

# 基于阴影概率约束的遥感影像建筑物阴影检测

葛乐<sup>1,2</sup>, 钟兴<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130102;

<sup>4</sup>吉林省卫星遥感应用技术重点实验室, 吉林 长春 130102

**摘要** 针对高分辨率遥感影像中建筑物阴影检测的需求,通过主成分变换和色调、色饱和度和强度(HSI)空间中阴影的光谱特性提取,开展了基于阴影概率约束的阴影检测方法研究。根据主成分变换结果与地物在 HSI 空间光谱特性的差异,消除暗色地物的影响,并用阴影概率检测存在于水体中的建筑物阴影,避免了传统方法由于水体与建筑物阴影光谱特征相近而引起的误检和漏检现象。基于吉林一号卫星影像的实验结果证明,所提方法的误检率和漏检率低于 6%,总体分类精度和 Kappa 系数高于 0.9,水体对阴影检测结果的影响明显降低,影像中阴影的整体检测效果得到提升。

**关键词** 图像处理; 阴影概率; 阴影检测; 阴影指数; 高分辨率遥感影像; 吉林一号

中图分类号 TP75

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041006

## Building Shadow Detection of Remote Sensing Images Based on Shadow Probability Constraint

Ge Yue<sup>1,2</sup>, Zhong Xing<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130102, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Satellite Remote Sensing Application Technology of Jilin Province, Changchun, Jilin 130102, China

**Abstract** In order to meet the needs of building shadow detection in high resolution remote sensing images, we study the shadow detection method based on shadow probability constraint by principal component transformation and spectral feature extraction in hue, saturation, and intensity (HSI) space. Based on the results of principal component transformation and the difference of the spectral characteristics of ground objects in HSI space, we eliminate the influence of dark objects and detect the shadow of buildings in the water using shadow probability. Compared with traditional methods, the proposed method avoids the false detection and missed detection caused by the similar spectral characteristics of water bodies and buildings. Experimental results based on Jilin No.1 images show that the false detection rate and missed detection rate of the proposed method are less than 6%, the overall classification accuracy and Kappa coefficient are higher than 0.9, the impact of water on shadow detection results is reduced, and the overall effect of image shadow detection is improved.

**Key words** image processing; shadow probability; shadow detection; shadow index; high resolution remote sensing image; Jilin No.1

**OCIS codes** 100.2000; 150.1135; 100.2960

收稿日期: 2017-08-30; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 中国科学院青年创新促进会专项、国家自然科学基金青年科学基金(61505203)

作者简介: 葛乐(1993—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: geyue01234@163.com

导师简介: 钟兴(1982—),博士,研究员,博士生导师,主要从事星载一体化方面的研究。

E-mail: ciomper@163.com(通信联系人)

# 1 引言

建筑物阴影普遍存在于高分辨率遥感影像中。阴影的存在造成遥感影像信息量的减少,并引起图像视觉效果的退化,因此需要对其进行检测和去除,以满足高级应用的需求<sup>[1]</sup>。通过阴影的检测,可以提取建筑物轮廓、高度等信息,拓展图像的应用潜力<sup>[2]</sup>。因此,高分辨率遥感影像中阴影的检测越来越受到研究者的重视。

现有遥感图像阴影检测方法分为两类,即基于模型和基于阴影特征的检测方法。基于模型的阴影检测方法需要已知传感器参数、太阳高度角、地表数字模型等参数,这类信息在研究过程中不易得到,限制了此类方法的应用。Makarau等<sup>[3]</sup>提出的黑体辐射模型,利用黑体辐射的物理特性、直射光与散射光的色温不同进行阴影检测;该方法所需的先验信息难以获得,局限性较大。基于阴影特征的阴影检测方法,通过阴影区域和非阴影区域属性上的差异来检测阴影,适用范围广泛,相关研究较多。Tsai<sup>[4]</sup>提出基于色彩不变特征的阴影检测方法,该方法操作简单,但是当地物影响复杂时,其检测效果会受到影响。杨俊等<sup>[5]</sup>利用阴影具有低亮度和高饱和度的特征,对饱和度分量和亮度分量设计了双阈值的阴影检测方法;姚花琴等<sup>[6]</sup>利用主成分(PCA)变换以及阴影区域在红、绿、蓝(RGB)空间阴影的性质进行了阴影检测。Murali等<sup>[7]</sup>提出一种基于图像LAB空间的阴影检测方法,排除阴影自身亮度对阴影检测的影响,但是对于复杂场景下的阴影检测效果较差。刘辉等<sup>[8]</sup>基于PCA变换以及色度、色饱和度和强度(HSI)模型,利用阴影指数(SI)区分阴影区域和非阴影区域。Jung等<sup>[9]</sup>将单高斯概率分布模型与几何特征相融合,以此来进行阴影检测,其局限性在于需要人工分割阈值。Leone等<sup>[10]</sup>提出了一种自适应背景差分的阴影检测方法,利用阴影区域与阴影覆盖区域纹理特征的相似性区分阴影区域与非阴影区域;该方法的检测过程较复杂,计算时间较长。徐杰等<sup>[11]</sup>利用K-means聚类算法以及衡量直方图相似度等方法来实现阴影区域检测,得到了较好的阴影检测率,但是由于非阴影区域与阴影区域的颜色相近时,聚类不准确,从而影响影像阴影检测率。艾维丽等<sup>[12]</sup>提出一种结合区域配对的室外阴影检测方法,离线训练支持向量机分类器,然后在线使用所建立模型检测图像中的阴影,当室外场景简单时效果较好,室外场景复杂时,不能有效检测出阴影。

上述方法在特定的应用条件下均可以进行较为准确的建筑物阴影检测,但是也同样存在以下问题: 1) 影像上的水体和阴影的特征相似,都具有高饱和度与低亮度值的特性<sup>[13]</sup>,当非阴影区域存在大量偏蓝色水体时,容易将阴影区域与水体混淆<sup>[14]</sup>; 2) 对于阈值亮度高的地物、水体和阴影,利用地物的亮度特性人工判定阈值,并假定所有阴影和水体的亮度值都低于亮度值高的地物,该处理客观性不足<sup>[15]</sup>; 3) 当建筑物阴影投射到水体表面时,上述方法很难检测到水体表面的建筑物阴影,存在漏检现象。

本文提出了一种基于PCA变换与HSI空间光谱特征的阴影检测方法,并结合基于阴影概率约束的方法,检测存在于水体表面的高大建筑物阴影。通过将该方法与双阈值阴影检测方法和基于SI的阴影检测方法进行对比,可以发现该方法不仅能够检测出存在于地面上的高大建筑物阴影,同时能够成功检测存在于水体表面的高大建筑物阴影,降低非阴影区域的误检率和建筑物阴影漏检率,提高了分类的总体精度和Kappa系数,从而可有效检测高分辨率遥感图像中的高大建筑物阴影。

## 2 阴影检测模型的建立

根据HSI空间中阴影低亮度、高饱和度的特征,并结合不同地物经过PCA变换后的第一主成分(PC1)值的差异,构建SI;同时结合阴影概率的概念,对水体阴影以及周围水体区域进行阴影概率约束,最终得到完整的阴影检测结果。

### 2.1 HSI空间阴影特性

HSI空间从人的视觉角度出发,用色度 $H$ 、饱和度 $S$ 、亮度 $I$ 来描述颜色。HSI空间比RGB空间更适合人的视觉特性。主要表现为:

1)  $S$  更高。在光谱特性基础上,由于瑞利散射和米散射的影响,阴影区域的亮度值主要来自蓝紫光。根据Phong光照模型<sup>[16]</sup>分析得到,阴影区域的蓝光分量降低得最少,所以阴影区域的 $S$ 值高。

2)  $H$  更高。在HSI空间中,由于散射光的影响,阴影区域的绿光分量和蓝光分量的反射差异变小<sup>[17]</sup>, $H$ 与绿光分量和蓝光分量的趋近程度有关,这使得阴影区域比非阴影区域具有更大的 $H$ 值。

3)  $I$  更低。由于阴影区域的直射光线被遮挡,只存在散射光线,所以阴影区域具有较低的 $I$ 值。

### 2.2 阴影的PCA变换

遥感影像经PCA变换后,得到的较少几个波段反映了原始影像大部分的信息,特别是变换后的

PC1,其至少包含了原图像 90%的信息<sup>[18]</sup>。PC1 特征值对应的是该分量的方差,方差是对比度的度量,PC1 具有很高的对比度。经过 PCA 变换之后,阴影的 PC1 大于水体的 PC1。经 PCA 变换后图像的对比度增强,水体和阴影的 PC1 值差异变大。

通过对吉林一号光学 A 星拍摄的大量存在高大建筑物阴影的遥感图像进行取样,得出以下结论:1) 当图像较亮且存在大量浅色地物时,阴影区域的 PC1 值为负,阴影的亮度值越低,其 PC1 值越低,如

图 1(a)、(c)所示;2) 当图像较暗且存在大量深色地物时,阴影区域的 PC1 值为正值,阴影的亮度值越低,PC1 值越大,如图 1(b)、(d)所示;3) 若阴影区域的 PC1 为负值,将 PC1 大于 0 的地物的 PC1 值置为 0;4) 若阴影区域的 PC1 为正值,将 PC1 小于 0 的地物的 PC1 的值置为 0。为了进一步扩大阴影区域与水体的差异,对结果进行进一步的归一化处理,使得 PCA 的值在 $[0,1]$ 之间。图 2 为归一化处理后地物的 PC1 光谱曲线,阴影的 PC1 大于水体的 PC1。

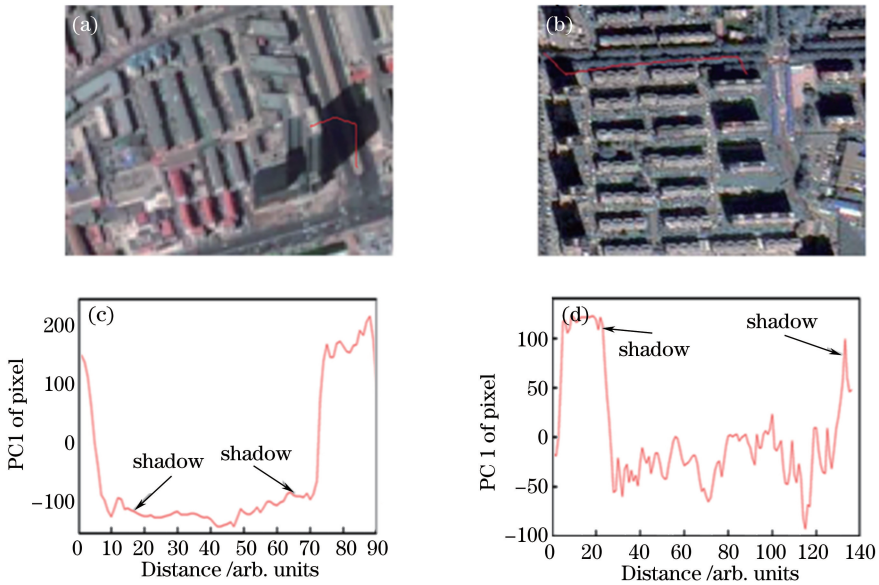


图 1 阴影区域的 PC1 对比图。(a)天津塔附近浅色地物区域;(b)长春北深色地物区域;(c)图 1(a)中红线标注地物的 PC1;(d)图 1(b)中红线标注地物的 PC1

Fig. 1 PC1 contrast diagrams of shadow area. (a) Light color surface feature area near Tianjin tower; (b) deep color surface feature area in north Changchun; (c) PC1 of area marked by red line in Fig.1(a); (d) PC1 of area marked by red line in Fig.1(b)

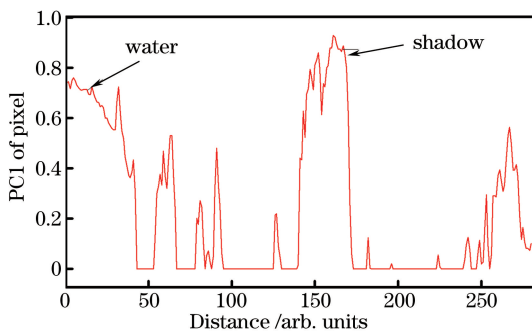


图 2 归一化后的地物 PC1 曲线

Fig. 2 Normalized PC1 curve of surface features

通过 PCA 变换后阴影区域的 PC1 值接近 1,且阴影区域在 HSI 空间的  $I$  分量很小,PC1 值大于  $I$  分量。与水体相比,水体的 PC1 与  $I$  分量的差值小于阴影的 PC1 与  $I$  分量的差值。综合水体与其他地物对阴影检测的影响,构建阈值阴影指数,其表达式为

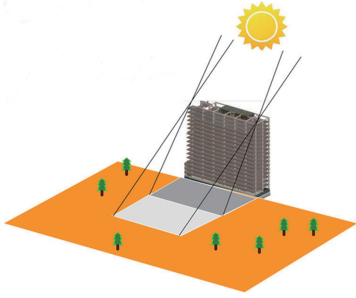
$$I_{MS} = \frac{(P_{C1nor} - I) \times (1 + S)}{(I + S)}, \quad (1)$$

式中  $I_{MS}$  为阈值阴影指数, $P_{C1nor}$  为归一化的 PC1。再经过 Otsu 法阈值得到阴影区域和非阴影区域。

### 2.3 阴影概率约束

根据太阳光线被遮挡的程度,可以将阴影区域分为本影区域和半影区域<sup>[19]</sup>。如图 3 所示,本影是指完全没有被光线照射到的区域,半影是指部分被光源照射到的区域。其中灰色区域为本影,浅灰色区域为半影。阴影概率的定义与半影的定义相符合。阴影概率表示像素属于阴影区域的可能性<sup>[20]</sup>,具体定义为:像素如果属于本影,则其阴影概率为 1,属于半影的像素的阴影概率在 0~1 之间;像素如果属于非阴影,则阴影概率为 0。

引入阴影概率的概念后,针对水体中建筑物阴

图3 高大建筑物投影区域模型<sup>[21]</sup>Fig. 3 Projection area model of high construction<sup>[21]</sup>

影的检测,将根据阈值阴影指数  $I_{MS}$  得到的部分水体阴影以及周围水体作为先验信息,令部分水体阴影像素的阴影概率为 1,周围水体像素的阴影概率为 0。第  $i$  个像素的颜色设为相应阴影区域和非阴影区域的线性组合<sup>[22]</sup>:

$$I_i = \alpha_i G_i + (1 - \alpha_i) B_i, \alpha_i \in [0, 1], \quad (2)$$

式中  $G_i$  和  $B_i$  分别代表阴影区域和非阴影区域的颜色值,  $\alpha_i$  为阴影概率。假设在一个像素附近  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  小窗口内属于阴影区域的像素值都是相等的,属于非阴影区域的像素值也相等,基于该假设将(2)式转化为关于  $\alpha_i$ 、 $a$  和  $b$  的线性方程:

$$\alpha_i \approx a I_i + b, \forall i \in \omega, \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{F - B}, \quad (4)$$

$$b = \frac{B}{F - B}, \quad (5)$$

式中  $F$  为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  小窗口内的阴影像素值,  $B$  为该小窗口内的非阴影像素值。(4)式和(5)式为该线性方程[(3)式]的系数表达式。(3)式的线性关系最终可转化为求解  $\alpha$  ( $\alpha$  为  $\alpha_i$  构成的向量)、 $a$  和  $b$  的值,使目标函数  $J(\alpha, a, b)$  取得最小值,即

$$J(\alpha, a, b) = \sum_{i \in \mathbf{I}} \left[ \sum_{i \in \omega_j} (\alpha_i - a_j I_i - b_j)^2 \right], \quad (6)$$

式中  $\omega_j$  为第  $j$  个像素周围  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  的小窗口。根据文献[20]的证明,参数  $a$  和  $b$  可以被消除,最终目标函数中只包含参数  $\alpha$ ,即

$$J(\alpha) = \alpha^T \mathbf{L} \alpha, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{L}$  为一个  $N \times N$  的拉普拉斯算子矩阵,第  $(i, j)$  项可表示为

$$L_{ij} = \sum_{k(i,j) \in \omega_k} \left[ \delta_{ij} - \frac{1}{|\omega_k| + \sigma_k^2} (I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k) \right], \quad (8)$$

式中  $\omega_k$  为包含第  $i$  个像素和第  $j$  个像素的  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  的小窗口;  $\delta_{ij}$  为克罗内克函数;  $\mu_k$

和  $\sigma_k^2$  为  $\omega_k$  中像素值的均值和方差;  $|\omega_k|$  为小窗口内的像素总数。将标定的水体阴影与周围水体的先验信息作为求解目标函数最小值的约束条件  $\lambda(\alpha^T - b_s^T) \mathbf{D}_s (\alpha - b_s)$ , 阴影概率  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = \arg \min (\alpha^T \mathbf{L} \alpha) + \lambda (\alpha^T - b_s^T) \mathbf{D}_s (\alpha - b_s), \quad (9)$$

式中  $\mathbf{D}_s$  为一个对角矩阵,其对角元素为 1,其他像素为 0;  $b_s$  为一个向量,先验信息中的阴影样本对应  $\alpha$  值为 1,非阴影样本对应  $\alpha$  为 0;  $\lambda$  在本文中设为 100。最终将(9)式转化为对线性方程的求解,即

$$(\mathbf{L} + \lambda \mathbf{D}_s) \alpha = \lambda b_s. \quad (10)$$

得到的结果符合阴影概率的定义,即非阴影区域的像素值为 0,半影区域的像素值范围为  $(0, 1)$ ,阴影区域的像素值为 1。然后进行形态学运算,得到水体中的建筑物阴影,将基于阴影概率约束的水体阴影与基于新阴影指数得到的阴影检测结果取并集,得到最终的阴影检测结果。

### 3 实验结果分析

为了验证所提阴影检测方法的有效性和优越性,用该方法对吉林一号光学 A 星(包括全色及多光谱 RGB 4 个波段,全色分辨率为 0.72 m)拍摄的天津塔附近 ( $1280 \text{ pixel} \times 1015 \text{ pixel}$ ) 和长春市北 ( $800 \text{ pixel} \times 664 \text{ pixel}$ ) 进行研究。天津塔附近除存在于地面建筑物阴影外,还存在于水体中的阴影,地物信息比较复杂。长春北存在水体、裸土、道路、阴影等地物建筑物阴影集群。为了验证该方法的有效性,将该方法分别与双阈值阴影检测方法和阴影指数方法进行对比。

#### 3.1 水体中阴影检测结果

图 4 为天津塔周围水域,基于阴影概率的阴影检测方法可以检测出处于水体中天津塔的阴影。图 4(a)中的红框内标记的是水体阴影,图 4(c)为对图 4(b)进行形态学运算后得到最终的阴影检测结果。

图 5 为天津塔周围区域,存在水体、水体中天津塔的倒影、马路等。处在水体中的天津塔的阴影与其周围水体特征相似,使得两种地物较难区分。由图 5(b)、(c)可知,双阈值阴影检测方法和基于 SI 的方法能够检测出与水体特征差异较大且投影于地面上的建筑物阴影,但是对水体中天津塔的阴影则存在漏检现象,同时也存在将水体误检为阴影区域的现象。所提方法可以准确检测出水体中天津塔的阴影,并且未将水体误检为阴影。



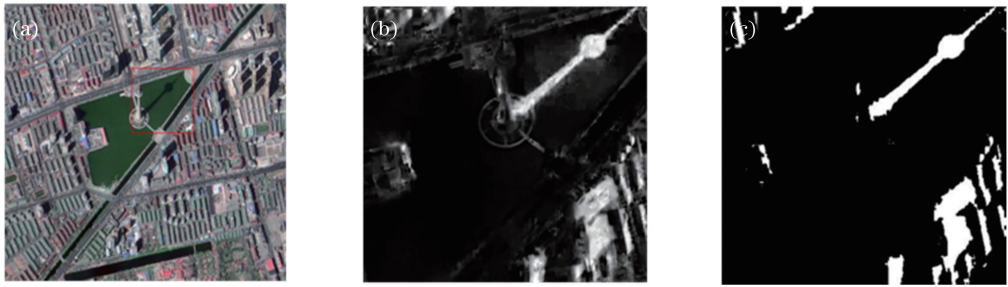


图4 基于阴影概率的水体中阴影检测结果。(a)水体阴影;(b)阴影检测结果;(c)形态学阈值结果  
Fig. 4 Results of shadow detection in water based on shadow probability. (a) Shadow of water;  
(b) shadow detection result; (c) morphological threshold result

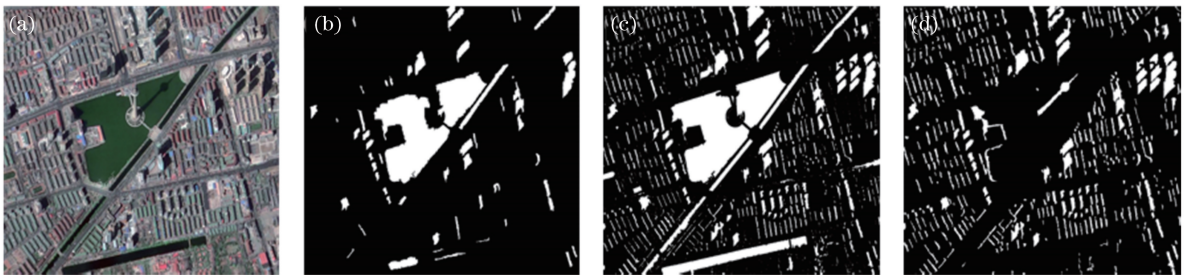


图5 天津塔周围阴影检测结果。(a)原图;(b)双阈值检测方法结果;(c)SI方法检测结果;(d)所提方法结果  
Fig. 5 Results of shadow detection around Tianjin tower. (a) Original draft; (b) result of double threshold  
detection method; (c) result of SI method; (d) result of the proposed method

### 3.2 高大建筑物阴影检测结果

图6为长春北部的高分辨率遥感图像,存在草坪、湖泊、裸土、马路、高大建筑物阴影集群等种类丰富的地物。图6(c)、(d)中对建筑物阴影集群的检测效果较好,但是将湖泊误检为建筑物阴影。SI的检测结果中出现了明显的其他地物,如图中左

上方的草丛以及右方的马路,实验证明当地物信息复杂时,该方法并不能消除复杂地物种类对阴影检测结果的影响。双阈值检测和所提方法的阴影检测效果良好。然而,双阈值方法将湖泊检测为阴影,存在误检现象,所提方法准确地将水体检测为非阴影。

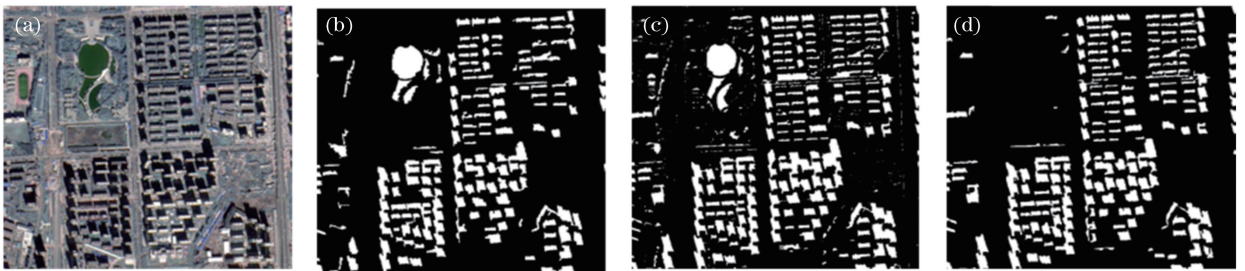


图6 长春北部阴影检测结果。(a)原图;(b)双阈值检测方法结果;(c)SI方法检测结果;(d)所提方法结果  
Fig. 6 Results of shadow detection in north Changchun. (a) Original draft; (b) result of double threshold detection method;  
(c) result of SI method; (d) result of the proposed method

采用4个定量评价指标(误检率 $F_{\text{CER}}$ 、漏检率 $F_{\text{OER}}$ 、总体分类精度OA和Kappa系数<sup>[23]</sup>)定量比较算法的检测性能。其中,误检率为非阴影像素误检为阴影像素点数与真实阴影像素点数的比率;漏检率为未检测到的阴影像素点数与真实阴影像素点数的比率;总体分类精度为被正确分类的总阴影区

域与非阴影区域的像素和与总像素点数的比率;Kappa系数为给予误差矩阵的一种评价指标,用来检验分类结果的正确程度。

表1给出了天津塔遥感影像的4种客观评价指标,就漏检率分析而言,所提方法与双阈值阴影检测方法、SI检测方法相比,漏检率分别降低了17.03%和

表 1 天津塔附近 3 种阴影检测方法的评价结果  
Table 1 Evaluation results of three detection methods  
around Tianjin tower

Algorithm	$F_{CER}/\%$	$F_{OER}/\%$	OA	Kappa
Ref. [4]	21.75	23.33	0.77	0.54
Ref. [6]	19.37	12.98	0.85	0.76
Proposed	4.72	5.46	0.95	0.91

14.65%，误检率分别降低了 17.87% 和 7.52%，总体分类精度分别提高了 0.18 和 0.10，Kappa 系数分别提高了 0.37 和 0.15。表 2 为利用所提方法对长春北部遥感影像的最终检测结果，所提方法与双阈值阴影检测方法及 SI 检测方法相比，漏检率分别降低了 3.29% 和 6.74%，误检率分别降低了 6.72% 和 4.19%，总体分类精度分别提高了 0.13 和 0.07，Kappa 系数分别提高了 0.05 和 0.07。该结果客观说明了所提出的阴影检测方法能够区分城市中易与建筑物阴影混淆的偏蓝色水体及暗色地物，且能够准确检测出城市高大建筑物阴影以及水体中的建筑物阴影。

表 2 长春北部 3 种阴影检测方法的评价结果  
Table 2 Evaluation results of three detection methods in  
north Changchun

Algorithm	$F_{CER}/\%$	$F_{OER}/\%$	OA	Kappa
Ref. [4]	7.23	8.96	0.86	0.88
Ref. [6]	10.68	6.43	0.90	0.86
Proposed	3.94	2.24	0.97	0.93

## 4 结 论

利用 PCA 变换与 HSI 空间光谱特征有效消除了暗色地物对于高分辨率遥感影像阴影检测的影响。同时，结合阴影概率约束条件，与文献[5]、[8]相比，所提算法能完整提取水体中的高大建筑物阴影，解决了传统阴影检测方法无法完整提取水中高大建筑物阴影的难题。对吉林一号光学 A 星大量遥感图像进行阴影检测，实验证明所提算法可将误检率和漏检率降低到 6% 以下，总体分类精度和 Kappa 系数可达到 0.9 以上，该算法对于水中高大建筑物阴影检测效果良好。

## 参 考 文 献

[1] Wang J, Qin Q M, Ye X, *et al.* A survey of building extraction methods from optical high resolution remote sensing imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 653-662.

王俊, 秦其明, 叶昕, 等. 高分辨率光学遥感图像建筑物提取研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 653-662.

- [2] Chen H S, He H, Xiao H Y, *et al.* Shadow detection in high spatial resolution remote sensing images based on spectral features [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 484-490.  
陈红顺, 贺辉, 肖红玉, 等. 基于光谱特征的高空间分辨率遥感影像阴影检测 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 484-490.
- [3] Makarau A, Richter R, Muller R, *et al.* Adaptive shadow detection using a blackbody radiator model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 2049-2059.
- [4] Tsai V J D. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1661-1671.
- [5] Yang J, Zhao Z M, Yang J. A shadow removal method for high resolution remote sensing image [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(1): 17-20.  
杨俊, 赵忠明, 杨健. 一种高分辨率遥感影像阴影去除方法 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2008, 33(1): 17-20.
- [6] Yao H Q, Yang S W, Liu Z J, *et al.* A method of shadow detection for city tall ground objects based on QuickBird images [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2): 51-55.  
姚花琴, 杨树文, 刘正军, 等. 基于 QuickBird 影像的城市高大地物阴影检测方法 [J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 51-55.
- [7] Murali S, Govindan V K. Shadow detection and removal from a single image using LAB color space [J]. Cybernetics & Information Technologies, 2013, 13(1): 95-103.
- [8] Liu H, Xie T W. Study on shadow detection in high resolution remote sensing image based on PCA and HSI model [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): 78-84.  
刘辉, 谢天文. 基于 PCA 与 HSI 模型的高分辨率遥感影像阴影检测研究 [J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 78-84.
- [9] Jung C R. Efficient background subtraction and shadow removal for monochromatic video sequences [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2009, 11(3): 571-577.
- [10] Leone A, Distante C. Shadow detection for moving

- objects based on texture analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(4): 1222-1233.
- [11] Xu J, Xiang W B, Mao Y B, *et al.* Moving object shadow detection based on regional color clustering [J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(3): 193-196.  
徐杰, 项文波, 茅耀斌, 等. 基于区域颜色聚类的运动目标阴影检测[J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(3): 193-196.
- [12] Ai W L, Wu Z H, Liu Y L. Outdoor shadow detection with paired regions [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(4): 551-558.  
艾维丽, 吴志红, 刘艳丽. 结合区域配对的室外阴影检测[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(4): 551-558.
- [13] Zhou X L, Guo J W, Liu K M. Water body information extraction based on operational land imager imagery and principal component analysis: A case study of Poyang Lake region [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080104.  
周小莉, 郭加伟, 刘琨铭. 基于陆地成像仪影像和主成分分析的水体信息提取——以鄱阳湖区为例[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080104.
- [14] Shuai T, Zhang H Y, Zhang L P. The objected-based method of shadow detection in high-resolution remote sensing imagery [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(12): 1228002.  
帅滔, 张洪艳, 张良培. 面向对象的高分辨遥感影像阴影探测方法 [J]. *光子学报*, 2015, 44(12): 1228002.
- [15] Li D W, Yang F B, Wang X X. Multisource remote sensing classification based on random forest and adaptive weighted D-S evidence synthesis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031001.  
李大威, 杨风暴, 王肖霞. 基于随机森林与 D-S 证据合成的多源遥感分类研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031001.
- [16] Deng L, Deng M J, Zhang L S. Optimization of shadow detection and compensation method for high-resolution remote sensing images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(2): 277-284.  
邓琳, 邓明镜, 张力树. 高分辨率遥感影像阴影检测与补偿方法优化 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(2): 277-284.
- [17] Su Y Z, Li A H, Jin G Z, *et al.* Multi-feature HSI-togram back-projection for moving shadow detection [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(7): 1395-1402.  
苏延召, 李艾华, 金广智, 等. 结合直方图反投影的多特征运动阴影检测算法 [J]. *光电子·激光*. 2014, 25(7): 1395-1402.
- [18] Xu Y, Wei Z Y. An improved traffic sign image recognition algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2017, 54(2):021001.  
徐岩, 韦镇余. 一种改进的交通标志图像识别算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 021001.
- [19] Duan Z G, Qu L Q, Tian J D, *et al.* Outdoor illumination shadow detection based on orthogonal decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0815002.  
段志刚, 屈靓琼, 田建东, 等. 基于正交分解的室外光照阴影检测 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0815002.
- [20] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. A closed-form solution to natural image matting [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 228-242.
- [21] Su N, Zhang Y, Tian S, *et al.* Shadow detection and removal for occluded object information recovery in urban high-resolution panchromatic satellite images [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(6): 2568-2582.
- [22] Liu D W, Han L, Han X Y. High spatial resolution remote sensing image classification based on deep learning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0428001.  
刘大伟, 韩玲, 韩晓勇. 基于深度学习的高分辨率遥感影像分类研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0428001.
- [23] Li P W, Ge W Y, Liu G Y. Shadow detection method based on shadow probability model for remote sensing images [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(2): 510-514.  
李鹏伟, 葛文英, 刘国英. 基于阴影概率模型的遥感影像阴影检测方法 [J]. *计算机应用*, 2015, 35(2): 510-514.