

## 基于属性滤波和上下文分析的高分辨遥感图像建筑物提取方法

蒋李兵<sup>\*①</sup> 王 壮<sup>①</sup> 郁文贤<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

<sup>②</sup>(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

**摘 要:** 遥感图像分辨率的提高在带来丰富细节的同时,也给传统的目标提取方法提出了新的挑战。该文根据建筑物目标的属性和上下文关系,提出了一种新的高分辨率遥感图像中建筑物目标提取方法。该方法首先以具有相似属性的连通像素为处理单元,依据地物对象间的属性差异,对遥感图像进行不同尺度的属性滤波;接着根据建筑物和阴影的自身属性特点,对上述属性滤波结果进行粗筛,形成备选目标集;最后,进一步考虑建筑物与其阴影间的上下文关系,从二者的方位角、相对位置和区域距离 3 方面对备选目标集进行筛选,完成建筑物提取。对居民区和工业区遥感图像的实验结果表明,该方法优于传统方法,可用于提取多种类型的建筑物。

**关键词:** 高分辨遥感图像; 建筑物提取; 属性滤波; 上下文分析

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-2985-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00615

## Building Extraction from High Resolution Remote Sensing Image by Attribute Filtering and Context Analysis

Jiang Li-bing<sup>①</sup> Wang Zhuang<sup>①</sup> Yu Wen-xian<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Traditional object extraction methods encounter new challenges as the spatial resolution of remote sensing image increases. For the purpose of building extraction in that circumstance, a new method combining both attribute filtering and context analysis is proposed in this paper. Firstly, attribute filters are performed on the object level, which is defined by the connected pixels with similar attribute. Secondly, according to the prior knowledge of buildings and shadows, preliminary regions are extracted as the building candidates. Thirdly, the context between building and shadow is considered, which leads to the aspect angle, relative position and central distance criteria for the confirmation of buildings from the building candidates. Results on both of the residential and industrial regions demonstrate that the proposed method is effective for building extraction and performs better than the traditional methods.

**Key words:** High resolution remote sensing image; Building extraction; Attribute filtering; Context analysis

### 1 引言

在遥感图像分析和应用领域,对建筑物的自动提取<sup>[1]</sup>一直以来都是一个重要的研究课题。特别地,Quickbird, Worldview-2 等高分辨遥感平台的成功运行为建筑物提取任务提供了有力的数据支撑。在高分辨遥感图像中,建筑物的细节丰富,结构清晰,适于目视解译。然而,图像分辨率的提高也给传统的建筑物自动提取方法提出了新的挑战,迫切需要研究高分辨条件下的建筑物提取方法。

传统的遥感图像建筑物提取方法,按照处理单

元的层次可以分为基元边缘的方法<sup>[2-4]</sup>和基于局部区域的方法<sup>[5-10]</sup>两类。其中,基于边缘的方法以单个像素点为处理单元,通常采用“边缘提取-生成基元-基元编组”的流程。基于区域的方法则以一定形状的邻域为处理单元对图像上下文建模,通过特征提取、分割步骤并辅以一定的后处理完成目标提取,典型的有活动轮廓模型、分水岭算法等。这些方法在中低分辨率的遥感图像中得到了成功的应用,但当面对高分辨遥感图像时却往往难以奏效:图像分辨率的提高导致建筑物的轮廓边缘淹没在大量不相关的边缘中而不易辨别,使得基于边缘的方法中由基元到对象的过程变得异常困难甚至不可实现;高分辨遥感图像中相邻像素间的相关性也显著高于中

低分辨率图像，依然沿用基于区域的方法中指定形状的邻域结构并不合理。

近年来，以文献[8]所提出的差分属性剖面(Differential Attribute Profile, DAP)方法为代表的基于对象的高分辨遥感图像目标提取方法<sup>[8,11,12]</sup>，突破了传统方法以像素或局部邻域为基本处理单元的局限，将处理单元扩展为具有相似属性的所有像素。这种处理方式与高分辨遥感图像像素间的强相关性本质相契合，受到研究人员的关注。

本文结合建筑物的属性特点和阴影形成的物理机制，提出了一种基于属性滤波和上下文分析的建筑物提取方法。算法首先对遥感图像进行属性滤波，然后结合建筑物先验知识对属性滤波结果进行筛选形成备选目标集，最后根据阴影与建筑物的上下文关系从备选目标集中确认建筑物目标。

## 2 高分辨光学遥感图像建筑物属性特点分析

建筑物作为一类典型的立体地物，其在遥感图像中的表现取决于自身的光谱吸收率、反射率以及成像时的太阳高度角。图 1(a)给出了垂直过顶成像时太阳、建筑物和传感器之间的几何关系示意图，其中，S, R 和 G 分别代表像平面上的阴影、屋顶和地面。在高分辨遥感图像中，建筑物屋顶和阴影清晰明显，屋顶上的通风口等细节结构也能大致分辨，如图 1(b)所示。其中，屋顶由于材质和表面起伏性质的差异而呈现为或亮或暗的色调，而阴影则表现为显著的暗色。同时，建筑物的用途还决定了其周围可能会存在道路，植被，树木，车辆等地物。它们或因材质相近而具有与屋顶类似的光谱反射特性，或因成像关系产生阴影，从而与建筑物发生混淆。上述特点表明，在高分辨率遥感图像建筑物提取问题中，传统的以像素或局部区域为处理单元的

方式均不合适，而是需要从对象层次上进行分析。同时，立体地物的成像特点也决定了建筑物和阴影间的上下文关系也是一项重要的鉴别指标。

## 3 属性滤波理论

属性滤波理论是基于集合论发展的，连通变换和属性变换是它的两个基本变换。记  $I$  为二值图像， $x$  为  $I$  上的某一像素点， $X$  是包含  $x$  的连通域，则  $x$  处的连通开变换  $\Gamma_x(I)$  定义为

$$\Gamma_x(I) = \begin{cases} X, & x \in X \\ \emptyset, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

在连通开变换中加上属性约束  $T$ ，就得到了关于连通域  $X$  的属性开变换  $\Gamma_T(X)$ ：

$$\Gamma_T(X) = \begin{cases} X, & T(X) > \lambda \\ \emptyset, & T(X) \leq \lambda \end{cases} \quad (2)$$

其中  $T(X)$  是连通域  $X$  的某一属性， $\lambda$  是属性门限。整个二值图像的属性开变换  $\Gamma^T(I)$  为

$$\Gamma^T(I) = \bigcup_{x \in I} \Gamma_T[\Gamma_x(I)] \quad (3)$$

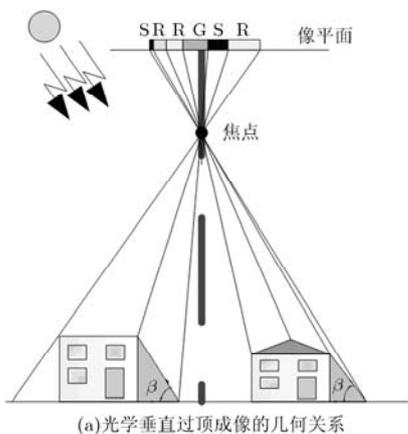
借助于阈值分解原理<sup>[13]</sup>，可以将上述二值图像的属性变换推广到灰度图像。阈值分解原理，是指以各个灰度级为门限对灰度图像进行阈值化得到的一系列二值图像，记为  $\text{Th}_k(I)$ ：

$$(\text{Th}_k(I))(x) = \begin{cases} 1, & I(x) > k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

对每一个二值图像  $\text{Th}_k(I)$  实施式(3)所示的属性开变换，并且取其中满足约束条件的最大灰度级作为输出响应，就得到了灰度图像  $I$  的属性开变换  $\gamma^T(I)$ ：

$$(\gamma^T(I))(x) = \max\{k : x \in \Gamma^T[\text{Th}_k(I)]\} \quad (5)$$

简单地说，对灰度图像  $I$  的属性开可以理解为是赋予  $I$  中每个位置上的像素一个最大门限值  $\lambda$ ，该门



(a) 光学垂直过顶成像的几何关系



(b) 某居民区的高分辨率遥感图像

图 1 光学遥感成像的原理及实际场景图像

限使得当前像素满足：(1)属于前景连通分量；(2)该连通分量的属性  $T(X) > \lambda$ 。

同样地，由集合的互补性可以得到灰度图像  $I$  的属性闭变换  $\varphi^T(I)$ ：

$$(\varphi^T(I))(x) = \min\{k : x \in \Psi^T[\text{Th}_k(I)]\} \quad (6)$$

其中  $\Psi^T(I) = (\Gamma^T(I^c))^c$  为二值图像的属性闭变换。

对于图像  $I$  上的每一像素点  $x$ ，根据不同的属性门限  $T_\lambda$  做属性开和闭变换，就得到了  $x$  点处的属性

$$\Delta I(x) = \left\{ \Delta_i I(x) : \begin{cases} \Delta_i I(x) = \Pi(\varphi^{T_\lambda}(I))(x) - \Pi(\varphi^{T_{\lambda-1}}(I))(x), \lambda = (n - i + 1), \forall i \in [1, n] \\ \Delta_i I(x) = \Pi(\gamma^{T_\lambda}(I))(x) - \Pi(\gamma^{T_{\lambda-1}}(I))(x), \lambda = (i - n), \forall i \in [n + 1, 2n] \end{cases} \right\} \quad (8)$$

从式(4)-式(8)的定义可以看出，属性变换所作用的邻域同时考虑了灰度和空间上的连通性，相较于传统的事先约定好形状和尺寸的邻域具有更好的灵活性，可以根据图像的局部特性自适应地选择邻域结构。文献[8]通过实验指出，不同地物间由于属性的差异会在不同的属性尺度上达到最大响应，从而形成峰值区别明显的 DAP 曲线。根据这个性质可以提取符合建筑物属性范围的对象，构成备选建筑物集和阴影集。

建筑物的属性范围可以根据其类型、用途及先验知识获得。常见的建筑物外形较规则，其屋顶像素强度一致，在图像中呈现为或明或暗的区域；阴影与建筑物相邻，一般也具有较规则的形状，但呈现为明显的暗区。另外，通过建筑物的用途也能推知部分属性信息，例如，居民区建筑物的尺寸明显小于工业区建筑物，但其分布密度则远高于工业区的情况。根据上述性质，我们选择面积、对角线和转动惯量这 3 个属性分别对遥感图像进行属性滤波，并根据建筑物的属性范围对滤波结果进行粗筛。考虑到建筑物类型的不确定性因素，我们对上述粗筛结果取并集，从而形成备选的建筑物和阴影目标集。

#### 4 基于上下文的备选建筑物筛选

由于属性区间不可避免地存在相互重叠，会导致部分地物(停车坪、人行道、树木等)被错误地划分在备选目标集中，需要进一步筛选。如前所述，阴影是停车坪、人行道等平面地物与建筑物在遥感图像上的显著区别。同时，由树木等其他立体地物形成的无关阴影也可以根据其附近是否存在备选建筑物而加以剔除。

阴影形成的投影关系决定了其与建筑物的相对位置和形状。详细来说，阴影与建筑物相邻并且位于沿太阳光入射方向的远端，其方位角与建筑物相近，表现为具有一定宽度的“L”形或平行四边形。基于上述分析，我们将沿太阳光入射方向位置、方

开剖面  $\Pi(\gamma^T(I))(x)$  和闭剖面  $\Pi(\varphi^T(I))(x)$ ：

$$\left. \begin{aligned} \Pi(\gamma^T(I))(x) &= \{\Pi\gamma^{T_\lambda} : \Pi\gamma^{T_\lambda} = (\gamma^{T_\lambda}(I))(x), \\ &\quad \forall \lambda \in [0, \dots, n]\} \\ \Pi(\varphi^T(I))(x) &= \{\Pi\varphi^{T_\lambda} : \Pi\varphi^{T_\lambda} = (\varphi^{T_\lambda}(I))(x), \\ &\quad \forall \lambda \in [0, \dots, n]\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将属性开剖面和闭剖面的相邻项取差分并联合起来，就构成了  $x$  点处的差分属性剖面  $\Delta I(x)$ ：

位角和区域距离作为建筑物与其阴影的上下文关系，对备选建筑物集和阴影集进行筛选。特别地，考虑到遮挡可能会导致阴影质心发生偏差，直接将质心距离作为区域距离并不合理。为此我们计算阴影沿其方位角方向的外接矩形，以将该外接矩形的形心与建筑物质心的距离作为区域距离，示意图见图 2(c)。于是，基于上下文的备选建筑物筛选步骤如下：

(1)计算备选建筑物集中的目标质心  $(x_b, y_b)$ ，并用最小外接矩形法计算其方位角  $\alpha_b$ ；

(2)在备选建筑物周围邻域内，沿太阳光入射方向的远端搜索阴影区域；

(3)计算阴影区域的方位角  $\alpha_s$ ，并求其沿方位角方向的外接矩形的形心  $(x_s, y_s)$ ；

(4)根据式(9)求备选建筑物与阴影的方位角偏差  $\Delta\alpha$  和区域距离  $\Delta d$ ，若同时满足  $\Delta\alpha < AT$  和  $\Delta d < DT$  ( $AT$  和  $DT$  分别为角度和距离门限)，则确认为建筑物目标。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= |\alpha_b - \alpha_s| \\ \Delta d &= \sqrt{(x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

图 2 给出了基于上下文的备选建筑物筛选过程。图 2(a)是实测的建筑物切片图像，其中包含了一栋规则建筑物，伴随有“L”形阴影。图 2 (b)是依据建筑物的面积和转动惯量属性范围粗筛出的备选建筑物集(白色区域)和阴影集(黑色区域)。图 2(c)是依建筑物与阴影上下文关系得到的建筑物目标。其中，白色区域为建筑物，包围黑色区域的方框则是阴影区域沿其方位角方向的外接矩形，“\*”是它们各自的质心和形心。

#### 5 算法流程

从高分辨率遥感图像中提取建筑物的算法流程可以概括为 3 个部分，首先，根据不同的属性对高分辨遥感图像进行滤波，计算其差分形态剖面；接着，根据建筑物属性范围的先验知识，对各差分属

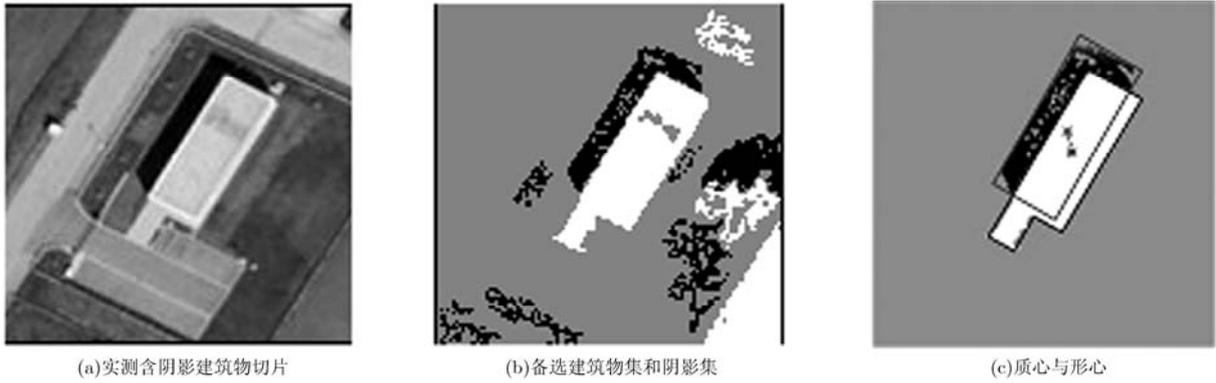


图 2 基于上下文的建筑物筛选

性剖面的极值位置进行筛选, 并将筛选结果取并集, 形成备选建筑物集和阴影集; 最后, 根据建筑物和阴影间的上下文关系对备选集进行筛选, 满足条件的对象可被确认为建筑物目标。流程图如图 3 所示。

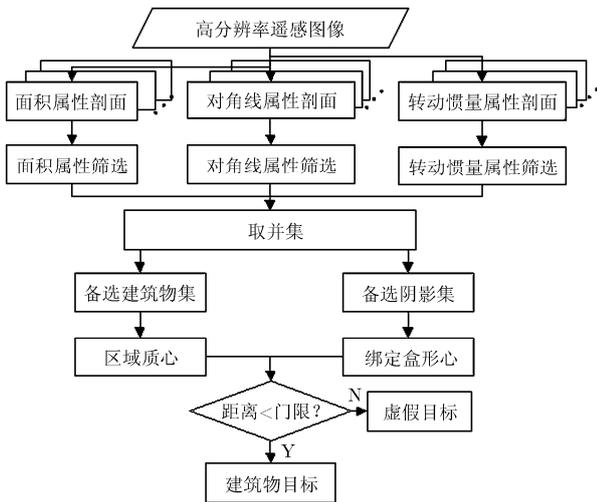


图 3 高分辨率遥感图像建筑物提取算法流程

### 6 算法实验及结果分析

为验证本文方法的性能, 对多幅不同场景的实测高分辨遥感图像进行了实验。图像数据来源于 Google Earth 公开发布的 Quickbird 卫星图像, 分辨率为 0.6 m。图 1(b)是意大利港口城市 Pescara 中的一个典型居民区场景, 其中包含有 20 栋建筑物, 建筑物周围环绕有树木, 场景中心为一停车场, 上面停放有数十辆汽车, 主干道沿斜向下 45° 贯穿整幅图像。实验所涉及的算法参数设置如下: 建筑物面积像素区间: [100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500]; 外接矩形对角线像素区间: [14, 20, 28, 35, 40, 45, 50, 55]; 转动惯量区间: [0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8]; 方位角偏差门限 AT: 10°。建筑物与其阴影之间的质心距离不仅与建筑物的 3 维尺寸有

关, 还受成像时太阳高度角的影响。然而, 在目标检测任务中, 由于无法提前获知建筑物的 3 维尺寸, 难以得到准确的距离门限。在实际应用中, 常用的办法是根据当前所考察场景中的建筑物类型用途, 给出经验性的距离门限值。本文考虑到阴影区域在方位向上的尺寸与建筑物相近, 并针对所考察场景的类型(居民区和工业区), 将距离门限 DT 设置为当前建筑物外接矩形对角线长度的一半。图 4, 图 5 和图 6 分别是基于不同属性区间的滤波结果。为了增加可视效果, 已经对该结果进行了增强操作。可以看出, 不同地物在对同一属性区间的滤波响应差别很大; 同时, 同种地物对象之间由于形状、大小的差异, 导致其最大响应所处的属性区间也不一样。

图 7 是不同方法针对图 1(b)得到的建筑物提取结果。其中, 图 7(a)是基于建筑物属性范围筛选得到的备选建筑物集和阴影集, 图 7(b)是在图 7(a)结果的基础上, 通过阴影上下文关系进一步筛选所确认的建筑物目标。图 7(c)是根据文献[2]的基于边缘的方法获得的结果, 图 7(d)则是基于最小强制的分水岭方法所划分的各建筑物区域。图 7(b)~图 7(d)中不同算法的直观提取结果显示, 基于边缘的算法提取结果的漏检和误检情况均比较严重。而基于最小强制的分水岭方法尽管在进行分水岭分割之前已经加入了最小强制处理, 但依然存在较严重的过分分割现象, 造成检测结果中有较多的虚假目标, 且大部分提取出的建筑物目标区域中混杂了多种不同类型的地物, 不利于下一步的目标鉴别等处理。相比较而言, 本文算法的结果尽管也存在着漏检和虚假目标, 但提取出了图像中绝大多数的建筑物。其中, 左上角的不规则大建筑物由于形状和面积明显异于居民区建筑, 在备选建筑物筛选阶段直接被漏检; 左上角的另一居民区建筑则由于没能完整地显示在图像中而发生漏检。而图中部分道路及树木的属性与建筑物属性范围重合, 且与附近的阴影也构成了上下文环境, 形成虚假目标。

图 8(a)是一幅工业区场景的遥感图像，其中包含了明暗和大小不一的 15 栋大型建筑物。根据工业区建筑物的特点，面积和外接矩形对角线的像素长度区间分别调整为[500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000]和[32, 45, 63, 77, 90, 100, 110, 118]，其余参数与图 7 的设置相同。图 8(b)~图 8(d)

是不同算法得到的建筑物提取结果。可以看出，基元边缘的算法受无关边缘的影响，漏检和误检情况严重。基于最小强制的分水岭方法的性能有所提高，但结果中的虚假目标偏多，且目标 ROI 中混杂着不同地物(图像左侧部分)，不利于后续的处理。本文方法则能提取出图像中的绝大多数建筑物。

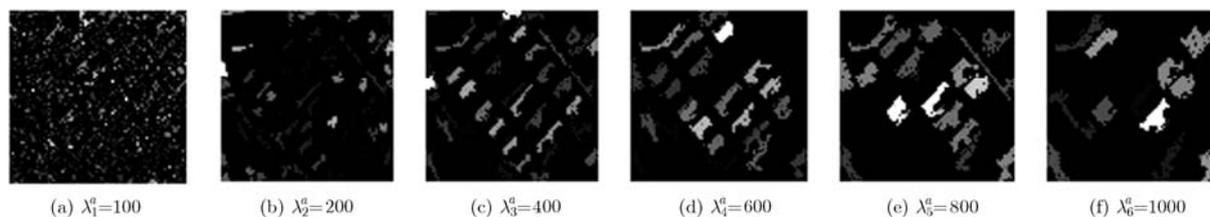


图 4 基于面积的属性滤波剖面

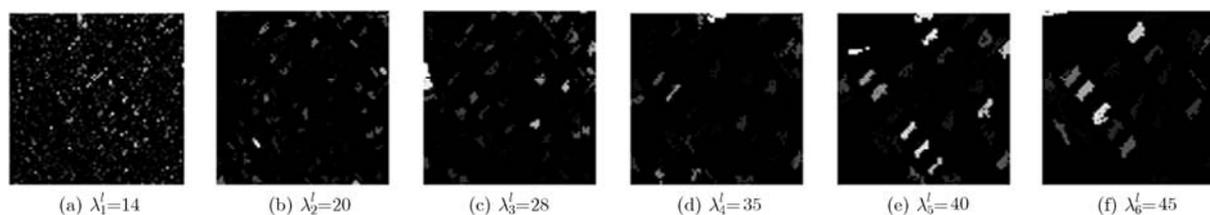


图 5 基于外接矩形对角线长度的属性滤波剖面

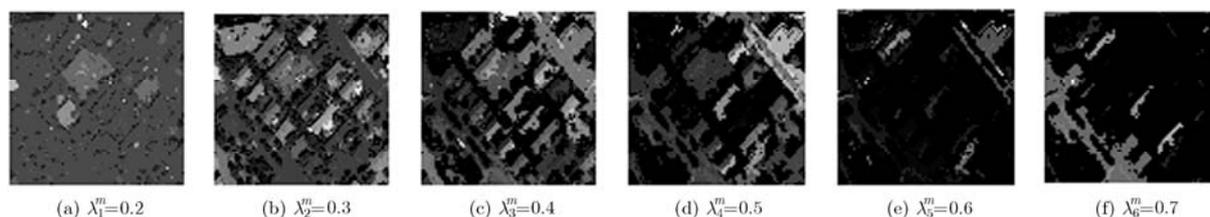


图 6 基于转动惯量的属性滤波剖面

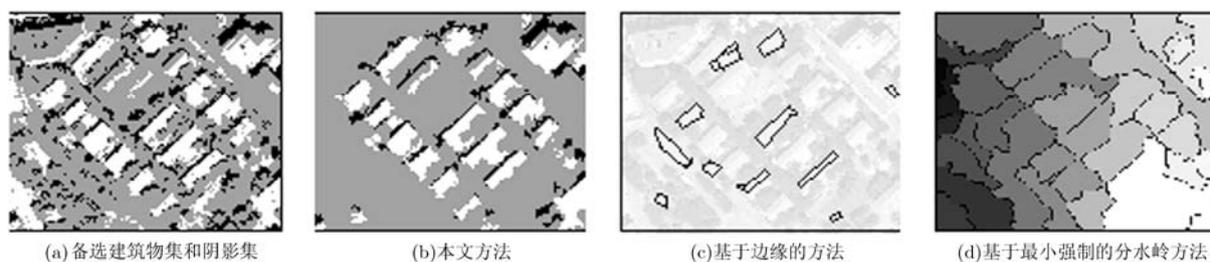


图 7 不同方法的建筑物提取结果

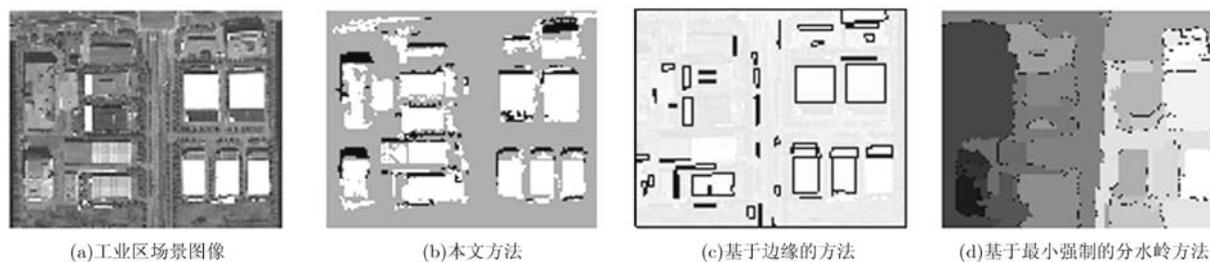


图 8 工业区场景的建筑物提取结果

进一步地,从目标级检测精度<sup>[14]</sup>方面对3种算法的性能进行定量评估,包括目标检测率(PD)、虚假目标率(PFA)和目标平均断裂块数(PS),具体定义如下:

$$\left. \begin{aligned} PD &= n_t/N_o \\ PFA &= n_f/(n_t + n_f) \\ PS &= (n_t + n_f)/n_t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $N_o$ 是真实目标数, $n_t$ 和 $n_f$ 分别是检测结果中的正确目标和虚假目标数目。

表1给出了3种算法的目标级检测精度评估指标和各自的时间开销。其中,算法的开发环境为Matlab 7.12,CPU为P4双核3G,内存1G。从表1可以看出,基于边缘的方法在处理高分辨遥感图像时,由于要从大量与目标不相关的边缘中进行线基元启发式搜索和基元感知编组,导致算法的时间开销很大;同时,这些无关边缘也易造成目标的漏检和误检,居民区和工业区场景的实验结果印证了这一点。基于最小强制的分水岭方法的检测率较基于边缘的方法有较大提高,时间开销也是3种算法中最小的,但是过分割的问题依然存在,导致检测

结果的虚假目标率偏高。本文所提出的方法在居民区场景获得了86.4%的检测率、26.9%的虚假目标率和1.3的平均断裂块数,尽管在工业区场景中受屋顶材质差异的影响,检测性能有所下降,但平均断裂块数依然控制在1.5,表现仍优于上述两种方法。

## 7 结束语

本文提出了一种新的面向高分辨遥感图像的建筑物提取方法。该方法通过对遥感图像进行属性滤波生成备选建筑物集和阴影集,并依据建筑物与阴影间的上下文关系从备选集中提取建筑物,针对不同场景遥感图像的实验验证了本文方法的有效性。需要说明的是,本文的距离门限是准经验性的。另一种可行的办法是将建筑物提取与3维尺寸反演这两项任务交替结合,根据建筑物的3维几何参数精确地计算出建筑物与阴影间的实际距离来指导建筑物的提取。这将是我們下一步的研究工作。

**致谢** 特别感谢 Masdar Institute of Science and Technology 的 Prashanth Marpu 博士关于 DAP 算法理论和实现的热心交流。

表1 目标级检测精度

建筑物提取算法	居民区场景				工业区场景			
	PD (%)	PFA (%)	PS	时间(s)	PD (%)	PFA (%)	PS	时间(s)
本文方法	86.4	26.9	1.3	33.3	68.2	31.8	1.5	92.1
基于边缘的方法	22.7	61.5	2.6	952.8	31.3	84.8	6.6	8053.5
基于最小强制的分水岭方法	81.8	50.0	2.0	4.2	50.0	47.6	1.9	10.2

## 参考文献

- [1] Prasad S. Optical Remote Sensing: Advances in Signal Processing and Exploitation Techniques[M]. Berlin: Springer, 2011: 4-7.
- [2] Cardoso L A. Computer-aided recognition of man-made structures in aerial photographs[D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 1999.
- [3] 毛峡, 赵兴圆, 沈巍. 一种基于模糊决策的矩形目标提取算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 699-702.  
Mao Xia, Zhao Xing-yuan, and Shen Wei. Extraction method of rectangular building based on fussy decision-making[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(6): 699-702.
- [4] 承德保. 基于多特征组的遥感图像中建筑物目标自动识别与标绘的方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2867-2870.  
Cheng De-bao. A method for automatic building recognition and mapping based on multiple features in remote sensing images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2867-2870.
- [5] Pesaresi M and Benediktsson J A. A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 309-320.
- [6] Jin X and Davis C H. Automated building extraction from high-resolution satellite imagery in urban areas using structural, contextual, and spectral information[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005(14): 2196-2206.
- [7] 陶超, 谭毅华, 蔡华杰, 等. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 39-45.  
Tao Chao, Tan Yi-hua, Cai Hua-jie, et al. Object-oriented method of Hierarchical urban building extraction from high resolution remote sensing imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 39-45.

- [8] Mura M D, Benediktsson J A, Waske B, *et al.* Morphological attribute profiles for the analysis of very high resolution images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(10): 3747-3761.
- [9] 余旺盛, 侯志强, 王朝英, 等. 基于改进滤波和标记提取的分水岭算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(4): 825-830.  
Yu Wang-sheng, Hou Zhi-qiang, Wang Chao-ying, *et al.* Watershed algorithm based on modified filter and marker-extraction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4): 825-830.
- [10] Peeters S, Marpu P R, Benediktsson J A, *et al.* Classification using extended morphological attribute profiles based on different feature extraction techniques[C]. 2011 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, July 24-29, 2011: 1689-1692.
- [11] Licciardi G A, Villa A, Mura M D, *et al.* Retrieval of the height of buildings from WorldView-2 multi-angular imagery using attribute filters and geometric invariant moments[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(1): 71-79.
- [12] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2010, 65(1): 2-16.
- [13] Soille P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*[M]. Berlin: Springer, 2003: 277-291.
- [14] 赵凌君. 高分辨率 SAR 图像建筑物提取方法研究[D]. [博士论文], 国防科技大学, 2009.  
Zhao Ling-jun. Building extraction from high resolution SAR imagery[D]. [Ph.D dissertation]. National University of Defense Technique, 2009.
- 蒋李兵: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为遥感图像理解、SAR 与光学图像融合.
- 王 壮: 男, 1973 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为数据融合与自动目标识别.
- 郁文贤: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信号处理、目标识别、数据融合等.