨单元,从像素级别验证了本文所提方法的有效性。

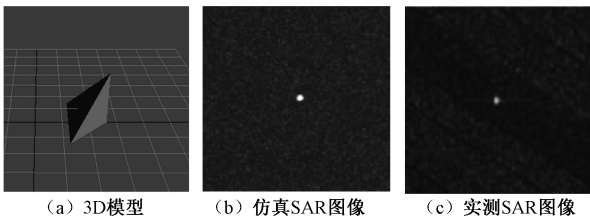


图 3 角反射器的仿真实验
Fig.3 Experiments for corner reflector

第 2 组实验选取简易的平顶房屋作为三维模型,并将仿真 SAR 图像与理论分析图像对比。图 4(a)表示一个长宽高为 30 m × 20 m × 10 m 的平顶屋,雷达飞行方向与屋顶的长边方向一致,仿真结果如图 4(b)所示,一次散射由屋顶和墙壁区域形成,由于斜距成像的原因,墙壁和屋顶产生叠掩。墙壁与地面垂直形成二面角,仿真图像上电磁波的相位中心位于墙角位置,回波叠加后出现二次散射亮线。电磁波照射不到的地方形成阴影区。对比图 4(c)可得,叠掩、阴影、顶底倒置及二次散射的亮线等几何特征均与理论分析结果一致,证明了本方法能较好的模拟简单建筑的几何特征。

第 3 组实验选取带窗户的房屋和有栏杆的筒仓模型进行实验。图 5(a)表示 10 m × 10 m × 5 m 的带窗房屋,包含窗户、窗框等元素,方位角为 45°。图 5(b)表示筒仓的三维模型,外墙曲面以三角平面近似。图 6 表示带窗户房屋的全散射和各次散射图。一次散射形成图像轮廓,二次散射发生在墙角和窗框部分,三次及以上的散射只发生在窗户部分。在多次散射中,斜距等于电磁波传播总路程的一半,故窗框四次、五次散射的位置其比一次散射的位置靠右。墙面每侧的 3 个亮区由 3 个窗户散射形成。

对筒仓模型的仿真结果如图 7 所示,图 7(a)其中图 7(b)为散射层级分布图。无论是平面建筑还是曲面建筑,仿真结果都体现了叠掩、阴影、

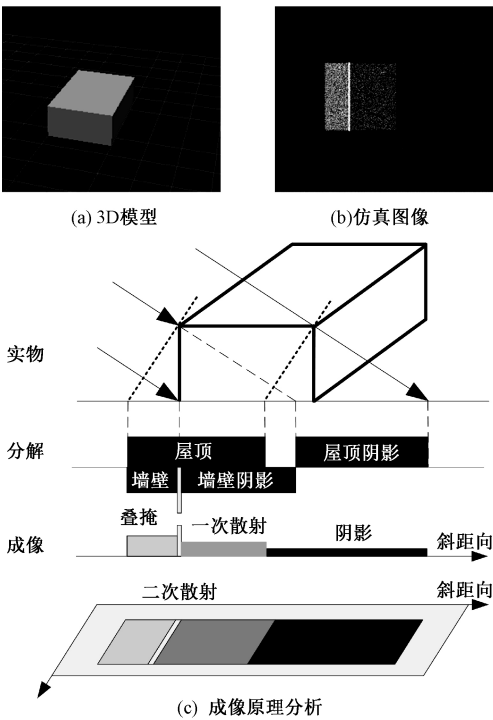


图 4 平顶房屋的仿真及分析图
Fig.4 Simulation and analysis images of flat-roof building

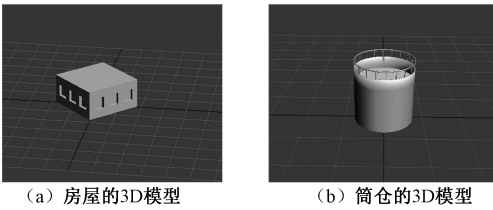


图 5 仿真目标的三维模型
Fig.5 3D model of simulation targets

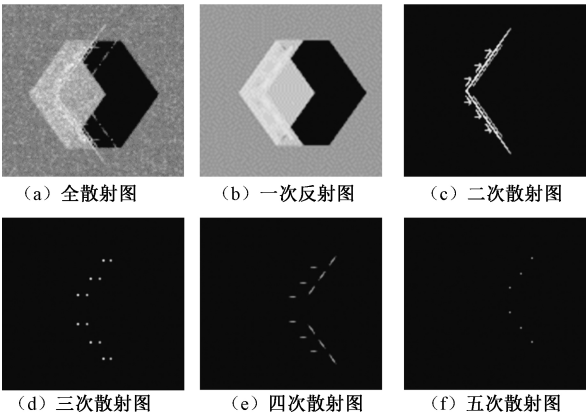


图 6 带窗房屋的仿真图像
Fig.6 Simulation images of the building with windows

多次散射等几何特征。对于窗户、栏杆等建筑细节的仿真,说明本方法在高分辨率仿真中具有可行性。

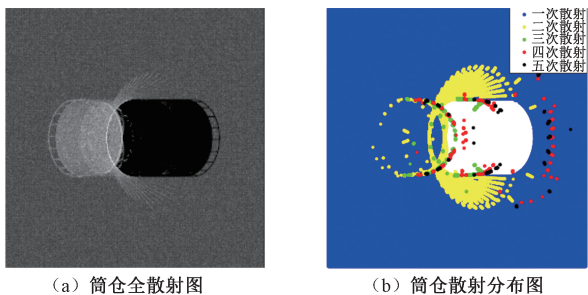


图 7 筒仓的仿真图像和散射分布图

Fig. 7 Simulation and distribution images of silo

第 4 组实验选取多伦多地区某组合建筑物为目标,其光学航拍图像及三维模型如图 8 所示。在实验中,雷达的中心频率为 9.65 GHz,带宽为 0.15 GHz,俯仰角为 46°,采样间隔为 1.1 m,组合建筑的三维模型由 Google Earth 数据获取,雷达入射角与建筑物侧边的夹角为 30°。

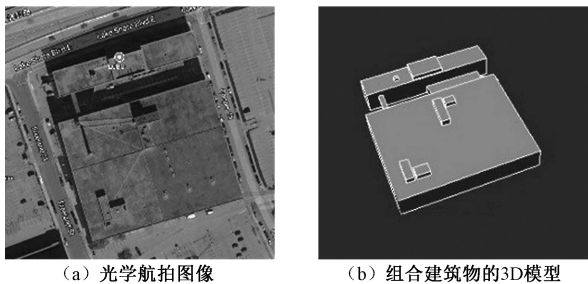


图 8 组合建筑物的航拍图及三维模型

Fig. 8 Aerial photo and 3D model of combination building

采用本文算法进行仿真,得到仿真图像如图 9(a)所示,由文献[1]算法得到仿真结果如图 9(b)所示,将仿真结果分别与实测图像图 9(c)进行对比。

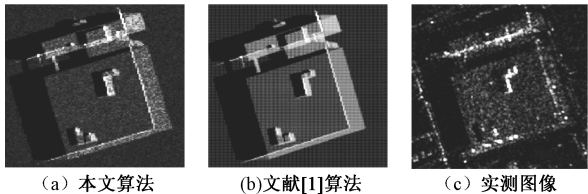


图 9 组合建筑物的实测 SAR 图像及仿真 SAR 图像

Fig. 9 Real and simulation SAR images of combination building

仿真图像中建筑物的几何特征均能与实测 SAR 图像保持一致。由于文献[1]中对分辨单元内散射点的处理不充分,没有充分考虑散射模型、噪声及带宽等因素,仿真图像中出现了明暗相间的条纹特征,对比实测 SAR 图像可得,本文的仿真结果更加逼真。但真实 SAR 图像中有部分亮点在本文算法的仿真 SAR 图像中没有对应,是因

为对建筑物的建模精度不够,阁楼、窗户、金属空调架以及屋顶的通风口等建筑构件在建模中被忽略了。因此,提高建模精度是得到逼真 SAR 图像的关键因素。

综合以上实验结果可得,针对规则的建筑物目标,本文的仿真方法可以得到几何特征一致的逼真 SAR 图像。

4 结论

本文提出一种基于建筑物几何特征的高分辨率 SAR 图像仿真方法,该方法首先根据三维场景模型和雷达的工作参数构建成像几何模型,然后基于改进的 Phong Shading 散射模型,在场景间展开射线追踪,得到采样点的散射信息矩阵,接着将得到的采样点数据进行后处理,最终得到高分辨率的仿真 SAR 图像。分析和仿真结果表明,该方法能够准确、高效的仿真建筑物在 SAR 图像中的几何特征,后处理过程严格考虑了 SAR 实际成像过程中的带宽、噪声等影响因素,另外,分层的数据处理方法为后续研究散射特征提供了基础。下一步将研究仿真图像在图像建筑物提取及目标重建中的作用。

参考文献

- [1] 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):1 445-1 456.
- [2] Balz T, Hammer H, Auer S. Potential and limitations of SAR image simulators: a comparative study of three simulation approaches [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 101: 102-109.
- [3] 董纯柱,胡利平,朱国庆,等. 地面车辆目标高质量 SAR 图像快速仿真方法[J]. 雷达学报,2015,4(3):351-360.
- [4] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, et al. SAR raw signal simulation for urban structures [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2003, 41(9): 1 986-1 995.
- [5] 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): 1 787-1 801.
- [6] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, et al. Simulation tools for interpretation of high resolution SAR images of urban areas [C] // IEEE Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France, 2007, 18: 1-5.
- [7] Chen H Z, Zhang Y T, Wang H Q, et al. SAR imaging simulation for urban structure based on analytical models [J].

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(6): 1 127-1 131.

[8] Kulpa K S, Samczynski P, Malanowski M, et al. An advanced SAR simulator of three-dimensional structures combining geometrical optics and full-wave electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1):776-784.

[9] Xu F, 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):3 219-3 234.

[10] Delliere J, Maitre H, Maruani A. SAR measurement simulation on urban structures using a FDTD technique[C]// IEEE Urban Remote Sensing Joint Event, Shanghai, China, 2007:1-8.

[11] Stefan A. 3D synthetic aperture radar simulation for interpreting complex urban reflection scenarios [D]. Munich: Technical University of Munich, 2011.

[12] Balz T, Stilla U. Hybrid GPU-Based Single- and Double-Bounce SAR Simulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (10): 3 519-3 529.

[13] Bolter R. Reconstruction of man-made objects from high resolution SAR images [C] // IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, USA, 2000, 3: 287-292.

[14] Hammer H, Karsten S. Coherent simulation of SAR images [J]. Proc. SPIE 7477, Image Signal Processing for Remote Sensing. 2009, 7477:74771G-9.

[15] Auer S, Gernhardt S, Bamler R. Ghost persistent scatters related to multiple signal reflections [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8 (5): 919-923.

[16] 王国军. 建筑物目标高分辨率 SAR 图像理解研究[D]. 北京:中国科学院大学,2014.

[17] Raffaella G, Antonio I, Daniele R. Model-Based Interpretation of High-Resolution SAR Images of Buildings [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(2): 107-119.

[18] 熊文昌. 人造目标 SAR 图像仿真及其在解译中的应用 [D]. 北京:中国科学院大学,2014.