

高分辨率卫星影像的城市建筑物高度反演技术

杨 俊

四川中水成勘院测绘工程有限责任公司 四川 成都 610000

【摘要】：高分辨率卫星影像凭借高空间细节捕捉能力，成为城市建筑物高度反演的关键数据源，其技术优化对提升城市三维建模精度、助力城市规划与管理具有重要意义。该技术通过提取影像中的几何、辐射等特征，结合传感器参数与地面控制信息，构建反演模型以计算建筑物高度。当前技术在复杂建筑密集区易受遮挡影响，导致反演误差较大，需通过改进特征提取算法与优化模型参数来解决。优化后的技术可有效降低误差，更好满足城市建设中对建筑物高度数据的精准需求，为城市相关工作开展提供可靠数据支撑。

【关键词】：高分辨率卫星影像；城市建筑物；高度反演；反演模型；精度优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.16.081

引言

高分辨率卫星影像的城市建筑物高度反演技术，是衔接卫星遥感数据与城市三维空间信息的重要桥梁，其发展直接影响城市空间分析、基础设施规划等工作开展质量。城市建筑物高度作为城市形态的核心指标，传统测量方法如实地测绘，存在覆盖范围小、耗时耗力的局限，难以适应大规模城市数据获取需求。高分辨率卫星影像凭借广覆盖、高时效的优势，为建筑物高度反演提供了新路径，但在实际应用中，影像噪声、地形差异等因素会干扰反演结果，如何突破这些技术瓶颈，提升反演稳定性与准确性，成为推动城市遥感应用深化的关键方向，也为后续技术研究与实践应用奠定基础。

1 城市建筑物高度反演的技术需求与现存问题分析

1.1 城市发展对建筑物高度数据的多场景需求阐述

城市规划过程中，建筑物高度数据是确定容积率、规划公共空间布局的核心依据，例如在商业区建设规划中，需依据周边建筑物高度合理设计新建筑层数，避免遮挡与空间拥挤；城市灾害风险评估工作里，建筑物高度影响洪水淹没范围预测、地震灾害应急救援路线规划，准确的高度数据可提升灾害应对预案的科学性。城市生态监测中，建筑物高度与城市热岛效应分布密切相关，通过高度数据能分析建筑密集区的热环境变化，为生态调控提供数据支撑，这些不同场景的需求均对建筑物高度数据的精度与获取效率提出了较高要求。

1.2 传统建筑物高度测量方法的局限性梳理

传统实地测绘方法依赖测量人员携带专业设备到现场采集数据，在城市中心建筑密集区域，受交通拥堵、建筑物遮挡等因素影响，测量工作难以高效推进，且单次测量范围通常局限于几个街区，无法快速获取整个城市的建筑物高度数据。航空摄影测量虽覆盖范围较广，但受天气条件影响大，阴天、大风等天气会导致拍摄工作延误，且数据处理周期长，难以满足城市建设中对高度数据的实时性需求。传统方法的测量成本较高，大规模应用时会增加城市管理经济负担，这些局限性使

得传统方法难以适应现代城市快速发展的需求。

1.3 高分辨率卫星影像反演技术面临的核心问题剖析

高分辨率卫星影像在反演建筑物高度时，首先面临的是影像遮挡问题，城市中高层建筑相互遮挡，会导致部分建筑物影像信息缺失，尤其是建筑物底部与顶部边缘细节模糊，影响特征提取的完整性；其次，影像噪声干扰较为明显，卫星传感器在成像过程中受大气散射、电子噪声等因素影响，影像中会出现杂点、条纹等噪声，干扰几何特征与辐射特征的准确提取；另外，传感器参数与地面实际地形的匹配偏差也会影响反演结果，不同卫星传感器的轨道参数、成像角度存在差异，若参数校正不准确，结合地形数据时易产生误差，导致反演的建筑物高度与实际高度偏差较大。

2 高分辨率卫星影像的特征提取技术与优化策略

2.1 卫星影像几何特征提取的关键技术要点

高分辨率卫星影像的几何特征提取主要针对建筑物的边缘、角点、纹理等信息，边缘提取常采用 Canny 算子、Sobel 算子等方法，其中 Canny 算子通过多尺度高斯滤波抑制噪声，再利用双阈值法检测边缘，能有效捕捉建筑物的轮廓边缘；角点提取则采用 Harris 角点检测算法，通过计算影像像素点的灰度变化，识别建筑物转角、屋顶拐点等关键角点，为后续高度计算提供几何参考。在提取过程中，需结合卫星影像的空间分辨率调整算法参数，例如针对 1 米分辨率影像，需将高斯滤波标准差设置在合适范围，以平衡噪声抑制与边缘细节保留的效果。

2.2 影像辐射特征与建筑物高度的关联性分析

卫星影像的辐射特征主要包括像素灰度值、反射率等，这些特征与建筑物高度存在间接关联。建筑物不同高度区域受光照角度影响，辐射特征存在差异，例如建筑物顶部受直射光照，反射率较高，灰度值较大，而建筑物底部因阴影遮挡，反射率较低，灰度值较小。通过建立辐射特征与高度的关联模型，可利用灰度值差异辅助判断建筑物高度范围。不同材质的建筑物

表面对电磁波的反射特性不同,例如金属屋顶与混凝土墙面的反射率存在明显差异,在辐射特征提取时需考虑材质因素的影响,通过分类处理减少材质差异对高度反演的干扰。

2.3 特征提取算法的优化方向与实践路径

针对传统特征提取算法在复杂场景下精度不足的问题,可引入深度学习技术进行优化,例如采用卷积神经网络(CNN)构建特征提取模型,通过大量城市卫星影像样本训练网络,使模型能自动学习建筑物的复杂特征,提升遮挡区域、噪声干扰下的特征提取精度。在实践中,需构建多样化的训练数据集,涵盖不同城市地貌、不同季节的卫星影像,以增强模型的适应性;结合迁移学习方法,利用已训练成熟的网络模型参数,减少新模型的训练时间与数据需求,加快优化算法的实际应用进程,还需通过对比实验验证优化算法的效果,不断调整网络结构与训练参数。

3 城市建筑物高度反演模型的构建与参数校准

3.1 基于立体影像的几何反演模型搭建方法

基于高分辨率卫星立体影像构建几何反演模型,核心是利用影像对之间的视差计算建筑物高度。首先通过相对定向与绝对定向处理,确定两张立体影像的内外方位元素,建立立体模型;然后采用密集匹配算法,如半全局匹配(SGM)算法,计算影像中每个像素的视差值,得到视差图;再根据卫星传感器的基线距、焦距等参数,结合视差与高度的几何关系公式,将视差值转换为建筑物高度值。在模型搭建过程中,需确保立体影像的重叠度在60%以上,以保证匹配点的数量与精度,同时对匹配过程中产生的误匹配点进行剔除,可通过一致性检验、最小二乘法等方法提高视差图的准确性。

3.2 单影像阴影反演模型的原理与适用场景

单影像阴影反演模型利用建筑物阴影长度与高度的几何关系实现高度计算,其原理是基于太阳高度角、方位角与阴影长度的三角函数关系,通过测量影像中建筑物阴影的长度,结合已知的太阳参数,反推建筑物高度。该模型适用于晴天拍摄、阴影清晰且无遮挡的卫星影像,在建筑物分布较为稀疏的城市区域应用效果较好。在实际应用中,需先通过卫星影像的元数据获取太阳高度角与方位角,再利用影像的空间分辨率将阴影的像素长度转换为实际地面长度,同时需校正地形坡度对阴影长度的影响,若地面存在坡度,需根据坡度角调整阴影长度的测量值,以减少地形因素导致的反演误差。

3.3 反演模型关键参数的校准流程与方法

反演模型的关键参数包括卫星传感器焦距、基线距、太阳高度角、地面控制点坐标等,参数校准需分步骤进行。首先针对传感器参数,通过查阅卫星官方提供的技术文档获取初始参数,再结合地面控制场的实测数据进行校正,例如利用已知坐标的地面控制点,对比模型计算的控制点坐标与实测坐标,通

过最小二乘法调整传感器参数,提高参数准确性;对于太阳参数,若影像元数据中的太阳高度角与方位角存在误差,可利用地面物体的阴影长度反算太阳参数,与元数据参数对比校正;还需对模型中的误差修正参数进行校准,如大气折射系数,通过采集不同时段、不同区域的卫星影像与实测数据,建立误差修正参数与影像获取条件的关联关系,实现参数的动态校准。

4 反演技术的实验验证与误差控制措施

4.1 实验数据的选取标准与预处理步骤

实验数据选取需遵循代表性与多样性原则,选取不同城市类型(如平原城市、山地城市)、不同建筑密度区域(如高密度商业区、中低密度住宅区)的高分辨率卫星影像,影像分辨率需不低于2米,以保证特征提取的精度。需获取实验区域的地面实测数据,包括建筑物高度实测值、地面控制点坐标等,作为验证反演结果的依据。数据预处理步骤包括影像辐射校正(消除大气散射、传感器噪声影响)、几何校正(纠正影像变形,使影像坐标与实际地理坐标匹配)、影像裁剪(提取实验所需的特定区域影像),预处理过程中需采用专业遥感处理软件,如ENVI、ERDAS,确保处理流程的规范性与数据质量。

4.2 多场景下反演结果的验证方法与指标

反演结果验证采用定量与定性相结合的方法,定量验证通过计算反演高度与实测高度的统计指标实现,主要指标包括平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE),MAE反映反演误差的平均水平,RMSE衡量误差的离散程度,RE则体现误差相对于实际高度的比例,这些指标能全面评估反演精度;定性验证通过对比反演得到的建筑物高度分布图与实际城市建筑分布情况,观察反演结果是否符合城市建筑的实际情况特征,如建筑物高度的空间分布规律、不同区域建筑高度的差异等。在多场景验证中,需分别在建筑密集区、建筑稀疏区、地形复杂区等场景下计算验证指标,分析技术在不同场景的适用性。

4.3 反演误差的来源识别与控制对策

反演误差主要来源于影像数据、模型参数、特征提取三个方面,影像数据方面,影像噪声、遮挡导致的信息缺失会产生误差,可通过影像去噪算法(如小波变换去噪)、多源影像融合(结合光学影像与雷达影像)补充缺失信息来控制;模型参数方面,参数校准不准确会引发误差,需加强参数校准流程的规范性,增加地面控制点数,提高参数精度;特征提取方面,算法精度不足会导致特征提取偏差,可优化特征提取算法,引入深度学习技术提升提取精度。还可采用多模型融合的方法,结合几何反演模型与阴影反演模型的结果,通过加权平均减少单一模型的局限性,进一步降低反演误差。

5 高分辨率卫星影像反演技术的应用拓展与效能提升

5.1 技术在城市规划与空间管理中的应用场景

在城市规划领域，该反演技术可用于城市三维模型构建，快速获取城市全域建筑物高度数据，为城市总体规划中的空间结构布局提供依据，例如判断城市中心区与郊区的建筑高度差异，优化城市功能分区；在城市更新改造中，通过反演不同时期的卫星影像，获取建筑物高度变化数据，分析城市更新区域的建设进度与改造效果，辅助制定更新规划方案。在空间管理方面，利用反演技术监测建筑物违规加建情况，通过对比不同时间的建筑物高度数据，识别超出规划高度的建筑，为城市执法管理提供数据支持；结合建筑物高度数据与交通流量数据，分析建筑密度与交通拥堵的关联性，优化城市交通规划。

5.2 技术与其他遥感技术的融合应用路径

将高分辨率卫星影像反演技术与合成孔径雷达（SAR）技术融合，SAR 影像具有全天候、全天时成像能力，可弥补光学卫星影像受天气影响的局限，两者融合能实现建筑物高度的全天候反演，例如在阴雨天气，通过 SAR 影像获取建筑物的几何信息，结合光学影像的辐射特征，提升反演的连续性与稳定性；与激光雷达（LiDAR）技术融合，LiDAR 能直接获取高精度的三维点云数据，可将其作为地面真值，用于校准卫星影像反演模型的参数，提升反演精度，同时利用卫星影像的广覆盖优势，拓展 LiDAR 数据的应用范围，实现大范围区域的高精度建筑物高度获取，融合过程中需解决不同数据源的坐标匹

配、数据格式转换等问题，确保数据的一致性。

5.3 提升技术应用效能的策略与未来方向

提升技术应用效能需从数据、算法、硬件三方面入手，数据方面，建立高分辨率卫星影像与地面实测数据的共享平台，整合多源数据资源，减少数据获取成本与时间；算法方面，加强轻量化算法研发，使反演模型能在移动端、边缘计算设备上运行，满足实时性应用需求，例如在应急救援场景中，快速反演受灾区域建筑物高度，为救援决策提供及时支持；硬件方面，随着卫星传感器技术的发展，推动高分辨率、高光谱卫星的应用，获取更丰富的影像信息，为反演技术提供更优质的数据源。未来，还可结合人工智能技术实现反演过程的自动化与智能化，减少人工干预，提升技术的应用效率与普适性，同时探索技术在智慧城市、碳中和城市建设等新兴领域的应用，进一步拓展技术的价值。

6 结语

本文围绕高分辨率卫星影像的城市建筑物高度反演技术展开研究，明确了技术在城市发展中的重要性，分析了现存问题，提出了特征提取优化、模型构建与参数校准、误差控制等技术方案，并探讨了应用拓展路径。研究表明，该技术通过持续优化，能有效提升城市建筑物高度反演精度，满足城市规划、空间管理等多场景需求。后续需进一步加强多源技术融合与智能化发展，推动技术在更多新兴领域的应用，为城市高质量发展提供更有力的空间信息支撑。

参考文献：

- [1] 陈雨薇,赵文博.高分辨率卫星立体影像的城市建筑物高度反演方法优化[J].遥感技术与应用,2023,38(2):412-421.
- [2] 林浩然,孙佳琪.基于单影像阴影与深度学习的建筑物高度反演模型构建[J].测绘通报,2022,(8):78-83.
- [3] 周梓豪,吴雨桐.高分辨率光学与 SAR 影像融合的建筑物高度反演技术研究[J].地理与地理信息科学,2023,39(4):23-29.
- [4] 郑晓宇,马思远.城市建筑物高度反演中的误差来源及控制对策[J].遥感信息,2022,37(5):105-111.
- [5] 黄雅欣,程子轩.高分辨率卫星影像反演技术在智慧城市规划中的应用[J].城市发展研究,2023,30(6):56-62.