

# 利用后向散射特性从高分辨率 SAR 影像中提取建筑物高度

刘 康<sup>1</sup> Timo Balz<sup>2</sup> 廖明生<sup>2</sup>

(1 武汉大学电子信息学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**研究了一种基于雷达后向散射特性,从单张星载高分辨率 SAR 影像提取建筑物高度的方法。该方法通过检测建筑物二次散射强度,同时获取目标方位角、入射角等参数以及相关介质特性等信息,根据后向散射几何光学模型估算建筑物高度。实验验证了对于相当一部分典型建筑物都能够获得较为理想的高程估计值,进而证明了该方法提取建筑物高度的可行性和有效性。

**关键词:**合成孔径雷达;后向散射特性;二次散射;高度提取

**中图法分类号:**P237.9

从合成孔径雷达(SAR)图像中提取建筑物的高度信息是城区遥感的重要应用之一,也是 SAR 图像信息提取领域的研究难点。现阶段通过 SAR 影像提取建筑物高度信息的研究主要有高分辨率雷达干涉测量技术<sup>[1]</sup>、立体 SAR 摄影测量技术<sup>[2,3]</sup>、SAR 影像多视处理方法<sup>[4]</sup>以及 SAR 影像模拟方法<sup>[5]</sup>等几个方向。以上这些高度提取的方法需要至少两幅以上同一地区的影像,且处理过程也较为复杂。

目前,仅通过单张影像要想实现建筑物高度提取仍具有相当的难度<sup>[6]</sup>。针对上述研究现状,本文将研究一种基于雷达后向散射特性,通过检测建筑物二次散射强度,测量系统参数及各种先验信息来提取建筑物高度的方法。

## 1 建筑物后向散射模型

国内外学者在基于 SAR 后向散射特性建筑物高度提取方面已经展开了理论模型和方法的研究。Franceschetti 等建立了城市建筑物几何及电磁特征模型,用于研究不同散射成分在总体后向散射中的贡献,同时探讨了成像场景参数特别是几何参数对建筑物散射特性的影响,并针对不同的应用目标为 SAR 成像参数的选取提出了指导

性建议<sup>[7]</sup>。Dong 等利用定量物理模型对建筑物在 SAR 影像中 3 种基本的散射机制进行了分析,比较了各种散射机制对总体后向散射相对贡献的大小,并利用 AIRSAR 机载数据进行了验证<sup>[8]</sup>。Brunner 等通过对建筑物模拟 SAR 影像和真实影像进行了比较和研究,通过迭代计算建筑物高度<sup>[11,12]</sup>。

城区典型建筑物的雷达后向散射机制按照其传播路径的不同主要划分为一次散射、二次散射和三次散射等 3 种。二次散射(double-bounce)是指先入射到墙体再经墙面反射到地面,再由地面反射回接收机。所有的二次散射回波能量都会在墙体与地面形成的二面角的底部位置发生叠加和汇聚,从而产生非常强的回波信号,在 SAR 影像中表现为极亮的条带。很多情况下建筑物的雷达散射截面(RCS)主要贡献来自于各种二次散射。这一现象在建筑物密集分布的城市区域尤为普遍,也是本文研究的重点。

Franceschetti 等对城区环境的电磁场模型包括基于典型建筑物的二次散射机理进行了全面深入的分析,提出了采用几何光学和 Kirchhoff 或物理光学近似求解的理论。根据文献<sup>[11]</sup>,二次散射的强度为:

$$\sigma \approx \frac{16\pi R_1^2 R_2^2 A^2 \sin^2 \theta \cos^8 \varphi \left[ \frac{\sin(k_0 L \sin \theta \sin \varphi)}{k_0 L \sin \theta \sin \varphi} \right]^2}{\lambda} \quad (1)$$

式中,  $R$  表示介质的菲涅耳反射系数;  $A$  是二面角的面积;  $L$  为入射建筑物墙面的边长;  $k_0$  表示波数;  $\theta$  为雷达波的入射角;  $\varphi$  为建筑物方位角, 定义为电磁波入射面与雷达方位向之间的夹角。

## 2 建筑物高度提取

本文在对建筑物 SAR 影像二次散射特性<sup>[9]</sup>研究的基础之上, 通过测量和获取二次后向散射强度、入射角、方位角以及介质参数等先验信息, 并对其进行分析和不断修正, 最后再根据后向散射几何光学(GO)近似解模型, 计算和求解建筑物的高度<sup>[8-9]</sup>:

$$h = \frac{8\pi^2 \cos^2 \theta \cdot \sigma^2 (2/L^2) \cdot \exp \left[ \frac{\tan^2 \theta \sin^2 \varphi}{2\sigma^2 (2/L^2)} \right]}{|S_{pq}|^2 \tan \theta \cos \varphi (1 + \tan^2 \theta \sin^2 \varphi)} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  表示二次散射对雷达散射截面的贡献量;  $S_{pq}$  代表散射矩阵的一个元素;  $p$  和  $q$  分别代表水平极化或垂直极化分量。本文实验数据为垂直极化(VV)模式, 那么根据文献[7],  $S_{vv}$  为:

$$S_{vv} = 2[R_{\perp}(\xi)R_{\parallel w}(\psi)\cos^2\theta\cos^2\varphi - R_{\perp}(\xi)R_{\perp w}(\psi)\sin^2\varphi]\cos\theta\sqrt{1+\tan^2\theta\sin^2\varphi} \quad (3)$$

式中,  $\psi$ 和 $\xi$ 分别表示雷达波在建筑物墙面上的

入射角以及地面的入射角;  $R$  为菲涅耳反射系数;  $R_{\perp}$  和  $R_{\parallel}$  分别表示地面处垂直极化和水平极化的反射系数;  $R_{\perp w}$  和  $R_{\parallel w}$  则表示墙体上垂直极化和水平极化的反射系数。

另外, 与地面和墙体材料特性相关的参数, 包括介质复介电常数  $\epsilon$ , 由  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  确定, 描述介质粗糙程度与电磁波长关系的随机过程  $\sigma$  和相关长度  $L$ , 也是影像计算的关键因素。为了便于计算, 本文假设墙面及其周围地面为平坦的并且由单一材料组成, 同时根据建筑物场景的特点及材料组成对以上参数值进行合理的估计和选择。

## 3 高分辨率星载数据实验

本文采用 TerraSAR-X 条带模式影像作为实验数据, 工作频率为 9.6 kHz, 分辨率为 3 m。实验区为西班牙第二大城市巴塞罗那南部港口区域, 该区域内有大量较为理想的工业建筑和大型厂房可用于实验。

实验首先选取 5 座建筑物  $B_1 \sim B_5$ , 通过微软 Bing Maps 获取的航拍影像以及相对应的雷达影像如图 1。建筑物的真实高度可参考 Google 地球提供的数据。实验采用 3 幅同一地区不同时间获取的雷达影像数据进行测量和计算, 图 1 中雷达影像获取时间为 2009-08-15, 3 景数据的成像参数基本一致。实验结果如表 1 所示。

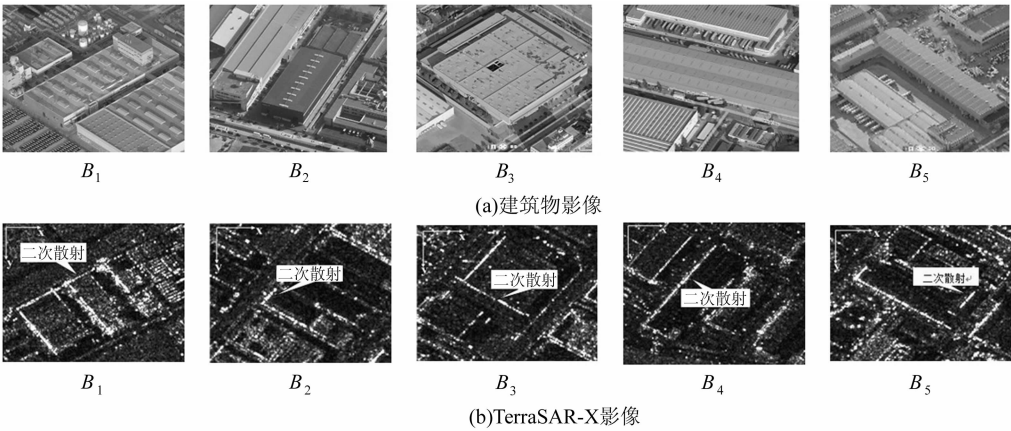


图 1 实验建筑物航拍影像( Bing Maps)以及 TerraSAR-X 影像( DLR/Infoterra)  
Fig. 1 Aerial Images( Bing Maps) and TerraSAR-X Images of 5 Buildings( DLR/Infoterra)

表 1 升轨数据实验参数及实验结果

Tab. 1 Parameters and Results of Ascending Data						
	$\varphi$	$\theta$	建筑物实际高度/m	实验结果/m		
				2009-08-15	2009-06-13	2009-05-30
$B_1$	56.9°	35.3°	26	26.5	36.6	37.6
$B_2$	35.1°	35.3°	11	6.8	11.9	10.9
$B_3$	55.5°	35.3°	12	15.6	14.8	13.5
$B_4$	35.0°	35.3°	13	3.4	2.3	2.1

对上述结果进行分析,通过航拍影像观察  $B_4$  及其周围场景不难发现,在  $B_4$  前方停留了很多装卸货物的卡车,并且墙面上有多扇呈开启状态的大门,这些状况都会很大程度地减弱建筑物的二次散射,很有可能成为造成  $B_4$  实验结果严重偏小的主要原因。

从另一个方向观察  $B_1$  如图 2(a) 所示,有 3 个较强散射体 A、B 和 C(金属水箱等)位于  $B_1$  墙体的两端,由图 2(b) 可以发现,这些散射体在 SAR 影像中产生了较强的旁瓣。旁瓣信号会对其相同方位向上分辨率单元的回波产生影响,并且旁瓣的位置和强度都是随机的,因此,会对墙体的二次散射有一定程度的影响。然后分别测量 3 幅影像如图 2(b) 中所示起点 S 到终点 E 这一段建筑墙面的二次散射强度值,如图 3 所示。3 幅影像的二次散射回波信号曲线非常接近,强度变化也非常相似,只是在图中圆圈标注的 3 个区域,08-15 的值要比其他两幅影像略高一些。这可能就是散射体 A、B、C 产生的旁瓣对建筑物二次散射回波造成的影响,从而使得  $B_1$  的结果变化较大并且不太稳定。

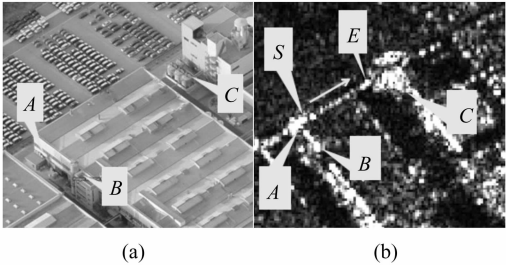


图 2 建筑物  $B_1$  的航拍影像和雷达影像  
Fig. 2 Aerial Image and SAR Image of  $B_1$

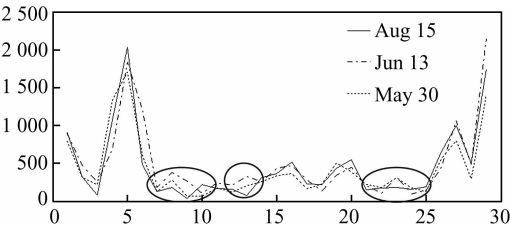


图 3  $B_1$  墙面二次散射回波强度  
Fig. 3 Double-bouncing Reflectivity of  $B_1$

升降轨道数据可以提供对同一目标不同视角以及不同方位角度的观测。本文再对同一建筑物在升轨影像和降轨影像中的高度进行估算,针对实验参数(如入射角或者方位角)的改变,观察实验结果是否会产生较大的变化。

建筑物  $B_6$ 、 $B_7$ 、 $B_8$  及  $B_9$  被选取作为实验对象。实验参数和结果如表 2 所示,对于同一建筑

物,升轨数据和降轨数据的入射角以及方位角都有一定的变化。实验结果显示,对于大部分的实验对象依然能够获得接近于建筑物实际高度的估计值。

表 2 升降轨道数据实验参数及实验结果

Tab. 2 Parameters and Results of Ascending and Descending Data							
建筑物实际高度/m		降轨数据			升轨数据		
		$\varphi$	$\theta$	$h/m$	$\varphi$	$\theta$	$h/m$
$B_6$	17	53.8°	33.8°	17.1	55.2°	35.3°	15.2
$B_7$	20	75°	33.8°	24.7	34.8°	35.3°	23.4
$B_8$	16	14.8°	33.8°	16.8	34.6°	35.3°	9.1
$B_9$	16	53°	33.8°	11.7	56.2°	35.3°	18.8

4 结 语

本文研究和利用基于雷达后向散射特性的方法,通过雷达二次散射回波信号强度等先验信息获取城区建筑物高度,并利用星载高分辨率数据进行实验,证明了其对于提取部分典型建筑物高程信息具有一定的可行性和有效性。现阶段的初步实验无法非常精确地获取计算所需建筑物以及周围场景的地面信息和介电参数,只能根据相关文献和资料对这些先验信息进行选取和估计,同时提出了一些简化计算的假设,会给实验和计算造成一定程度的影响。尽管如此,对于相当一部分实验对象还是获得了非常不错的实验结果。

致谢:本文所采用的高分辨率 SAR 影像测试数据由德国航天局(DLR)通过 DLR 的 AO 项目 LAN0634 提供。

参 考 文 献

[1] Stilla U, Soergel U, Thoennessen U. Potential and Limits of InSAR Data for Building Reconstruction in Built-up Areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003, 58(1): 113-123

[2] Simonetto E, Oriot H, Garelo R. Rectangular Building Extraction from Stereoscopic Airborne Radar Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10): 2 386-2 395

[3] 史文中,曹辉,张剑清. 基于高分辨率影像的城市三维建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(9): 783-787

[4] 徐丰,金亚秋. 多方位高分辨率 SAR 的三维目标自动重建(二):多方位重建[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 23-33

[5] 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):1 487-1 504

[6] 杨杰, 廖明生, 江万寿, 等. 从单幅雷达影像提取地面高程信息[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2000, 25(6):537-541

[7] 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

[8] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, et al. Accuracy of Building Height Estimation from SAR Images [C]. IGARRS 2006, Denver, Colorado, 2006

[9] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, et al. Building Feature Extraction via a Deterministic Approach: Application to Real High Resolution SAR Images [C]. IGARRS 2007, Barcelona, Spain, 2007

[10] Dong Y, Forster B, Ticehurst C. Radar Backscatter Analysis for Urban Environments[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6):1 351-1 364

[11] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L. Height Estimation of Man-made Structures Using Hybrid VHR Optical and SAR Imagery [C]. EARSeL Joint Workshop: Remote Sensing—New Challenges of High Resolution, Bochum, 2008

[12] Brunner D, Bruzzone L, Ferro A, et al. Analysis of the Reliability of the Double Bounce Scattering Mechanism for Detecting Buildings in VHR SAR Images [C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 2009

第一作者简介:刘康,博士生,现主要从事 SAR 影像处理、SAR 目标特征提取等方面的研究。  
E-mail:liukangelva@hotmail.com

# Investigation on Building Height Extraction via Radar Backscattering Characteristics in High Resolution SAR Images

LIU Kang<sup>1</sup>   Timo Balz<sup>2</sup>   LIAO Mingsheng<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)  
(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079 , China)

**Abstract:** Building characteristic information, especially building height extraction, is of great significance in urban remote sensing application. A method for building height determination via radar backscattering characteristics is studied, using only one spaceborne high-resolution SAR image. The building height can be evaluated by the strength of the double-bounce backscattering of a building, looking angle, orbit, and material parameters based on the geometrical optics (GO) backscattering model. The approach provides good results for typical buildings, indicating the validity of the proposed method. With the continuous development of high resolution SAR system, there are various possible applications in urban building characteristic extraction.

**Key words:** SAR(synthetic aperture radar); backscattering characteristics; double-bouncing; height extraction

About the first author: LIU Kang, Ph. D candidate, majors in SAR image processing and target feature extraction.  
E-mail: liukangelva@hotmail.com