

几何模型约束的 SAR 图像建筑物提取

王国军^{1,2}, 张凤丽¹, 徐旭^{1,2}, 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:利用高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取的常规方法是首先利用二次散射特征线确定建筑物边界, 然后利用叠掩、阴影等散射特征来提取建筑物高度. 当建筑物目标走向与星载 SAR 方位向夹角较大时, 其二次散射特征不明显, 常规重建方法不能取得理想结果. 针对这类建筑物目标, 在分析 SAR 图像上的散射特征为平行四边形条带的基础上, 提出一种基于几何模型约束的建筑物自动提取与三维重建方法. 将该方法应用于 TerraSAR-X 聚束模式图像, 并对提取结果进行了分析和评价, 表明该方法能够有效提取建筑物目标及其三维信息.

关键词:高分辨率 SAR; 建筑物提取; 几何模型约束; 最优化; 平行四边形

中图分类号:P23 **文献标识码:**A

Geometrical model-based three-dimensional building extraction in high-resolution SAR imagery

WANG Guo-Jun^{1,2}, ZHANG Feng-Li¹, XU Xu^{1,2}, 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: The traditional methods for 3D building extraction from high resolution monoscopic SAR imagery extract the footprint from bright lines caused by double bounce between ground and wall, then estimate height from features such as layover, shadow etc. However, it is very common that bright lines of buildings with large aspect angles are unrecognizable in SAR imagery, which makes these traditional methods useless. A new method was proposed for 3D extraction of these kinds of buildings from a single high resolution amplitude SAR image. This method relies on the constraint of geometrical model, assuming a parallelepipedic 3D building model. The performance of this new method were validated on test SAR data over two urban area.

Key words: high-resolution SAR imagery; 3D building extraction; Geometrical model-based; optimal; parallelogram

PACS: 84.40.Ua

引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时全天候的特性, 已经成为对地观测和目标探测的重要手段之一. 自 2007 年以来, 意大利的 Cosmo-SkyMed、加拿大的 RADARSAT-2、德国的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 卫星系统先后升空, 开启了高分辨率星载 SAR 时代. 发展高分辨率 SAR 图像的建筑物目标识别、信息提

取和三维重建的方法已经成为当前 SAR 应用研究的一个热点^[1-5]. 建筑物目标的自身结构及空间分布的复杂性, 导致建筑物目标与电磁波之间的相互作用机理非常复杂, 从而给建筑物目标的 SAR 图像的解译和信息提取带来了巨大的挑战.

常见的建筑物目标三维重建方法有基于干涉测量方法^[4, 6]、基于雷达摄影测量方法^[7, 8]和基于二次散射强度的三维重建方法^[1], 大多是首先分割出

收稿日期: 2012-11-25, 修回日期: 2013-05-21

Received date: 2012-11-25, revised date: 2013-05-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA120403); 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)

Foundation items: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (2011AA120403); Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-EW-320); National Natural Science Foundation of China (41001213)

作者简介(Biography): 王国军(1986-), 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 主要研究领域为高分辨率 SAR 图像模拟、城市雷达遥感应用研究. E-mail: wangji@irsa.ac.cn

建筑物目标在图像上各种散射特征区域(二次散射、叠掩、阴影等),然后根据散射特征区域对应的几何参数或者辐射值来重建建筑物三维信息.这些方法的重建精度取决于图像分割的效率和准确性,高分辨率 SAR 图像斑点噪声与建筑物目标结构与分布的复杂性严重影响了图像的分割精度.由于建筑物目标的散射特征区域与建筑物的几何模型之间存在着确定的仿射变换关系,如果将这种变换关系作为约束条件引入到目标提取中,必然会增加分割的精度进而提高提取精度.通过将模拟图像与真实图像进行匹配来反演建筑物高度的三维重建方法^[2]虽然引入了这种约束条件,但该方法仅仅能用于提取高度,建筑物边界信息需要采用其他手段获得,从而给该方法的应用带来了一定的局限.

针对以上存在的问题,本文提出了一种基于几何模型约束的建筑物目标自动提取与三维重建方法.首先分析建筑物目标在 SAR 图像上表现为平行四边形亮条带和二次散射亮线的组合,并建立了这些散射特征与建筑物目标三维参数之间的定量关系模型,然后引入平行四边形的几何模型约束条件,通过迭代最优的方法寻找最优平行四边形,最后基于二次散射亮线与平行四边形的位置关系来确定二次散射的长度进而完成目标的三维重建.将该方法应用于两个实验区的 TerraSAR-X 图像,结果表明该方法能够有效提取并重建目标.最后分析了方法的优缺点以及改进方向.

1 散射机制分析和定量关系建立

在高分辨率 SAR 图像中,建筑物目标主要表现为亮线和亮点的集合.亮线特征主要由墙地二次散射引起,而亮点特征主要由建筑物表面复杂结构组成的三面角反射器或者特殊材质引起,由于成像过程中的点扩散效应,在 SAR 图像中的强散射点集合往往表现为亮条带.亮线特征可用于确定墙角线的位置和长度,亮条带往往对应着墙面和屋顶附属结构的散射.因此,从高分辨率 SAR 图像中提取建筑物目标并进行三维重建的关键在于提取这些亮线和亮条带特征.

1.1 建筑物目标的散射机制分析

假设文中建筑物目标的轮廓可以简化为长方体结构,并且满足建筑物之间无相互遮挡.通常情况下,建筑物屋顶较光滑并且附属结构较少,其回波信号较弱;而建筑物墙面包含大量窗户导致墙面结构不连续,并且含有大量金属材料,因此表现为较强的

亮条带.图 1(a)为一个长方体结构建筑物的光学图像,电磁波从右往左照射,只有三个面可以被电磁波照射到,分别是屋顶面、主墙面和侧墙面;图 1(b)为该建筑物的 TerraSAR-X 聚束模式降轨地距图像;如图 1(c)为该建筑物主墙面的实地照片,主墙面分布大量的窗户结构和金属材料,所以其散射信号强,在 SAR 图像中表现为一条平行四边形亮带,如图 1(b)中红框内;图 1(d)为该建筑物侧墙面实地照片,侧墙面窗户等附属结构较少,表面光滑,因此散射信号弱,在 SAR 图像中特征不明显,如图 1(b)中蓝框内;建筑物屋顶除分布着少量附属结构外,大部分表面较光滑(所示图 1(a)),回波信号弱,因此 SAR 图像中屋顶轮廓也不明显,如图 1(b)中绿框内,绿框中 4 个亮目标为屋顶附属结构引起.对于墙面与地面形成的二面角反射器,指向角为墙面与卫星方位向夹角,指向角越小,则回波较强,指向角越大则回波弱^[9].图 1(b)中建筑物的侧墙面指向角为 12° ,二次散射亮线明显,如亮线 $B'F'$;主墙面指向角为 78° ,理论上线段 $A'B'$ 处会出现较弱二次散射亮线,但被主墙面的强信号淹没而无法识别.

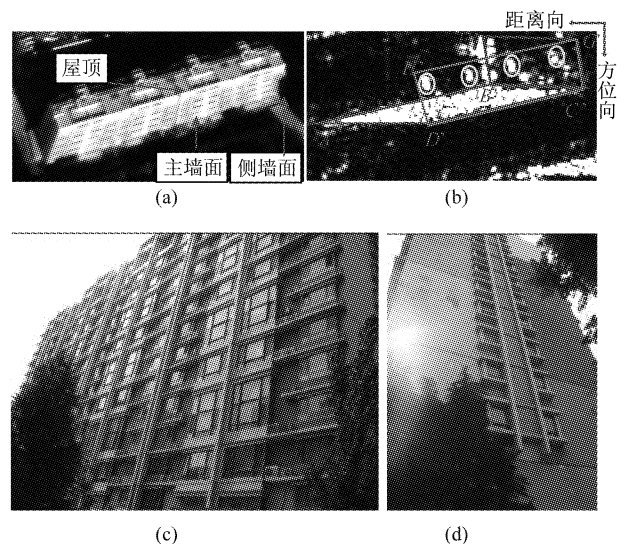


图 1 (a) 建筑物的光学图像, (b) TerraSAR-X 聚束模式地距图像, (c) 主墙面照片, (d) 侧面墙面照片

Fig. 1 (a) optical image of a building from Google Earth, (b) spotlight mode of TerraSAR-X image in ground range geometry, (c) photo of the main wall facet, (d) photo of the side wall facet

为验证以上分析,利用 SAR 图像模拟器生成该建筑物的模拟 SAR 图像^[10],模拟过程中,设置主墙面为强散射属性,而将屋顶和侧墙面设置为弱散射属性.图 2 中左边为长方体建筑物的三维模型 AB-

CD-EFGH,右边为模拟图像,虚线指出了三维模型与模拟图像之间的映射关系,顶点 A-H 分别映射到 A'-H'. 建筑物只有三个面可以被电磁波照射到:主墙面映射到 A'B'C'D'、侧墙面 BCGF 映射到 B'C'G'F',屋顶面 DCGH 映射到 D'C'G'H'. 通过比较发现,模拟图像上的平行四边形亮特征和二次散射亮线与真实图像完全对应.

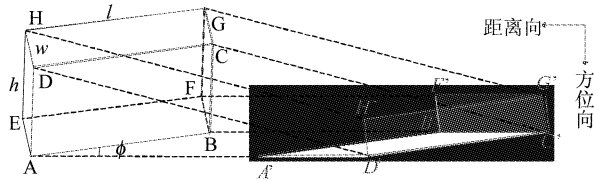


图2 建筑物三维模型(左)及其模拟图像(右)
Fig. 2 3D model of the building (left) and its corresponding simulated image(right)

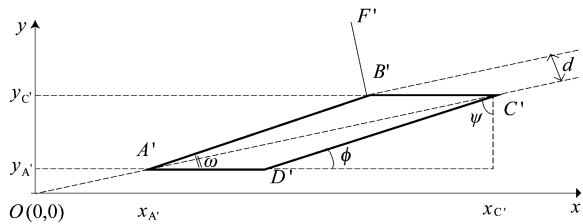


图3 散射特征几何结构
Fig. 3 Geometric structure of the scattering features

1.2 三维重建的定量关系模型

从以上分析可以看出,建筑物的墙面与真实 SAR 图像上对应区域之间存在仿射变换关系. 主墙面的墙面回波强,映射到 SAR 图像上特征为较明显的亮平行四边形,对应的二次散射亮线不明显;侧墙面只有二次散射亮线较为明显,提取侧墙面宽度. 因此,当建立了建筑物目标的几何参数与真实图像中平行四边形亮条带和二次散射亮线之间的定量关系后,可以利用 SAR 图像来重建建筑物三维信息. 平顶建筑物表示为 $X = \{x_0, y_0, l, w, h, \psi\}$, 其中 x_0 和 y_0 为离传感器最近角点(图 2 中 B 点)的图像坐标, l, w 和 h 分别为长、宽和高, ψ 为主墙面方位角,定义为主墙面与卫星方位向的夹角,如图 2 所示. 图 3 为建筑物目标的散射特征:平行四边形 A'B'C'D'(表示为 P)与二次散射亮线 B'F'(表示为 Γ), xOy 为地距图像坐标. 其中, P 的上下两条边 A'D'和 B'C'平行于距离向(x 轴),因此要确定 P ,只需要知道顶点 A'与顶点 C'的位置,两个角度 ϕ 和 ω 的大小,其中 ϕ 为内角, ω 为主对角线倾角. 在点 $O(0,0)$ 为原点

的局部图像坐标系 Oxy 中,有 $y_{A'} = x_{A'} \tan \omega$, $\tan \omega, y_{C'} = x_{C'} \tan \omega$, 则有 $P = \{x_{A'}, x_{C'}, \omega, \phi\}$. 当 P 确定后,二次散射亮线 Γ 是过角点 B',且与边 A'B'垂直的射线,只要确定其长度 e 即可,因此 Γ 可以表示为 $\Gamma = \{P, e\}$.

通过以上分析可知:平行四边形的斜边 A'B'确定了主墙面 ABCD 的墙角线,方位角为 A'B'与方位向夹角;两条短边 A'D'和 B'C'平行于距离向坐标,为主墙面在距离向的叠掩长度,二次散射亮线 B'F'的长度为建筑物的宽度. 根据 SAR 成像几何关系可以得到建筑物目标 X 与平行四边形 P 和二次散射亮线 Γ 之间的定量关系如公式(1).

$$\begin{cases} (x_0, y_0) = (x_{B'}, y_{B'}) \\ \psi = 90^\circ - \phi \\ l = |A'B'| \\ w = |B'F'| \\ h = |A'D'| \tan \theta \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $(x_{B'}, y_{B'})$ 为角点 B'对应的图像坐标, ϕ 为平行四边形 P 的内角, l 表示线段的长度, θ 为该建筑物目标成像时对应的入射角.

2 三维重建方法

通过以上的分析和结论可以知道,提取并重建建筑物目标的关键在于如何准确提取以上平行四边形和二次散射亮线特征. 在 SAR 图像中,斑点噪声和旁瓣效应等导致高亮特征的边界不完整,如图 1b 中二次散射亮线 B'F'. 为了获得这些特征区域,最直接的方法是利用图像分割算法提取特征的完整边界. 而常规的图像分割方法大多是基于灰度或者纹理特征,所以在分割噪声干扰较多的 SAR 图像时无法取得较好的效果. 本文研究的建筑物目标的散射特征为平行四边形与线段的组合,所以将这些几何模型作为约束条件加入分割算法中,就可以获得更好的提取效果. 由于平行四边形区域较大,所以先根据平行四边形约束条件提取对应区域,再利用平行四边形和线段约束条件来获得整个目标区域.

图 4 为重建方法的流程图,首先从 SAR 图像中提取出平行四边形的初始值,在此基础上,引入平行四边形约束条件从图像中提取出最优平行四边形 P_{opt} ,进而确定了二次散射亮线的起点和方向,在引入线段约束条件来确定二次散射亮线的长度,最后利用公式可以重建目标三维信息. 本文选用包含建筑物目标特征的小图像块(图 1b)作为输入来详细介绍建筑物目标提取和三维重建算法.

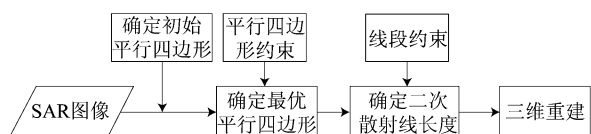


图4 基于几何模型约束的三维提取方法流程图

Fig. 4 The flow chart for geometrical model-based three-dimensional building extraction

2.1 主墙面图像初始范围的确定

提取目标区域的关键在于从四维空间 $\{x_A, x_C, \omega, \phi\}$ 中找到最优平行四边形 P_{opt} , 当解空间的范围未知时, 寻找最优解将会非常困难而耗时, 而给定最优解的初始值可以极大地减小搜索范围, 从而提高效率. 为了确定主墙面图像的初始范围, 首先对图像块 I 作 Radon 变换来确定平行四边形主对角线 (图 3 中 $A'C'$) 的方向和顶点, 得到 x_A, x_C, ω 的初始值, 再利用平行四边形内外灰度差异来确定内角 ϕ 的初始值.

Radon 变换可以计算图像在某一指定角度射线方向上投影, 变换公式为

$$f(\rho, \vartheta) = \iint_D I(x, y) \delta(\rho - x \cos \vartheta - y \sin \vartheta) dx dy \quad (2)$$

其中, D 表示图像区域, $I(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的灰度值, δ 是 Dirac 函数, ρ 是图像中心到直线的垂直距离, ϑ 是图像中心到直线的垂线与 x 轴的夹角. Radon 变换将图像从灰度平面映射到参数 (ρ, ϑ) 平面, 对图像求出各个 ϑ 值的投影, 从而对图像全角度观察. 若图像中存在向后散射较强的平行四边形区域, 主对角线垂直方向对应投影将出现最大值, 参数平面 (ρ_0, ϑ_0) 处会形成一个峰值. 图 5a 为 Radon 变换结果, 找到峰值点并进行逆变换^[11] 得到主对角线所在的直线, 图 5b 中 $A'C'$ 所在绿线, 其倾角 $\omega_0 = 8.0^\circ$. 由于 Radon 变换无法得到主对角线的顶点, 还需要如下处理. 获取沿该直线方向的宽度为 3 个像元的长条带兴趣区的图像, 利用 otsu 分割方法^[12] 得到图 5b 中主对角线的顶点 $A'(x_{A'0}, y_{A'0})$ 和 $C'(x_{C'0}, y_{C'0})$.

确定了主对角线三个参数 x_A, x_C, ω 的初始值之后, 还需要确定平行四边形内角 ϕ 的初始值. 在图 5b 中, 首先分别过点 A' 和点 C' 作两条水平的直线 (黄色标记), 则平行四边形包含在两条平行黄线构成的矩形内 (黄色标记). 然后点 A' 和点 C' 分别做直线 $A'P$ 和 $C'Q$, 两条直线互相平行, 与水平方向

夹角为 α , 其中 $\alpha \in (\omega_0, 90^\circ)$. 于是, 平行四边形 $A'PC'Q$ 将黄色矩形框划分成 3 块区域, 对应类间方差为 $g(\alpha) = \sum_{i \in R(\alpha)} P_i \sigma_i$, $R(\alpha)$ 其中为角度 α 为时划分的区域, P_i 为第 i 个区域占黄色矩形框的像元比例, σ_i 为第 i 个区域灰度方差. 当 α 等于平行四边形内角, 即 $\alpha = \phi$, 则三块区域的内部一致性最好, σ_B 取得最小值, 用公式表示. 由于 $g(\alpha)$ 没有具体解析式, 通过数值计算方法得到类间方差 $g(\alpha)$ 关于 α 的变化趋势 (图 6), $g(\alpha)$ 在 $\alpha = 14^\circ$ 时取得最小值, 因此可以得到平行四边内角的估计值 $\phi_0 = 14^\circ$.

$$\phi = \arg \min_{\alpha} \{g(\alpha)\} \quad (3)$$

通过以上处理可以确定参数 x_A, x_C, ω 和 ϕ 的初始值, 从而确定平行四边形 P 的初始解为 $P_0 = \{x_{A'0}, x_{C'0}, \omega_0, \phi_0\}$. 由于建筑物目标的散射特征受到较多干扰, 主对角线的提取可能存在偏差, 而内角的提取是基于主对角线的, 所以预处理获得的初始平行四边形往往不是最优解, 需要在初始值周边寻找最优解.

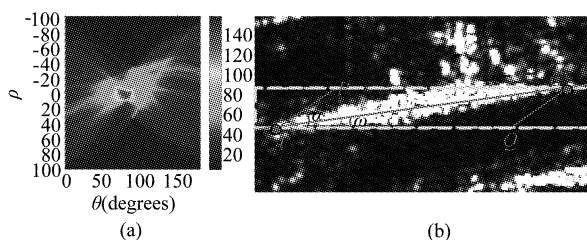


图5 Radon 变换检测主对角线

Fig. 5 Results of Radon translation and the extracted main diagonal

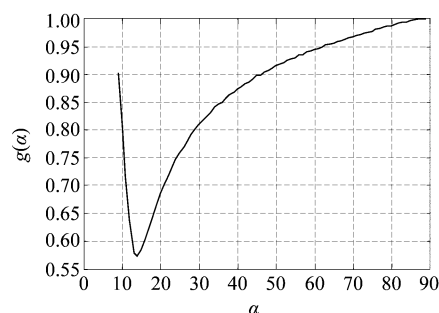


图6 归一化类间方差与角度的变化趋势

Fig. 6 Normalized within-class variance varies with the angle

2.2 主墙面图像区域的优化

本方法中采用了一种基于平行四边形约束的迭代最优方法来确定最优平行四边形. 首先假设平行四边形 $P = \{x_A, x_C, \omega, \phi\}$ 将建筑物目标所在的

SAR 图像块 I 划分成两个子区域: 目标 I_p 和背景 $I_{\bar{p}}$, 这两个区域的内部灰度一致性要好于区域间. 如果 P 与建筑物主墙面成像的平行四边形完成重合, 则目标区域与背景区域的内部灰度一致性最好, 而区域之间的灰度分布差异最大; 否则, 两块区域内部灰度一致性降低, 区域之间灰度分布差异减小. 因此利用平行四边形划分成的目标与背景区域之间的灰度差异和区域内部灰度一致性作为目标函数, 通过最优化问题的解算可以得到最优平行四边形 P_{opt} .

$$P_{opt} = \arg \min_p \{F(P, I)\} \quad (4)$$

其中目标函数 $F(P, I)$ 为利用 P 将图像块 I 划分成目标区域 I_p 和背景区域 $I_{\bar{p}}$ 的区域内部一致性测度, 如公式.

$$F(P, I) = \sum_{i \in (P, \bar{P})} p_i(I_i) \sigma(I_i) / [\mu(I_p) - \mu(I_{\bar{p}})] \quad (5)$$

其中 $p_i(I_i)$ 和 $\sigma(I_i)$ 分别为第 i 个区域的像元百分比和灰度均方根, $\mu(I_p)$ 和 $\mu(I_{\bar{p}})$ 分别为目标和背景像元均值.

确定了初始解 $P_0 = \{x_{A'_0}, x_{C'_0}, \omega_0, \phi_0\}$ 后, 可以建立一个以 P_0 为中心的包含最优解的搜索范围 Ω , 定义如公式, 在此搜索空间中利用枚举法即可快速寻找到最优解.

$$\Omega = \begin{cases} x_{A'} \in R_{A'}, \\ x_{C'} \in R_{C'}, \omega \in R_{\omega}, \phi \in R_{\phi} \\ R_{A'} = [x_{A'_0} - \varepsilon_A, x_{A'_0} + \varepsilon_A] \\ R_{C'} = [x_{C'_0} - \varepsilon_C, x_{C'_0} + \varepsilon_C] \\ R_{\omega} = [\omega_0 - \varepsilon_{\omega}, \omega_0 + \varepsilon_{\omega}] \\ R_{\phi} = [\phi_0 - \varepsilon_{\phi}, \phi_0 + \varepsilon_{\phi}] \end{cases} \quad (6)$$

其中, $R_{A'}$ 、 $R_{C'}$ 、 R_{ω} 和 R_{ϕ} 分别为变量 $x_{A'}$ 、 $x_{C'}$ 、 ω 和 ϕ 的变化区间, ε_A 、 ε_C 、 ε_{ω} 和 ε_{ϕ} 分别为对应区间半径, $\varepsilon_A = \varepsilon_C = 5$, $\varepsilon_{\omega} = \varepsilon_{\phi} = 1^\circ$; $x_{A'}$ 和 $x_{C'}$ 的变化步长为 0.1 像元, ω 和 ϕ 的变化步长为 0.05° . 利用以上目标函数在搜索空间中寻找到最优解为 $P_{opt} = \{x_{A'} = 4.0, x_{C'} = 160.5, \omega = 7.90^\circ, \phi = 12.55^\circ\}$, 如图 7b 中红色平行四边形 $A'B'C'D'$.

2.3 宽度提取及三维重建

由于二次散射亮线 Γ 与主墙面墙角线 $A'B'$ 垂直, 所以利用最优平行四边形即可确定二次散射亮线 Γ 的起点和方向, 于是确定 Γ 的长度 e 即可得到建筑物的宽度. 由于二次散射的宽度大于 1 个像元, 并且灰度分布不均匀, 所以仅仅在该条线上确定边界点误差较大. 为了准确提取参数 e , 采用如下方

法. 假设图 7a 中虚线为 Γ 所在方向, 将虚线的宽度扩展到 10 个像元, 从而将一维边界点提取转化为二维边界提取问题. 可以采用边界检测算子^[8]得到 $B'F'$ 长度为 30.

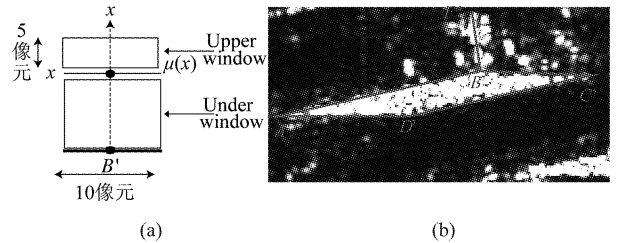


图 7 (a) 二次散射亮线的长度确定方法, (b) 提取的建筑物目标的最优平行四边形和二次散射亮线特征

Fig. 7 (a) The method to extract the length of double bounce line. (b) The obtained optimal parallelogram and double bounce line for the building

确定了平行四边形 $P_{opt} = \{x_{A'} = 4.0, x_{C'} = 160.5, \omega = 7.90^\circ, \phi = 12.55^\circ\}$ 和二次散射亮线段 $\Gamma = \{P_{opt}, e = 30\}$, 如图 7b 中红色线框结构, 利用公式来重建建筑物 $X = \{(x_0, y_0) = (101.7, 33.7), \psi = 77.45^\circ, l = 73.42, w = 22.5, h = 44.9\}$.

3 实验结果和分析

3.1 数据介绍

为了验证该方法的有效性和适用性, 将该方法应用于北京市两个典型居民区的 TerraSAR-X 地距图像, 成像时间为 2010 年 4 月 16 日, 降轨右视聚束模式, 像元大小为 $0.75\text{m} \times 0.75\text{m}$, 入射角为 45.6° . 实验区的建筑物为长条形东西走向. 其中实验区一对应光学图像和 SAR 图像分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示, 包含 9 个建筑物目标 B1-B9; 实验区二对应光学图像和 SAR 图像分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示, 包含 9 个建筑物目标 M1-M9. 该方法的处理对象为单个建筑物目标, 在提取和重建之前需要手工或者自动方法将图像分块, 其中每个数据块包含一个建筑物目标的散射特征.

3.2 实验结果及分析

表 1 中给出了图 8 和图 9 中建筑物目标的长、宽和高的反演结果及误差. 在 18 个建筑物目标中, 只有 12 个目标的三维参数被提取出来, 其余建筑物受到周边目标的严重干扰, 建筑物 B1、M1、M3、M8 和 M9 被右侧目标遮挡了, 其图像特征并非本文描述的平行四边形与二次散射亮线的组合. 该方法对于其他建筑物反演结果较好. 其中, 长度的反演误差

的均值和标准差分别为 0.1 m 和 2.4 m,表明该方法对于长度的反演精度非常高.高度的反演误差均值和标准差分别为 -0.1 m 和 3.7 m,表明该方法对于高度的反演精度较好;其中建筑物 B6 的高度反演误差较大,达到了 8 m,原因是其图像特征受到地面干扰.宽度的误差均值和标准差分别为 3.7 m 和 2.58 m,表明宽度反演结果偏大,这是由于宽度是通过提取二次散射亮线得到.当建筑物的墙面非正对电磁波入射方向时,如本文中建筑物的侧墙面,与地面相比,墙面较为光滑,则电磁波第一次入射到墙面后发生镜面反射到地面,第二次散射为漫反射,只有与入射场平行的回波才能被传感器接受形成二次散射.此时,二次散射回波的散射中心位于墙角线所在的直线上,但是却比墙角线长,而且建筑物越高表现越明显.

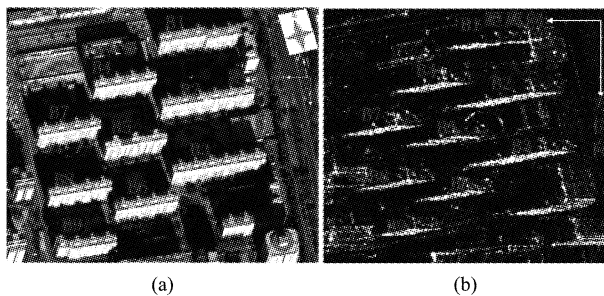


图 8 实验区一的光学和 TSX 图像 (a) Google Earth 光学图像 (b) TSX 降轨地距图像
Fig. 8 Optical and SAR images for the test area 1, (a) optical image from Google earth, and (b) TSX image in ground geometry (descending with viewing direction from the right)

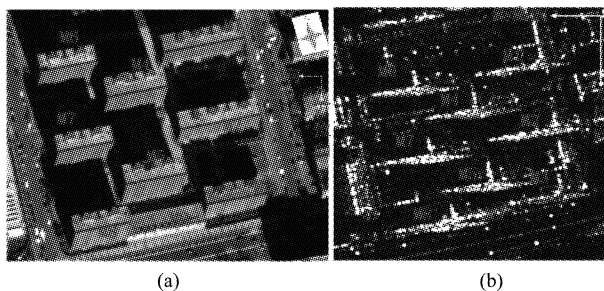


图 9 实验区二的光学和 TSX 图像 (a) Google Earth 光学图像 (b) TSX 降轨地距图像
Fig. 9 Optical and SAR images for the test area 2, (a) optical image from Google earth, and (b) TSX image in ground geometry (descending with viewing direction from the right)

结果表明该方法能够有效提取并重建长方体建筑物目标.其中,长度反演精度最优,高度其次,宽度

表 1 实验区三维提取结果

Table 1 The extracted results of the test areas

编号	长/m			宽/m			高/m		
	测量值	反演	误差	测量值	反演	误差	测量值	反演	误差
B2	114.0	112.6	-1.4	16.9	20.8	3.9	44.0	43.5	-0.5
B3	109.0	109.6	0.6	16.9	20.9	4.0	44.0	45.0	1.0
B4	77.0	73.4	-3.6	16.9	22.5	5.6	44.0	44.9	0.9
B6	75.8	72.6	-3.2	16.9	18.7	1.8	44.0	36.0	-8.0
B7	76.0	76.3	0.3	16.9	26.1	9.2	44.0	40.0	-4.0
B8	76.0	75.5	-0.5	16.9	19.9	3.0	44.0	39.9	-4.1
B9	60.0	59.2	-0.8	16.9	19.4	2.5	44.0	42.8	-1.2
M2	63.0	62.7	-0.3	16.9	19.2	2.3	29.0	38.0	4.3
M4	46.9	50.6	3.7	15.9	22.3	6.4	44.1	52.9	3.3
M5	46.9	49.7	2.8	15.9	20.9	5.0	44.1	45.9	1.8
M6	46.0	45.7	-0.3	15.9	16.1	0.2	44.1	47.6	3.5
M7	46.0	49.7	3.7	15.9	16.3	0.4	42.1	44.1	2.0
均值			0.1			3.7			-0.1
方差			2.4			2.6			3.7

偏大.此外,该方法不能有效处理遮挡或受干扰建筑物目标,其鲁棒性有待提高.

4 结语

基于建筑物目标在高分辨率 SAR 图像上的散射特征,提出了一种基于几何模型约束的建筑物目标提取与三维重建方法.该方法将建筑物目标几何模型约束条件引入散射特征的提取,通过迭代最优方法寻找散射特征与背景之间最佳边界,然后建立散射特征与建筑物三维结构之间的关系,进而重建建筑物三维信息.该方法的特点在于将几何模型约束引入建筑物目标的提取从而避免了单纯的图像分割带来的误差;该方法能够自动提取建筑物的位置和三维信息,为 SAR 图像自动提取建筑物目标提供了一种解决方案.实验结果表明该方法能够较为有效提取并重建长方体建筑物目标;同宽度的提取相比,长度和高度的提取效果更好.然而该方法存在一定的局限性,首先它无法有效提取并重建散射特征不明显的建筑物目标,而城市中建筑物目标的多样性和复杂性导致大量散射特征不明显,所以增加该方法处理特征不明显目标是非常重要的,可以通过融合多个视向的数据来提高重建精度;其次,该方法提取建筑物目标的宽度偏大,因此需要研究二次散射亮线与建筑物墙角线之间的定量关系对反演结果进行修正,进一步提高宽度反演精度.

REFERENCES

- [1] GUIDA R, IODICE A, RICCIO D. Height Retrieval of Isolated Buildings From Single High - Resolution SAR Images

(下转第 480 页)

处理和应用具有重要的参考价值.

REFERENCES

- [1] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi, *et al.* *Spaceborne synthetic aperture radar interferometry* [M]. Beijing: Science press (王超,张红,刘智等. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京:科学出版社), 2002. 1-37.
- [2] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, **88**(3): 333-382.
- [3] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software [M]. New York: Wiley, 1998. 4-5.
- [4] Goldstein R, Zebker H, Werner C. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713-720.
- [5] Xu W, Chang E C, Kwok L K, *et al.* Phase-unwrapping of SAR interferogram with multi-frequency or multi-baseline [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Canada, 1994, 2: 730-732.
- [6] Brehm T, Wahlen A, Essen H. High resolution millimeter wave SAR [C]. European Radar Conference, Amsterdam, 2004: 217-220.
- [7] Magnard C, Meier E, Ruegg M, *et al.* High resolution millimeter wave SAR interferometry [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2007: 5061-5064.
- [8] LI Dao-Jing, LIU Bo, PAN Zhou-Hao, *et al.* Airborne MMW InSAR interferometry with cross-track three-baseline antennas [C]. *9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2012: 301-303.
- [9] LIU Bo, PAN Zhou-Hao, LI Dao-Jing, *et al.* Moving target detection and location based on millimeter wave InSAR imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘波, 潘舟浩, 李道京, 等. 基于毫米波 InSAR 成像的运动目标探测与定位. 红外与毫米波学报), 2012, **31**(3): 258-264.
- [10] PAN Zhou-Hao, LIU Bo, LI Dao-Jing, *et al.* Millimeter Wave Three Baseline InSAR System Error Correction and Signal Analysis [J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (潘舟浩, 刘波, 李道京, 乔明. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析. 电子与信息学报), 2011, **33**(10): 2464-2470.
- [11] Yu Hanwen, Li Zhenfang, Bao Zheng. A Cluster-Analysis-Based Efficient Multibaseline Phase-Unwrapping Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(1): 478-487.
- [12] Prati C, Giani M, Leuratti N. A 2-d phase unwrapping technique based on phase and absolute values information [C]. *Proceedings of the 1990 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1990: 2043-2046.
-
- (上接 449 页)
- [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **48**(7): 2967-2979.
- [2] 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.
- [3] SOERGEL, E M, A T, *et al.* Stereo Analysis of High-resolution SAR Images for Building Height Estimation in Cases of Orthogonal Aspect Directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, **64**(5): 490-500.
- [4] THIELE A, CADARIO E, SCHULZ K, *et al.* Analysis of Gable-Roofed Building Signature in Multiaspect InSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **7**(1): 83-87.
- [5] FENG X, YA-QIU J. Automatic Reconstruction of Building Objects From Multiaspect Meter-Resolution SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(7): 2336-2353.
- [6] BRENNER A R, ROESSING L. Radar Imaging of Urban Areas by Means of Very High-Resolution SAR and Interferometric SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(10): 2971-2982.
- [7] TISON C, TUPIN F, MAITRE H. A fusion scheme for joint retrieval of urban height map and classification from high-resolution interferometric SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(2): 496-505.
- [8] TUPIN F. Extraction of 3D information using overlay detection on SAR images [J]. *2nd Grss/Isprs Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003: 72-76.
- [9] 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(99): 612-616.
- [10] WANG G, ZHANG F, ZI W, *et al.* High resolution SAR image simulation for buildings based on ray tracing algorithm: Proc. SPIE 8006, 80060G (2011), 2011 [C], Guilin, China 2011.
- [11] SVALBE I. Exact, scaled image rotations in finite Radon transform space [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, **32**(9): 1415-1420.
- [12] CHENG J, JIN T, KU X, *et al.* Road junction extraction in high-resolution SAR images via morphological detection and shape identification [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012, **4**(3): 296-305.