DOI: 10.5846/stxb201309252361

钱瑶, 唐立娜, 赵景柱.基于遥感的建筑物高度快速提取研究综述.生态学报,2015,35(12):3886-3895. Qian Y, Tang L N, Zhao J Z.A review on building height extraction using remote sensing images. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12):3886-3895.

基于遥感的建筑物高度快速提取研究综述

钱 瑶,唐立娜*,赵景柱

中国科学院城市环境研究所,城市环境与健康重点实验室,厦门 361021

摘要:近年来我国城市化进程不断推进,不仅体现在城市面积上的增长,也体现在建筑物高度的增长。高度增长一方面能尽量 克服城市土地资源匮乏的瓶颈,另一方面为优化城市结构及城市功能做出贡献。在城市遥感研究领域,对于城市建筑物高度的 提取也成为研究的重点。城市建筑物高度的估计与测量,已成为城市规划和扩张、城市灾害风险预警与评估的重要参数,同时 也为数字城市三维模型的建立提供了基础测绘资料。分别基于光学遥感影像、高分辨率 SAR(Synthetic Aperture Radar)影像以 及光学遥感影像与高分辨率 SAR 影像的融合三方面,全面阐述城市建筑物高度的提取方法,并比较两类影像在提取建筑物高 度的优劣势,通过回顾早年研究方法,逐步引入近年来新的发展趋势。

关键词:城市高度;建筑物高度提取;光学遥感影像;高分辨率 SAR 影像

A review on building height extraction using remote sensing images

QIAN Yao, TANG Lina*, ZHAO Jingzhu

Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: The processes of Chinese urbanization are characterized by both horizontal expansion and vertical growth of buildings. Compared with urban surface expansion, urban height rising seems particularly important for sustainable urbanization. The vertical increase in buildings is helpful to reduce using land resources that are scare in China, and can contribute positively to the optimization of urban landscape structure and urban functions. Estimating and measuring building height has become one of the most significant factors in urban planning, urban expansion, urban disaster warning and assessing, as well as providing initial mapping data for creating three-dimensional (3D) digital city models. This paper reviews the methodologies of extracting building height, making use of various optical remote sensing images, VHR (Very High Resolution) SAR images, and the fusion of optical images and VHR SAR images. Then we summarize the advantages and disadvantages of the three techniques. When optical images are available, the shadows of buildings are often used to calculate building height. The accuracy of this technique varies tremendously depending on algorithms. Supervised classification method and edge detection method were widely used in recent years. In addition, the volumetric shadow analysis and areal shadow analysis also become more and more popular. If SAR images are available, the use of single VHR SAR image is an effective way to extract building height. Radar interferometry method, stereo-pair method, and quantitative analysis in electromagnetic intensity of backward scattering are also commonly used. Either optical or SAR images has its drawbacks for extracting building height. As a result, the fusion method that integrating optical images and SAR images are adopted, and it proves to be an accurate way of building height extraction. Apart from the accuracy of calculating building height, we need to take the other important elements into account, such as cost, complexities and application ranges in practice. Based on the comparisons of the three techniques mentioned above, we can also summarize the temporal progress

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41101143);全国生态环境十年(2000—2010年)变化遥感调查与评估专项课题(STSN-11-02) 收稿日期:2013-09-25; 网络出版日期:2014-07-02

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lntang@iue.ac.cn

in researches on building height extraction in the past decades and analyze the trend of future technical development in building height detection. With the improved monitoring methods, accumulated experience and innovated technologies, a low-cost, practical and accurate method on extracting building height will be found out in the near future. At last, paying more attention on building height also means paying more attention on urban height, and the expansion of urban height has an important effect on city's 3D expansion. For one thing, the vertical growth of cities is good at easing urban horizontal expansion pressure. For another, the increases in building height make it possible for maintaining city's compact spatial form.

Key Words: urban height; building height extraction; optical images; VHR SAR images

自 20 世纪 70 年代起,世界范围内的城市土地扩张速度普遍高于城市人口增长率,城市用地在急剧扩 张^[1]。1978 年以来,我国城市化进程突飞猛进,城市化率由 1978 年的 17.4%激增到 2011 年的 51.7%。城市 的横向水平扩张即建成区面积由 1978 年的 7438 km²快速增长到 2010 年的 38727 km^{2[2]}。占地面积小、人口 容量大、抗震性能高、实用性强的高层建筑的出现,为城市功能的优化和城市人口容量的提升带来了巨大的转 机^[3]。城市的纵向高度扩张在城市三维扩张中意义重大:一方面减缓城市水平面积的扩张速度,另一方面, 维持紧凑的城市空间形态。

将城市横向面积扩张和纵向高度增长进行综合考虑,有助于城市空间形态特征的研究和城市景观的模 拟^[4]。以城市高度扩张作为城市扩张研究的突破口,是近年来新出现的研究方向,为研究城市空间发展过程 和城市扩张驱动力因子提供了新的分析方法^[5]。城市高度的研究与城市建筑物的高度研究密切相关。芮建 勋认为城市建筑物高度影响着城市热力景观,从而影响城市的热场效应与城市的景观格局^[6]。张培峰等通 过研究城市建筑物在三维空间的变化特征,揭示城市改造过程中,建筑三维景观的演变规律与驱动机制,从而 预测其变化趋势,也为城市规划与管理的合理调整提供借鉴^[7]。

本文分别从三个方面综述了建筑物高度估测的研究进展,分别为基于光学遥感影像提取建筑物高度、基 于高分辨率 SAR 影像提取建筑物高度以及基于光学遥感影像与高分辨率 SAR 影像的融合对建筑物高度进行 提取,并总结了每种方法的精度、实现的难易程度和应用范围。

1 光学遥感影像的建筑物高度提取

在光学遥感影像中,对建筑物三维高度的提取,主要是通过激光测距、立体像对以及阴影测高来实现的。 立体像对与激光测距都需要采用特定的仪器来获取相应的数据,而阴影测高只利用单张高分辨率遥感影像, 建立建筑物与阴影的成像几何模型,简单便捷地实现高度的测量^[8]。

1.1 激光测高法与立体像对法

在激光测高时,通常使用专业的激光测距仪,例如美国奥卡 OPTi-LOGIC800HL,其测高精度为±1 m; TruyardSP800H 便携式激光测距仪,其精度范围也在1m内。

曹治国等通过立体像对法,利用具有准核线的 IKONOS 立体图像,同时考虑卫星高度角和方位角,利用几 何光学成像模型,快速计算建筑物顶部 13 对同名点的大地坐标,实现场景的快速三维重建,避免了 RPC (Rational Polynomial Coefficient)模型进行繁杂的迭代计算,不仅实现了计算上的优化,而且提高了获取的三 维坐标精度,但是在减少人工干预和提高自动化方面有待改善^[9]。

1.2 阴影测高法

随着高分辨率传感器,如:采用 CCD(Charge-Coupled Device)线阵列推扫成像模式的 SPOT 卫星、IKONOS 卫星,以及 QuickBird 卫星等相继发射,遥感影像的空间分辨率和波谱分辨率的不断升级,综合全色波段的高 空间分辨率和多光谱波段的高波谱分辨率的优势,进行数据融合,得到高清且易判读的遥感影像,从中获取建 筑物阴影,为建筑物高度的提取提供了有效保障。2013 年美国 Landsat8 卫星的发射,其卷云波段设计的波长

范围位于粘土矿物光谱反射的强吸收带,有利于建筑不透水面信息的区别^[10]。在 Landsat8 中,全色影像波长 范围的收窄有利于该影像上植被和非植被的区别。

阴影测高法提取建筑物高度,主要分为三类:分类法,阈值分割法,边缘检测法。

1.2.1 分类法

依据分类法提取建筑物阴影,通常有监督分类法与面向对象分类法。

监督分类法,杨志惠使用1m分辨率的IKONOS影像数据,以常州市新北区为研究样本,采用监督分类技术将遥感影像分为建筑物、阴影、道路、水域、林域及其他共六类^[11]。由于阴影内部相对均一,在平滑性、粗糙性、精细度和规则性方面与其他地物有明显区别,所以在阴影分类中融入了能量、熵和反差等纹理指数,以此提高阴影提取的精确度。

面向对象分类法,田新光使用1m分辨率多光谱影像,0.61m分辨率的QuickBird全色影像数据,以北京 城区为研究对象,基于模糊规则的决策树法,得到的建筑物高度的MSE 值为1.1486^[12]。

Ye 等使用 eCognition 商业软件对 SPOT 影像进行面向对象分类^[13]。由于难以区分水体和建筑物阴影,因此采用数据融合的手段,充分利用影像中的几何信息和光谱信息,通过多光谱波段中的近红外波段对水体的敏感性,再结合两者不同的形态特征,最终将建筑物阴影从影像中分割出来。

1.2.2 阈值分割法

在 20 世纪末与本世纪初,由于阈值分割法对信息提取的实用性与高效性,受到一致的好评与广泛的 应用。

20世纪80年代末, Irvin 与 Mckeown 使用航空影像建立建筑物高度与阴影之间的关系^[14]。随后, Cheng 与 Thiel 对 SPOT 全色图像运用阈值法, 分割阴影, 建立建筑物高度与阴影的几何模型, 结合高精度地形图去 除高程对结果的影响, 在对 42 座建筑物的高度提取中, 均方根误差仅为 3.69 m^[15]。1998年, Shettigara 与 Sumerling 提出在子象元级确定阴影边界的方法, 基于阈值分割提取更加准确的阴影轮廓^[16]。何国金等对 SPOT 影像采用数据融合的方法, 对北京市某区域的建筑物高度进行提取, 随之提出一种基于图像阴影特征 的城市建筑物高度分级及其分布信息自动生成技术, 将获取的建筑物高度信息用于蜂窝式电话网站的建 设^[17]。当遥感图像分辨率大于 5 m 时, 太阳方位角是影响测量长度与阴影实际长度差异的重要因素, 董玉森 等完善了前人忽略的关键元素, 在阴影与建筑物高度的模型中, 考虑了太阳方位角对高度估计的影响^[18]。

然而,阈值分割法的缺陷在于,一方面,难以消除一些噪声,如树木(绿化带)、水体(河流)、道路等的阴影。另一方面,阈值的选择难度较大,如果阈值偏低,则所检测出的边缘线较多,包含的虚假边缘也越多,得到的结果更容易受噪声的影响,包含的不相关信息也就越多;相反,如果阈值偏高,则会漏检边缘,遗失重要的信息,导致边缘的缺失和不完整,难以完成后续的高度估计。

1.2.3 边缘检测法

要避免漏检真实边缘,防止引入虚假边缘,降低对噪声的敏感程度,成为影响边缘检测的关键因素。边缘 检测的目的就是剔除不相关的信息,保留图像重要的结构属性,大幅度减少数据量。常见的边缘检测算子,包 括基于搜索的一阶导数表示法,如 Robert、Sobel、Prewitt 算子等,和基于零交叉的二阶导数表示法,如拉普拉斯 算子等。然而,以上算法虽简单易操作,但是在增强边缘和降低噪声之间的折中太过明显,在应用中的效果并 不理想。

1986年,Canny 在研究中开发出一种广泛适用的 canny 算子,以高斯平滑去噪声,计算亮度梯度值与方向,用滞后阈值跟踪边缘^[19]。他提出评价边缘检测算子性能优良的三条准则:①好的信噪比,即将非边缘点 判为边缘点的概率要低,将边缘点判为非边缘点的概率要低;②好的定位性能,即检测出的边缘点要尽可能在 实际边缘的中心;③对单一边缘要有唯一响应,即单个边缘产生多个响应的概率要低,并且虚假边缘响应应得 到最大抑制。在边缘检测法中,这种经典的 canny 算子是最优的阶梯型算法,具有较强的抗噪声干扰能力,能 够精确定位,并且获取较连续的阴影边缘。 李二森等基于投影误差原理与(摄影测量学)共线条件方程,利用单幅高分辨率遥感影像提取建筑物,就运用了 canny 算子检测建筑物边缘,其次进行 OPTA(One-Pass Thinning Algorithm)算法的边缘细化,最后以半自动的人工点击垂直边缘线附近的点,由改进的 Hough 变换提取垂直边缘线,并通过实验验证了方法的可行性^[20-21]。

1.3 光学影像的建筑物高度提取的新方法

近年来,基于光学影像对建筑物高度的获取,有了诸多新方向的发展趋势。

王媛媛等提出一种新的方法,根据空间水平直线全向成像的角度不变形原理,对正射航拍遥感影像与折 反射全向图像进行配准,最后提取建筑物高度^[22]。该方法在数据获取上便捷易行,GOOGLE EARTH 可以为 之提供免费且清晰的遥感影像;其建模过程简单,通过全自动化的方式能完成,减少人工成本;此外,所生成的 高清晰度的基于地面视角的建筑物三维模型,能更好的从中提取墙面纹理,进一步提高结果的精确性。

蒙印基于摄影测量的基本原理(灭点法),提出一种在已知影像内方位元素的前提下,根据已有 GIS (Geographic Information System)数据信息,从单张低空、大倾角航片中提取建筑物高度信息的方法^[23]。利用 该几何特性,可以求解影像的内外方位元素,恢复数码相机的空间姿态,根据地面已知点信息,从而获取建筑 物高度数据。结果表明:100 m 建筑物误差 1.85 m。

Lee 等基于体积阴影分析法 VSA(Volume Shadow Analysis)提出智能计算方案,实现建筑物高度提取的自动化与智能化^[24]。Licciardi 等利用属性滤波与图像的几何不变矩特征,对多角度高空间分辨率遥感影像进行建筑物高度的获取^[25]。Izadi 基于模糊推理对复杂轮廓建筑物进行高度提取,实验证明该方法对建筑物高度提取的精度高,航拍机载影像的建筑物高度平均误差为 0.15 m,星载影像的建筑物高度平均误差为 0. 27 m^[26]。

2 SAR 影像的建筑物高度反演

由于光学影像的传感器构造与人眼构造的相似性,以及成像机理的一致性,使得人们不必在图像解译上 花费过多的时间,并且对光学影像的分析、判别、理解与识别上一目了然。然而光学传感器是被动传感器,并 且,光学影像受大气、云层、天气的限制,在应急侦查,灾害检测方面不能快速响应,因此给测量工作带来诸多 不便。而 SAR 影像的传感器,是利用微波进行感知的主动传感器。微波与可见光、红外相比,其波长较长,发 生散射较低,可穿透云层和大气,能够全天时、全天候、多波段、多视角、多极化对地物进行观测。

随着科技成果的不断更新,机载 SAR 系统和星载 SAR 系统都朝着高分辨率的方向行进,国内外的 SAR 系统都在经历日新月异的变化。一方面,在机载 SAR 系统中,例如美国的 AIRSAR 系统,具有多个工作频段 和全极化的系统,是多基线干涉成像雷达。德国的 ESAR 系统,同时兼备单极化和多极化的系统。国内中国 科学院电子研究所等研究的机载 SAR 系统的分辨率也已优于 1 m。另一方面,在星载 SAR 系统中,由于 20 世纪 90 年代欧洲发射的 ERS-1 和 ERS-2 广泛应用,为世界各地的研究工作提供了大量的宝贵资料,推动遥 感技术的大力发展; 而近年来, SAR 技术朝着高空间分辨率的特点继续发展,如德国在 2007 年发射的 TerraSAR-X 卫星,同年意大利发射的 COSMO-SkyMed 卫星,以及加拿大的第一颗全极化民用卫星 Radarsat-2。这些卫星的发射与技术的进步,都为雷达遥感技术在城市中对细小目标进行更精细更准确的监测识别和应用 提取,奠定了坚实的基础。

2.1 利用 SAR 影像提取建筑物高度的主要途径

近年来,利用 SAR 影像提取建筑物高度的途径主要分为:单幅高分辨率影像的提取,立体像对的反演方法,基于雷达干涉数据 InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)的测量方法,以及近年来大力发展的电磁后向散射强度的定量化分析对建筑物高度的获取。

2.2 单幅高分辨率影像的提取

傅兴玉等基于单幅 SAR 影像中建筑物不同的电磁散射类型,提出一种利用建筑物三维 CAD 模型对 SAR

中建筑物特征区域进行图像仿真的方法,并通过二次散射信息、叠掩信息、阴影信息确定建筑物的位置、方向 以及屋顶的类型,最后提出一种基于分布密度函数差异的匹配度函数,最终将获得的最优匹配值作为建筑物 的高度值^[27-29]。该方法利用 SAR 成像几何结构与不同散射区域之间的空间位置关系,克服 SAR 产生的斑点 噪声与建筑物所在区域内的其他强散射体的干扰,如空调、铝合金边窗等。

2007年,Brunner等研究关于入射角与方位角对二次散射区域划分的影响,经过试验证明以 HH 极化和 40°至 50°的入射角进行观测更能描绘出阴影区域及叠掩区域^[30]。2008年,Brunner等提出以一种"hypothesis generation-rendering-matching(假设-模拟成像-匹配)"方法,利用米级分辨率的 TerraSAR-X 提取建筑物高度,并分别对平顶建筑物、人字顶建筑物以及 Pyramid 进行高度反演,证实了该方法对于获取在形状和尺寸上存 有差异的建筑高度,具备一定潜力^[31]。2010年,其分别利用两个亚米级高分辨率机载和两个米级分辨率的 星载 TerraSAR-X 卫星,同时对德国 Dorsten 地区的 40 座建筑物进行高度测量,结果显示,对于平顶建筑物而 言,通过星载卫星所提取的高度优于机载影像;然而,对于人字顶建筑物而言,结论则是相反^[32]。

邹斌等认为,SAR 影像受相干斑的干扰,传统的边缘提取算法无法有效确定建筑物的叠掩区域及阴影区 域的位置,在通过二次散射定位的基础上,采用线灰度累加法,根据累加的灰度值来判别阴影与叠掩^[33]。蒋 李兵等通过正交投影模型实现模型假设的快速生成,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,并使用模拟和机载 SAR 图像的试验验证了算法的有效性^[34]。

然而,利用单幅 SAR 影像的成像几何关系对建筑物高度的恢复存在一定误差的原因:确定二次散射区域、阴影区域、叠掩区域的位置有误差,会导致高度提取的误差;推导公式时引入近似,也会产生误差。

2.3 立体像对的反演方法

与光学影像中的立体测量类似,SAR 影像也能通过立体像对实现建筑物高程的估计。同侧观测:对同一 目标建筑物进行同方位的观测,利用不同的入射角成像^[35]。异侧观测:通过升降轨道的数据,为观测者提供 同一目标建筑物多视角以及多方位的观测数据。

Leberl 认为一般对于同侧观测来说,入射角的变化越大,两幅 SAR 影像的相似性就越低^[36]。在同方位的 同侧观测中,Simonetto 认为平行轨迹所记录的影像像对是通过不同的入射角(或视场角)来实现雷达摄影测 量的立体像对的分析^[37]。随后,在2005年,分别以同方位两个不同的入射角10°和30°,进行矩形建筑物高度 反演,结果显示,两者分别与测高理论值的精度相近,从而验证方法的可行性^[38]。Soergel 认为机载雷达系统 比星载雷达系统的入射角大,在高楼林立的 CBD 地区,能降低建筑物成像时的相互遮挡,避免造成叠掩区域 或阴影区域的相互重叠,从而干扰建筑物高度反演的效果,尽可能的减小误差^[39]。因此在这方面,机载雷达 比星载雷达更有优势;除此之外,他还认为异侧观测比同侧观测,在建筑物高度估计中更具备优势。徐丰以日本东北大学校园为研究对象,采用 CFAR(Constant False Alarm Rate)检测,利用 Hough 变换和同名点方法,将 Pi-SAR 采集的四个基本方位(90°、270°、0°、180°)影像进行处理,并建立基于多方位的新的迭代配准模型^[40]。 2.4 基于雷达干涉数据(InSAR)的测量方法

雷达干涉测量基于时间测距的成像原理,利用雷达回波信号所携带的相位信息,对同一目标建筑物对应 的两个回波信号之间的相位差,结合观测平台的轨道参数等,获取高精度的信息。InSAR 影像像对的基线要 求比较短,但是对数据获取的时间间隔和系统参数和数据处理方面要求十分严格^[41]。

早在 2000 年, Gamba 等将 InSAR 数据应用于计算机视觉技术中, 拉开了雷达干涉测量技术提取城市高大 建筑的序幕^[42]。Tison 基于 InSAR 影像进行建筑物阴影的提取, 反演建筑物的形状与高度^[43]。由于单干涉 图法测量建筑物高度时缺陷在于无法克服相位解缠问题, 因而, Wegner 等则基于 InSAR 影像和光学影像的融 合, 利用光学影像, 解决相位解缠的模糊性, 尤其是针对非常高的建筑物或者低矮建筑物的高度提取十分有帮 助^[44]。实验中, 他使用 0.31 m 分辨率的航拍正射影像, 以及相同分辨率的机载 InSAR 数据, 测量建筑物的高 度, 结果显示高度均差为-2.8 m。Thiele 直接运用 InSAR 信息, 提取同一建筑对应的两个回波信号之间的相 位差, 并结合观测平台的轨道参数等, 获取建筑物高度信息^[45]。此外, Thiele 等融合 GIS 数据与 InSAR 影像 对三维建筑物的重建,GIS 数据提供二维建筑物底部轮廓线,InSAR 数据获取建筑物高程信息^[46]。

然而,采用 InSAR 的缺陷在于,建筑物阴影包含了屋顶部分的长度,使得建筑物高度提取的难度增加、精度降低。使用雷达干涉测量与 SAR 的立体像对测量都需要至少两幅影像才能进行建筑物高度估计,不如单幅 SAR 简单实用^[47]。

2.5 电磁后向散射强度的定量化分析

Dong 等认为,在城市中,根据后向散射机制的不同,采用极化分解技术,将城市建筑物与地表的后向散射 类型分为最基本的三类:一次散射、二次散射、三次散射^[48]。经过试验,证明一次散射和二次散射在城市建筑 物后向散射回波中的贡献占主导地位,而由于三次散射自身的低普遍性和散射强度偏弱的特性,使得三次散 射的贡献占辅助地位。

Franceschetti 等通过构建雷达散射横截面(RCS)反射模型,以地表粗糙度、介电常数等场景参数以及雷达 飞行轨迹等雷达参数作为先验信息,建立几何参数与电磁后向散射模型,将电磁后向散射模型与 GO (Geometric Optic)、PO(Physical Optic)相结合,对 SAR 影像中建筑物二次散射回波进行定量分析,并提出建 筑物高度的计算方法(公式1),与此同时,使用经验性灵敏度分析,考虑到不完整的参数信息对最终结果的负 面影响,引入乘性校正常数(multiplicative calibration constant)减小误差,最后用高分辨率机载 SAR 数据进行 试验,验证了此方法对建筑物高度的获取的可靠性与有效性^[49-50]:

$$H = |\sigma^{\circ}| \frac{8\Pi \cos^{2}\theta \cdot \sigma^{2} \left(\frac{2}{L^{2}}\right) \cdot \exp\left[\frac{\tan^{2}\theta \cdot \sin^{2}\varphi}{2\sigma^{2} \left(\frac{2}{L^{2}}\right)}\right]}{|s_{pq}|^{2}l \cdot \tan\theta \cdot \cos\varphi \cdot (1 + \tan^{2}\theta \cdot \sin^{2}\varphi)}$$
(1)

式中, H代表建筑物实际高度; σ °代表二次散射对 RCS 的贡献值; S_{pq} 代表散射矩阵的一个元素,其中, p和 q分别为水平极化和垂直极化; θ 代表雷达入射角; φ 代表建筑物方位角(即电磁波入射面与雷达方位向的夹角); L代表建筑物墙面的边长。

例中,以5种不同的建筑物方位角:20°、25°、30°、35°、40°,对实际高度为20m的建筑物进行高度的反演。 当 $\Delta\sigma$ =0.019m或-0.019m时,比较理论的期望值与计算的估测值之间的差异,即:当 $\Delta\sigma$ =0.019m时,建筑 物高度在理论上的MSE=0.3864,而估测值的MSE=2.2735;当 $\Delta\sigma$ =-0.019m时,建筑物高度在理论上的MSE =0.3864,而估测值的MSE=1.2972。

Guida 等也通过构建几何与电磁散射的模型,对建筑物高度参数进行反演,并验证了二次散射对建筑物高度估计的重要意义,最终将有效结果推广、应用到真实影像中^[51]。

3 基于 SAR 影像与光学影像的融合提取建筑物高度

SAR 在成像过程中,地物目标在方位向上按飞行的时序记录成像,在距离向上按地物目标返回信号的先 后顺序记录成像,几何畸变更严重。此外,SAR 影像与光学遥感影像不仅在成像过程中有区别,而且,两者的 成像方式也有所不同,SAR 是通过获得相干电磁波的后向散射信号来成像的。相干成像方式固有的斑点噪 声导致影像的分辨率和图像的结构性信息量降低,统计分布也不同于普通光学图像。例如,常见的边缘检测 或图像分割法,如果直接应用于 SAR 图像,易检出大量的孤立像素。而光学遥感影像也存在弊端,正如上节 所述的受天气、光照影响严重。因此,考虑将两者融合,扬长避短,各自发挥其优势,从而提取更加精确的 数据。

Tupin 等充分利用光学数据与 SAR 数据的互补性,从光学影像中提取建筑物底部轮廓线,从米级分辨率 SAR 影像中获取建筑物高程信息,并提出一种新的方法"height hypothesis-characteristic areas generation-likelihood maximization(高度假设-特征区域形成-最大似然法)"^[52]。Sportouche 等以法国 Marseille 地区的两 个场景为研究对象,利用分辨率为 0.68 m 的 QuickBird 数据和分辨率为 1.1 m 的 Terra SAR-X 数据,通过 QuickBird 提取光学影像中建筑物的底部轮廓线,将其投影到 Terra SAR-X 所获得的 SAR 影像中,提出"height

hypothesis-partitioning generation-criterion optimization(高度假设-统计分区-标准最优化)"的方法,结合辐射标 准与统计标准,以半自动化的方式估计建筑物高度^[53]。实验结果:场景1建筑物高度测量的 RMSE 值为 1.34 m,场景2建筑物高度测量的 RMSE 值为 0.85 m。且建筑物高度并未出现任何过高或过低估计的趋势。

融合的优势在于:(1)SAR 影像中建筑物边缘形成的 L 型亮线或 1 型直线亮线,为光学影像提取建筑物 边界的范围提供了保障;(2)光学影像无叠掩现象,可为 SAR 提取精确的建筑物底部轮廓线提供保障^[54]。然 而在成本控制与实现的难易程度方面需要有所突破。

4 城市建筑物高度提取方法比较分析

提取城市建筑物高度的方法可以概括为3种,分别是基于光学遥感影像、SAR影像以及光学与SAR影像 的融合(表1)。通过陈述不同方法的精度特征、实现的难易特征以及应用特征,从而比较提取建筑物高度方 法的优劣势,为选择合适的精度、成本或应用等要求提供数据基础。其中,实现的难易程度包括数据获取的难 易程度,时间成本、价格成本的高低程度,数据处理的难易程度,如:专业技术人员的操作熟练程度、算法的复 杂程度等。

对于光学遥感影像而言,首先,在提取精度方面,正射航拍遥感影像与折反射全向图像配准法的精度较高,但是航拍遥感影像较难获取,折反射全向图像必须由自行研制的折反射全向成像系统获取;激光测高的精度也较高,然而花费的人工成本较大,且无法针对城区大范围建筑物的高度进行大面积提取,因此一般情况下,两者的实用度不高,普及度也不高。其次,从成本与数据处理的难易程度来看,阴影法中的分类法、阈值法以及边缘检测法目前都有比较简易的数据处理程序,且成本相对较低。再次,在应用范围方面,阴影法针对大尺度的城区,可对较大范围内的建筑物进行大面积的高度提取,有利于数字化城市的发展,尤其是边缘检测法,精度较高,而且成本方面比较经济、合理,因此,实用性非常显著。

对于 SAR 影像而言,首先在提取精度方面,无论是星载 SAR 影像还是机载 SAR 影像,分辨率越高就代表 提取的精度越高,同时也意味着成本的增加。其次,在人工成本的高低方面,机载 SAR 影像比星载 SAR 影像 的价格高的多。最后,就获取数据的难易程度来说,机载的 SAR 影像比星载的 SAR 影像较难获取。基于单幅 高分辨率 SAR 影像提取建筑物高度是目前 SAR 领域运用最多的方法之一,与立体相对法、干涉测量法相比, 只需要一幅影像即可;同时在算法上更加简易。当针对几栋建筑物的小尺度研究时,电磁后向散射强度的定 量化分析法方法精度较高。

对于光学遥感影像与 SAR 影像的融合方法,其提取精度较高,不仅能针对大尺度的城区建筑群,而且在 提取小尺度的几栋建筑物高度方面,都能实现良好的信息获取,但其应用成本、数据处理的综合难易程度与上 述两种方法相较而言,略显劣势。从互补角度上看,一方面 SAR 影像由于侧视成像导致的几何畸变,以及相 干成像方式的固有斑点噪声使得图像清晰度降低,此时,通过光学图像的中心投影方式,可以避免产生叠掩等 图像变形,为测量建筑物高度提供清晰的底部轮廓线。另一方面,SAR 的主动微波遥感方式,弥补了光学遥 感在恶劣天气下不能成像或成像模糊的弊病,因此,融合法能够充分利用两者的互补性,扬长避短。

此外,在研究中还发现:对平顶建筑与三角顶建筑物的高度测量结果进行比较,表明平顶建筑物的高度估 计结果优于后者,说明复杂外形的建筑物高度估计仍亟待改善。

另外,本文中的精度与实现难易程度是根据具体的应用与特定的数据源或仪器所决定,同一种方法,在不同分辨率的数据源或不同精度专业仪器测量下,得到的结果不尽相同,实现难易程度也不尽相同。在不同的 实验精度要求或所受现状的制约下,往往依照方法的难易程度,选择符合要求的数据源及测量方法。

建筑物高度的测量为城市灾害监测提供了基本测绘资料,如检测地震对建筑物的损毁程度时,利用灾情 发生前后获取的影像,比对分析,有力保障灾后重建工作的开展。不仅如此,城市建筑物高度的反演也为建筑 物三维模型的建立与数字化城市的建设提供了基础参数。因而,一方面确保建筑物高度提取的精度,另一方 面,提高应用价值,降低研究成本,最后实现遥感技术在建筑物高度提取以及建筑物三维重建上的大面积推

广,为城市高度的反演和城市的高度扩张奠定研究基础。

Table 1 Methods and applications of extracting building height				
提取方法 Methods	数据源/专业仪器 Data/Instruments	精度 * Accuracy	实现难易程度* Complexity	应用 Applications
激光测高法 Laser measuring	美国奥卡 OPTi-LOGIC800HL	盲同	难	仅单个建筑物
光学遥感影像的立体像对法 Stereo-pair with optical images	IKONOS 卫星立体像对大小为 400×400的局部影像	高	中	单个建筑物及区域建筑群
阴影法 分类法 面向对象 Shadows Classification	0.61 m 全色波段, 1 m 多光谱波 段的 QuickBird 影像	中	易	北京城区
监督分类 Supervised classification	1 m 全色波段,4 m 多光谱波段 的 IKONOS 影像	中	易	常州市新北区
阈值分割法 Threshold segmentation	ALOS PRISM level 1B2 和 AVNIR-2 level 1B2(多光谱分辨 率 10 m/景,全色分辨率 2.5 m/ 景)	中	易	天津市塘沽地区 31 座建筑
边缘检测法 Edge detection	4 m 全色数据"北京一号"	中	易	北京望京地区
正射航拍遥感影像与折反射全向图像配 准法 Image registration of aerial images and catadioptric omni-directional images	正射航拍遥感影像,折反射全向 图像	言同	难	单个建筑物
灭点法 Vanishing point	单张低空、大倾角航片及数码相 机拍摄影像	言同	X住	单个建筑物
单幅 VHR SAR 影像法 Single VHR SAR image	亚米级高分辨率机载 SAR 影 像,米级分辨率的星载 TerraSAR-X 影像	低	中	6 栋平顶建筑物、27 栋人字顶 建筑物以及 7 栋其他顶建筑物
VHR SAR 影像的立体像对法 Stereo-pair with VHR SAR images	4 个不同方位(90°、270°、0°、 180°)Pi-SAR 影像	中	中	日本东北大学校园
雷达干涉测量法 InSAR method	0.31 m 航拍正射影像,以及相同 分辨率的机载 InSAR 数据	言同	中	德国 Dorsten 地区
电磁后向散射强度的定量化分析法 Electromagnetism back scattering	高分辨率 SAR 影像	低	中	单个建筑物
"高度假设-统计分区-标准最优化"法 Height hypothesis-partitioning generation- criterion optimization	0.68 m的 QuickBird 数据和 1.1 m的 Terra SAR-X 数据	中	中	法国 Marseille 地区,两个场景

表1 提取建筑物高度的方法与应用

*高:相对误差≤3%;中:3%<相对误差≤6%;低:相对误差>6%;易:数据获取与数据处理简单,成本(时间成本、价格成本)较低;难:数据 获取与数据处理复杂,成本(时间成本、价格成本)较高;中:数据获取、数据处理及成本处于上述两者之间

参考文献(References):

- [1] Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, Reilly M K. A meta-analysis of global urban land expansion. PLoS One, 2011, 6(8): e23777.
- [2] 赵景柱, 宋瑜, 石龙宇, 唐立娜. 城市空间形态紧凑度模型构建方法研究. 生态学报, 2011, 31(21): 6338-6343.
- [3] 权瑾.历史环境下城市高度控制体系研究——以西安曲江新区为例 [D].西安:西安建筑科技大学, 2009.
- [4] 罗谷松,孙武,李国,纪芸,王义明.广州建成区三维城市模型的构建及其高度分布特征.热带地理,2008,28(6):523-528.
- [5] Shi L Y, Shao G F, Cui S H, Li X Q, Lin T, Yin K, Zhao J Z. Urban three-dimensional expansion and its driving forces -a case study of

Shanghai, China. Chinese Geographical Science, 2009, 19(4): 291-298.

- [6] 芮建勋.上海市高层建筑的城市热力景观效应研究.地理与地理信息科学,2007,23(1):104-108.
- [7] 张培峰, 胡远满, 熊在平, 刘淼. 基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析. 生态学报, 2011, 31(23): 7251-7260.
- [8] 高翔, 赵冬玲, 张蔚. 利用高分辨率遥感影像获取建筑物高度信息方法的分析. 测绘通报, 2008, (3): 41-43.
- [9] 曹治国, 陈华. IKONOS 卫星图像的快速三维场景重建. 计算机与数字工程, 2006, 34(11): 9-11, 15-15.
- [10] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat8 遥感影像新增特征及其生态环境意义. 生态学报, 2013, 33(11); 3249-3257.
- [11] 杨志惠. 从 IKONOS 影像中提取建筑物的高度 // 第十三届华东六省一市测绘学会学术交流会论文集. 南京, 2011: 120-123.
- [12] 田新光, 张继贤, 张永红. 利用 QuickBird 影像的阴影提取建筑物高度. 测绘科学, 2008, 33(2): 88-89, 77-77.
- [13] Ye Z W, Deng C B, Gong H L. Acquiring height distribution information about high-rises in Beijing using shadow in Spot-5//Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Classification of Remote Sensing Images. International Society for Optics and Photonics, 2008: 71470S-12.
- [14] Irvin R B, Mckeown D M. Methods for exploiting the relationship between buildings and their shadows in aerial imagery. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(6): 1564-1575.
- [15] Cheng F, Thiel K H. Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT-Image-Part 1. Test of forty-two buildings. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(3): 409-415.
- [16] Shettigara V K, Sumerling G M. Height determination of extended objects using shadows in SPOT images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, 64(1): 35-44.
- [17] 何国金,陈刚,何晓云,王威,刘定生.利用 SPOT 图像阴影提取城市建筑物高度及其分布信息.中国图像图形学报 A 辑, 2001, 6(5): 425-428.
- [18] 董玉森, 詹云军, 杨树文. 利用高分辨率遥感图像阴影信息提取建筑物高度. 咸宁师专学报, 2002, 22(3): 93-96.
- [19] Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [20] 李二森,张保明,邱志斌,李宝峰.高分辨率航空影像建筑物垂直边缘线提取技术研究.测绘工程,2010,19(5):15-19.
- [21] 李二森,张保明,郭海涛.基于单张航片确定人工地物高度技术的研究.海洋测绘,2006,26(5):61-64.
- [22] 王媛媛, 陈旺, 张茂军, 王炜, 徐玮. 折反射全向图像与遥感图像配准的建筑物高度提取算法. 计算机应用, 2011, 31(9): 2477-2480.
- [23] 蒙印. 单像片建筑物高度信息提取 // 中国测绘学会 2006 年学术年会论文集. 北京: 中国测绘学会, 2006.
- [24] Lee T, Kim T. Automatic building height extraction by volumetric shadow analysis of monoscopic imagery. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(16): 5834-5850.
- [25] Licciardi G A, Villa A, Dalla Mura, M, Bruzzone L, Chanussot, J, Benediktsson, J A. Retrieval of the height of buildings from WorldView-2 multi-angular imagery using attribute filters and geometric invariant moments. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(1): 71-79.
- [26] Izadi M, Saeedi P. Height estimation for buildings with complex contours in monocular satellite/airborne images based on fuzzy reasoning // Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Image Processing. Hong Kong: IEEE, 2010; 4293-4296.
- [27] 傅兴玉, 尤红建. 高分辨率 SAR 图像建筑物三维成像几何结构分析. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 469-473.
- [28] 傅兴玉, 尤红建, 付琨, 张翰墨. 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): 394-398.
- [29] 傅兴玉, 尤红建, 付琨. 单幅高分辨率 SAR 图像建筑物三维模型重构. 红外与毫米波学报, 2012, 31(6): 569-576.
- [30] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L. Extraction of building heights from VHR SAR imagery using an iterative simulation and match procedure // Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA: IEEE, 2008: 141-144.
- [31] Brunner D, Lemoine G, Fortuny J, Bruzzone L. Building characterisation in VHR SAR data acquired under controlled EMSL conditions // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE, 2007: 2694-2697.
- [32] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L, Greidanus H. Building height retrieval from VHR SAR imagery based on an iterative simulation and matching technique. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1487-1504.
- [33] 邹斌,许可,张腊梅,李慧君. SAR 图像建筑物三维信息提取方法研究. 雷达科学与技术, 2009, 7(2): 95-101.
- [34] 蒋李兵, 王壮, 雷琳, 郭炜炜, 郁文贤. 基于模型的单幅高分辨 SAR 图像建筑物高度反演方法. 电子学报, 2012, 40(6): 1086-1090.
- [35] 张风丽, 邵芸. 城市目标高分辨率 SAR 遥感监测技术研究进展. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 415-422.
- [36] Leberl F. Radargrammetric SAR Image Processing, Artech House, Norwood, Mass. 1989.
- [37] Simonetto E, Oriot H, Garello R, Le Caillec J. Radargrammetric processing for 3-D building extraction from high-resolution airborne SAR data // Proceedings of IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE, 3: 2002-2004.

- [38] Simonetto E, Oriot H, Garello R. Rectangular building extraction from stereoscopic airborne radar images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10): 2386-2395.
- [39] Soergel U, Michaelsen E, Thiele A, Cadario E, Thoennessen U. Stereo analysis of high-resolution SAR images for building height estimation in cases of orthogonal aspect directions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(5): 490-500.
- [40] Xu F, Jin Y Q. Automatic reconstruction of building objects from multi-aspect meter-resolution SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2336-2353.
- [41] 廖明生,林珲. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003.
- [42] Gamba P, Houshmand B, Saccani M. Detection and extraction of buildings from interferometric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 611-618.
- [43] Tison C, Tupin F, Maitre H. A fusion scheme for joint retrieval of urban height map and classification from high-resolution interferometric SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2): 496-505.
- [44] Wegner J D, Hänsch R, Thiele A, Soergel U. Building detection and height estimation from high-resolution InSAR and optical data // Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2010: 1928-1931.
- [45] Thiele A, Cadario E, Schulz K, Thoennessen U, Soergel U. Building recognition from multi-aspect high-resolution InSAR data in urban areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3583-3593.
- [46] Thiele A, Hinz S, Cadario E. Combining GIS and InSAR data for 3D building reconstruction // Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2010: 2418-2421.
- [47] 朱俊杰,丁赤飚,尤红建,胡岩峰,付鲲.基于高分辨率 SAR 图像的建筑物高度提取.现代雷达, 2006, 28(12): 76-79.
- [48] Dong Y, Forster B, Ticehurst C. Radar backscatter analysis for urban environments. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6): 1351-1364.
- [49] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, Riccio D, Ruello G. Building feature extraction via a deterministic approach: Application to real high resolution SAR images // Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE, 2007; 2681-2684.
- [50] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, Riccio D, Ruello G. Accuracy of building height estimation from SAR images // Proceedings of the IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, CO, USA: IEEE, 2006; 3647-3650.
- [51] Guida R, Iodice A, Riccio D. Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2967-2979.
- [52] Tupin F. Merging of SAR and optical features for 3D reconstruction in a radargrammetric framework // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2004: 395-398.
- [53] Sportouche H, Tupin F, Denise L. Extraction and three-dimensional reconstruction of isolated buildings in urban scenes from high-resolution optical and SAR spaceborne images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3932-3946.
- [54] 张波,王超,张红,吴樊. SAR 影像建筑物提取与高度反演研究综述. 遥感技术与应用, 2012, 27(4): 496-503.