

## 单幅高分辨率 SAR 图像建筑物三维模型重构

傅兴玉<sup>1,2,3</sup>, 尤红建<sup>1,2</sup>, 付琨<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**提出了一种利用高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重构的方法. 首先, 分析了高分辨率 SAR 图像建筑物产生的电磁散射的类型, 给出了不同类型散射区域的后向散射计算方法, 并在此基础上给出了一种利用建筑物三维 CAD 模型进行 SAR 建筑物特征区域图像仿真的方法; 其次, 给出了利用建筑物的二次散射结构确定建筑物底部轮廓位置和方向的方法, 并提出了一种基于分布密度函数差异的仿真图像迭代匹配方法, 进行建筑物高度的反演. 仿真 SAR 图像后向散射系数用来划分建筑物不同的散射区域, 通过计算特征区域之间的分布密度函数差异, 以取得最大匹配度值的仿真图像对应的检验高度作为建筑物的反演高度; 最后, 选用了两幅不同屋顶类型的实际机载高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重构实验, 试验结果较为理想, 验证了所提方法的可行性和有效性.

**关键词:**高分辨率 SAR 图像; 建筑物电磁散射; SAR 图像仿真; 三维重构  
**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A

### 3-D reconstruction of building from single high-resolution SAR image

FU Xing-Yu<sup>1,2,3</sup>, YOU Hong-Jian<sup>1,2</sup>, FU Kun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Reconstructions of the 3-D model of buildings from single high-resolution SAR (Synthetic Aperture Radar) image were studied. After a detailed analysis on the electromagnetic backscattering model of buildings, the methods on how to calculate the backscattering coefficient of different reflectivity areas and on how to create a simulated SAR image from the CAD model of a building was proposed. The outlines and orientations of buildings were extracted using the double-bounce structures. The building height was estimated based on the iterative simulation and matching. The simulated SAR images are divided into different kinds of scattering areas. The Kullback-Leibler divergence between these areas was treated as a measurement of the matching degree. The tested height, at which the simulation SAR image obtains the best matching degree, is taken as the final estimated height. The above methods were evaluated on two real high-resolution SAR images. The reconstruction results are satisfying and prove the feasibility of 3-D reconstruction of building from single high resolution SAR image and the validity of the proposed approach.

**Key words:** high-resolution SAR images; electromagnetic backscattering of building; SAR image simulation; 3-D reconstruction

**PACS:** 84.40.Xb

### 引言

利用遥感手段进行建筑物区域的提取和三维重

建一直以来都是遥感技术应用领域研究的热点内容之一. 近年来, 随着机载 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 技术的不断成熟, 获取的 SAR

图像分辨率得到了很大提高,目前国外机载 SAR 图像分辨率已经达到 0.1m (如美国 miniSAR, 法国 RAMSES),我国机载 SAR 的分辨率也已经达到了很高的水平.在高分辨率条件下,建筑物在高分辨率 SAR 图像上的空间信息更加丰富,几何结构特征更加明显,为建筑物提取和三维重构提供了一个重要的数据源.

以前中低分辨率 SAR 图像不足以辨识单栋建筑物个体,仅利用单幅 SAR 图像难以确定建筑物准确的完整位置,因此利用 SAR 图像提取建筑物区域的方法大多是通过与其他数据的融合来实现的. Tupin 等<sup>[1]</sup>, Sportouche 等<sup>[2]</sup>通过融合 SAR 图像和光学图像进行建筑物区域提取实验.近年来,随着 SAR 图像分辨率进一步提高,单栋建筑物在图像上表现出的“叠掩”,二次散射和阴影等更加明显.这些现象一方面给高分辨率 SAR 图像人工判读解译带来了较大的困难,另一方面也反映了建筑物的三维结构信息,为建筑物提取和三维重构提供了重要的线索,使得基于单幅高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重构成为可能<sup>[3-4]</sup>.

高分辨率 SAR 图像建筑物各个可见表面的局部入射角和观测路径不同,表现出的后向散射特性存在较大的差异,同时建筑物表面附属的强散射局部几何结构(如窗台二面角,空调或者太阳能设施)给利用高分辨率 SAR 图像提取建筑物带来了较大的困难.本文提出了一种基于仿真 SAR 图像迭代匹配的建筑物三维模型重构方法,探索利用单幅高分辨率 SAR 图像进行建筑物三维模型重构的可行性.

## 1 建筑物电磁散射模型

按照雷达回波信号传播路径的不同,建筑物产生的后向散射主要分为单次散射、二次散射和多次散射<sup>[5]</sup>.其中,单次散射主要是由入射表面直接返回到雷达接收天线的电磁波,包括分别来自地面、墙面和屋顶的散射,如图 1(a)所示;二次散射主要是来自于地面-墙体或者墙体-地面之间的二次弹射,主要包括 SAR 发射的电磁波,先到达地面,然后从地面反射到墙面,再由墙面反射到雷达接收机,或者先到达墙面,然后由墙面反射到地面,再由地面反射到雷达接收机的电磁散射部分,如图 1(b)所示;三次以及三次以上的多次散射主要指的是电磁波在墙面和地面之间发射多次反射,典型的三次散射作用为“地面-墙体-地面”或“墙体-地面-墙体”的散射,如图 1(c)所示.

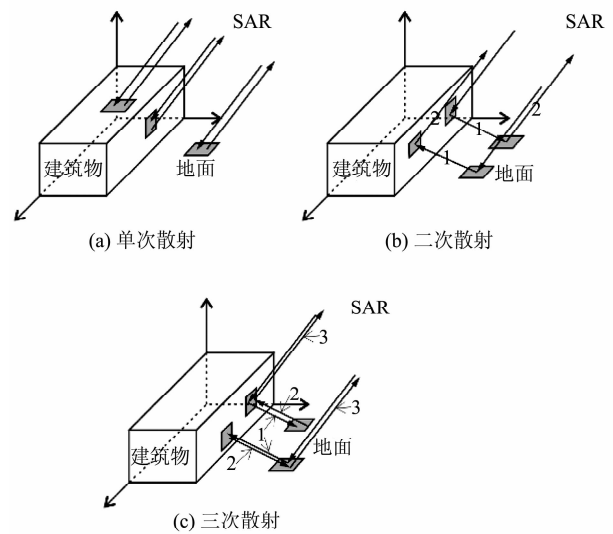


图 1 建筑物不同类型的后向散射,传播方向上数字表示电磁波散射次数

Fig. 1 Different types of backscattering caused by a building. The numbers represent reflection of electromagnetic wave

### 1.1 单次散射

对于地面,屋顶和墙面处产生的单次散射,一方面根据表面的介电常数和粗糙度表现出不同的后向散射特性,另一方面在这些不同的位置存在距离向相等的散射面元(如图 2 所示),这些面元产生的后向散射就会被叠加在相同的距离向分辨单元内,称为“叠掩”现象.

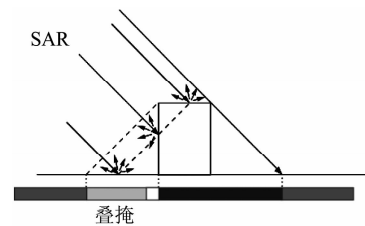


图 2 建筑物叠掩结构成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of building layover in SAR images

对于人工建筑物来说,表面为轻微的粗糙表面,其尺寸与雷达波长相比足够大,同时建筑物距离 SAR 较远,采用微扰模型计算其单次散射的后向散射系数.后向散射由相干部分和非相干部分组成,总的后向散射系数为

$$\sigma_{pp}^0(\theta) = \sigma_c^0(\theta) + \sigma_{ppn}^0(\theta) \quad (1)$$

其中, $\theta$ 表示雷达波的局部入射角, $\sigma_c^0$ 为相干散射部分,它仅存在于散射表面法线附近,解析表达式为<sup>[6]</sup>

$$\sigma_c^0(\theta) = \frac{4\Gamma_0}{\beta^2} \exp(-4k^2 s^2) \exp(-4\theta^2/\beta^2) \quad , \quad (2)$$

式中,  $\Gamma_0 = |(\sqrt{\varepsilon} - 1)/(\sqrt{\varepsilon} + 1)|$  为电磁波法线方向的表面反射率,  $\varepsilon$  为建筑物表面的介电常数,  $k$  表示电磁波波数,  $\beta$  为雷达波束的宽度. 非相干部分与建筑物表面高度分布有关, 当表面分布自相关函数服从高斯分布时, 非相干系数为

$$\sigma_{ppn}^0(\theta) = 4k^4 s^2 l^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pp}| \exp[-k^2 l^2 \sin^2 \theta] \quad , \quad (3)$$

式中,  $\alpha_{pp}$  表示极化方向的菲涅尔反射系数.

$$\alpha_{hh} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \quad , \quad (4)$$

$$\alpha_{vv} = (\varepsilon - 1) \frac{\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta)}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad . \quad (5)$$

## 1.2 二次散射

在高分辨率 SAR 图像中, 建筑物尤其是墙面平滑的高层建筑墙角处往往会有明显高亮的线型二次散射结构, 这是由于二次散射在该位置上聚焦所形成的. 建筑物二次散射后向散射强度与建筑物高度、方位角、以及表面粗糙程度和介电常数等有关.

$$\sigma^0 = hf(\mathbf{p}) \quad , \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{p}$  表示由建筑物位置、表面粗糙度和表面介电参数等组成的观测矢量. 这些参数主要包括建筑物的长度  $l$ 、宽度  $w$ 、高度  $h$ 、方位角  $\phi$ 、局部观测角  $\theta$ 、地面和建筑物表面的介电常数  $\varepsilon$ 、高度分布方差  $\sigma$  和相干长度  $L$  等. 高分辨率 SAR 图像建筑物二次散射模型示意图见图 3. R. Guida 等<sup>[7]</sup> 分别给出了在 GO-PO 和 GO-GO 近似条件下  $f(\mathbf{p})$  的解析表达式.

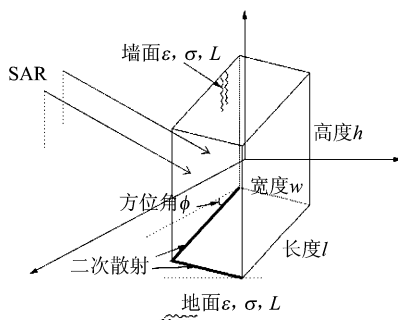


图3 高分辨率 SAR 图像建筑物二次散射模型示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the double-bounce structures in high resolution SAR images

## 1.3 阴影区域

SAR 是侧视工作的主动微波传感器, 在建筑物背向雷达接收机一侧的部分地面, 雷达波束被建筑物屋

顶或者墙面的遮挡, 对应距离向单元没有回波信号, 在 SAR 图像上形成亮度较低的阴影区域. 阴影现象是利用高分辨率 SAR 图像提取建筑物位置和高度的一个重要线索, 阴影区域距离向的起点对应了远侧屋顶边界的位置, 其长度与建筑物高度成正比.

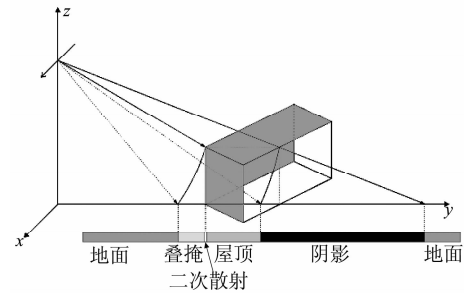


图4 建筑物三维成像几何结构示意图  
Fig.4 Geometric configuration of building

## 2 SAR 建筑物特征区域图像仿真

图 4 给出了建筑物三维成像几何结构示意图. 设 SAR 的空间位置坐标  $(X_s, Y_s, Z_s)$ , 速度矢量为  $(V_x, V_y, V_z)$ , 对于空间内的任一可见点  $P$ , 设其三维空间坐标为  $X_p, Y_p, Z_p$ , 其对应的斜距图像点  $Q$  的坐标  $(x, y)$  为, 则它们之间满足如下斜距和多普勒方程<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} r_0 + xM_x = \sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2} \\ \frac{V_x(X_s - X_p) + V_y(Y_s - Y_p) + V_z(Z_s - Z_p)}{r_0 + xM_x} = -\frac{f_d \lambda}{2} \end{cases} \quad , \quad (7)$$

式中,  $r_0$  表示近地点斜距,  $\lambda$  为雷达波长,  $M_x$  表示斜距方向的分辨率, 上述一般都为已知参数.  $f_d$  表示多普勒中心频率. 式(7)建立了斜距图像坐标和空间坐标之间的对应关系, 形式简单易于求解, 同时又符合雷达的距离多普勒原理.

本文的 SAR 建筑物特征区域图像仿真流程如图 5 所示. 对于每个面元的可见部分, 一方面按照式(7)计算可见部分顶点在 SAR 斜距图像坐标, 并结合雷达波照射到面元上形成的局部入射角计算后向散射强度, 然后在相应的方位向和距离向进行后向散射累加; 另一方面, 计算面元在地面形成阴影区域, 以所有可见部分形成的阴影区域与非建筑物面元散射区域的交集作为阴影区域. 通常, 还需要根据 SAR 图像乘性噪声的模型, 将得到的后向散射系数图像进行噪声调制, 得到含有斑点噪声的仿真图像. 本文 SAR 图像仿真的目的是为了划分建筑物不同类型的散射区域, 为后续基于仿真图像迭代匹配的建筑物高度提取提供数据准备, 因此, 仿真流程中去

掉了相干噪声调制的处理过程.

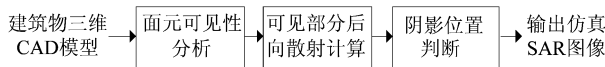


图5 建筑物 SAR 图像仿真流程图  
Fig.5 Flowchart of SAR simulation of building

在不同方位角下,雷达可以观测到的建筑物墙面和屋顶面不同,同时建筑物的方位角通过影响到雷达局部入射角而改变墙体的后向散射强度.图6给出了4种不同方位角下的立方体建筑物模型的三维成像几何结构示意图和采用本文方法得到的 SAR 建筑物特征区域仿真图像.仿真图像中高亮线型结构对应了建筑物二面角形成的二次散射,黑色像素对应了建筑物形成的阴影区域,暗灰色背景像素为地面散射区域,中间不同的灰度级代表了建筑物不同表面形成的后向散射和“叠掩”区域.通过仿真结果不难看出,本文仿真方法得到的 SAR 图像较好的展现了建筑物在 SAR 图像上的几何特征和空间分布,如建筑物大致形状,阴影区域,“叠掩”以及二次散射位置.同时不难看出,在不同方位角下,建筑物 SAR 图像表现出的特征差别较大.

### 3 建筑物三维模型重构

#### 3.1 建筑物位置和方位确定

高分辨率 SAR 图像中的建筑物二次散射呈现出明显的高亮线型或 L 型结构,其位置对应了建筑物墙角位置,如图7(a)所示.对于常见的具有矩形

轮廓的建筑物,在建筑物走向与方位向不平行时,通过其在高分辨率 SAR 图像上呈现出来的 L 型结构可以确定建筑物完整的位置.一般情况下,雷达从不同方位对建筑物进行观测,通过融合建筑物多方位的二次散射结构可以确定建筑物的完整位置,如图7(b)所示.

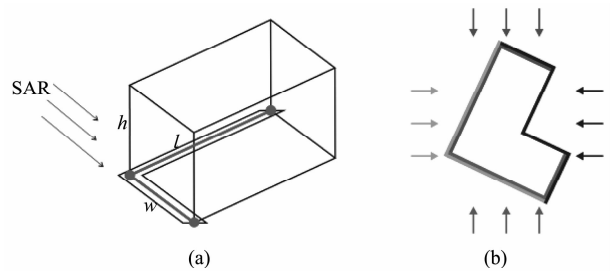


图7 (a)建筑物 L 型结构位置示意图;(b)建筑物多方位二次散射融合  
Fig.7 (a) The location of building double-bounce, and (b) building reconstruction via fusion of double-bounce under different aspect

实际高分辨率 SAR 图像中建筑物 L 型结构一般具有如下的典型特征:1)具有较高的散射强度,在图像上呈现非常明显的高亮结构;2)由两个互相垂直的直线型结构组成,且方向与建筑物墙面走向平行;3)二次散射多伴随着多次散射,实际 SAR 图像中建筑物 L 型结构沿着距离向的宽度大于单个像素,宽度值与雷达波长,建筑物高度,墙面和地面的散射特性等有关.

图8(a)给出了建筑物 L 型几何结构参数模型示意图.针对高分辨率 SAR 图像中建筑物 L 型二

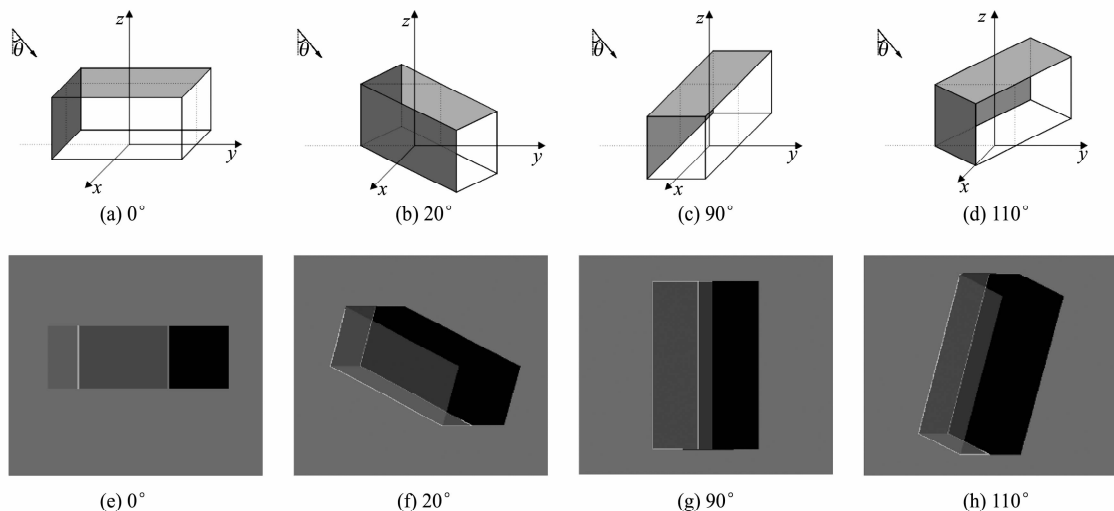


图6 立方体建筑物在4种不同方位角下 SAR 三维成像结构示意图及建筑物特征区域仿真图像  
Fig.6 The geometrical configuration and the simulation SAR image of a cube building under different orientations

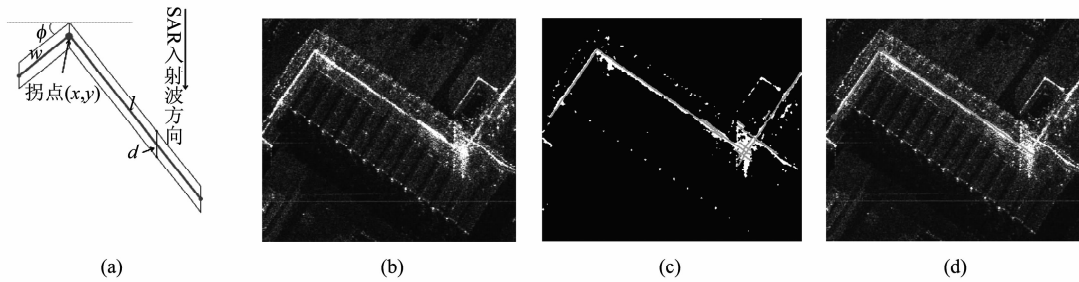


图 8 (a) L 型结构参数模型图, (b) 高分辨率 SAR 图像, (c) 方向线提取结果, (d) L 型结构提取结果  
Fig. 8 (a) The parametric model of L-shaped structures, (b) SAR image of a building, (c) Extraction results of orientation lines Hough Transform, and (d) Extraction results of L-shaped structures

次散射结构的特点, 本文采用一种基于改进 Hough 变换的 L 型结构提取算法<sup>[9]</sup>, 图 8(b)、(c) 和 (d) 给出了高分辨率 SAR 图像提取建筑物 L 型的实验结果.

### 3.2 建筑物高度提取

利用高分辨率 SAR 图像提取建筑物高度, 常采用量测“叠掩”或者阴影的长度的方法计算建筑物高度. 然而, 此类方法提取精度依赖于阴影和“叠掩”位置的准确判断和提取, 如果“叠掩”或阴影的定位误差较大, 会直接导致高度提取精度变差. 针对上述问题, 本文综合考虑建筑物几何特征区域(包括单次散射, “叠掩”, 二次散射和阴影)之间的散射强度差异和空间位置分布, 采用一种基于建筑物三维 CAD 模型仿真图像和实际 SAR 图像匹配的建筑物高度提取方法.

图 9 给出了建筑物高度提取方法的流程图. 首先, 利用高分辨率 SAR 图像建筑物的二次散射和“叠掩”等信息确定建筑物位置、方位和屋顶类型等, 建立建筑物三维 CAD 模型; 其次, 给定建筑物检验高度, 采用与实际 SAR 图像相同的成像参数对 CAD 模型进行仿真, 得到检验高度条件下的仿真 SAR 图像; 最后, 对建筑物高度值进行迭代检验, 以取得目标匹配函数最优的仿真图像对应的高度值作为建筑物高度的估计值.



图 9 基于仿真图像匹配的建筑物高度提取流程图  
Fig. 9 Flowchart of building height estimation based on iterative simulation and matching

记建筑物实际高度和假设高度分别为  $h_{\text{true}}$  和  $h, X$  表示实际 SAR 图像,  $\tilde{X}(h)$  表示高度  $h$  的假设下对应的

仿真 SAR 图像. 建筑物高度最优估计的表示式为

$$\tilde{h} = \arg \max_h M[\tilde{X}(h), X], \quad (8)$$

其中,  $M[\cdot, \cdot]$  表示图像之间的匹配度函数. D. Brunner 等将  $\tilde{X}$  和  $X$  看成两个随机变量, 提出了一种基于信息熵的图像匹配度函数<sup>[10]</sup>, 表示为

$$M(\tilde{X}, X) = H(\tilde{X}) + H(X) - H(\tilde{X}, X), \quad (9)$$

其中,  $H$  表示随机变量的信息熵,  $H(\tilde{X}, X)$  表示两者的联合分布的信息熵.

上述方法依赖于实际 SAR 图像和仿真图像分布密度函数计算. 然而, 仿真 SAR 图像很难做到与实际一致的后向散射强度, 限制了上述方法的应用. 本文提出了一种基于分布密度函数差异的匹配度函数, 建筑物仿真 SAR 图像像素点的散射强度表示的是分类标签, 用以划分建筑物不同散射区域. 实际 SAR 图像上用于统计各分类区域的分布密度函数. 所提出的目标匹配度函数为

$$M = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i,j \in \text{Areas}} MI(i,j), i \neq j, \quad (10)$$

$$MI(i,j) = K(P_i | P_j) + K(P_j | P_i) = \int [p_i(x) \ln \frac{p_i(x)}{p_j(x)} + p_j(x) \ln \frac{p_j(x)}{p_i(x)}] dx, \quad (11)$$

其中, Areas 表示建筑物不同的散射区域, 包括单次散射, 叠掩, 二次散射和阴影等特征区域,  $n$  表示特征区域类型的个数,  $K$  表示不同区域间的联合交叉熵,  $p(x)$  表示了建筑物实际 SAR 图像特征区域分布密度函数. 上述匹配度是随检验高度变化的函数. 在建筑物真实高度处, 仿真图像特征区域与实际 SAR 图像的特征区域位置吻合较好, 特征区域间分布密度函数差异最大,  $MI$  取得最大值.

图 10(a) 是在平顶矩形建筑物仿真图像上添加了相干斑点噪声的 SAR 仿真图像. 其中, 建筑物模型尺寸为长 80 m, 宽 30 m, 高 14 m. 模拟 SAR 从上侧照射, 飞行高度为 1000 m, 俯视角约为 45°. 图 10

(b) 给出了目标匹配度随着检验高度变化的函数曲线. 不难看出, 提出的基于分布函数差异的匹配度函数在真实高度处取得了最大值, 验证了该方法的正确性.

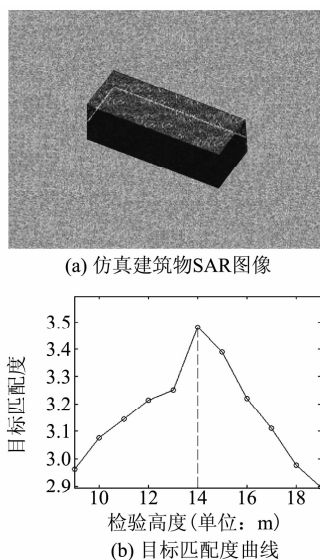


图 10 基于仿真迭代匹配的建筑物高度重建实验  
Fig. 10 Height reconstruction of a simulated building based on iterative simulation and matching

## 4 实验结果

### 4.1 实验 1

实验 1 选用了平顶矩形轮廓建筑物高分辨率 SAR 图像进行实验, 原始高分辨率 SAR 图像如图 11 (a) 所示. 图 11 (b) 是从 Google Earth 上截取的对应该区域的高分辨率光学遥感影像. 由于建筑物屋顶面比较平滑, 入射的电磁波以发生镜面反射为主, 后向散射较弱, 因此屋顶面在 SAR 图像并不明显. 而建筑物墙体和地面之间的二面角形成的二次散射较为明显, 图 11 (c) 给出了采用基于改进 Hough 变换的建筑物 L 型结构提取结果, 图中红线对应了建筑物二次散射结构主轴线, 红线和绿线组成的矩形轮廓是建筑物完整位置.

图 12 (a) 给出了建筑物三维模型图, 图 12 (b) 给出了建筑物 #1 的匹配度函数随着检验高度的高度的变化曲线, 图 12 (d)、(e) 和 (f) 分别给出了建筑物 #1 在检验高度分别为 6.2 m、10.4 m 和 18.5 m 的检验高度下的仿真 SAR 图像. 可以看出, 在真实高度 (10.0 m) 附近处 (10.4 m) 取得了最大值, 验证了方法的有效性. 对于由于周围地物 (如树木) 影响导致建筑物阴影结构不完整的情况, 本文采用“掩

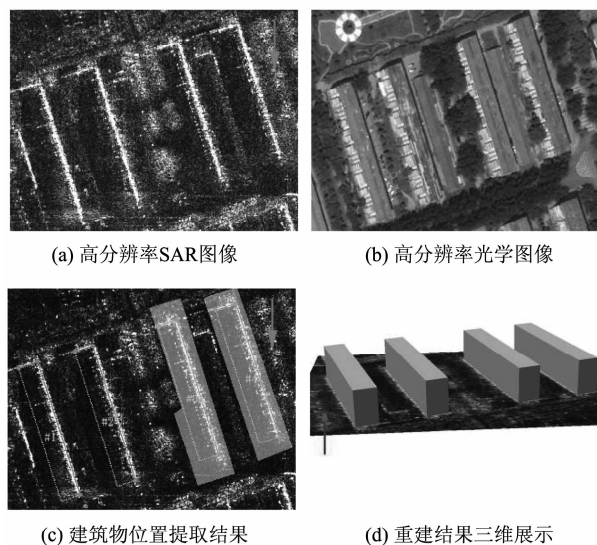


图 11 高分辨率 SAR 图像平顶矩形建筑物三维重构实验  
Fig. 11 3D reconstruction experiment of rectangular building from high resolution SAR images

膜”的方法消除其对反演精度的影响. 实验图像中建筑物 #3 和 #4 的阴影存在被截断的情形, 人工选择建筑物“掩膜”区域如图 11 (c) 中黄色背景区域所示. 表 1 给出了图像中 4 栋建筑物的三维重构结果, 包括建筑物的长度、宽度、方位角、高度和反演精度等. 从重建结果可以看出, 建筑物 #1 和 #2 的反演精度较好, 叠加了“掩膜”的建筑物 #3 和 #4 的反演精度也较好.

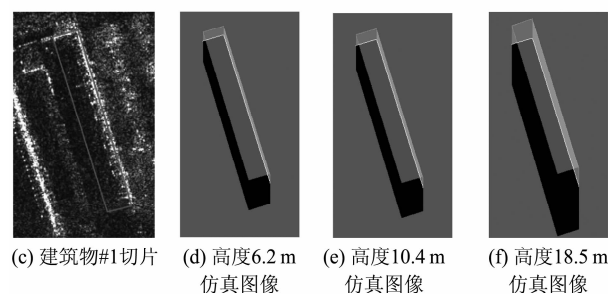
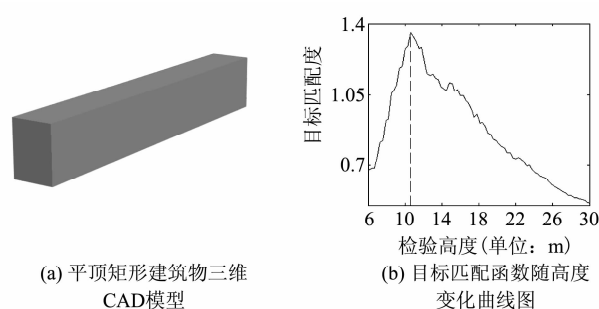


图 12 建筑物 #1 三维重构结果  
Fig. 12 3D reconstruction result of building #1

表 1 高分辨率 SAR 图像平顶建筑物三维重构结果  
Table 1 3D reconstruction results of building

| 序号 | 长/m    | 宽/m   | 方位角/(°) | 高度/m | 实测高/m | 偏差比   |
|----|--------|-------|---------|------|-------|-------|
| #1 | 145.25 | 27.38 | 65.82   | 10.4 | 10.0  | 4.0%  |
| #2 | 146.16 | 25.90 | 65.98   | 10.4 | 10.0  | 4.0%  |
| #3 | 146.51 | 27.27 | 66.64   | 9.5  | 10.0  | -5.0% |
| #4 | 146.73 | 28.74 | 65.48   | 10.4 | 10.0  | 4.0%  |

## 4.2 实验 2

为了验证方法的普适性和鲁棒性,实验 2 选用了具有尖状屋顶的建筑物的机载高分辨率 SAR 图像进行三维重构实验,原始 SAR 图像如图 13(a)所示.与实验 1 中的 SAR 图像相比,本实验中的 SAR 图像分辨率更高,建筑物的尖状屋顶和 L 型结构的拐点表现地比较明显.但由于建筑物附近的地表杂物的影响,建筑物墙体二面角的二次散射结构不完整,为自动提取和确定建筑物位置带来了很大的困难.实验中的建筑物为垂直墙面,由建筑物的高分辨率 SAR 图像三维成像几何结构(图 4)可知,屋顶处和地面处墙角拐点具有相同的方位向坐标,同时建筑物 L 型结构与墙面走向平行.因此,利用建筑物屋顶和地面墙角拐点的投影关系,并结合建筑物走向,就可以确定建筑物 L 型结构的位置.图 13(b)给出了人工提取得到的建筑 L 型结构以及利用 L 型结构确定建筑物位置的结果图像.

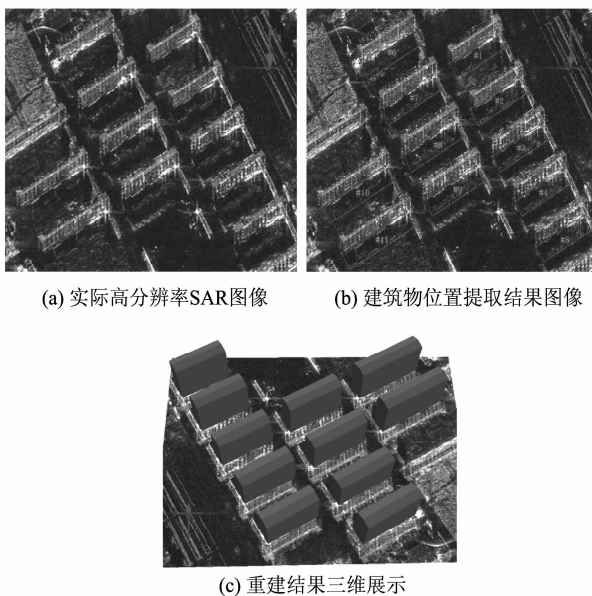


图 13 高分辨率 SAR 图像尖状屋顶建筑物三维重构实验  
Fig. 13 3D reconstruction experiment of gable-roofed building from high resolution SAR images

图 14(a)给出了建筑物的三维 CAD 模型,图 14

(b)和(c)分别给出了建筑物#3的目标匹配度函数随检验高度变化曲线和在最优检验高度值下建筑物的仿真 SAR 图像.不难看出,虽然建筑物区域存在较多的局部强散射体结构(如金属窗台,空调压缩机或太阳能热水器等)形成的高亮结构,本文方法依然可以较好地估计得到建筑物的高度,证明了该方法的鲁棒性.图 14(d)给出了建筑物#3的三维标绘图像.表 2 给出了实验场景内共 11 栋建筑物的三维重建结果.从重构结果看出,建筑物高度反演精度在 10% 以内,验证了此方法的有效性和鲁棒性.图 13(c)给出了所有重建建筑物三维模型展示结果.

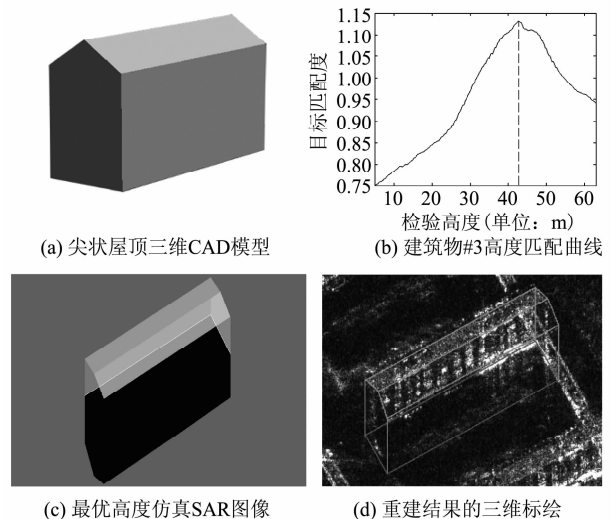


图 14 尖状屋顶建筑物三维 CAD 模型及建筑物#3 三维重构结果

Fig. 14 The CAD model of gable-roofed building and reconstruction result of building #3

表 2 高分辨率 SAR 图像尖状屋顶建筑物三维重构结果  
Table 2 3D reconstruction results of gable-roofed buildings from high resolution SAR images

| 序号  | 长/m    | 宽/m   | 方位角/(°) | 高度/m | 实测高/m | 偏差比    |
|-----|--------|-------|---------|------|-------|--------|
| #1  | 93.67  | 30.76 | 54.05   | 33.8 | 35.0  | -3.43% |
| #2  | 94.62  | 30.79 | 56.93   | 33.8 | 35.0  | -3.43% |
| #3  | 96.21  | 28.82 | 56.38   | 42.8 | 45.0  | -4.89% |
| #4  | 93.88  | 26.88 | 56.84   | 46.7 | 45.0  | 3.78%  |
| #5  | 94.52  | 28.56 | 55.01   | 48.5 | 45.0  | 7.78%  |
| #6  | 101.49 | 30.76 | 55.01   | 37.1 | 35.0  | 6.00%  |
| #7  | 102.87 | 30.52 | 54.69   | 32.3 | 35.0  | -7.71% |
| #8  | 102.27 | 30.03 | 55.00   | 34.7 | 35.0  | -0.86% |
| #9  | 102.13 | 30.52 | 54.69   | 36.2 | 35.0  | 3.43%  |
| #10 | 126.37 | 30.52 | 55.65   | 37.1 | 35.0  | 6.00%  |
| #11 | 125.67 | 30.52 | 55.65   | 36.5 | 35.0  | 4.29%  |

## 5 结论

提出了一种利用单幅高分辨率 SAR 图像进行

建筑物提取和三维重构的方法. 选用了两幅不同场景的实际高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重建实验, 两种不同屋顶类型的建筑物三维重建结果都比较理想, 验证了利用高分辨率 SAR 图像进行建筑物三维重建的可行性. 该方法充分利用了高分辨率 SAR 图像中建筑物三维成像几何结构和不同散射区域之间的空间位置关系, 可以克服 SAR 图像斑点噪声和建筑物场景内强散射体的干扰. 对于二次散射结构清晰完整的建筑物, 结合改进 Hough 变换提取的 L 型结构, 计算机可以自动进行三维重建, 自动化程度较高. 但若二次散射结构不明显或者不完整, 需要人工确定建筑物屋顶类型、位置和方位.

### REFERENCES

- [1] Tupin F, Roux M. Detection of building outlines based on the fusion of SAR and optical features [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, **58**(1-2), 71 - 82.
- [2] Sportouche H, Tupin F, Denise L. Building extraction and 3D reconstruction in urban areas from high-resolution optical and SAR imagery [C]. *Joint Urban Remote Sensing Event*, Shanghai, 20-22 May 2009, 1 - 11.
- [3] Thiele A, Cadario E, Schulz K, Thoennessen U and et al. Building recognition fusing multi-aspect high-resolution InSAR data [C]. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006, 3643 - 3646.
- [4] ZHAO Ling-Jun, KUANG Gang-Yao. A watershed-based automatic building detection in high-resolution airborne urban SAR images [J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (赵凌君, 匡纲要. 基于分水岭变换的高分辨率机载城区 SAR 图像建筑物自动检测方法. *电子与信息学报*) 2008, **30**(10), 2325 - 2328.
- [5] 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.
- [6] HE Jiao. Analysis of building height inversion based on VHR SAR image [D]. Master Dissertation, Beijing Jiaotong University (何娇. 高分辨率 SAR 图像建筑物高度反演研究方法, 硕士学位论文, 北京交通大学) June 2011.
- [7] Guida R, Iodice A, Riccio D. Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(7), 2967 - 2979.
- [8] YOU Hong-Jian, FU Kun. *Fine Processing of Synthetic Aperture Radar Image* [M]. Beijing: Science Press (尤红建, 付琨. 合成孔径雷达图像精准处理. 北京: 科学出版社), 2011.
- [9] FU Xing-Yu, YOU Hong-Jian, FU Kun, et al. An approach to extract L-shaped feature of building from VHR SAR image based on multi-scale Hough transform [J]. *Ceomatics and Information Science of Wuhan University* (傅兴玉, 尤红建, 付琨, 等. 利用多尺度 Hough 变换提取高分辨率 SAR 图像建筑物 L 型结构. *武汉大学学报·信息科学版*) 2012, **37**(4), 394-399.
- [10] 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.
- (上接 568 页)
- Curves evolving and left ventricle MRI segmentation based on narrow band level set method [J]. *Computer Engineering and Applications* (周则明, 陈强, 王平安, 等. 基于窄带水平集的曲线演化与左心室 MRI 图像分割. *计算机工程与应用*), 2003, **39**(27): 46 - 48, 72.
- [4] ZHOU Ze-Ming, XIANG Jie, WANG Hong-Yuan, et al. Study on the narrow band's construction for the level set method [J]. *Systems Engineering and Electronics* (周则明, 项杰, 王洪元, 等. 水平集方法中窄带构造技术. *系统工程与电子技术*), 2007, **29**(7): 1201 - 1204.
- [5] YU Hong-Chuan, WANG De-Jun, TANG Ze-Sheng, et al. Singular points in level set evolution and revised narrow banding algorithm [J]. *Journal of Software* (于洪川, 王德军, 唐泽圣, 等. 水平集演化中的奇点与改进的窄带算法. *软件学报*), 2003, **14**(4): 811 - 817.
- [6] Li C, Xu C, Gui C, et al. Level set evolution without re-initialization; A new variational formulation; 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005 [C]. Los Alamitos, CA, USA: Ieee, 2005: 430 - 436.
- [7] LI Jun, YANG Xin. *Principles and applications of the image partial differential equations* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press (李俊, 杨新. 图像偏微分方程的原理与应用. 上海: 上海交通大学出版), 2003.
- [8] Xu C, Yezzi Jr A, Prince J L. On the relationship between parametric and geometric active contours; 34th Asilomar Conference, 2000 [C]. Pacific Grove, CA, United States: IEEE, 2000: 483 - 489.
- [9] Shi Y, Karl W C. Real-time tracking using level sets; 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005 [C]. San Diego, CA, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005: 34 - 41.
- [10] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1990, **12**(7): 629 - 639.
- [11] WANG Qi, DING Hui, ZHANG Wei, et al. 3-D breast MRI sequence segmentation based on region and level set algorithm [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)* (王琪, 丁辉, 张伟, 等. 利用分区处理和水平集算法分割序列三维乳腺 MRI. *清华大学学报(自然科学版)*), 2009, **49**(03): 419 - 423.