

基于模型的单幅高分辨 SAR 图像 建筑物高度反演方法

蒋李兵¹, 王 壮¹, 雷 琳¹, 郭炜炜¹, 郁文贤²

(1. 国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 高分辨合成孔径雷达(SAR)图像的丰富使得建筑物三维信息获取成为城区遥感的一项重要研究课题. 针对单幅 SAR 图像建筑物的高度估计问题, 提出了一种基于模型的高度反演方法. 该方法遵循假设检验的思路, 通过正交投影模型实现模型假设的快速生成, 并设计了基于分割的似然函数, 利用模拟退火算法在高维模型假设空间中搜索最优解. 基于模拟和实测机载 SAR 图像的实验验证了算法的有效性.

关键词: 高分辨 SAR 图像; 建筑物高度估计; 三维几何参数模型; 投影模型; 似然函数

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1086-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.003

Model-Based Building Height Retrieval from Single HR SAR Image

JIANG Li-bing¹, WANG Zhuang¹, LEI Lin¹, GUO Wei-wei¹, YU Wen-xian²

(1. ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of high resolution (HR) synthetic aperture radar (SAR) imaging, the technology of building 3D information extraction from SAR images is becoming an important issue in radar remote sensing. In order to retrieve building height information from single HR SAR image, a model-based height estimation approach is proposed. An orthographic projection model is established to achieve the quick generation of the model hypothesis. A segmentation-based likelihood function is derived to examine the consistency between the model hypothesis and the actual SAR image. The hypothesis test procedure, which is iterated with the simulated annealing algorithm, is designed to optimize the hypothesis from the high dimensional model space. The experimental results using both of the simulated and actual airborne SAR images show the effectiveness of the proposed method.

Key words: high resolution synthetic aperture radar image; building height retrieval; 3D geometric parameterized model; projection model; likelihood function

1 引言

随着星载及机载 SAR 系统的持续投入应用和分辨率的不断提高, SAR 对地观测的能力得到了显著增强, 也大大拓宽了 SAR 遥感的应用范畴. 高分辨率 SAR 图像的出现使得从图像中提取建筑物的三维几何信息尤其是高度信息成为可能, 从而在(地震, 海啸等)灾害快速评估领域得到广泛应用^[1]. 立体测量和干涉测量^[2,3]作为两种常用的 SAR 图像高度反演方法, 尽管已成功用于建筑物高度估计, 但在许多实际场合中往往受到数据获取条件的限制: 立体测量要求有配对的 SAR 图像,

而干涉测量中涉及的相位解缠则常需要借助额外的辅助数据. 近年来, 直接由单幅 SAR 图像获取建筑物高度信息的研究开始为人们所关注.

单幅 SAR 图像中建筑物高度信息提取方法主要是基于对建筑物叠掩和阴影的分析. 按处理思路的不同, 主要可以分为三大类: (1)直接测量法^[4-6]通过测量叠掩和阴影尺寸, 依成像关系推算高度值. 此方法易受测量误差的影响而造成高度参数估计的误差; (2)电磁反演法^[7,8]构建场景电磁及几何参数与图像可测参数之间的确定性方程关系进行求解, 其不仅要求构建准确的 RCS 反射模型, 而且还需要已知粗糙度、介电常数等场

景电磁参数作为先验;(3)基于模型的方法^[9-14]以传感器和建筑物几何模型为约束,根据“模型假设-匹配检验”的思想迭代求解高度参数,是目前研究的一大热点.但在模型假设生成阶段,由于常涉及 SAR 图像模拟而具有较高的计算复杂度.

本文提出了一种新的基于模型的单幅 SAR 图像建筑物高度反演方法,其无需进行模拟 SAR 图像的计算,而是通过正交投影模型实现模型假设的快速生成.并且从图像分割的角度出发,综合考虑建筑物叠掩、阴影等多类特征区域的整体特征,构造了新的似然函数,通过模拟退火算法有效地实现了高度参数的估计.

2 问题描述

2.1 高分辨 SAR 图像建筑物特征分析

SAR 的主动侧视成像方式使得建筑物在高分辨 SAR 图像中呈现出前视收缩、叠掩、二面角等多种特有的表达,给解译任务带来困难.然而,也正是由于这种特别的成像方式,使得 SAR 图像中蕴含了目标的三维几何信息,从而为基于单幅 SAR 图像的高度反演提供了物理基础.

图 1 以平顶建筑物为例,给出了两种不同入射情况下沿建筑物剖面的分布关系.正对雷达照射方向的建筑物墙面和地面构成二面角反射器,在图像中形成一条亮细线(*b* 区);同时,墙面、地面及屋顶的单次反射叠加于相同分辨单元内,形成较亮的叠掩区域(*a* 区和 *c* 区);而在背向雷达入射方向的一侧,则因遮挡而出现阴影(*d* 区).由图 1 中的斜距剖面分布规律可知,这些区域隐含着建筑物的高度信息.

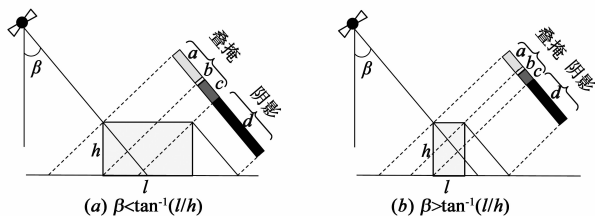


图1 两种入射情况的平顶建筑物斜距分布规律

2.2 建筑物高度估计问题建模

图 1 表明,从单幅 SAR 图像中提取高度信息的关键在于如何有效挖掘高度与建筑物区域之间的内在关系.基于模型的方法通过引入部分参数已知的建筑物模型作为先验约束,能综合利用建筑物在 SAR 图像中的整体区域特征,有利于获得稳定的建筑物高度估计.

记 $O(l, w, h, \alpha, \gamma)$ 为建筑物三维几何参数模型,其中 l, w, h, α, γ 分别代表长、宽、高、方位角和屋顶倾角, $\theta_s = (H, \beta)$ 是 SAR 传感器的高度和入射角.假定在此前的目标检测阶段,已经完成了建筑物切片 I 的提取,并进一步藉由 GIS、光学图像等先验知识库,获知了

建筑物除高度之外的其余参数(记为 $\theta_o = (l_o, w_o, \alpha_o, \gamma_o)$),则基于模型的单幅 SAR 图像建筑物高度估计问题可以建模为:

$$h' = \arg \max_h M\{O(h, \theta_o) |_{\theta_s}, I\} \quad (1)$$

其中 $M\{\cdot\}$ 是似然函数,它表征了在成像条件 θ_s 下,模型 $O(h, \theta_o)$ 与实际图像 I 之间的似然程度.式(1)表明,建筑物高度估计问题可以视为寻求与实际图像数据最为匹配的模型估计问题.

一般来说,建筑物三维几何参数模型与实际二维 SAR 图像之间的相似性难以直接度量,需要构建从模型 $O(h, \theta_o)$ 到图像特征区域 I' 的映射 $f(\cdot)$, 记为:

$$I' = f(O(h, \theta_o) |_{\theta_s}) \quad (2)$$

通过式(2)的映射,式(1)中模型与图像的匹配问题就转化为了图像域上的匹配问题.将式(2)代入式(1),并考虑匹配过程中空间位置(记为 (c_x, c_y))的影响,式(1)改写为:

$$\begin{cases} (h', (c_x, c_y)') = \arg \max_{h, (c_x, c_y)} M\{I', I\} \\ \text{s.t. } I' = f(O(h, \theta_o) |_{\theta_s}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的求解需要解决以下三个问题:(1)映射函数 $f(\cdot)$ 的构建;(2)似然函数 $M\{\cdot\}$ 的设计;(3)组合参数搜索策略.第 3 节将针对这三个问题展开详细讨论.

3 基于模型的高度估计新方法

图 2 归纳了本文基于模型的高度估计方法实现流程.首先,以 SAR 传感器成像参数和部分参数已知的建筑物参数模型作为先验信息,结合本文所构建的简化投影模型,生成从三维几何参数模型到二维平面的特征区域.接着,从图像分割的角度出发,设计了度量二维特征区域与实际 SAR 图像切片相似性的似然函数.最后,采用模拟退火算法并设计了合理的初始化策略进行高度、位置参数的联合优化搜索.

3.1 3D 模型-斜距平面投影模型

在正侧视照射方式下,三维空间中的点 (x, y, z) 经一次反射成像,其在 SAR 斜距平面 P 上的位置 (m, n) 可以由图 3 的空间正交投影映射近似确定,投影方程如下:

$$\begin{cases} m = (x, y, z) \cdot R(\theta_s) \\ n = (x, y, z) \cdot A(\theta_s) \end{cases} \quad (4)$$

其中, (\cdot) 是点积运算, $R(\theta_s)$ 和 $A(\theta_s)$ 分别是构成斜距

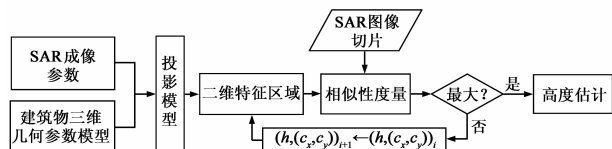


图2 基于模型的高度估计方法流程图

平面 P 的单位正交矢量. 由前面 2.1 节的分析可知, 一次和二次反射在建筑物成像过程中占居主导地位. 且规则建筑物二次反射的位置较特殊, 恰好位于墙角线上, 因此用式(4)计算建筑物在 SAR 平面中的位置是合理的.

建筑物可以根据其三维几何参数模型 $O(h, \theta_o)$ 分解为一系列小平面的集合 $\{F_i\}$, 而每个小平面 F_i 都可以用平面点集 $\{(x, y, z) |_{F_i}\}$ 来表示. 对该平面点集中的每一点依式(4)作正交投影, 就可以得到建筑物在斜距平面 P 上对应的二维特征区域 I' . 进一步地, I' 中的阴影与非阴影可以通过各小平面向法向量与斜距矢量的点积正负来区分, 而叠掩与非叠掩也可以根据投影过程中同一分辨单元对应的点集数目区别开, 从而 I' 中隶属于建筑物的不同特征区域的位置和尺寸可以被唯一地确定. 整个投影映射过程可以表示为:

$$I' = f(O(h, \theta_o) |_{\theta_s}) = \bigcup_{F_i \in O(h, \theta_o)} (x, y, z) |_{F_i} \cdot (\mathbf{R}(\theta_s) \times \mathbf{A}(\theta_s)) \quad (5)$$

特征区域 I' 不仅刻画了建筑物在斜距平面上投影的整体形状, 还包含了建筑物叠掩、阴影、单次反射等各局部特征区域的位置和形状. 因此, 从图像分割的角度出发, 我们可以将特征区域 I' 理解为对应于建筑物各个特征区域的标记图像, 在下文中简称为标记模板.

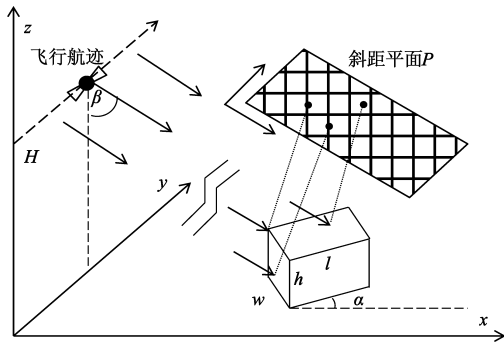


图3 三维模型向二维斜距平面的投影示意

3.2 似然函数

在本文的高度反演方法中, 由不同高度假设生成的标记模板在实际 SAR 图像切片上滑动, 使这二者间的一致程度达到最大的即为所求的高度参数. 这实质上属于图像匹配的研究范畴. 最大似然法^[10]和互信息法^[11]是两种常用的图像相关匹配的方法. 最大似然法以图像统计分布模型为前提, 互信息法则计算由仿真器生成的场景模拟图像与实际图像之间的互信息, 对图像模拟的逼真度有较高的要求. 然而, 目前尚难以建立针对高分辨 SAR 城区场景的精确统计模型^[15], 且本文所生成的标记模板并不包含反射强度信息, 与由仿真器生成的模拟图像有很大差别, 因此上述两种方法均不适用本文的情况.

本文构建了一个新的似然函数. 该函数包含区域相似度和轮廓相似度两项, 综合地从建筑物的区域特征和轮廓特征两个方面反映标记模板与实际 SAR 图像之间的相似程度. 建筑物各特征区域内的像素由于具有相近的局部入射角和后向反射类型而使得其幅度趋于一致, 而不同特征区域之间由于入射角和反射类型的不同而导致其幅度差异明显. 从这个性质出发, 可以建立基于区域的似然函数: 记 $I'(L)$ 为标记模板 I' 中对应于标记 L 的特征区域, 当以标记模板 $I'(L)$ 为掩模在实际 SAR 幅度图像 I 上滑动时, 其在 I 上相对应的区域记为 $I_R(L)$, 则类内方差 v_{inner} 和类间方差 v_{inter} 分别为:

$$v_{\text{inner}} = \sum_{L=1}^K \frac{1}{N_R(L)} \sum_{p_i \in I_R(L)} (p_i - m(L))^2 \quad (6)$$

$$v_{\text{inter}} = \sum_{L=1}^K \sum_{L'=L+1}^K (m(L) - m(L'))^2 \quad (7)$$

其中, p_i 是 i 处的幅度值, $N_R(L)$ 和 $m(L)$ 则分别是区域 $I_R(L)$ 的像素总数与均值, K 是标记数. 则区域相似度为:

$$M_{\text{region}} = \frac{v_{\text{inter}}}{v_{\text{inner}}} \quad (8)$$

类似地, 从建筑物各特征区域轮廓的强对比度性质出发, 我们同样可以得到轮廓相似度的表达式:

$$M_{\text{contour}} = \sum_{L=1}^K \frac{1}{N_C(L)} \sum_{p_i \in I_C(L)} \text{grad}(p_i) \quad (9)$$

其中, $I_C(L)$ 为区域 $I(L)$ 的轮廓, $N_C(L)$ 是该轮廓上的像素点个数, $\text{grad}(\cdot)$ 是梯度算子.

于是, 总的似然函数表示为区域和轮廓两种相似度的加权和形式:

$$M(I', I) = M_{\text{region}} + w \cdot M_{\text{contour}} \quad (10)$$

其中, w 是权因子, 可视 M_{region} 和 M_{contour} 的数量级进行自适应调节.

3.3 基于模拟退火的参数组合优化求解

式(3)是一个组合参数优化问题, 搜索空间具有一定的复杂度, 不适合采用经典的确定性优化搜索方法直接求解. 以模拟退火^[16]为代表的随机优化方法由于不需要对搜索空间进行限制性假设, 因而本文采用模拟退火算法求解式(3). 结合本文实际, 分别选用指数型退火表和 Metropolis 转移核, 初始状态中的匹配位置随机地从受限二维空间 $[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \in \mathbf{R}^2$ 中生成, 而模型高度则依直接测量法得到:

$$T(n) = a^n T_0, n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$p = \begin{cases} 1, & \text{if } M(\cdot)_{n+1} > M(\cdot)_n \\ \exp \frac{M(\cdot)_{n+1} - M(\cdot)_n}{T}, & \text{if } M(\cdot)_{n+1} \leq M(\cdot)_n \end{cases} \quad (12)$$

其中, T_0 和 a 为退火的初温和系数; p 是状态转移概

率, $M(\cdot)$ 为式(10)所定义的似然函数.

4 实验结果与分析

4.1 测试数据集说明

本文的测试集中包含非相干仿真图像和实测图像两类数据. 其中, 非相干仿真图像是根据 Lambertian 反射模型, 针对两种常见的建筑物类型——平顶建筑物和人字顶建筑物, 设定不同的建筑物模型参数、成像条件和噪声水平而生成的, 主要用于分析算法性能. 实测的机载 SAR 图像则用于检验算法的实际效能.

4.2 实验参数设置

模拟退火算法中涉及到的参数设置如下: 初温 $T_0 = 100$, 退火系数 $\alpha = 0.95$, 每个温度采样 50 次, 终止温度 $T_t = 1$; 高度初值 h_0 依直接测量法计算; 似然函数中的权因子 $w = 100$.

4.3 实验结果

图 4 和图 5 分别以平顶和人字顶建筑物模拟 SAR 图像为例, 给出了高度反演的过程示意. 在平顶建筑物实验中, SAR 入射角 45° , 高度 5000m, 建筑物真实模型

参数 $O(h, \theta_0) = O(40, (40, 20, 30, 0^\circ))$, 图像尺寸 200×300 , 乘性噪声方差 0.1, 依直接测量法得到的高度初值 $h_0 = 36.8$. 图 4(a) 是叠加了初始标记模板(以灰色细轮廓表示)的 SAR 模拟图像; 图 4(b) 是温度 $T = 12.8$ 时的中间结果; 图 4(c) 是退火过程收敛后的最终估计结果; 图 4(d) 是似然函数随退火过程的演化曲线. 标记模板越逼近建筑物的真实轮廓, 表示建筑物模型和匹配位置参数越接近真实值. 从图 4 可以看出, 随着退火过程的进行, 标记模板逐渐逼近实际的建筑物的真实轮廓, 并在退火收敛时达到很好的吻合, 对应的最终估计结果为 $(h', (c_x, c_y)') = (40.3, (113, 129))$. 分析图 4(d) 的似然函数演化曲线发现, 由于具有较好的高度初值(真值落于其邻域内), 使得退火过程能以大概率较快地收敛于真值附近. 从数值上看, 高度估计值 $h' = 40.3$ 与模型真值 $h = 40$ 非常接近, 优于直接测量法的结果, 表明本文的高度反演方法是有效的. 图 5 所示的人字顶建筑物 $O(h, \theta_0) = O(20, (20, 10, 0, 45^\circ))$ 高度反演过程与图 4 类似, 也得到了准确的高度估计结果 ($h' = 20.0\text{m}$), 印证了本文方法对上述两类建筑的适用性.

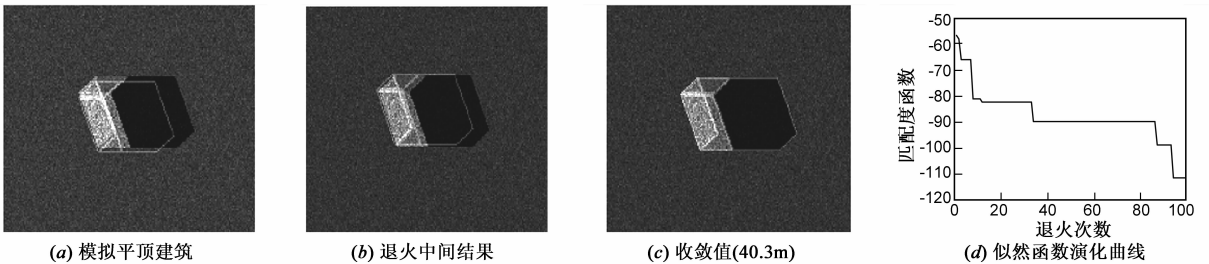


图4 平顶建筑物高度反演结果

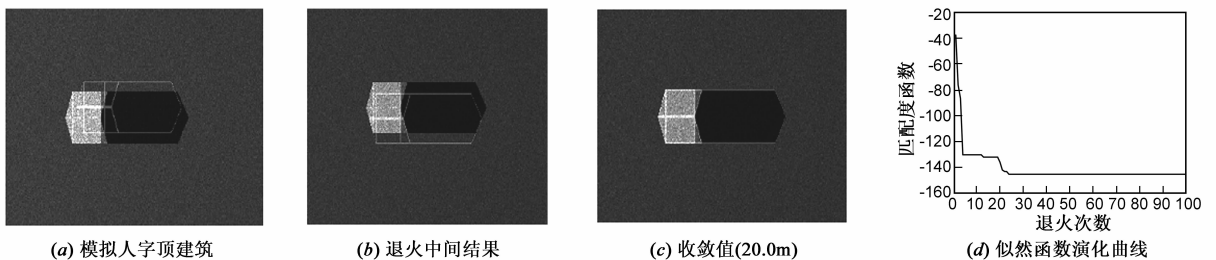


图5 人字顶建筑物高度反演结果

在测试数据集中, 选取方位角为 0° 、 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 80° 、 90° 的两类建筑物, 成像入射角为 51° 和 30° , 噪声方差为 0.1 和 0.2, 共 56 幅模拟图像测试本文高度反演算法的性能. 图 6 给出了估计结果的绝对误差统计曲线. 其中, 图 6(a) 和图 6(b) 分别是入射角为 51° 和 30° 时平顶建筑物的高度估计绝对误差, 图 6(c) 是 30° 入射角下屋顶倾角为 45° 的人字顶建筑物的高度估计绝对误差. 误差统计结果表明, 针对模拟图像的高度绝对误差均值约为 0.5m, 最大误差不超过 1.5m. 同时, 图 6 中不同方位角下的估计误差起伏并不明显, 说明本文算法

对建筑物方位角参数不敏感. 不同噪声方差下的误差曲线也表明, 估计误差并未随噪声水平的增大而显著变大, 说明估计算法具有较好的噪声鲁棒性. 我们在已知最优匹配位置的前提下, 以 Gamma 分布为统计先验, 选用文献[9]的算法在同样的数据集上进行了测试, 得到的高度绝对误差均值约为 2.8m. 从结果上看, 本文算法的估计精度优于文献[9]的算法. 进一步考虑到本文方法对建筑区的统计分布无先验要求, 其适用范围更广. 综合以上模拟图像的实验结果表明, 本文算法能够有效地从单幅 SAR 图像中估计建筑物的高度.

图 7 给出了基于实测 SAR 数据的建筑物高度反演结果.图 7(a)是合肥某工业区中一平顶建筑物的机载 SAR 图像切片,大小为 201×219 ,载机航高 5000m,局部入射角接近 62° ,建筑物相对于雷达的方位角约为 3° .受客观条件的限制,未能对该建筑物的几何尺寸进行实地测量.但借助于 Google Earth 所提供的 QuickBird 光学图像,我们手工从图像中测得该建筑物的长宽分别为 66m 和 21m.而对于建筑物高度真值,本文参考文献 [14] 的做法,通过对不同距离剖面上叠掩和阴影的多次手工测量,以测量结果推算的平均值 $\bar{h} = 31.2\text{m}$ 作为高度真值的参考值.尽管直接测量得到的高度估计结果

易受测量误差的影响,但通过多次测量取平均后可以降低误差范围,因而将均值视为真值的近似是合理的.

在实测 SAR 数据高度反演实验所涉及的算法参数中,除了权因子 w 根据实际区域相似度函数和轮廓相似度函数的数量级变化调整为 20 外,其余参数均与 4.2 节中的设置相同.图 7(b)是退火过程中将标记模板叠加于原图的中间结果示意.图 7(c)中的标记模板轮廓与实测图像中建筑物主要区域的轮廓基本相吻合,对应的高度估计值 $h' = 28.7\text{m}$.从实测数据实验的结果看,由本文方法得到的高度估计值接近于参考值,说明本文算法对实测 SAR 数据也是适用的.

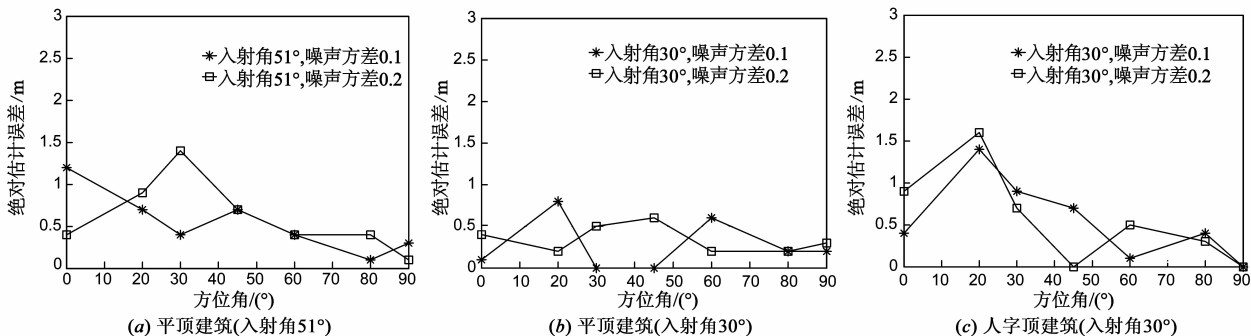


图6 建筑物高度反演绝对误差曲线

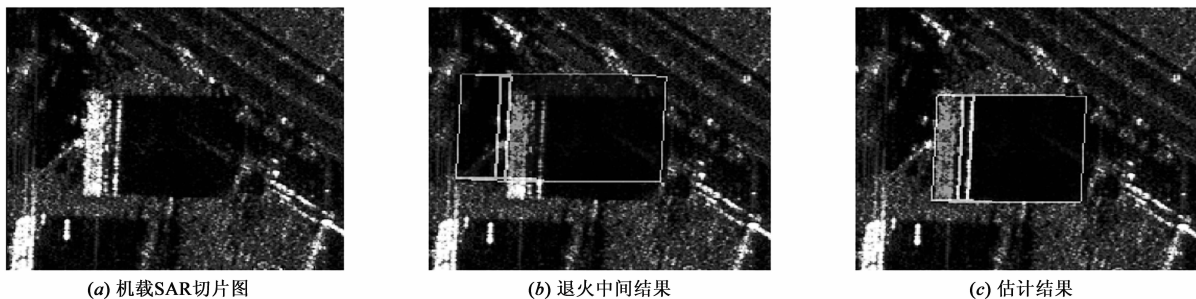


图7 实测SAR图像建筑物高度反演示例

5 结论

基于雷达遥感的建筑物高度反演是城区三维重建的重要研究课题.本文从图像分割这一角度出发,以部分参数已知的建筑物三维几何模型作为先验约束,提出了一种针对单幅 SAR 图像的建筑物高度反演方法.与立体测量和干涉测量方法相比,本文提出的方法降低了对数据源的要求.同时,与现有的单幅 SAR 图像建筑物高度估计方法相比,本文方法既克服了直接测量法由于定位精度低带来的估计误差大的缺点,也无需进行基于模型仿真方法中所涉及的模拟 SAR 图像计算,对提高 SAR 图像建筑物高度反演的精度和降低计算复杂度均具有一定的意义.

需要说明的是,本文基于一次反射所构建的投影模型仅适用于常见的简单规则建筑物,但在刻画金字塔等二次反射占主导作用的人造目标时存在局限性.

同时,密集城区环境中相互遮挡建筑物的高度反演也是一个现实而亟待解决的问题.下一步的研究将致力于这两个方面.

参考文献

[1] SOERGEL U. Radar Remote Sensing of Urban Areas[M]. Berlin: Springer, 2010. 1 - 8.
 [2] 马仑,廖桂生,李真芳.利用分布式小卫星 InSAR 系统获取宽域、高分辨、高精度三维地形[J].电子学报, 2009, 37(9):1900 - 1906.
 MA Lun, LIAO Gui-sheng, LI Zhen-fang. Using constellation InSAR system to reconstruct three-dimensional topography with wide swath, high resolution and high precision[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1900 - 1906. (in Chinese)
 [3] 庞蕾,张继贤,范洪冬.多基线干涉 SAR 测量技术发展及趋势分析[J].电子学报, 2010, 38(9): 2152 - 2157.

- PANG Lei, ZHANG Ji-xian, FAN Hong-dong. Progress and tendency of multibaseline synthetic aperture radar interferometry technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2152 – 2157. (in Chinese)
- [4] TUPIN F. Extraction of 3D information using overlay detection on SAR images[A]. Olaf H. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas[C]. Berlin: IEEE Press, 2003. 72 – 76.
- [5] HILL R D, MOATE C P, BLACKNELL D. Urban scene analysis from SAR image sequences[A]. Edmund G. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII[C]. Orlando: SPIE, 2006. 1 – 12.
- [6] BENNETT A J, BLACKNELL D. The extraction of building dimensions from high resolution SAR imagery[A]. Smith J K. IEEE Radar Conference[C]. Alabama: IEEE Press, 2003. 182 – 187.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SPORTOUCHE H, TUPIN F, DENISE L. Building extraction and 3D reconstruction in urban areas from high-resolution optical and SAR imagery[A]. 5th GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas[C]. Shanghai: IEEE Press, 2009. 1 – 11.
- [10] SPORTOUCHE H, TUPIN F, DENISE L. Building detection and height retrieval in urban areas in the framework of high resolution optical and SAR data fusion[A]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium[C]. Hawaii: IEEE Press, 2010. 3660 – 3663.
- [11] BRUNNER D, LEMOINE G, BRUZZONE L. Height estimation of man-made structures using hybrid VHR optical and SAR imagery[A]. Remote Sensing—New Challenges of High Resolution[C]. Bochum: IEEE Press, 2008. 186 – 193.
- [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] QUARTULLI M, DATCU M. Stochastic geometrical modeling for built-up area understanding from a single SAR intensity image with meter resolution[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1996 – 2003.
- [14] 赵凌君. 高分辨率 SAR 图像建筑物提取方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
ZHAO Ling-jun. Building Extraction from High Resolution SAR Imagery[D]. Changsha: National University of Defense Technique, 2009. (in Chinese)
- [15] 陈杰, 朱晶, 周荫清, 等. 复杂目标场景合成孔径雷达图像异质性分析与测量方法研究[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1687 – 1692.
CHEN J, ZHU J, ZHOU Y Q, et al. Review on heterogeneity measurement of synthetic aperture radar imagery with complex scenario[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1687 – 1692. (in Chinese)
- [16] KRIKPATRICK S, GELATT C D, Vecchim P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220: 671 – 680.

作者简介



蒋李兵 男, 1982 年 12 月出生于江苏省启东市. 现为国防科技大学四院 ATR 国防科技重点实验室在读博士生, 从事 SAR 图像解译方面的研究工作.

E-mail: readfish0101@163.com



王 壮 男, 1973 年 9 月出生于陕西省西安市. 现为国防科技大学四院 ATR 国防科技重点实验室教授, 硕士生导师, 从事图像理解、数据融合与自动目标识别方面的研究工作.

E-mail: zhuang_wang@sina.com