

自适应 Gamma 变换的遥感影像云阴影补偿方法

杨金辉¹, 高贤君^{1*}, 杨元维^{1,2}, 丰远远¹

¹长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

²城市空间信息工程北京市重点实验室, 北京 100045

摘要 遥感影像中云阴影的遮挡严重影响着影像解译与应用, 寻找一种高效的阴影补偿方法恢复被遮挡信息显得尤为重要。针对现有常规 Gamma 变换补偿模型中 γ 系数计算方法依赖阴影区域统计特征, 无法体现阴影区域内部差异的问题, 提出一种利用不同层级的影像特征信息构建自适应 Gamma 变换的云阴影补偿算法。首先对遥感影像进行云阴影检测, 获取云阴影区域并统计区域级的特征均值与方差; 然后设计了改进对数变换 γ 因子计算方法, 通过综合阴影区域内像素局部窗口与阴影区域和非阴影区域的多层级均值方差信息, 加权求解能反映阴影区域总体特征和内部差异的最佳值, 实现像素级的自适应补偿, 使得云阴影区域内部所有像素均能得到合理补偿, 达到与非阴影区域相一致的效果。实验结果表明, 所提方法可有效实现不同形状、厚度云层下的云阴影补偿, 云阴影亮度和对比度提升明显, 较好地再现云阴影下的区域地物细节。

关键词 遥感影像; 云阴影; 自适应 Gamma 变换; 加权综合

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028004

Cloud Shadow Compensation Method of Remote Sensing Images Based on Adaptive Gamma Transformation

Yang Jinhui¹, Gao Xianjun^{1*}, Yang Yuanwei^{1,2}, Feng Yuanyuan¹

¹School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China;

²Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100045, China

Abstract The existence of cloud shadows in remote sensing images severely affects image interpretation and application. Therefore, finding an efficient shadow compensation method is essential to recover the shaded information. Because the calculation method for obtaining γ coefficient in the conventional Gamma transformation compensation model relies only on the statistical characteristics of the shadowed area, this method cannot reflect the difference between the pixels within the shadowed area. Therefore, this study proposes a self-adaptive Gamma algorithm using the image information from different levels to compensate for the shaded information automatically in the cloud shadows. First, the cloud shadows were detected using remote sensing images and the feature mean and variance of the shadow regions were calculated. Then, the improved logarithmic transformation γ -factor calculation method was designed. By synthesizing the multi-level mean variance information of the local window of pixels in the shadow area, the shadow area and non shadow area, the weighted solution can reflect the overall characteristics and internal differences of the shadow area. Moreover, this method can realize the pixel-level adaptive compensation. Therefore, each pixel in the cloud shadow area can be reasonably compensated to achieve the same effect as the

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金(2020NGCM07)、北京市重点实验室经费资助项目(20210205)、海南省地球观测重点实验室开放基金(2020LDE001)、长江大学大学生创新创业基金(Yz2020036)

通信作者: *junxgao@yangtzeu.edu.cn

nonshaded area. The experimental results show that the proposed method can effectively compensate the cloud shadow cast by clouds with different shapes and thicknesses. The brightness and contrast of cloud shadows are considerably improved. Additionally, the details of the regional features in cloud shadows are better recovered.

Key words remote sensing image; cloud shadow; adaptive Gamma transformation; weighted combination

1 引言

在遥感影像获取过程中,时常存在云层遮挡太阳光形成大面积、不规则的云阴影。这些阴影区域的灰度值受云层厚薄和大小程度等因素影响,表现出整体亮度低、内部遮挡程度不均匀的特点^[1-2]。在高分辨率遥感影像的应用中,影像的地物细节信息对目标识别提取尤为重要,大面积云阴影的存在会影响细节信息的利用^[3]。因此,探索遥感影像云阴影补偿方法具有重要意义。

高分遥感影像中阴影补偿方法主要有图像增强法和模型法两大类^[4]。图像增强法包括 Wallis 滤波^[5]、线性拉伸^[6]、Retinex 法^[7]、直方图匹配法^[8]、辐照度补偿法^[9]等,此类方法主要通过不同的图像增强算法提升阴影区域的整体亮度和对比度,达到阴影补偿的目的。Sarabandi 等^[10]基于图像局部增强原理设计了线性相关校正算法,该算法可有效地恢复阴影区域信息。Tsai^[11]设计了基于阴影不变特征的阴影检测算法,该算法采用直方图匹配对阴影区域进行增强恢复。Yang 等^[12]在 Wallis 滤波模型上通过改变强度系数和拉伸系数达到增强亮度和对比度的目的,最终得到较好的阴影补偿效果。总体来说,该类方法的补偿效果与图像增强算法能力密切相关,但易出现补偿过度或不足现象,且补偿系数依赖实验效果和人工经验,较难实现根据阴影区域遮挡程度进行阴影自动补偿的目的。模型法则利用 Gamma 修正法、色彩恒常性原理、线性相关修正法等构建补偿模型,在补偿时加入阴影区域对应非阴影区域的信息,以此实现补偿区域与对应非阴影区域信息一致性的效果^[13-16]。Wan 等^[17]利用 Gamma 变换原理,通过将阴影信息作为乘性噪声,对指数模型进行校正。Mo 等^[18]设计一种面向对象的阴影检测方法,利用词袋模型进行区域匹配,实现阴影补偿。此类方法在进行阴影补偿时虽然可有效提高阴影区域的整体亮度与对比度,但依然存在自适应调整能力较弱等问题,导致处理后的影像细节信息恢复不够完整,难以达到理想状态。

针对目前补偿方法难以根据云阴影中遮挡不均匀特点做出自适应调整的问题,本文在 Gamma 补偿

模型基础上,设计了一种利用阴影区域和非阴影区域的均值、方差以及阴影区域内像素局部窗口的均值、方差信息的改进 Gamma 变换模型,自适应地进行云阴影补偿,有效恢复阴影区域的地物细节信息。

2 Gamma 变换的阴影补偿原理

Gamma 变换根据人眼对光线的敏感程度,对影像亮度进行编码,主要原理是采用 γ 因子对影像进行非线性的亮度调整,多用于影像匀色调整优化与图像增强。目前阴影补偿中常见的有经典 Gamma 变换法、Gamma 修正算法^[19]、利用对数变换自适应 Gamma 补偿算法^[20]等。所提方法基于对数变换 Gamma 补偿算法,引入多层次信息,实现云阴影区域的自适应补偿。

2.1 经典 Gamma 变换法的基本原理

在图像处理过程中,经典 Gamma 变换常应用于调整过度曝光(过亮)或曝光不足(过暗)的图像,在摄影行业后期处理中使用较多。经典 Gamma 变换公式为

$$s = cr^\gamma, \quad (1)$$

式中: r 为图像的原始灰度值; s 为经过计算后的灰度值; c 为灰度缩放系数; γ 为伽马因子,控制整个变换的缩放程度。

Gamma 变换对灰度值进行非线性调整,对较暗区域加以增强,同时又降低较亮区域灰度值,最终达到增强图像整体细节的效果。但云阴影区域受云层遮挡程度的影响,整体亮度偏低,阴影区域灰度值差距较大,将经典 Gamma 变换算法直接应用到高分遥感影像的阴影补偿处理中补偿效果并不明显。

2.2 Gamma 修正算法阴影补偿原理

Gamma 修正算法在式(1)的基础上加以改进,把阴影作为乘性噪声源,辐射校正时利用指数函数进行校正。Gamma 修正法的计算公式为

$$p_N = 2047 \left(\frac{p}{2047} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2)$$

式中: p_N 为处理后的像素值; p 为原始像素值; γ 为伽马因子,该处利用其倒数约束变换的程度。

当利用 Gamma 修正算法进行阴影补偿操作

时,通常人工赋予 γ 因子固定的经验值。由于云层遮挡程度不同,阴影区域不同像素灰度值对 γ 因子的数值要求也随之变化。若将固定的 γ 值应用到不同的影像,则会忽视各影像阴影区域内部像素值的差异性,导致部分影像补偿效果不佳。

当 γ 因子均取固定值 1.12 时三幅影像的补偿结果如图 1 所示。从目视效果来看,图 1(a)影像亮度提升均匀,与邻近非阴影区域无明显色差,阴影

覆盖下地物信息恢复较为完整,补偿效果相对较好;图 1(b)影像亮度均值提升明显,阴影覆盖下地物细节有一定程度的恢复,但补偿后阴影区域与邻近非阴影区域有明显对比差异;图 1(c)影像补偿后仍存在较明显灰色区域,此区域下地物细节恢复效果较差。由此看出,固定的 γ 因子无法适用于所有云阴影影像的补偿,亟须一种能够根据影像自身特征变化而自适应解算的阴影补偿算法。

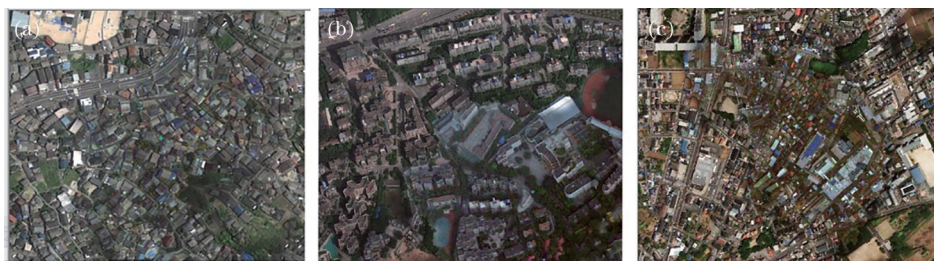


图 1 $\gamma=1.12$ 时对不同影像的补偿效果

Fig. 1 Compensation effects for different images under $\gamma=1.12$

2.3 对数变换自适应 Gamma 阴影补偿算法阴影补偿原理

与 Gamma 修正算法的 γ 因子只能取某一固定经验值相比,对数变换自适应 Gamma 补偿法则能够根据影像自身特性解算出适应于影像的 γ 因子,公式为

$$p_N = p^\gamma, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\log m_{NSD} + \sigma_{NSD}}{\log m_{SD} + \sigma_{SD}}, \quad (4)$$

式中: m_{SD} 和 σ_{SD} 为阴影区域均值和方差; m_{NSD} 和 σ_{NSD} 分别为对应非阴影区域均值和方差。对数变换自适应 Gamma 补偿法虽然能根据阴影区域的信息状态自动解算出 γ 因子,但该因子对阴影补偿的效果并不理想,如图 2 所示。图 2(a)影像中阴影的中间



图 2 对数变换自适应 γ 补偿方法对不同影像的补偿效果
Fig. 2 Compensation effects of logarithmic transformation adaptive γ compensation method for different images

部分补偿效果欠佳,但阴影边界却呈现出过度补偿现象,且阴影区域与非阴影区域存在明显边界;图 2(b)影像中阴影的中间部分亮度提升效果一般,

但阴影边界却无明显补偿效果,阴影区域内部地物细节没有得到较好恢复。由此看出,该算法虽然具有一定的自适应性,但对阴影区域的整体亮度提升效果并不突出,呈现出中间低、边界高的现象;其次,无法处理阴影区域内部到边界的平滑过渡,阴影区域与非阴影区域存在明显分界线,交界处地物信息被分割,影响目视解译效果。

总体来说,这些算法仍然存在着自适应补偿不足的问题,难以达到补偿效果和自适应补偿能力兼容的状态。因此,在以上三种补偿算法的基础上,本文提出了自适应 Gamma 变换的遥感影像云阴影补偿算法。

3 自适应 Gamma 变换的阴影补偿原理

云阴影区域的地物普遍存在亮度低、色调高等特征,且在辅助性特征如蓝、绿波段的差值分量及饱和度上具有特征值高的特点。另外,云层厚度也直接决定了光照透射量,进而影响到云阴影的遮挡程度,云层薄的区域亮度值比云层厚的区域高。因此,在阴影区域检测和提取方面,云阴影提取相对于建筑物阴影更难。采用文献[21]中的云阴影特征选取与自动阈值结合的检测方法实现阴影提取,并提出自适应 Gamma 变换的云阴影补偿算法,实现云阴影区域地物的亮度增强。

3.1 Gamma 系数的自适应获取

自适应 Gamma 变换的关键在于如何能够根据影像特征自适应计算合适的 γ 因子, 以此控制整个变换的缩放程度, 达到理想的补偿效果。为了最佳地利用阴影周围的状态信息, 以式(2)为基础, 结合式(4)的自适应思想, 综合利用阴影区域、对应非阴影区域以及阴影区域内窗口矩阵的均值、方差信息, 通过加权综合处理计算出自适应于该像素的 γ 因子。 γ 因子的解算公式为

$$\gamma = N \frac{\log m_{\text{NSD}} + \sigma_{\text{NSD}}}{\log(0.5m_{\text{SD}} + 0.5m_{\text{WSD}}) + (0.5\sigma_{\text{SD}} + 0.5\sigma_{\text{WSD}})}, \quad (5)$$

式中: m_{WSD} 和 σ_{WSD} 为窗口矩阵均值和方差; N 为强度参数, 主要用于控制 γ 的变化范围(一般为 1.28~1.32)。模型通过对整体阴影区域均值和方差以及阴影区域窗口矩阵均值和方差进行加权处理, 最终得到自适应阴影补偿的 γ 因子。

由于云层遮挡程度不同, 同一幅影像中的阴影区域内像素之间亮度值差异较大。因此, 为提升阴影区域的整体亮度, 并解决阴影内亮度值差异较大的问题, 在逐像素计算补偿值时, 提出整体阴影区域特征和窗口矩阵特征联合约束的方法。窗口矩

阵的均值和方差的计算公式为

$$m_{\text{WSD}} = \frac{\sum_{a=-n}^n (i+a, j+a)}{(2n+1)^2}, \quad a \in [-n, +n], \quad a \in \mathbf{Z}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{WSD}} = \frac{\sum_{a=-n}^n [(i+a, j+a) - m_{\text{WSD}}]^2}{(2n+1)^2}, \quad a \in [-n, +n], \quad a \in \mathbf{Z}, \quad (7)$$

式中: n 为窗口矩阵的半边长; (i, j) 为窗口矩阵中逐像素的亮度均值。式(6)累加窗口矩阵中所有像素亮度值, 取其平均作为计算区域的亮度均值。在取得式(6)计算结果后, 式(7)利用方差计算原理解算该窗口矩阵方差。

如图 3 所示, 蓝色线内为检测到的阴影区域, 红色线到蓝色线区域为阴影到非阴影的过渡区域, 绿色线到红色线内为阴影外一定范围的局部非阴影区域。在逐像素解算 γ 因子时, 以像素为中心取合适的 n 值并选取以边长为 $2n+1$ 的窗口矩阵。将该区域作为计算范围, 利用式(6)和式(7)解算窗口矩阵的均值、方差。通过改变 n 值的大小可控制窗口矩阵的边长范围, 对于较为特殊例如细节信息丰富的影像可以适当降低 n 值的大小, 一般情况下 n 为 10~15。

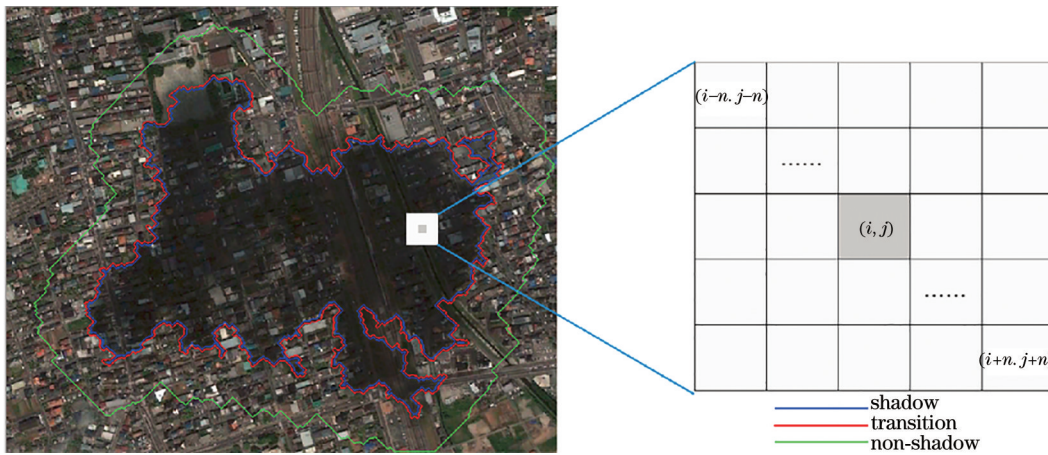


图 3 阴影像素矩阵窗口示意图

Fig. 3 Schematic of the shaded pixel matrix window

利用亮度均值 B 和平均梯度 T 以及非阴影区域的亮度均值 B_{NSD} 和平均梯度 T_{NSD} 计算补偿质量评价指标 ΔB^2 和 ΔT^2 , 具体计算为

$$\begin{cases} \Delta B^2 = [(B - B_{\text{NSD}}) / B_{\text{NSD}}]^2 \\ \Delta T^2 = [(T - T_{\text{NSD}}) / T_{\text{NSD}}]^2 \end{cases} \quad (8)$$

将所提算法应用到同一幅影像的补偿处理中,

通过调整窗口大小得到不同的补偿结果, 分析窗口大小对补偿质量的影响。由图 4(a)可以看出, 窗口大小的改变对梯度细节信息的影响较大。随着窗口的不断增大, 窗口提供的局部信息范围更广, 对 ΔB^2 和 ΔT^2 影响逐渐减小, 更趋近于无窗口的补偿效果。同时, 由图 4(b)可以看到, 随着窗口的不断增大, 阴影补偿计算的时间呈现出指数增长趋势。图 5(a)、

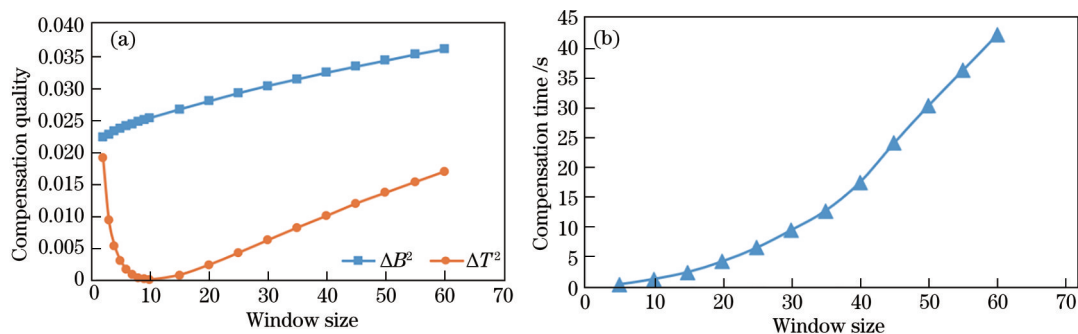


图 4 窗口大小对补偿结果的影响。(a)对补偿质量的影响;(b)对补偿时间的影响

Fig. 4 Influence of the window size on the compensation results. (a) Impact on compensation quality; (b) impact on compensation time

(b)、(c)分别是窗口大小为 5、21、35 时的补偿效果。综合分析三幅补偿效果图,图 5(a)细节部分过度处理,图 5(c)阴影区域亮度提升不明显,图 5(b)相较于

其他两幅图在细节优化和亮度提升上都有明显优势。由此,可根据使用者的质量需求和效率需求对所提算法中提到的窗口进行适当调整。

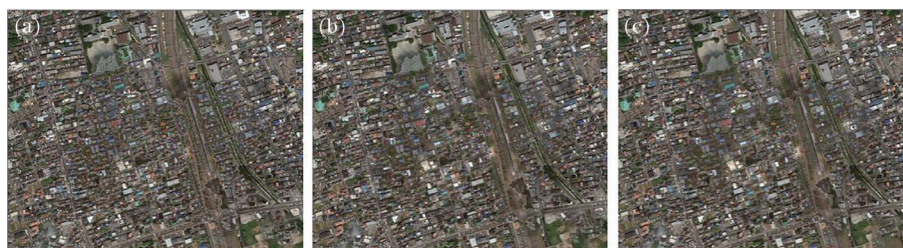


图 5 不同窗口大小补偿效果对比。(a) $n=2$; (b) $n=10$; (c) $n=17$

Fig. 5 Comparison of compensation effects under different window sizes. (a) $n=2$; (b) $n=10$; (c) $n=17$

3.2 自适应 Gamma 变换阴影补偿流程

所提阴影补偿算法流程主要分为阴影检测、特征值计算、阴影补偿 3 个步骤。如图 6 所示,首先利

用多特征组合的阴影自动检测方法提取影像中的云阴影区域^[21];然后对获取的独立阴影区域与对应非阴影区域分别计算其均值和方差,在计算单个像

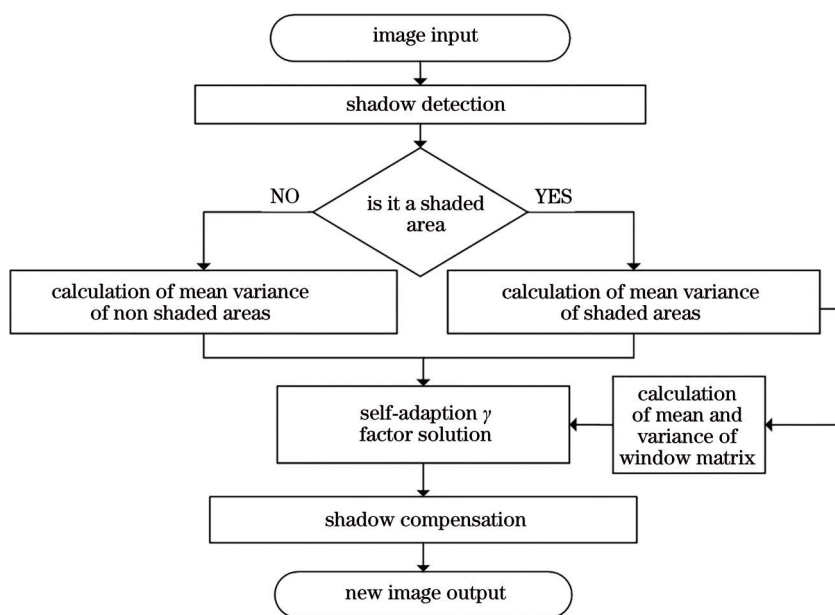


图 6 自适应 Gamma 变换补偿流程

Fig. 6 Flow chart of adaptive Gamma transform compensation

素补偿值时,计算该窗口矩阵的均值和方差,并根据 γ 因子解算模型自适应解算出适合该像素的 γ 因子;最后利用计算出来的 γ 因子对该像素进行补偿,待补偿完成后输出新影像。

4 实验结果与分析

为对比分析自适应 Gamma 变换算法处理不同

云阴影影像的效果,选取了面积、形状、亮度均不相同、分辨率 1 m 的三幅城市区域的高分辨率遥感影像作为实验数据。图 7 阴影区域面积较大,形状较完整。图 8 阴影区域形状较零散,单片区域面积较小,阴影区域内整体亮度较高。图 9 阴影区域面积较大,形状完整,阴影内部亮度值较低且相差不大,但细节信息丢失较严重。

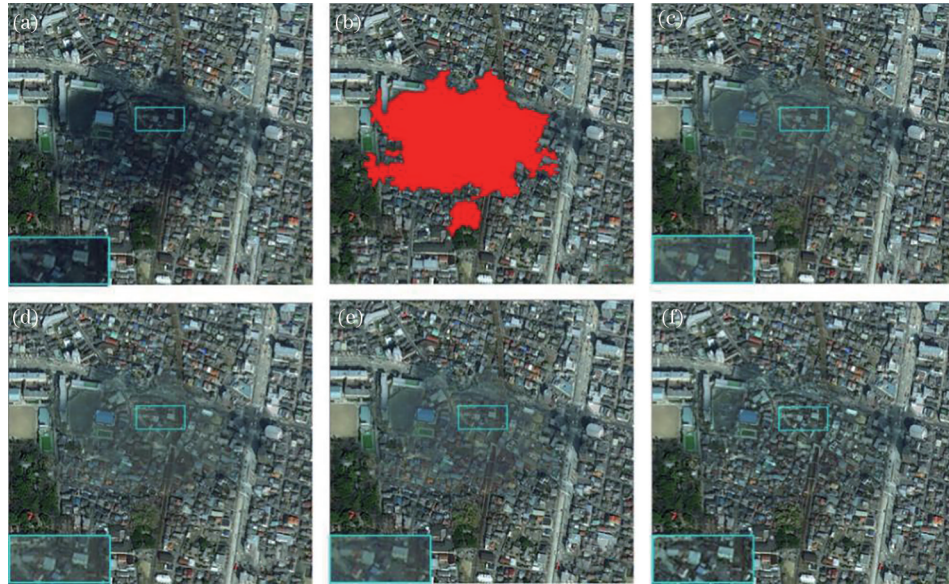


图 7 影像 1 补偿结果对比。(a)原始影像;(b)阴影检测;(c)经典 Gamma 补偿;(d) Gamma 修正;(e)对数变换自适应 Gamma 补偿;(f)所提方法

Fig. 7 Compensation result comparison of image 1. (a) Original image; (b) shadow detection; (c) classical Gamma compensation; (d) Gamma correction; (e) logarithmic transform adaptive Gamma compensation; (f) proposed method

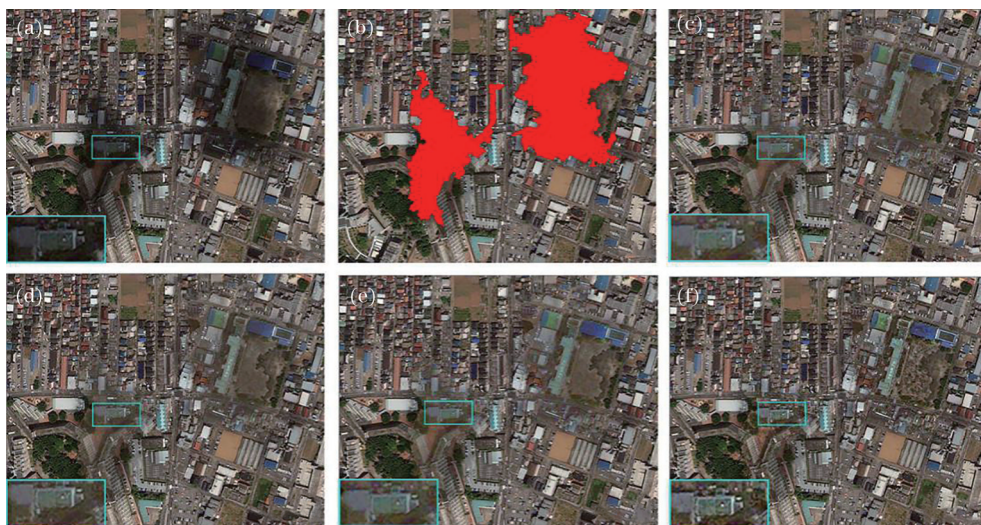


图 8 影像 2 补偿结果对比。(a)原始影像;(b)阴影检测;(c)经典 Gamma 补偿;(d) Gamma 修正;(e)对数变换自适应 Gamma 补偿;(f)所提方法

Fig. 8 Compensation result comparison of image 2. (a) Original image; (b) shadow detection; (c) classical Gamma compensation; (d) Gamma correction; (e) logarithmic transform adaptive Gamma compensation; (f) proposed method



图9 影像3补偿结果对比。(a)原始影像;(b)阴影检测;(c)经典Gamma补偿;(d) Gamma修正;
(e)对数变换自适应Gamma补偿;(f)所提方法

Fig. 9 Compensation result comparison of image 3. (a) Original image; (b) shadow detection; (c) classical Gamma compensation; (d) Gamma correction; (e) logarithmic transform adaptive Gamma compensation; (f) proposed method

采用经典Gamma变换法、Gamma修正法、对数变换自适应Gamma补偿法、所提自适应Gamma变换法进行补偿对比分析。在三幅影像阴影补偿处理过程中控制单一变量,经典Gamma变换法检测的 γ 因子取值0.7;Gamma修正法的 γ 因子取值1.03;对数变换自适应Gamma补偿法根据影像条件自适应解算 γ 因子;所提自适应Gamma变换法的常数 N 取值1.3,窗口矩阵边长取值10, γ 因子根据影像条件自适应解算获得。

图7~9的(a)、(b)分别为原始影像和阴影自动检测的结果。图7~9的(c)是利用经典Gamma变换法补偿的效果图,该算法对阴影区域的整体亮度、对比度提升效果不佳,对阴影区域的亮度、对比度提升在数值上与其他几种算法相比效果最差。图7~9的(d)为Gamma修正算法补偿效果图,可以看到该算法在选择合适的 γ 因子后可以显著提升阴影区域的整体亮度,但与非阴影区域相比,其补偿亮度均值仍具有一定差距,实际补偿使阴影与非阴影交界处易出现过度补偿现象,且该算法处理类似图7阴影区域面积较大、云层遮挡程度不同的影像时补偿效果不佳。图7~9的(e)为对数变换自适应Gamma补偿结果,该算法的补偿效果与经典Gamma变换算法相近,但具有不依赖人工干预的优势,设置的 γ 因子不会因为人工经验的不同而不同,简化了阴影补偿的步骤。从表1中的数据对比可以看出,该算法在亮度和对比度的提升效果上与经典

Gamma算法相近,补偿效果欠佳,主要是因为该方法的自适应获取的参数并不合适,导致补偿效果不理想。图7~9的(f)为所提算法补偿结果,对比发现,与以上三种算法相比,所提自适应Gamma变换法更能达到理想的补偿效果,可以将阴影区域的亮度均值提升到与周围非阴影区域的目标值相近,又摆脱了人工干预,计算过程中的 γ 因子完全是由解算模型根据阴影像素的实际情况来确定的,在阴影边界优化补偿、阴影区域内细节恢复等方面比其他方法更占优势。

结合实验影像与实验数据表对比发现,四种算法中Gamma修正算法和自适应Gamma变换法在亮度均值提升效果上占据优势。但Gamma修正算法由于 γ 因子需要根据不同影像的特征来进行人工调节,调节精度难以掌握。所提自适应Gamma变换补偿算法相对于其他几种补偿方法不仅在亮度均值提升方面具有更明显的效果,对阴影区域内部的细节恢复方面也有较大的优势,可达到亮度与对比度同时提升的目标。从最终补偿效果图可以看出,所提算法充分利用阴影区域、非阴影区域以及阴影区域中窗口矩阵的均值、方差等影像自身特征信息,计算获得适应于影像中阴影补偿的 γ 因子,用于阴影区域的自适应补偿,很好地改善了补偿后阴影边界过亮问题,且整个补偿过程无需人工干预,实验效率得到充分提高,实现对云阴影区域自适应补偿的目的。

表 1 不同方法的阴影补偿质量结果对比

Table 1 Comparison of shadow compensation quality results using different methods

Image	Method	$\Delta B^2 + \Delta T^2$	Compensation result		Shaded area		Non-shaded area	
			B	T	B	T	B	T
1	Proposed method	0.040	78.73	22.81				
	Classical Gamma	0.298	61.48	14.14				
	Gamma correction	0.365	52.07	14.56	48.92	7.59	98.16	23.47
	Log-Gamma	0.295	85.44	11.1				
2	Proposed method	0.060	82.92	19.55				
	Classical Gamma	0.283	62.15	14.81				
	Gamma correction	0.347	53.08	15.18	48.64	9.39	96.36	20.75
	Log-Gamma	0.235	68.31	15.01				
3	Proposed method	0.085	78.43	19.03				
	Classical Gamma	0.437	60.2	11.19				
	Gamma correction	0.547	47.5	11.32	38.62	7.86	90.89	18.32
	Log-Gamma	0.330	73.56	11.67				

5 结 论

提出了自适应 Gamma 变换阴影补偿算法,根据影像特征信息自适应补偿阴影区域。该算法充分利用影像特征信息,对影像中阴影区域、非阴影区域以及阴影区域窗口矩阵的均值、方差特征信息进行加权处理,解算出适合该窗口补偿计算的 γ 因子。实验证明,所提算法在处理特征不同的云阴影影像时均可得到较好的补偿效果,能够恢复一定程度的真实地物信息。后续的研究工作将进一步探讨阴影边界优化补偿问题。

参 考 文 献

[1] 常京新,王双喜,杨元维,等. 高分遥感影像建筑物轮廓的逐级优化方法[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1010002.
Chang J X, Wang S X, Yang Y W, et al. Hierarchical optimization method of building contour in high-resolution remote sensing images[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1010002.

[2] 屈也频,刘坚强,侯旺. 单目视觉高精度测量中的合作目标图形设计[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1315001.
Qu Y P, Liu J Q, Hou W. Graphics design of cooperative targets on monocular vision high precision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1315001.

[3] Li Z W, Shen H F, Li H F, et al. Multi-feature combined cloud and cloud shadow detection in GaoFen-1 wide field of view imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 342-358.

[4] 杨元维,王明威,高贤君,等. 改进 Wallis 模型的高分辨率遥感影像阴影自动补偿方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 318-325.
Yang Y W, Wang M W, Gao X J, et al. Automatic shadow compensation based on improved Wallis model for high resolution remote sensing images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(3): 318-325.

[5] 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.
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.

[6] 王静. 基于线性校正的遥感图像阴影去除算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 7-20.
Wang J. Research on shadow removal in remote sensing images based on linear correction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 7-20.

[7] 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.
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 Shanxi Province as an example[J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(4): 33-37.

[8] 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.
- [9] Han H Y, Han C S, Huang L, et al. Irradiance restoration based shadow compensation approach for high resolution multispectral satellite remote sensing images[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6053.
- [10] Sarabandi P, Yamazaki F, Matsuoka M, et al. Shadow detection and radiometric restoration in satellite high resolution images[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, September 20-24, 2004, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2004: 3744-3747.
- [11] 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.
- [12] Yang Y W, Ran S H, Gao X J, et al. An automatic shadow compensation method via a new model combined Wallis filter with LCC model in high resolution remote sensing images[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 5799.
- [13] 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.
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.
- [14] 张红颖, 李鸿, 孙毅刚. 基于混合高斯模型的阴影去除算法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(1): 31-34.
Zhang H Y, Li H, Sun Y G. Shadow removal algorithm based on Gaussian mixture model[J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(1): 31-34.
- [15] 林宗坚, 任超锋, 姚娜, 等. 一种航空影像阴影补偿方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(4): 431-435.
Lin Z J, Ren C F, Yao N, et al. A shadow compensation method for aerial image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 431-435.
- [16] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像视见度增强[J]. *自动化学报*, 2011, 37(8): 923-931.
Yu J, Li D P, Liao Q M. Color constancy-based visibility enhancement of color images in low-light conditions[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(8): 923-931.
- [17] Wan C Y, King B A, Li Z. An assessment of shadow enhanced urban remote sensing imagery of a complex city-Hong Kong[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012: 177-182.
- [18] Mo N, Zhu R X, Yan L, et al. Deshadowing of urban airborne imagery based on object-oriented automatic shadow detection and regional matching compensation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(2): 585-605.
- [19] 郑茜颖, 王钦敏. 一种 QuickBird 卫星遥感影像的阴影重建方法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(17): 30-32.
Zheng Q Y, Wang Q M. Shadow restoration method of QuickBird satellite remotely sensed imagery[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(17): 30-32.
- [20] 岳照溪. 高分辨率遥感影像阴影检测与去除技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 27-29.
Yue Z X. Research on shadow detection and removal of high resolution remote sensing image[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 27-29.
- [21] 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.