



# 改进 Wallis 模型的高分辨率遥感影像阴影自动补偿方法

杨元维<sup>1</sup> 王明威<sup>2</sup> 高贤君<sup>1,3</sup> 李熙<sup>3</sup> 张佳华<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长江大学地球科学学院,湖北 武汉,430100

<sup>2</sup> 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北 武汉,430074

<sup>3</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:**目前的阴影自动补偿方法仍然存在对比度提升的自适应能力不足等问题。Wallis滤波原理常用于影像色彩匀光,但应用于阴影补偿时会存在影像反差系数对对比度提升效果不理想的问题。首先,通过增加补偿强度系数及拉伸系数,设计了改进的 Wallis 阴影补偿模型;然后,获取阴影周边的非阴影区域信息作为补偿目标,利用阴影边界在局部范围内寻找同类特征点,自动解算该模型中的补偿系数值,再根据各个阴影区域自身的特点定制相应的补偿模型,对阴影区域内各像素亮度进行合理补偿,恢复被遮挡地物信息;最后,选取多幅具有云阴影及地物阴影的影像进行检测以及阴影补偿的实验,并与局部补偿方法进行对比。实验结果表明,该方法能够有效地补偿阴影,使其亮度和对比度共同提升到与非阴影区域相一致的水平,最佳还原被阴影遮挡的地物信息。

**关键词:**Wallis模型;高分辨率遥感影像;阴影自动补偿;云和地物阴影

**中图分类号:**P237.3

**文献标志码:**A

遥感影像获取过程中由于受到太阳高度角、地形起伏、具有一定高度地物遮挡的影响,部分区域无法得到太阳的直接光照而产生阴影。阴影区域亮度明显暗于周围非阴影区域,地物信息无法真实呈现,从而导致影像质量受损。阴影遮挡的面积与被投射物体的大小及高度有关,其中云阴影的遮挡面积较普通地物大<sup>[1-2]</sup>。因此,研究遥感影像阴影补偿方法,恢复被阴影遮挡的地物信息对改善影像质量具有重要的研究意义。

阴影自动补偿方法主要分为图像增强法和模型法两类。图像增强法主要包括线性拉伸<sup>[3-4]</sup>、Retinex<sup>[5]</sup>、Wallis滤波<sup>[6]</sup>等方法,对阴影区域或图像全局采用图像增强算法来提升阴影区域的亮度与对比度,从而实现阴影去除。文献[7]利用局部统计增强模型统计阴影区域及非阴影区域在色调(hue, H)、饱和度(saturation, S)、亮度(intensity, I)特征分量上的均值与方差,结合一定的

补偿系数进行阴影区域补偿。这类方法的处理效果与图像增强算法能力相关,常依赖经验确定参数,难以做到根据阴影遮挡程度变化实现自适应处理。模型法是利用线性相关修正法、Gamma修正法、色彩恒常性原理等方法建立阴影光照补偿模型,将非阴影区域信息加入到补偿模型中进行阴影区域的补偿提升<sup>[8-11]</sup>。文献[12]提出了三次多项式非线性补偿模型,并采用一种内外轮廓线(inner - outer outline profile line, IOOPL)匹配方法获取模型参数,可自适应地补偿阴影;文献[13]利用Gamma修正原理将阴影视作一种乘性噪声源,认为噪声的影响系数与原始图像灰度有关,利用指数函数进行辐射校正,参数可通过阴影与非阴影区域的均值估计;文献[14]基于阴影与非阴影区域满足明可夫斯基范式的颜色恒常性算法的假设,根据非阴影区域的信息可推断出阴影区域在同等光照条件下应有的颜色信息,但是范式中的指数参数通常在整幅影像处理时

收稿日期:2019-12-12

项目资助:自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金(2020NGCM07);测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(18R04);国家自然科学基金(41701537);海南省地球观测重点实验室开放基金(2020LDE001)。

第一作者:杨元维,博士,讲师,主要从事高分辨率遥感图像目标智能解译研究。yyw\_08@163.com

通讯作者:高贤君,博士,副教授。junxgao@yangtzeu.edu.cn

保持一致,依赖经验获取。上述方法在进行自动阴影补偿时可有效提高整体亮度,但仍存在不同阴影区域的地物对比度自适应调整能力偏弱的问题,使得纹理信息显示不够突出,细节信息恢复不够完整。

本文在 Wallis 滤波原理基础上,引入了补偿强度及拉伸系数构建改进的 Wallis 补偿模型,使其更加针对性地提高特征均值与对比度,并对每个阴影区域分别进行同类特征点选取与匹配,以自动解算适合该区域的补偿参数,实现对影像中各阴影区域的自适应补偿,均衡提升对比度和亮度效果,尽可能完整地恢复被遮挡信息。

## 1 改进 Wallis 的阴影补偿原理

### 1.1 Wallis 滤波原理

Wallis 滤波器的一般形式可以表示如下<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} g^c(i,j) = g(i,j)r_1 + r_0 \\ r_1 = (cs_f)/(cs_g + s_f/c) \\ r_0 = bm_f + (1-b-r_1)m_g \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $g^c(i,j)$ 、 $g(i,j)$  分别代表目标影像和原始影像;参数  $r_1$ 、 $r_0$  分别为乘性系数、加性系数;  $m_g$ 、 $s_g$  分别代表待处理像素  $(i,j)$  周围局部区域的特征均值、方差;  $m_f$ 、 $s_f$  分别是对这一区域进行一定的分析后设定的目标均值、目标方差;  $c(c \in [0,1])$  为影像反差扩展常数,与窗口大小成正比;  $b(b \in [0,1])$  为影像亮度系数,当  $b$  接近 1 时,影像的均值被调整到  $m_f$ ,而当  $b$  接近 0 时,影像的均值基本没变化,保持为  $m_g$ 。一般情况下,通常选择整幅影像中该特征值的总体中值作为  $m_f$ ,而由于目标方差  $s_f$  决定着影像的反差和细节表现力,应当合理设定。当  $c$  和  $b$  取值均为 1 时,Wallis 滤波器基本等同于典型的局部增强模型,利用  $m_f$  和  $s_f$  进行增强处理。

以图 1(a)所示的云阴影影像为例,首先,进行阴影检测;然后,对阴影区域直接采用 Wallis 滤波原理对亮度特征分量进行补偿实验,以阴影区域的周边非阴影区域为目标值,Wallis 补偿取得的效果如图 1(b)所示。由图 1 可知,补偿后的效果确实在亮度方面得到了改善, $b$  对阴影区域特征均值提升有效果,但是总体仍然存在对比度不强问题, $c$  用于阴影区域的对比度改善效果不明显,补偿后的结果不清晰,地物特征未完全恢复。



(a) 云阴影原始影像

(b) Wallis 补偿效果

图 1 Wallis 滤波用于阴影区域补偿的效果

Fig.1 Shadow Compensation Results Using Wallis Filter

### 1.2 改进 Wallis 滤波的阴影补偿原理

利用 Wallis 滤波原理进行阴影补偿时,以非阴影区域为目标值,结合一定的  $b$  和  $c$ ,使得  $r_1$  和  $r_0$  相对固定,此时阴影区域的提升相当于一种线性变换,但由于阴影区域地物信息受阴影遮挡,使得内部特征反差偏小, $c$  对  $r_1$  的改变影响较弱,导致斜率偏低,无法有效地线性拉伸,模型缺少有效提升对比度的参数。此外,自动补偿应当能够自适应地根据遮挡程度的不同而合理确定补偿参数,而 Wallis 滤波补偿参数常以经验确定,自适应能力偏弱。

为了解决上述两个问题,本文提出了一种通过获取阴影区域周边一定范围的非阴影区域作为该阴影区域补偿的目标值,加入补偿强度系数和拉伸系数的方法,设计了改进的 Wallis 补偿模型,计算如下:

$$g^c(i,j) = \alpha(m_{\text{NSD}} + (g(i,j) - m_{\text{SD}})/(\beta r_1) - r_0 r_1) \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  表示补偿强度系数;  $\beta$  表示拉伸系数;  $m_{\text{NSD}}$ 、 $m_{\text{SD}}$  分别代表非阴影区域(non-shadow region, NSD)、阴影区域(shadow region, SD)的特征均值。

本文选择亮度均值  $B$  和平均梯度  $T$  来评价补偿结果的恢复效果<sup>[16]</sup>,并利用非阴影区域的亮度均值  $B_{\text{NSD}}$  和平均梯度  $T_{\text{NSD}}$  计算  $(\Delta B)^2$  和  $(\Delta T)^2$ ,以此作为两种质量参数评价补偿结果与目标值的差异及补偿结果质量,具体计算如下:

$$\begin{cases} (\Delta B)^2 = ((B - B_{\text{NSD}})/B_{\text{NSD}})^2 \\ (\Delta T)^2 = ((T - T_{\text{NSD}})/T_{\text{NSD}})^2 \end{cases} \quad (3)$$

统计图 1 所示的云阴影补偿结果的亮度均值和平均梯度,进一步得到  $\alpha$ 、 $\beta$  与两者的关系图,以及  $\alpha$ 、 $\beta$  的变化对质量参数的影响,分别如图 2、图 3 所示。

由图 2 可知,随着  $\alpha$  的增大,亮度均值与平均梯度随之提高,总体呈线性增长,但过高的  $\alpha$

使得亮度补偿过度,与周边非阴影区域的光照亮度不一致;通过与目标值的对比可以发现,在质量参数曲线变化的最小值处可取得最优 $\alpha$ 值。由图3可知, $\beta$ 的变化对单个像素的提升有影响,但不会引起整体区域的亮度均值的变化,其主要影响着阴影区域的平均梯度,其值越小,对比度越高;其值越大,对比度越低,但有一定的限值,过小的 $\beta$ 会引起信息过度拉伸而损失了原有信息;过大的 $\beta$ 会导致阴影区域地物信息无法得到有效提升,因此,选取合适的 $\beta$ 将有助于恢复阴影区域的细节信息。通过与目标对比度差异进行对比可以发现, $(\Delta T)^2$ 会随着 $\beta$ 的

增大而急剧减小,并很快达到与非阴影区域相一致的对比度效果,随着 $\beta$ 的继续增大,对比度差异变化缓慢。

如果各参数取得合适值,阴影区域的特征分量经过改进后的Wallis补偿模型提升后,同一位置处的 $g(i,j)$ 和 $g^c(i,j)$ 的关系发生明显变化,整体提升幅度变大,对比度更强,被遮挡的地物得以更清晰地再现。另外, $\alpha$ 能同时提高特征均值与对比度, $\beta$ 可有效控制对比度的提升,参数调整时针对性更强,更有利于恢复阴影区域的细节特征信息。因此,本文改进的模型能有效用于阴影补偿中。

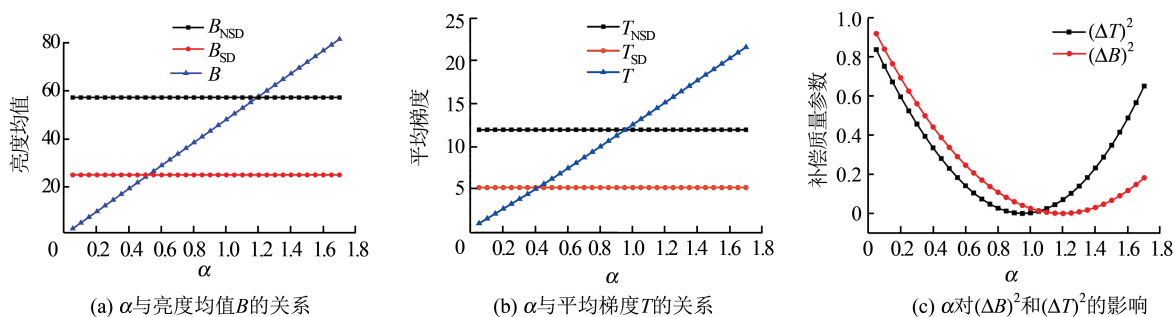


图2  $\alpha$ 对补偿结果的质量影响

Fig.2 Influence of  $\alpha$  on Quality of Compensation

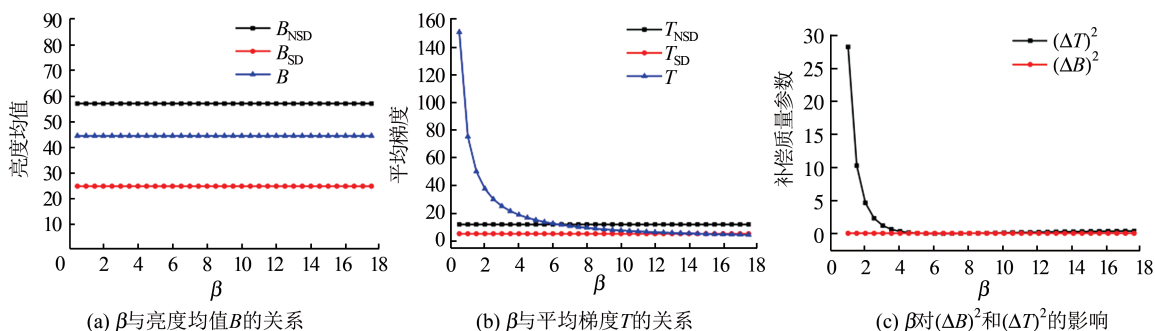


图3  $\beta$ 对补偿结果的质量影响

Fig.3 Influence of  $\beta$  on Quality of Compensation

## 2 阴影全自动补偿方法

在实际应用中,整幅影像会存在不同的阴影区域,为了对每个区域进行合理的自适应补偿,本文将以每个阴影区域为基本单元,获取阴影区域周边的非阴影区域,采用同类特征点匹配自动解算适合该区域相应特征的补偿参数,实现对每个阴影区域的自动补偿。

### 2.1 补偿参数自动获取方法

本文在阴影边界内外侧的一定小区域范围内寻找相似的同类特征点,利用多组同类特征点

获取阴影区域地物点对应的非阴影区域同类点的特征值,以此为目标值,利用最小二乘法代入阴影补偿公式联合解算未知参数,实现对各个区域相关补偿参数的自动获取。

本文以亮度特征改善为例,假设阴影边界附近的内部阴影区域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 $g^c$ 作为阴影区域的此像素的原始特征值 $g$ 的近似目标值。设在边界两侧选取了 $n$ 组同类特征点,通



过经验确定  $b$  和  $c$  的经验值,以独立阴影区域为整体,其周边一定范围的非阴影区域为补偿目标,  $m_{\text{NSD}}$  和  $\sigma_{\text{NSD}}$ 、 $m_{\text{SD}}$  和  $\sigma_{\text{SD}}$  分别代表非阴影、阴影区的特征均值和方差,为每个阴影区域确定原始的 Wallis 补偿系数  $r_0$  和  $r_1$ 。则  $\alpha$  和  $\beta$  的计算如下:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{g^c}{m_{\text{NSD}} + (g - m_{\text{SD}})\sigma_{\text{NSD}}/\sigma_{\text{SD}}} \\ \beta = \frac{g - m_{\text{SD}}}{(\frac{g^c}{\alpha} - m_{\text{NSD}} + r_0 r_1)r_1} \end{cases} \quad (4)$$

图 4 为单个区域补偿相关区域及特征点选取原理图。通过阴影检测确定阴影区域,利用一定的形态学膨胀处理,获取阴影区域周边一定宽度  $K_1$  的区域作为此阴影区域相关的非阴影区域。此两类区域将用于获取阴影及非阴影区域的均值和方差。以阴影区域为基础,再次进行  $K_2$  次膨胀及腐蚀处理,得到的区域边界分别作为非阴影特征线及阴影特征线,如图 4(a)所示。随机获取阴影边界线一系列点,分别寻找这些点在两类特征线上距离最近的点作为阴影特征点  $P_{\text{SD}}$  和非阴影特征点  $P_{\text{NSD}}$ ,可视作一对同类特征点。依次获取多对同类特征点,用于求解该区域的补偿参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ,将  $\alpha$ 、 $\beta$  代入式(2)实现对该阴影区域的补偿。对整幅影像中的其他区域重复上述过程,实现对各个阴影区域的自动补偿。

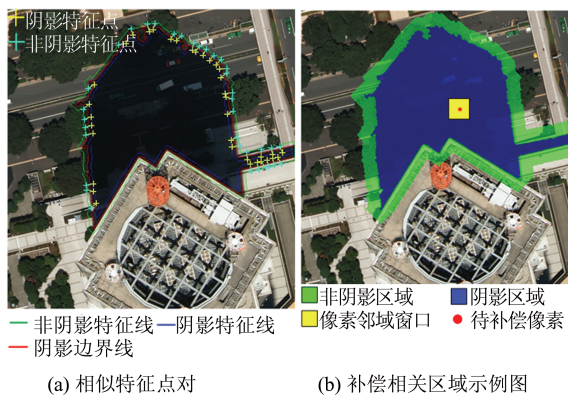


图 4 自动补偿的相似点对获取以及相关区域示例图  
Fig.4 Feature Points Acquisition and Relative Regions Schematic Diagram of Automatic Compensation

随机选取测试影像中 4 个不同的阴影区域作为测试对象,以  $(\Delta B)^2 + (\Delta T)^2$  为补偿质量总参数,通过人工调整参数获取的补偿质量参数与  $\alpha$ 、 $\beta$  之间的关系如图 5 所示。以质量总参数最小值估计  $\alpha$ 、 $\beta$  的理想值,与本文自动参数获取策略所得的  $\alpha$ 、 $\beta$  值对比,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,自动解算值与估计的理想值比较接近。

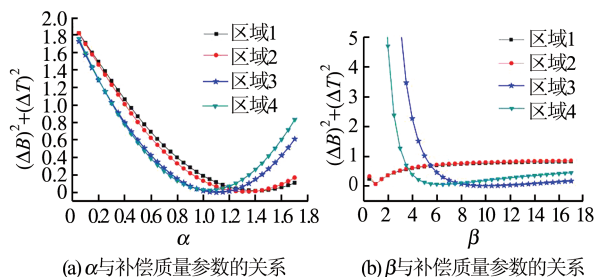


图 5 不同区域的  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $(\Delta B)^2 + (\Delta T)^2$  的关系图  
Fig.5 Relationship Between  $\alpha$ 、 $\beta$  and  $(\Delta B)^2 + (\Delta T)^2$  of Different Regions

表 1 不同区域的  $\alpha$  和  $\beta$  自动解算值与理想值对比  
Tab.1 Comparison of  $\alpha$  and  $\beta$  Values Calculated Automatically with Their Ideal Values of Different Regions

阴影区域	$\alpha$ 自动值	$\beta$ 自动值	$\alpha$ 理想值	$\beta$ 理想值
区域 1	1.295 0	1.036	1.35	1.0
区域 2	1.264 0	0.926	1.30	1.0
区域 3	1.091 0	9.831	1.10	10.0
区域 4	1.086 3	6.321	1.05	6.5

## 2.2 阴影自动补偿流程

本文对获取的真彩色影像 (red green blue, RGB) 进行 RGB-HSI 色彩空间变换,提取  $I$  分量并采用本文提出的补偿改进策略进行处理,补偿后转换到 RGB 色彩模型中实现自动补偿,具体步骤如下:①输入待处理 RGB 真彩色影像;②进行 RGB-HSI 色彩变换;③对影像进行阴影检测,获取阴影区域以及周边的非阴影区域;④选定  $I$  特征分量进行补偿处理,统计阴影区域的均值  $m_{\text{SD}}$  和方差  $\sigma_{\text{SD}}$ ,假设邻近非阴影区域的特征  $m_{\text{NSD}}$  和  $\sigma_{\text{NSD}}$  为理想值,并设定  $b$  和  $c$ ,根据非阴影区域的目标值自动解算  $\alpha$  和  $\beta$ ,再根据式(2)计算对应补偿值;⑤根据补偿后的新特征值,将 HSI 色彩模型转换到 RGB 色彩模型中,获取阴影补偿后的影像。

## 3 对比实验及分析

本文选取多幅存在明显普通地物阴影和云阴影的高分辨率遥感影像进行实验,以文献[17]提出的局部补偿模型以及原始的 Wallis 补偿算法作为参照算法进行对比。选择  $I$  特征分量进行补偿提升,设定  $b=0.6$ ,  $c=0.45$ 。本文方法在此参数的基础上,与自动解算得到的  $\alpha$  和  $\beta$  共同进行补偿,依次确定 3 种方法的参数。

本文选取影像 1、影像 2、影像 3 进行实验分



析。首先,分别利用文献[18-19]的方法进行阴影检测;然后,分别采用本文方法和参照算法对阴影区域进行阴影补偿,并对阴影补偿质量进行定量分析与对比。

影像1为城区存在高层建筑物阴影遮挡的航空遥感影像(图6(a)),分辨率为8 cm,阴影遮挡区域几乎没有光线的照射。因此,阴影区域内亮度非常低,地物信息无法获取。由图6可知,通过Wallis模型直接补偿结果的亮度和对比度提升效果不理想,在对比度方面反而存在一定的负作用;局部补偿结果能有效地提升亮度和对比度,但是对不同区域的补偿提升效果不一致,同一幅影像中存在部分区域补偿不足,亮度提升不够,而其他区域又存在补偿过度的情况;而本文方法结果在对比度和亮度提升方面能根据阴影自身特征取得与周围非阴影区域的图像质量相接近的效果。

影像2为云阴影遮挡的卫星影像(图7(a)),遮挡区域存在较多的绿色植被,整体非阴影区域亮度偏低。由图7可知,局部补偿结果使整体阴

影区域按照统一的补偿强度提升亮度,恢复了遮挡信息,但是对原始亮度较低的植被来说对比度稍差,而本文方法对不同地物信息恢复较为合理、均匀,对比度提升效果好。

影像3是具有多个云阴影遮挡的影像(图8(a)),由图8可知,3种方法提升后的补偿效果与非阴影区域色彩对比度均比较相近,其中,局部补偿方法的亮度提升稍弱。

统计3种方法补偿阴影区域后的亮度均值及平均梯度,与原始阴影及非阴影区域结果对比,并统计补偿质量总参数 $(\Delta B)^2 + (\Delta T)^2$ ,反映补偿结果与目标值直接在均值和对比度上的差异,该值越小,说明与目标值越接近,补偿效果越好,具体统计结果如表2所示。由表2可知,以非阴影区域为目标值,本文方法的补偿质量参数与目标值最接近。总的来说,本文方法通过补偿强度系数和拉伸系数来控制补偿结果,在对比度与亮度提升上,能够更有效准确地使补偿结果达到与非阴影区域相一致的效果,补偿质量更高,补偿自适应能力更强,对比度提升效果更有针对性。

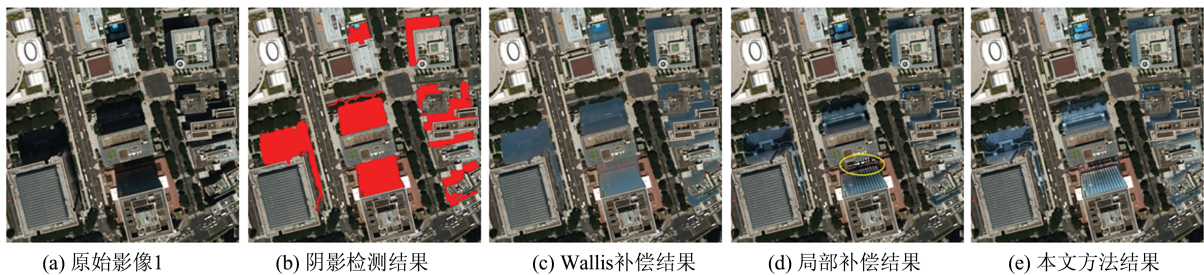


图6 影像1的普通阴影补偿结果对比

Fig.6 Comparison of Ordinary Shadow Compensation by Different Methods for Image 1

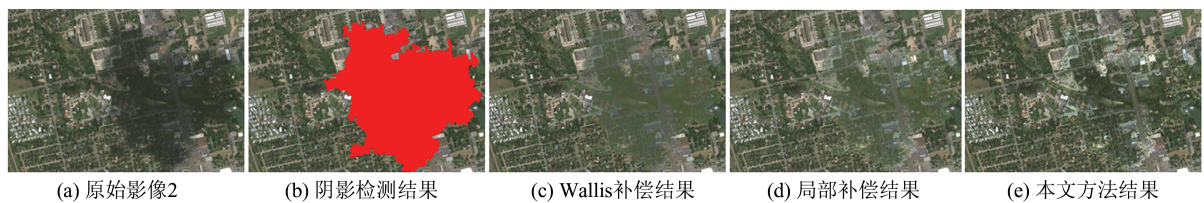


图7 影像2的云阴影补偿结果对比

Fig.7 Comparison of Cloud Shadow Compensation by Different Methods for Image 2

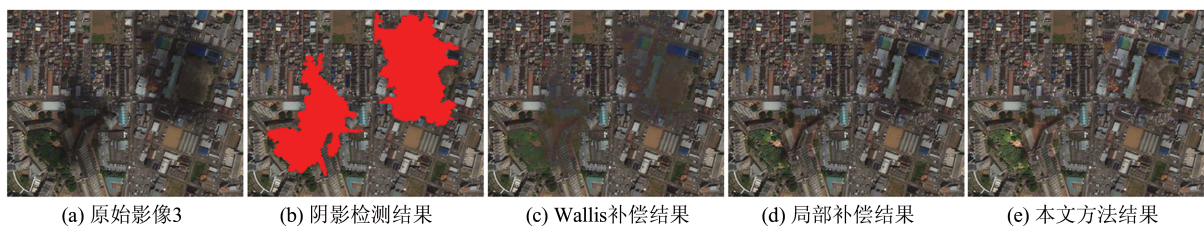


图8 影像3的云阴影补偿结果对比

Fig.8 Comparison of Cloud Shadow Compensation by Different Methods for Image 3

表 2 采用不同方法的阴影补偿质量结果对比

Tab.2 Comparison of Shadow Compensation Quality Using Different Methods

原始影像	补偿方法	补偿质量	补偿后的阴影区域		阴影区域		非阴影区域	
		$(\Delta B)^2+(\Delta T)^2$	亮度均值	平均梯度	亮度均值	平均梯度	亮度均值	平均梯度
影像 1	本文方法	0.001 5	96.99	26.02				
	Wallis 补偿	0.897 0	71.89	2.42	23.23	6.17	99.92	25.37
	局部补偿	0.041 2	81.96	22.98				
影像 2	本文方法	0.001 5	63.31	13.88				
	Wallis 补偿	0.466 0	56.27	4.71	36.27	5.18	63.18	14.44
	局部补偿	0.081 4	60.69	10.36				
影像 3	本文方法	0.000 4	59.56	13.95				
	Wallis 补偿	0.381 1	51.11	5.62	28.94	5.91	60.83	13.92
	局部补偿	0.013 4	54.63	13.15				

4 结 语

本文设计了改进 Wallis 滤波原理的阴影补偿模型,该模型增加了可有效提升特征强度和对比度的补偿强度系数及拉伸系数,相比于原始的 Wallis 滤波来说,对于信息受到严重损失的阴影区域,可帮助受损信息更有针对性地恢复与提升,并且结合参数自动提取方案,可有效获取模型中的各项补偿参数,使其能够根据各项阴影的具体特征实现自适应的补偿。相比于其他方法,本文方法对比度和亮度提升效果明显,能够更精准地达到与非阴影区域相一致的效果,恢复被阴影遮挡的地物信息。

本文方法可以应用于高分辨率遥感影像中云阴影或普通地物阴影的去除中,恢复被阴影遮挡的道路、房屋、植被等地物信息,为提高影像色彩质量、影像目标识别前的预处理、提高影像利用率提供了一种阴影遮挡信息恢复的解决方案。

参 考 文 献

[1] Lu Xin, Zhao Hongli, Yang Shuwen, et al. Dectection of Thick Clouds Shadow from Landsat TM Data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(5): 87-90(卢鑫, 赵红莉, 杨树文, 等. 一种陆地卫星影像厚云阴影检测方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 87-90)

[2] Li Z, Shen H, Li H, 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

[3] Tiwari S, Chauhan K, Kurmi Y. Shadow Detection and Compensation in Aerial Images Using MATLAB[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2015, 119(20):5-9

[4] Wang Jing. Research on Shadow Removal in Remote Sensing Images Based on Linear Correction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017(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)

[5] Wang S, Wang Y. Shadow Detection and Compensation in High Resolution Satellite Image Based on Retinex[C]. IEEE Computer Society on Fifth International Conference on Image and Graphics, Xi'an, China, 2009

[6] Gao Xianjun, Wan Youchuan, Zheng Shunyi, et al. Automatic Shadow Detection and Compensation of Aerial Remote Sensing Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 299-1 302(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): 1 299-1 302)

[7] Yang Jun, Zhao Zhongming, Yang Jian. 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)

[8] Yu Jing, Li Dapeng, Liao Qingmin. Color Constancy-Based Visibility Enhancement of Color Images in Low Light Conditions[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(8): 923-931(禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像视觉度增强[J]. 自动化学报, 2011, 37(8): 923-931)

[9] Zhang Hongying, Li Hong, Sun Yigang. Shadow Removal Algorithm Based on Gaussian Mixture Model [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(1): 31-34(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)

[10] Dong Shengguang, Qin Jianxin, Guo Yunkai. 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)
- [11] Lin Zongjian, Ren Chaofeng, Yao Na, et al. A Shadow Compensation Method for Aerial Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 431-435(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)
- [12] Zhang H Y, Sun K M, Li W Z. Object-Oriented Shadow Detection and Removal from Urban High-Resolution Remote Sensing Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 6 972-6 982
- [13] Wan C Y, King B A, Li Z. An Assessment of Shadow Enhanced Urban Remote Sensing Imagery of a Complex City: Hong Kong [C]. The 22th ISPRS Congress, Melbourne, Austrilia, 2012
- [14] Xu Qiuhong, Ye Qin. A Method of Shadow Elimination from City High Resolution Remote Sensing Images Based on Colour Constancy [J]. *Remote Sensing Information*, 2010(4): 13-16(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(4): 13-16)
- [15] Cao Bincai, Zhu Baoshan, Li Runsheng, et al. Wallis Algorithm for Single Image Dodging[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(5): 373-377(曹彬才, 朱宝山, 李润生, 等. 用于单幅影像匀光的Wallis算法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(5): 373-377)
- [16] Wang Qiongjie. High Resolution Orthoimage Shadow Detection and Anisotropic Scattering Compensation Method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017(王琼洁. 高分辨率正射影像阴影检测与各向异性散射补偿方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2017)
- [17] Li H F, Zhang L P, Shen H F. An Adaptive Nonlocal Regularized Shadow Removal Method for Aerial Remote Sensing Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 106-120
- [18] Gao Xianjun, Wan Youchuan, Yang Yuanwei, et al. Automatic Shadow Detection and Automatic Compensation in High Resolution Remote Sensing Images[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1 709-1 720(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): 1 709-1 720)
- [19] Gao Xianjun, Wan Youchuan, He Peipei, et al. Automatic Cloud Shadow Removal in Single Aerial Image [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(9): 771-777(高贤君, 万幼川, 何培培, 等. 单幅航空影像中云阴影的自动去除[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(9): 771-777)

## Automatic Shadow Compensation Based on Improved Wallis Model for High Resolution Remote Sensing Images

YANG Yuanwei<sup>1</sup> WANG Mingwei<sup>2</sup> GAO Xianjun<sup>1,3</sup> LI Xi<sup>3</sup> ZHANG Jiahua<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of Geological Survey, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** Shadows in high-resolution remote sensing images will cause objects information loss and image quality decline, which is not beneficial for relative applications. Current shadow compensation methods often take advantage of non-shadow information around the shadow area to increase the brightness, whereas there is an unsolved problem that the contrast cannot be enhanced well enough and self-adaptively. Wallis filter principle has been used in image dodging. However, when it is used in shadow compensation, contrast improvement is not as good as other methods, leading to poor compensation results. Therefore, an improved Wallis model compensation method is proposed in this paper to enhance the brightness and contrast better to restore the shaded information. **Methods:** First, by adding compensation strength and



stretch parameters, an improved Wallis model is designed. The strength parameter is positive to the brightness and contrast, and the stretch parameter is sensitive to the contrast. Therefore, the improved Wallis model is more efficient to adjust brightness and contrast. Moreover, an automatic parameters calculation strategy is further explored to customize a suitable compensation model for each shadow area. On one hand, the brightness average and deviation of the adjacent non-shadow region are calculated and used as the compensation target values. On the other hand, based on searching the same kinds of points around shadow boundaries, a series of non-shadow and shadow feature points are matched. Assumed the feature value of the non-shadow point is the approximate value of its responding shadow point, they can be used to calculate strength and stretch parameters automatically. Lastly, the brightness of each pixel in different shadow regions will be compensated by customized models to cover the shaded information self-adaptively. **Results:** In this paper, three sets of comparative experiments are set up to analyze and compare the part compensation method's algorithm, original Wallis method in three images with ordinary object shadows and cloud shadows, respectively. The differences in brightness average and gradient average between the compensated value and the non-shadow target value are used to evaluate the compensation quality. The experimental results show that: (1) Original Wallis model is useful to enhance brightness to some extent, while it is insufficient to improve contrast. As a consequence, the visual compensated results are not acceptable as the other two methods. (2) Part compensation method can improve brightness and contrast effectively. However, it cannot adjust self-adaptively according to each shadow region's condition, leading to some over-compensated and some insufficient compensation results in the same image. (3) The proposed method results indicate the best compensation quality in different shadow regions because the improved Wallis model is more pointed to improve contrast and the automatically calculated parameters values are suitable to customize the compensation model for each shadow region. **Conclusions:** Aiming at the contrast improvement of the current algorithm of automatic shadow compensation, an automatic compensation method based on an improved Wallis model is proposed in this paper. The experimental results show that the newly designed model is more effective to enhance brightness and contrast, which is useful for finding suitable parameters values. Combining with the strategy of automatic parameters calculation, its customized model can adaptively compensate each shadow. However, it should be pointed out that there are still some limitations about the shadow border compensation and the internal difference in one shadow area, which need to be further studied.

**Key words:** Wallis model; high resolution remote sensing image; automatic shadow compensation; cloud and ground objects shadows

**First author:** YANG Yuanwei, PhD, lecturer, specializes in automatic objects recognition from high resolution images. E-mail: yyw\_08@163.com

**Corresponding author:** GAO Xianjun, PhD, associate professor. E-mail: junxgao@yangtzeu.edu.cn

**Foundation support:** The Open Fund of Key Laboratory of National Geographic Census and Monitoring, Ministry of Natural Resources Open Fund(2020NGCM07); the Open Fund of State Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University (18R04); the National Natural Science Foundation of China(41701537); the Open Research Fund of Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province(2020LDE001).

**引文格式:** YANG Yuanwei, WANG Mingwei, GAO Xianjun, 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. DOI:10.13203/j.whugis.20190032(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. DOI:10.13203/j.whugis.20190032)