

# 改进对数变换联合局部增强的高分遥感影像阴影自动补偿方法

丰远远<sup>1</sup>, 高贤君<sup>1,2\*</sup>, 杨元维<sup>1,2</sup>, 邓帆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

<sup>2</sup>武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

**摘要** 针对遥感影像中的阴影会导致地物信息受损、影像质量下降的问题,提出了联合对数变换与局部增强的高分遥感影像阴影补偿方法。在阴影检测结果的基础上,首先设计了改进的对数变换图像增强方法,构建了对数变换模型,实现了阴影区域亮度的有效提升。然后,联合局部补偿模型,进行了加权处理,提升了阴影区域的对比度。最后,基于阴影边界同类特征点匹配的思想,自动解算了补偿模型的参数,实现了自动补偿。实验结果表明,所提方法可有效地实现阴影补偿,提升阴影区域的亮度与对比度,较准确地再现阴影区域地物的真实信息。

**关键词** 图像处理; 高分辨率遥感影像; 阴影补偿; 对数变换; 局部补偿模型; 加权综合

中图分类号 P237

文献标志码 B

doi: 10.3788/LOP57.201006

## Shadow Compensation of High-Resolution Remote Sensing Images Based on Improved Logarithmic Transformation and Local Enhancement

Feng Yuanyuan<sup>1</sup>, Gao Xianjun<sup>1,2\*</sup>, Yang Yuanwei<sup>1,2</sup>, Deng Fan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

**Abstract** In order to solve the problem that the shadow in remote sensing images leads to the loss of ground object information and the degradation of image quality, we propose a shadow compensation method by combing logarithmic transformation with local enhancement in the high resolution remote sensing images. First, based on the shadow detection results, we design an improved logarithmic transformation image enhancement method and construct the logarithmic transformation compensation model to effectively increase the brightness of shadow areas. Then, we use the local compensation model and weighting treatment to improve the contrast of shadow areas. Finally, we obtain the automatic parameters of the compensation model using the information of similar points on both sides of the shadow boundary and realize the automatic compensation. The experimental results indicate that the proposed method can be used for shadow compensation, to improve the brightness and contrast of shadow areas, and to recover the true ground object information of shadow areas correctly.

**Key words** image processing; high resolution remote sensing image; shadow compensation; logarithmic transformation; local compensation model; weighted synthesis

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 110.2960; 290.1090

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-02-04; 录用日期: 2020-02-24

基金项目: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(18R04)、地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2017NGCM07)、湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20181317)

\* E-mail: junxgao@whu.edu.cn

# 1 引言

由于受到太阳高度角、成像技术、地物遮挡等的影响,遥感影像中会存在阴影。而在高分遥感影像中,阴影区域地物的反射率较低,会引起影像目标分割和识别不准的问题<sup>[1]</sup>。随着影像空间分辨率的不断提高,在影像清晰度不断增加的同时,阴影对影像质量及应用效果的影响愈加严重。因此,探索合适的遥感影像阴影的补偿方法,采取非重拍手段尽可能恢复被遮挡的信息,最大效用地提高影像利用率具有重要的意义。

现有的阴影补偿法主要包括图像增强法及阴影特征信息补偿法两大类<sup>[2]</sup>。图像增强法是基于图像增强原理,通过选择性地突出或抑制图像中某些特征,使图像与视觉响应特性相匹配,进而使原始影像的数据发生变换<sup>[3]</sup>。传统的图像增强法包括直方图匹配法<sup>[4]</sup>、比值法、Retinex 法<sup>[5]</sup>、Wallis 滤波增强法<sup>[6]</sup>等,这些方法直接利用变换公式对整幅影像或者阴影区域信息进行图像增强,实现受损信息的补偿恢复。阴影特征信息补偿法<sup>[7]</sup>是运用阴影补偿模型对阴影区域的像素亮度、颜色、辐射值等进行处理,通过增强阴影区域的特征信息,实现阴影区域与非阴影区域一致的光照效果。杨俊等<sup>[8]</sup>运用阴影同质区原理,提出了阴影区域统计信息补偿法,有效提升了阴影区域的对比度;徐秋红等<sup>[9]</sup>利用颜色恒常性算法对阴影区域进行阴影去除处理,实现了阴影区域与非阴影区域的颜色一致性;高贤君等<sup>[10]</sup>利用局部补偿模型,设计了基于同类点匹配的参数自动解算方法,实现了自动补偿。总体来说,这类补偿方法常依据统一的模型进行阴影补偿,易出现补偿过度或不足的问题,难以根据阴影区域本身的特性实现自适应变换,不易实现亮度和对比度的同时提升。

因此,本文设计了改进的对数变换的阴影模型以提升阴影区域的亮度,并联合局部补偿模型以提升阴影区域的对比度;改进了同类点参数补偿方法,通过在阴影边界两侧选择相似特征点,自动解算了模型参数,实现了阴影区域的自适应补偿,提高了补偿精度,较好地恢复了阴影区域地物的真实特征信息。

## 2 改进对数变换联合局部增强的自动阴影补偿原理

针对目前图像增强与阴影区域信息补偿等方法存在的人工干预过多、对比度提升不均匀等问题,设计了改进对数变换与局部统计增强联合的高分遥感

影像阴影自动补偿方法,基于具有阴影亮度低、色调高等特征的阴影检测方法<sup>[10]</sup>,实现了阴影自适应补偿。

### 2.1 改进对数变换的阴影补偿原理

首先采用文献[5]提出的多条件综合自动提取方法,对整幅影像进行检测分析,提取出阴影区域。然后基于对数变换原理进行阴影补偿实验,针对不足之处进行合理改进,使改进的对数变换图像增强方法更加适用于阴影补偿。

#### 2.1.1 对数变换图像增强原理

对数变换表示输出图像的像素灰度值与其对应的输入图像的像素灰度值为对数关系,它作为图像处理算法的一个组成部分,通过对图像的低灰度值进行部分扩展及对图像的高灰度值进行部分压缩,可达到强调图像低灰度部分的目的。它的一般表达式<sup>[11]</sup>为

$$f(i, j) = A \ln [|g(i, j)| + 1], \quad (1)$$

式中: $(i, j)$ 为图像的像素; $f(i, j)$ 为输出图像的像素灰度值; $g(i, j)$ 为对应输入图像的像素灰度值; $A$ 是强度参数,主要用于变换阴影特征提升的动态范围,将动态范围变换到一个合适的区间,以显示阴影区域更多的细节。进行阴影补偿时, $A$ 主要影响整体特征的变化幅度范围,对图像对比度的提升不明显,补偿结果的清晰度不足。

#### 2.1.2 改进的对数变换补偿模型

根据不同的应用,(1)式被变换成不同的形式。针对原始对数变换应用于补偿时存在的补偿结果对比度不明显的问题,本文通过增加调节参数 $V$ ,改进并设计了适用于阴影补偿的变换公式,即

$$f(i, j) = A \ln [V \times |g(i, j)| + 1], \quad (2)$$

式中: $V > 1$ 。通过对参数 $V$ 的调整,原始结果的变换调整变得灵活,合适的参数 $V$ 对阴影的整体补偿效果有重要作用。当 $A$ 固定时,不同 $V$ 下补偿结果 $f(i, j)$ 与原始结果 $g(i, j)$ 的对数变换关系曲线图如图1所示。从图1中可以看出,当调制参数 $A$ 固定时, $V$ 的数值越大,曲线的斜率变化越大,拉伸效果越好,这有利于扩大阴影中原始特征值差异不明显的区域,增强对比度。

当 $A$ 取固定值0.8时, $V$ 对阴影处理结果的影响如图2所示。结合图1和图2可以看出, $V=1$ 时对应原始的对数变换,原始的对数变换能进行拉伸变换,对阴影补偿有一定的效果,但无法满足阴影补偿对亮度提升和对比度提升的需求。当 $V < 1$ 时,曲线斜率变化较小,拉伸效果不明显,如图2(c)所

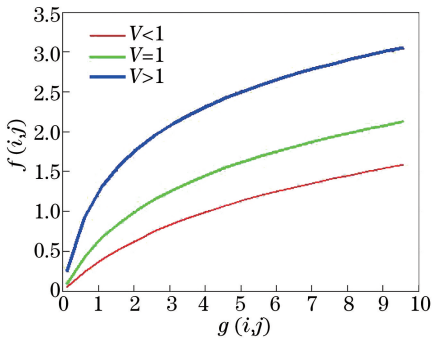


图1 参数  $V$  对对数变换曲线的影响

Fig. 1 Influence of parameter  $V$  on logarithmic transformation curve

示,当  $V=0.5$  时,改进后的对数变换对阴影补偿后图像的亮度及对比度的提升不明显,阴影补偿后图像的亮度及对比度不如原始的阴影图像。表1为对数变换实验的数据。由表1可知, $V < 1$ 时改进后的

对数变换的阴影补偿效果不如原始的对数变换的好。当  $V > 1$  时,曲线斜率较大,拉伸效果较明显,这说明改进的对数变换在  $V > 1$  时有利于阴影区域的特征补偿。从图2(e)可以看出,改进后的对数变换有利于增强阴影区域的亮度,基本恢复了被遮挡区域的信息,但补偿后图像的对比度与非阴影区域的目标值仍有较大区别,具体数值如表1所示。结合图2及表1可以看出,在  $V > 1$  的条件下,在一个合理的范围内,改进后的对数变换对阴影区域的补偿效果较好。一旦超过了合理范围,虽然阴影补偿后图像的亮度均值与梯度均值均高于非阴影区域目标值,但会出现影像失真的情况,如图2(f)所示,且补偿后的阴影区域亮度过高,与邻近非阴影区域有明显区别,影响影像的整体效果。因此,本文引入了局部补偿原理,通过联合对数变换与局部补偿,进一步修正补偿效果的对比度。

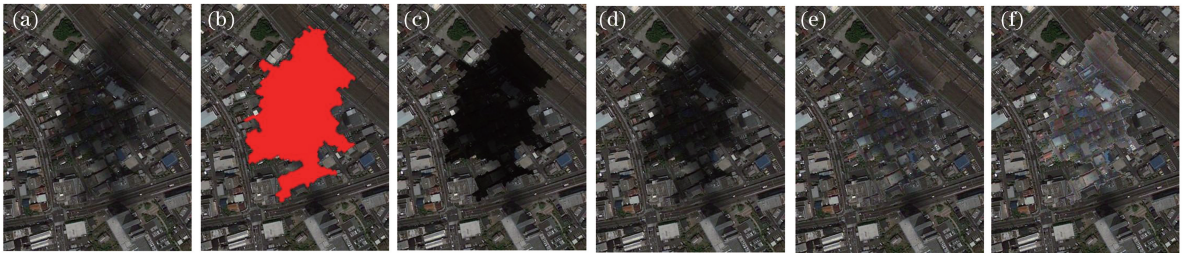


图2 参数  $V$  对补偿结果的影响。(a)原始影像;(b)阴影检测结果;(c) $V=0.5$ 时的补偿效果;(d)  $V=1$ 时的补偿效果;(e)  $V=2.5$ 时的补偿效果;(f)  $V=3$ 时的补偿效果

Fig. 2 Influence of parameter  $V$  on compensation result. (a) Original image; (b) shadow detection result; (c) compensation effect when  $V = 0.5$ ; (d) compensation effect when  $V = 1$ ; (e) compensation effect when  $V = 2.5$ ; (f) compensation effect when  $V = 3$

表1 对数变换实验数据

Table 1 Experimental data of logarithmic transformation

Index	Original value of shaded area	Non-shaded area target value	Compensation effect when $V=0.5$	Compensation effect when $V=1$	Compensation effect when $V=2.5$	Compensation effect when $V=3$
Mean brightness	35.6813	61.5258	13.7326	26.5029	60.2695	70.3108
Mean gradient	5.9157	10.7843	2.8213	4.3433	8.6223	9.9473

## 2.2 联合局部增强与对数变换的阴影补偿原理

改进的对数变换阴影补偿原理在增强补偿亮度方面具有很大的优势,但仍然存在对比度提升不足的问题。因此,本文引入了局部增强算法<sup>[12-13]</sup>,与改进的对数变换进行加权联合以提升对比度。

### 2.2.1 局部统计增强原理

常见的图像增强技术主要分为基于全局处理和基于局部处理两大类。在阴影补偿中,阴影可能只

占整幅影像的一小部分,传统的全局图像增强是对全图进行处理,虽然对阴影区域有一定的效果,但在全图范围内会丢失很多重要的信息。对阴影区域进行形态学处理,得到对应的非阴影区域。局部统计增强用于阴影补偿时,根据图像局部阴影区域的像素点与对应的非阴影区域的像素点有较大相关性的原理,在阴影检测的基础上,通过分析阴影区域对应的非阴影区域的亮度均值和均方差来构建局部补偿

模型,以解决全局图像增强时局部阴影区域的亮度增强不足的问题。这种方法能在增强暗区细节亮度的同时兼顾影像整体的对比度,减少信息的丢失。

通过对非阴影区域像素的亮度均值和均方差的研究,引入非阴影区域的局部补偿模型<sup>[14]</sup>:

$$y'(i,j) = A \left[ m_N + \frac{y(i,j) - m}{\sigma} \times \sigma_N \right], \quad (3)$$

式中: $y(i,j)$ 、 $y'(i,j)$ 分别为影像中像素 $(i,j)$ 处亮度分量的原始值和补偿值; $m$ 和 $\sigma$ 为阴影区的亮度均值与均方差; $m_N$ 和 $\sigma_N$ 分别为阴影区对应的非阴影区域的亮度均值和均方差。通过对补偿系数 $A$ 进行设定,可以达到不同的补偿效果。局部补偿原理已经应用于阴影补偿,在对比度改善方面有着明显的效果,但在亮度提升方面效果稍弱;当亮度提升至目标值时,会出现对比度提升过度的问题。

因此,本文联合对数变换和局部补偿方法,通过综合二者的优势来达到亮度与对比度均衡补偿的效果。

### 2.2.2 加权联合阴影补偿

加权联合阴影补偿的具体思想是针对阴影区域,统计局部补偿模型所需的统计参数,计算局部补偿值 $y'(i,j)$ ,同时利用改进的对数变换进行补偿,

获取对数变换补偿结果 $f(i,j)$ ,进而对对数变换与局部补偿结果进行综合加权以得到最终补偿结果 $I$ 。即

$$I = f(i,j) * u + y'(i,j) * r, \quad (4)$$

式中: $I$ 为最终阴影补偿结果; $u$ 和 $r$ 为权值系数,且 $u+r=1$ 。通过寻找最佳的权值系数,获取联合补偿模型,综合两种方法的优点,共同提高阴影补偿效果。通过大量的实验对比与分析,发现权值系数 $u$ 和 $r$ 分别取0.4和0.6时,补偿效果达到最佳,得到的综合补偿结果与目标值最为接近。

当 $A$ 为0.9时,对图2(a)所示影像中的阴影分别使用对数变换补偿方法、局部补偿方法以及联合补偿方法进行补偿,结果如图3所示。表2是不同补偿方法下的图像质量。结合图3与表2可以看出,对数变换补偿在亮度提升方面优于局部补偿方法,但图像的对比度远低于目标值,阴影覆盖下的地物在补偿后较模糊;局部补偿方法在对比度提升方面有较大优势,但亮度提升效果稍弱,补偿结果图中仍有阴影;联合补偿综合了两种方法的优点,极大改善了图像的亮度均值和对比度,补偿结果最接近目标值,最大限度地还原了真实的地物信息。



图3 三种方法得到的补偿结果。(a)原始影像;(b)对数变换结果;(c)局部补偿结果;(d)联合补偿结果  
Fig. 3 Compensation results from three methods. (a) Original image; (b) logarithmic transformation result; (c) local compensation result; (d) joint compensation result

表2 不同补偿方法下的图像质量

Table 2 Image quality under each compensation method

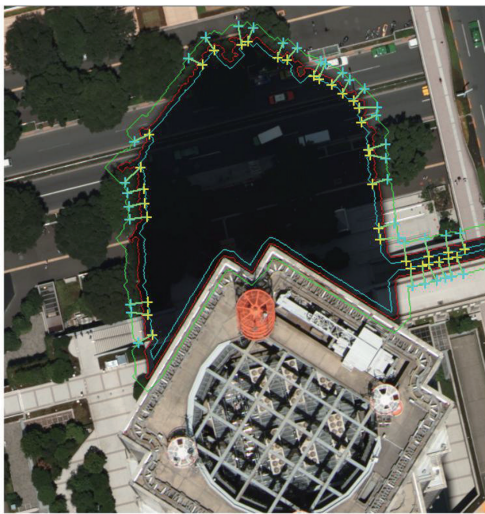
Index	Original value of shaded area	Non-shaded area target value	Logarithmic transformation result	Local compensation result	Joint compensation result
Mean brightness	35.6813	61.3258	87.0096	43.8826	61.1334
Mean gradient	5.9157	10.5143	7.1328	11.9212	10.0059

### 2.3 补偿参数的自适应获取

为了根据每个阴影区域自身的特点进行自适应补偿,本文在阴影边界内外侧的小区域范围内,通过寻找相似的同类特征点的方法,获取阴影区域地物点对应的非阴影区域同类点,并以其特征值为目标值,利用最小二乘法和阴影补偿公式,联合计算未知参数,实现各个区域相关补偿参数的自动获取。

图4所示为自动补偿过程中相似点对的获取示意图。以亮度特征改善为例,假设阴影边界附近的内部阴影区域中某像素代表某种地物,如裸地、柏油路,在其邻近的边界外部的非阴影区域内也应有被阳光直接照射的此类地物像素,可将非阴影区域内的此类地物像素所具有的特征值作为阴影区域中此类地物像素的原始特征值的近似目标值。首先通过

阴影检测确定阴影区域,然后对阴影边界线进行形态学膨胀及腐蚀处理,将膨胀处理后得到的区域边界作为非阴影特征线,将腐蚀处理后得到的区域边界则作为阴影特征线,接着在阴影边界线上随机获取一系列点,在两类特征线上分别寻找与这些点距离最近的点,并将其作为阴影特征点  $P^{SD}$  和非阴影特征点  $P^{NSD}$ ,它们可视为同类特征点对。具体思想如下:设在边界两侧选取了  $n$  组同类特征点,选取并匹配了相当数量的同类地物点对  $(P_1^{SD}, P_1^{NSD}), \dots, (P_n^{SD}, P_n^{NSD})$ ,为每个阴影区域确定了原始的补偿系数  $V, A, u$  和  $r$ 。以阴影点的像素特征值作为原始值,非阴影点的像素特征值作为目标值,将其代入(3)式,通过联立方程组,采用最小二乘平差原理,求解  $A$ ;然后将此  $A$  值代入(2)式,同理求解  $V$ ,并将此值与最优经验  $V$  值进行比较,如果偏差较大,将会使用最优经验  $V$  值;接着将  $A$  和  $V$  代入(4)式,同理求解合适的  $u$  和  $r$ 。将最终确定好的参数重新代入(2)~(4)式,确定该阴影区域的最终补偿模型,完成相应阴影像素的补偿。依此类推,实现各个阴影区域的自动补偿。



+ non-shadow feature point    + shadow feature point  
 — shadow feature line        — non-shadow feature line  
 — shadow boundary line

图4 自动补偿过程中相似点对的获取示意图

Fig. 4 Acquisition diagram of similarity pairs during automatic compensation

### 3 实验对比与分析

为了对比分析实验结果,本文采用四种方法对同一幅影像进行阴影补偿实验。通过对比高分辨率遥感影像的补偿结果,对补偿精度与运算性能进行评价。

#### 3.1 补偿精度评价

本文选取了三幅分辨率为 2 m 且存在云阴影的城市遥感影像和一幅建筑物影像,分别采取局部补偿方法、Wallis 阴影补偿方法<sup>[15]</sup>、原始对数变换阴影补偿方法和本文方法对四幅影像进行阴影补偿,四种方法的补偿效果如图 5~7 所示。图 5(a)和图 6(a)均为被云阴影遮挡的城市建筑密集影像,采用 Wallis 方法得到的补偿结果如图 5(c)、6(c)所示,阴影区域的整体亮度偏低,影像细节恢复效果较差,补偿效果偏离真实影像。局部补偿方法得到的补偿结果如图 5(d)、6(d)所示,可以看出,在对阴影进行补偿时,局部补偿方法虽然在对比度提升方面有很大优势,但亮度提升效果较弱,补偿的整体效果较差。原始对数变换方法补偿结果如图 5(e)、6(e)所示,阴影区域的整体亮度提升效果较好,影像清晰度恢复效果较好,但由于对比度较差,阴影边缘的影像与邻近非阴影区域的影像有较大区别。与以上三种补偿方法相比,本文提出的联合补偿法效果较好,阴影区域的整体亮度与纹理细节的恢复效果较好,贴近影像真实值。图 7 为小区云阴影城市高分影像图,对比结果显示,Wallis 补偿方法在亮度与对比度提升方面效果较差,原始对数变换补偿方法在亮度提升方面效果较好,局部补偿方法在对比度提升方面占有优势,联合补偿方法结合了对数变换与局部补偿两种方法的优势,在还原地物细节方面优势更加突出。结合图 5~7 中补偿效果细节对比图可以看出,与原始对数变换补偿方法比较,本文的联合补偿方法在还原地物细节方面效果较好。

图 5~7 为三幅城市影像的大片阴影补偿效果对比,图 8 所示为小幅建筑物影像的阴影补偿结果对比。由图 8 可以看出,Wallis 补偿方法的阴影补偿结果与目标值差距较大,局部补偿与原始对数变换补偿方法分别在对比度提升与亮度提升方面有突出的效果,本文的联合补偿方法结合了局部补偿与原始对数变换补偿方法的优势,在阴影补偿方面有明显优势。

统计多幅影像阴影补偿前后的总体亮度均值和平均梯度<sup>[10]</sup>,结合非阴影区域目标值,评价结果如表 3 所示。对比发现,四种补偿方法均能使阴影区域的亮度均值得到一定程度的提高,但难以达到与目标值完全一致的水平;Wallis 法相对于其他三种方法,亮度补偿效果不稳定。在表征对比度的梯度均值方面,本文方法补偿后梯度均值基本达到或超



图 5 城市影像 1 的补偿结果对比。(a)原始影像；(b)细节对比图选定区域；(c)Wallis 法的补偿效果；(d)局部补偿效果；(e)原始对数变换补偿效果；(f)本文方法的补偿效果；(g)原始对数变换补偿效果的细节图；(h)本文方法补偿效果的细节图  
 Fig. 5 Comparison among compensation results of urban image 1. (a) Original image; (b) selected area of detail comparison map; (c) compensation result by Wallis method; (d) local compensation effect; (e) compensation result by original logarithmic transformation; (f) compensation result by proposed method; (g) detail of compensation result by original logarithmic transformation; (h) detail of compensation result by proposed method

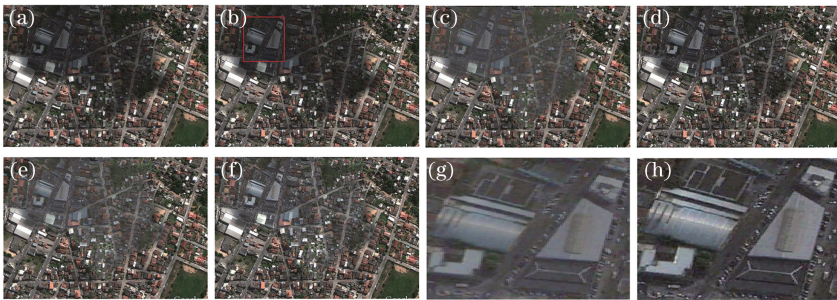


图 6 城市影像 2 的补偿结果对比。(a)原始影像；(b)细节对比图选定区域；(c)Wallis 法的补偿效果；(d)局部补偿效果；(e)原始对数变换补偿效果；(f)本文方法的补偿效果；(g)原始对数变换补偿效果的细节图；(h)本文方法补偿效果的细节图  
 Fig. 6 Comparison among compensation results of urban image 2. (a) Original image; (b) selected area of detail comparison map; (c) compensation result by Wallis method; (d) local compensation effect; (e) compensation result by original logarithmic transformation; (f) compensation result by proposed method; (g) detail of compensation result by original logarithmic transformation; (h) detail of compensation result by proposed method



图 7 城市影像 3 的补偿结果对比。(a)原始影像；(b)细节对比图选定区域；(c)Wallis 法的补偿效果；(d)局部补偿效果；(e)原始对数变换补偿效果；(f)本文方法的补偿效果；(g)原始对数变换补偿效果的细节图；(h)本文方法补偿效果的细节图  
 Fig. 7 Comparison among compensation results of urban image 3. (a) Original image; (b) selected area of detail comparison map; (c) compensation result by Wallis method; (d) local compensation effect; (e) compensation result by original logarithmic transformation; (f) compensation result by proposed method; (g) detail of compensation result by original logarithmic transformation; (h) detail of compensation result by proposed method

过目标值。与 Wallis 法、局部补偿方法和原始对数变换法相比,本文方法所获取的补偿效果接近目标值,能稳定地统一恢复阴影区域的基本信息。由图 5~8 可以发现,本文补偿方法不仅对大面积阴影

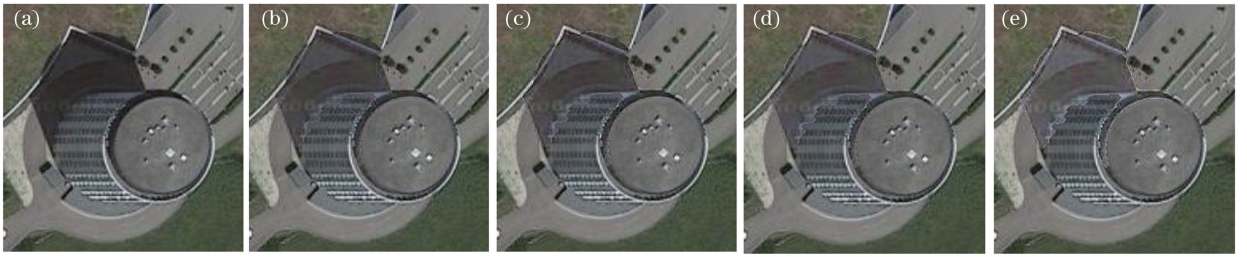


图8 建筑物的阴影补偿结果对比。(a)原始影像;(b)Wallis法的补偿效果;(c)局部补偿效果;  
(d)原始对数变换补偿效果;(e)本文方法的补偿效果

Fig. 8 Comparison among shadow compensation results of building image. (a) Original image; (b) compensation result by Wallis method; (c) local compensation result; (d) compensation result by original logarithmic transformation; (e) compensation result by the proposed method

表3 阴影补偿结果的评价

Table 3 Evaluation of shadow compensation results

Image	Index	Original value of shaded area	Non-shaded area target value	Compensation result by Wallis method	Local compensation result	Compensation result by original logarithmic transformation	Compensation result by proposed method
1	Mean brightness	32.7592	57.3512	42.9142	42.8810	48.9746	57.3512
	Mean gradient	4.5116	7.2790	3.5462	8.6396	6.3676	8.9232
2	Mean brightness	50.5660	86.8668	72.6850	65.1501	73.0049	86.2285
	Mean gradient	7.6557	15.2537	6.1923	13.1376	10.0181	14.0568
3	Mean brightness	29.1029	53.7794	37.5630	43.7125	49.7757	53.2503
	Mean gradient	4.6264	9.1361	4.9575	8.8015	5.9548	8.4537
4	Mean brightness	50.1019	98.8791	71.4916	75.1481	79.7161	95.5914
	Mean gradient	6.0155	10.1674	7.6867	9.5654	7.9620	10.0674

有效,而且对范围较小的阴影(如建筑物的阴影)也有较好的补偿效果。

### 3.2 运算性能评价

算法性能由图像大小、图像的阴影像素数目以及补偿时间三个方面联合体现。在系统配置为

Intel(R)i7 CPU 3.60 GHz,内存为32 GB的计算机环境下,在VS2017平台运行程序下,通过编写算法,实现了联合对数变换和局部增强的高分辨率遥感影像阴影自动补偿方法。阴影补偿的时间如表4所示。

表4 运算性能

Table 4 Operation performance

Image	Image size / (pixel × pixel)	Number of shaded pixels	Compensation time / s
Urban image 1	863 × 585	166541	1.13
Urban image 2	884 × 613	212022	1.62
Urban image 3	622 × 638	109438	1.01
Building image	257 × 266	9607	0.25

## 4 结 论

通过改进对数变换方法,使其能应用于高分辨率遥感影像的阴影补偿,并针对其不足,通过联合局部补偿方法,设计了参数自适应获取方法,实现了阴影的自动补偿。利用对数变换补偿提升阴影整体亮度,再联合局部补偿综合提升补偿结果的对比度,两者相互补充,共同提升阴影区域的亮度与对比度。针对每个阴影区域的自适应补偿参数解算方案,能使各个阴影区域实现自适应补偿,有利于恢复真实的地物信息,进一步提升补偿效果。

## 参 考 文 献

- [1] Aboutaleb M, Torres-Rua A F, McKee M, et al. Behavior of vegetation/soil indices in shaded and sunlit pixels and evaluation of different shadow compensation methods using UAV high-resolution imagery over vineyards [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 1066: 1066407.
- [2] 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.
- [3] Dong S G, Qin J X, Guo Y K. A method of shadow compensation for high resolution remote sensing images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(11): 118-124.  
董胜光, 秦建新, 郭云开. 一种高分辨率遥感影像阴影补偿方法[J]. *测绘科学*, 2018, 43(11): 118-124.
- [4] Wang Y, Pan Z B. Image contrast enhancement using adjacent-blocks-based modification for local histogram equalization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 59-65.
- [5] Bao H Y, Li Y, Zhao P. The research of object-oriented classification method in remote sensing image with texture analysis: taking Yangling County of Shaanxi Province as an example [J]. *Remote Sensing Information*, 2009, 24(4): 33-37.  
鲍海英, 李艳, 赵萍. 辅以纹理特征的面向对象的遥感影像分类方法研究——以陕西省杨陵县为例[J]. *遥感信息*, 2009, 24(4): 33-37.
- [6] Gao X J, Wan Y C, Zheng S Y, et al. Automatic shadow detection and compensation of aerial remote sensing images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1299-1302.
- 高贤君, 万幼川, 郑顺义, 等. 航空遥感影像阴影的自动检测与补偿[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(11): 1299-1302.
- [7] Mostafa Y. A review on various shadow detection and compensation techniques in remote sensing images [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, 43(6): 545-562.
- [8] 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.
- [9] Xu Q H, Ye Q. A method of shadow elimination from city high resolution remote sensing images based on colour constancy [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(4): 13-16, 111.  
徐秋红, 叶勤. 一种基于颜色恒常性理论的城市高分辨率遥感影像阴影消除方法[J]. *遥感信息*, 2010, 25(4): 13-16, 111.
- [10] Gao X J, Wan Y C, Yang Y W, et al. Automatic shadow detection and automatic compensation in high resolution remote sensing images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1709-1720.  
高贤君, 万幼川, 杨元维, 等. 高分辨率遥感影像阴影的自动检测与自动补偿[J]. *自动化学报*, 2014, 40(8): 1709-1720.
- [11] Jiao L N, Sun Z Y, Sha A M. Partially overlapped sub-block logarithmic transformation of images under non-uniform illumination [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(9): 196-199.  
焦立男, 孙朝云, 沙爱民. 非均匀光照图像的子块部分重叠对数变换[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(9): 196-199.
- [12] Yin H, Lyu G H, Luo X Y, et al. A segmentation-based adaptive image enhancement method inspired by the self-adjust features of HVS [J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2017, 8(6): 1895-1905.
- [13] Li B Z, Wang X H, Luo C. Color image segmentation algorithm used for core lines based on local enhancement and thresholding [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2017, 31(4): 311-317.



- 李保忠, 王晓浩, 罗超. 基于局部增强和阈值分割的芯线彩色图像分割算法 [J]. 测试技术学报, 2017, 31(4): 311-317.
- [14] Wang Y, Wan Y C, Gao X J. Automatic shadow compensation under improvement strategy of same kind points matching [J]. Geospatial Information, 2016, 14(8): 17-19, 25, 4 .  
王瑶, 万幼川, 高贤君. 同类点匹配改进策略下的阴影自动补偿方法 [J]. 地理空间信息, 2016, 14(8): 17-19, 25, 4 .
- [15] Wang J X, Shi L. Digital image feature extraction algorithm combined with Wallis filter [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(9): 1062-1066, 1080.  
王竞雪, 石利. 结合 Wallis 滤波的数字影像特征提取算法 [J]. 中国科技论文, 2016, 11(9): 1062-1066, 1080.