

# 一种高分辨率遥感影像阴影补偿方法

董胜光<sup>1,2,3</sup>, 秦建新<sup>1,3</sup>, 郭云开<sup>4</sup>

(1. 湖南师范大学, 长沙 410012; 2. 湖南省第二测绘院, 长沙 410119;

3. 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410012; 4. 长沙理工大学, 长沙 410004)

**摘要:** 针对遥感影像中阴影的存在直接影响影像质量以及地物信息提取和识别, 而现有的阴影补偿方法在普适性上都有一定的局限性问题, 该文结合 Curvelet 变换理论, 对常用的基于 HIS 色彩空间的阴影补偿算法进行改造, 提出了一种 Curvelet 变换和 HIS 色彩模型相结合的高分辨率遥感影像阴影补偿新算法: 首先对遥感影像进行色彩空间变换, 将影像从 RGB 空间转换到 HIS 空间, 对人眼非常敏感, 且包含丰富纹理信息的  $I$  分量进行曲波变换; 然后对变换的高频和低频系数进行补偿处理, 同时依据阴影区域及其周边非阴影区域的均值和标准差分别对  $H$  和  $S$  分量进行修正处理; 最后将处理后的  $H$ 、 $I$  和  $S$  分量进行色彩空间逆变换。实验结果表明, 与同态滤波、单一 HIS 色彩模型、小波变换和 HIS 色彩模型相结合等常用的阴影补偿算法相比, Curvelet 变换和 HIS 色彩模型相结合的算法能够取得更好的补偿效果。

**关键词:** 高分辨率遥感影像; 阴影补偿; Curvelet 变换; HIS 色彩模型

【中图分类号】P237

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2018)11-0118-07

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.11.019

## A method of shadow compensation for high resolution remote sensing images

**Abstract:** The shadow in remote sensing image means poor image quality, which increases the difficulty in extracting and recognizing the object information from images, but the common methods used in compensating shadow have some limitations. In this paper, a new shadow compensation algorithm based on curvelet transform and HIS color model is proposed for high resolution remote sensing images. This algorithm contains following steps: Firstly, convert images from RGB space to HIS space; and then, ' $I$ ' component is played curvelet transform into HIS space, which is very sensitive to human eyes and contains abundant texture information; Secondly, compensate the high frequency and low frequency coefficients from curvelet transform, adjust ' $H$ ' and ' $S$ ' components according to the average value and standard deviation of shadow region and its adjacent non-shadow region; Finally,  $I$ ,  $H$  and  $S$  components after compensated are performed color space inverse transformation. Experimental results show that, compared with common algorithms, such as homomorphic filtering algorithm, separate HIS color model, wavelet transform and HIS color model, the new algorithm could achieve better shadow compensation effect.

**Keywords:** high resolution remote sensing images; shadow compensation; Curvelet transform; HIS color model

DONG Shengguang<sup>1,2,3</sup>, QIN Jianxin<sup>1,3</sup>, GUO Yunkai<sup>4</sup> (1. Hunan Normal University, Changsha 410012, China; 2. The Second Survey and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410119, China; 3. Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application in Hunan Province, Changsha 410012, China; 4. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)



**作者简介:** 董胜光 (1985—), 男, 江西乐安人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为高分辨率遥感影像数据处理与信息挖掘提取。

E-mail: dsgstudent@163.com

收稿日期: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目

(41671498); 湖南省国土资源科技计划项目 (2017-18)

通信作者: 秦建新 教授 E-mail: qjxxzd@sina.com

## 0 引言

阴影是由于成像区域的光线被其他障碍物完全或者部分遮挡, 阴影区域的灰度值一般比周

边区域的更低。在高密度的城市环境中, 建筑物产生的阴影遮挡了约 20% 的重要信息<sup>[1-3]</sup>。遥感影像中的阴影是一种图像退化现象, 在对高分辨率遥感影像进行信息提取时, 阴影的存在会致使提取结果不精确甚至产生错误, 因为地物特征易受阴影影响变得不清晰, 阴影的存在会破坏地物边缘和纹理结构的连续性, 而地物边缘和纹理结构是地物信息提取的重要依据<sup>[4-6]</sup>。国内外对遥感影像阴影处理的研究大都处于试验研究阶段, 市面上 ERDAS、ENVI、PCI 等常见商业遥感影像处理软件中均没有该功能。目前国内外关于阴影的研究成果主要体现在阴影检测和阴影补偿两个方面。阴影检测方法较为简单, 主要是利用外部影像代替阴影区域。阴影补偿消除方法可分为基于外部影像的补偿和基于影像自身的补偿, 目前研究的热点主要集中在补偿消除方法<sup>[7]</sup>。基于影像自身的补偿已取得了一定的研究成果, 其总体思路大都是根据非阴影区域的信息来对阴影区域进行补偿, 可总结归结为 3 类: 空域阴影补偿、频域阴影补偿和色彩空间域阴影补偿。空域阴影补偿是常用的阴影补偿方法, 如滤波增强法和匹配拉伸法; 频域阴影补偿首先对待补偿影像进行傅里叶变换、小波变换等处理, 然后通过对空间频率特征进行分解、处理进行阴影补偿; 色彩空间域阴影补偿是利用 HIS 等色彩模型具有颜色恒常性这一特点, 即当照射物体表面的颜色光发生变化时, 人们对该物体表面颜色仍然保持不变的知觉特性。现有的各种算法对增强与补偿阴影区域信息都能起到一定的作用, 但仍存在一些问题, 有些算法对背景复杂、阴影非匀质性强的遥感影像阴影去除不适用, 有些算法尽管对阴影区的信息有补偿效果, 但也会出现较严重的颜色失真问题, 有些算法会破坏非阴影区中的信息, 使非阴影区的信息也受损。从国内外相关文献来看, 采用多种方法相结合进行阴影补偿消除已逐步成为一种趋势<sup>[8-10]</sup>。考虑到 HIS 色彩空间具有颜色恒常性, 3 个分量具有很好的独立性, 能够很好地进行图像处理<sup>[11-12]</sup>, 而近年来才提出的第二代曲波 (Curvelet) 变换不但具有小波变换的多分辨特性, 而且具有高度的各向异性, 可以很好地逼近奇异曲线, 更强烈地表达图像中沿边缘信息的能力, 更加适用于二维影像处理和分析<sup>[13-14]</sup>。本文拟对常用的基于 HIS 色彩空间的阴影补偿算法进行改造, 提出了一种 Curvelet 变换和 HIS 色彩模型相结合的高分辨率遥感影像阴影补偿算法。

## 1 原理与方法

### 1.1 总体思路

在 HIS 色彩模型中, 色调表示颜色所属的分类, 饱和度表示颜色的深浅程度。通常人眼对颜色深或者浅不是特别敏感, 而对亮度非常敏感, 亮度包含丰富的纹理信息, 在图像处理中, 可以不对其他分量进行处理, 仅对  $I$  (Intensity, 亮度) 分量进行处理, 这样更加符合人类眼睛的感知特点<sup>[15-16]</sup>。本文拟首先对遥感影像进行色彩空间变换, 将影像从 RGB 色彩空间转换到 HIS 色彩空间, 然后对人眼非常敏感, 且包含丰富纹理信息的  $I$  分量进行曲波变换, 对变换得到的高频和低频系数分别进行补偿处理, 同时依据阴影区域及其邻接的非阴影区域的均值和标准差对  $H$  (色调, Hue) 和  $S$  (Saturation, 饱和度) 分量进行调整; 最后将处理后的  $I$ 、 $H$  和  $S$  分量进行色彩空间逆变换, 从 HIS 色彩空间转换回 RGB 色彩空间, 并沿着阴影边缘过渡区进行中值滤波, 使补偿后的阴影区域与周边影像过渡平滑。流程如图 1 所示。

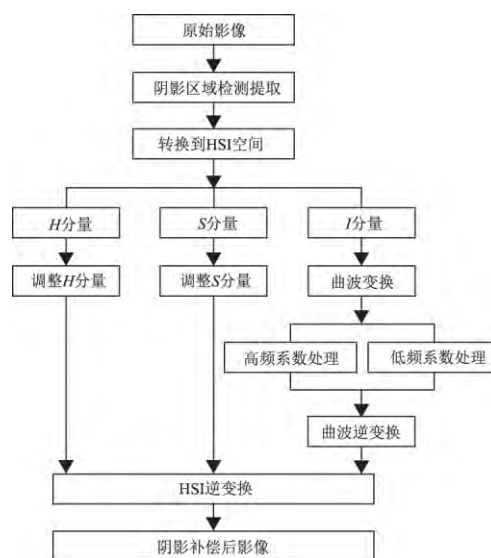


图 1 Curvelet 变换和 HIS 色彩模型相结合的影像阴影补偿流程

Fig 1 The Workflow of Image Shadow Compensation Based on Curvelet Transform and HIS Color Model

### 1.2 关键算法

#### 1.2.1 基于曲波变换的亮度补偿

1) 亮度  $I$  分量曲波变换。采取 USFFT (unequally spaced fast fourier transforms) 算法来实现  $I$  分量的曲波变换, 得到一系列不同频率的多分辨

变换系数, 其中第一层为低频系数, 其他外层均为高频系数。根据第二代离散曲波变换原理, 其变换公式见式(1)<sup>[17-19]</sup>。

$$c(j, l, k) = \int \hat{f}(\omega) \tilde{U}_j(\mathbf{S}_{\theta_1}^{-1} \omega) e^{i(b, \mathbf{S}_{\theta_1}^{-1} \omega)} d\omega \quad (1)$$

式中:  $c(j, l, k)$  为曲波系数;  $j, l, k$  分别表示图像的尺度、方向、位置参数;  $\tilde{U}_j(\omega)$  为频域中的窗函数;

$$\tilde{U}_j(\omega) = \tilde{W}_j(\omega) V_j(\omega); \begin{cases} \tilde{W}_j = \sqrt{\varphi_{j+1}^2(\omega) - \varphi_j^2(\omega)} \\ V_j(\omega) = V(2^{j/2} \omega_2 / \omega_1) \end{cases};$$

$\tilde{U}_j$  的频率分割区域为  $\{\omega_1, \omega_2: 2^j \leq \omega_1 \leq 2^{j+1}, 2^{-j/2} \leq \omega_2 / \omega_1 \leq 2^{-j/2}\}$ ;  $\mathbf{S}_{\theta}$  为剪切矩阵,  $\mathbf{S}_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \theta & 1 \end{bmatrix}$ ;  $\theta$  为旋转角度;  $b$  取离散值  $(k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{j+1})$ ,  $k_1, k_2$  是位移参数。

2) 低频系数处理。为恢复影像阴影区域丰富的地物信息, 需要先对阴影区域影像的低频分解系数进行相应的补偿处理。具体补偿方法是假设阴影区域影像与其周边邻接的影像亮度相似, 先计算阴影边缘清晰区域影像低频系数的均值和方差, 然后通过线性拉伸进行匹配计算, 从而实现阴影区域亮度补偿。将参与匹配的阴影周边的清晰区域记为  $A$ , 阴影覆盖区域记为  $A_{\text{shadow}}$ , 与清晰区域  $A$  之间的过渡区域记作  $A_{\text{mid}}$ , 清晰区域带的宽度记为  $d_1$ , 过渡区域的宽度为  $d_2$ , 像素  $P$  到阴影覆盖区域的欧氏距离可表示为  $d(p, A_{\text{shadow}})$ , 则区域  $A$  的计算见式(2)。

$$A = \{p \mid d_2 < d(p, A_{\text{shadow}}) < d_1, p \in A_{\text{shadow}}\} \quad (2)$$

采用式(3)对低频系数进行补偿。

$$c_q(l, k) = m_c + \frac{c_h(l, k) - m_l}{\sigma_l} \sigma_c \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} x, & x < T \\ \alpha x_{\max} \left[ \text{sigm}\left(c\left(\frac{x}{x_{\max}} - b\right)\right) - \text{sigm}\left(-c\left(\frac{x}{x_{\max}} - b\right)\right) \right], & x \geq T \end{cases} \quad (6)$$

4) 曲波逆变换。对处理过的高低不同频率的系数做 Curvelet 逆变换重构处理, 得到阴影补偿后的图像分量  $I$ 。

### 1.2.2 基于色度模型的色度补偿

在色彩空间模型下, 计算阴影区域及其

$$H'(i, j)_{\text{recovered}} = p \left[ \frac{\sigma_{H, \text{non-shadow}}}{\sigma_{H, \text{shadow}}} (H(i, j)_{\text{shadow}} - \mu_{H, \text{shadow}}) + \mu_{H, \text{non-shadow}} \right] \quad (7)$$

$$S'(i, j)_{\text{recovered}} = q \left[ \frac{\sigma_{S, \text{non-shadow}}}{\sigma_{S, \text{shadow}}} (S(i, j)_{\text{shadow}} - \mu_{S, \text{shadow}}) + \mu_{S, \text{non-shadow}} \right] \quad (8)$$

式中:  $H'$  和  $S'$  分别是补偿之后阴影区域的色调值和饱和度值;  $H$  和  $S$  分别为原始影像阴影区

式中:  $c_q(l, k)$  和  $c_h(l, k)$  分别表示补偿前和补偿后阴影覆盖区域的低频系数;  $m_c, \sigma_c$  是阴影边缘清晰区域低频系数的均值和方差;  $m_l, \sigma_l$  是阴影覆盖区域低频系数的均值和方差。

3) 高频补偿。图像的细节信息以及大部分的地物信息都主要包含在高频部分。本文使用阈值增强法对多尺度多方向的分解系数进行补偿增强处理, 为避免使用固定阈值造成影像纹理细节和噪声同时增强, 本文不使用固定阈值, 而选择能自适应阈值的 A. F. Laine 函数进行补偿增强处理<sup>[20]</sup>, 自适应阈值函数定义见式(4)。

$$f(x) = \alpha [\text{sigm}(c(x - b)) - \text{sigm}(-c(x + b))] \quad (4)$$

式中:  $\text{sigm}$  函数定义为:  $\text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ ;  $\alpha = \frac{1}{\text{sigm}(c(1 - b)) - \text{sigm}(-c(1 + b))}$ ;  $b$  控制增强范围,  $0 < b < 1$ , 由  $f(x) = x$  计算出  $b$  的值;  $c$  为控制增强强度, 可以设为固定值, 取 10~50 之间;  $-1 < x < 1$ 。

此函数是一个非线性变换的增强函数, 且存在一个阈值, 当系数绝对值大于阈值时被增强, 小于阈值时被削弱, 阈值  $T$  根据 Curvelet 变换的各方向分解系数自适应地计算确定, 如式(5)所示。

$$T = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N (c\{s\}(l, k) - c\{\bar{s}\})^2} \quad (5)$$

式中:  $c\{s\}(l, k)$  为第  $s$  尺度上在  $(l, k)$  处的变换系数;  $c\{\bar{s}\}$  为该尺度内系数的均值;  $M, N$  为图像的大小。自适应阈值函数式(4)可修改为式(6)。

邻接的非阴影区域的均值和标准差, 采取映射策略, 基于均值和标准差分别对阴影区域的  $H$ (色调, Hue)和  $S$ (Saturation, 饱和度)分量进行补偿调整, 映射公式见式(7)、式(8)。

域的色调值和饱和度值;  $\mu$  是阴影区域及其周边非阴影区的平均值;  $\sigma$  是阴影区域及其周边非阴影区

的标准差;  $p$  和  $q$  是补偿强度系数, 系数取值范围为 0.6~1。

## 2 试验研究

为了研究本文算法的可行性, 在 ENVI5.1 下进行试验研究, 运用 IDL 语言编写扩展程序实现本文算法, 先对相关补偿参数的选取进行试验研究, 然后与已有典型算法进行比较研究。试验时先对高分辨率遥感影像进行几何校正、辐射校正等预处理, 采用 Gram-Schmidt 算法将全色波段影像和多光谱波段影像进行融合, 并采用常用的基于  $C_3$  通道的阴影检测方法提取阴影区域。基于  $C_3$  通道的阴影检测方法是立足具有颜色恒常性的  $C_1C_2C_3$  色彩空间, 该方法能够充分利用阴影色彩不变量的光谱特性, 简单有效。

### 2.1 补偿参数选取试验研究

以北京市郊区的 WorldView-3 影像为试验数据, 分别研究  $I$  分量高频补偿强度系数  $c$ 、 $H$  分量补偿调整系数  $p$  和  $S$  分量补偿调整系数  $q$  的选取与总体补偿质量的关系。①将  $H$  和  $S$  分量的补偿调整系数  $p$  和  $q$  均设置为 0.85, 人工选取一定范围的  $I$  分量高频补偿强度系数  $c$ , 获取与其对应的总体质量参数, 拟合得到关系曲线, 确定最佳的  $I$  分量高频补偿强度系数  $c$ ; ②将  $I$  分量高频补偿强度系数  $c$  设置为最佳参数,  $S$  分量补偿调整系数  $q$  设置为 0.85, 人工选取一定范围的  $I$  分量补偿调整系数  $p$ , 获取与其对应的总体质量参数, 拟合得到关系曲线, 确定  $H$  分量最佳补偿调整系数; ③对  $S$  分量补偿调整系数  $q$  进行类似测试。总体补偿质量参数  $Q$  基于反映图像明暗程度的亮度均值  $B$  与反映图像对微小细节反差表达能力的平均梯度  $T$  来构建, 计算方法见式(9)。

$$Q = \left( \frac{B - B_{\text{NSD}}}{B_{\text{NSD}}} \right)^2 + \left( \frac{T - T_{\text{NSD}}}{T_{\text{NSD}}} \right)^2 \quad (9)$$

式中:  $B$ 、 $T$ 、 $B_{\text{NSD}}$ 、 $T_{\text{NSD}}$  分别为阴影区域补偿后和非阴影区域的亮度均值与平均梯度。质量参数的值越小, 说明补偿结果与非阴影区域质量越接近、效果越好。总体质量最小值对应的参数值即为理论上的最佳补偿参数值。

图 2 是补偿参数  $c$  与总体质量参数关系图, 图 3 是补偿参数  $p$  和  $q$  与总体质量参数关系图, 从图中可以看出, 补偿参数  $c$  大约取 40 效果最佳, 补偿

参数  $p$  大约取 0.8 效果最佳, 补偿参数  $q$  大约取 0.85 效果最佳。

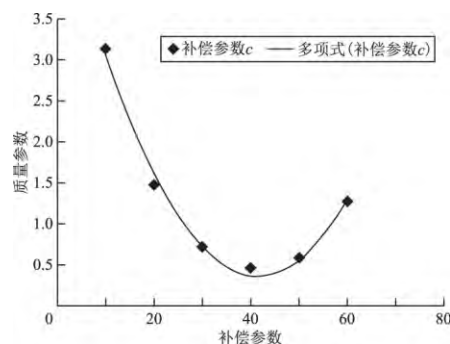


图 2 补偿参数  $C$  与总体质量参数关系图

Fig 2 The Relation Diagram between Compensation Parameter "C" and Overall Quality Parameter

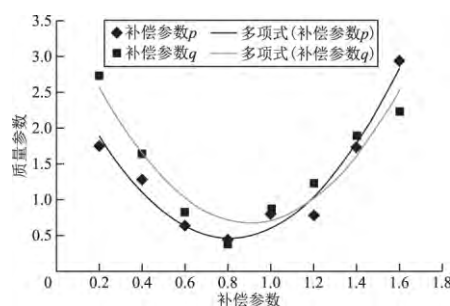


图 3 补偿参数  $p$  和  $q$  与总体质量参数关系图

Fig 3 The Relation Diagram between Compensation Parameter "p" "q" and Overall Quality Parameter

### 2.2 典型算法补偿效果对比研究

以北京市郊区的 WorldView-3 影像和湖南怀化市的 GeoEye-1 影像作为试验数据, 分别采用同态滤波补偿算法、基于 HIS 色彩空间的补偿算法、小波变换与 HIS 色彩模型相结合算法进行阴影补偿试验。试验中均选用最佳补偿参数, 图 4 和图 5 分别为 WorldView-3 影像和 GeoEye-1 影像的试验效果图, 表 1 和表 2 分别为阴影补偿前后均值、方差、平均梯度、总体补偿质量等统计值。

从试验结果可知, 两类影像数据采用不同补偿方法得到的结果影像, 均值、标准差和平均梯度均不同程度地得到提升, 这说明各类补偿算法对阴影均有一定的补偿作用, 补偿后的图像灰度层次更加丰富、对微小细节反差表达的能力更强, 采用本文方法得到的补偿影像, 均值与“小波变换+HIS 色彩模型”和“同态滤波算法”均较为接近, 但标准差和平均梯度方面均得到改善, 总体补偿质量最佳。

1) 同态滤波算法。对阴影有一定的补偿作用, 但补偿效果不是很明显, 且非阴影区域的信息也

被修改了, 处理后的影像整体上色彩有一定的失真。



图 4 WorldView-3 影像阴影补偿效果图

Fig 4 Shadow Compensation Effect Diagram of WorldView-3 Image

表 1 WorldView-3 影像阴影补偿前后统计值

Tah 1 The Statistical Value of the WorldView-3 Image before and after Shadow Compensation

算法	平均值			标准差			平均梯度			总体补偿质量		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
原始影像阴影区	20.35	32.75	78.82	16.79	15.74	10.84	5.25	7.43	6.83			
原始影像非阴影区	103.91	101.44	117.55	49.70	46.32	37.22	29.17	27.63	28.45			
同态滤波算法	117.93	119.46	138.90	45.79	36.23	32.36	15.48	11.56	19.73	7.27	4.98	1.70
HIS 色彩模型补偿	99.19	100.78	126.78	55.06	47.90	34.27	17.42	18.93	16.46	5.06	1.37	3.10
小波变换和 HIS 色彩模型相结	117.69	125.97	133.89	48.77	42.62	36.27	24.17	27.62	25.93	1.37	0.56	0.18
本文算法	113.11	122.63	128.84	52.02	46.31	33.81	26.72	28.53	26.81	0.42	0.43	0.08

3) 小波变换和 HIS 色彩模型相结合的补偿。补偿效果有一定提升, 但阴影补偿的同时, 图像的细节信息和边缘信息处理能力不够, 这主要是由于小波变换在表达奇异线和曲面方面依然存在不足, 不能最优地逼近大量纹理特征的线奇异性。

4) 本文算法。虽然色彩有细微损失, 但阴影

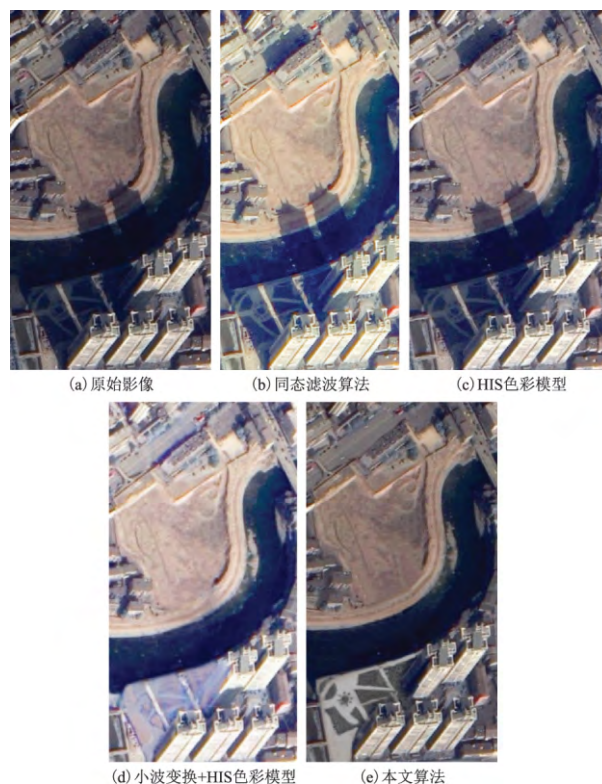


图 5 GeoEye-1 影像阴影补偿效果图

Fig 5 Shadow Compensation Effect Diagram of GeoEye-1 Image

2) 单一 HIS 色彩模型补偿算法。补偿后影像的色彩保真度较同态滤波好, 但阴影区域恢复后较平滑, 纹理细节信息较模糊, 且阴影痕迹仍然较为明显。

区域信息能够被有效补偿, 对比度较其他算法更加清晰, 地物纹理细节的恢复效果更好, 且阴影痕迹消除效果较好, 这主要是由于 Curvelet 变换具有各向异性, 能用极少的非零系数精确表达边缘, 比小波变换更有利于保留图像中的奇异信息和边缘信息, 使处理过后的图像噪声更平滑。

表 2 GeoEye-1 影像阴影补偿前后统计值  
Tab 2 The Statistical Value of the GeoEye-1 Image before and after Shadow Compensation

算法	平均值			标准差			平均梯度			总体补偿质量		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
原始影像阴影区	19.82	24.04	53.4	26.98	26.69	20.59	6.25	5.43	7.83			
原始影像非阴影区	110.34	103.37	108.31	55.42	55.88	51.47	32.17	30.24	25.67			
同态滤波算法	116.21	110.7	121.06	62.65	57.47	46.08	24.34	21.89	24.83	1.66	2.46	0.07
HSI 色彩模型补偿	98.64	90.95	97.47	50.66	46.81	41.61	20.42	19.23	18.56	3.88	4.38	0.87
小波变换和 HSI 色彩模型相结	125.82	117.4	128.37	53.87	49.25	41.79	26.89	22.16	21.43	1.32	2.55	0.43
本文算法	122.62	116.2	121.33	65.91	61.30	50.00	29.88	27.27	22.01	0.52	0.58	0.28

### 3 结束语

本文提出的 Curvelet 变换和 HIS 色彩模型相结合的高分辨率遥感影像阴影补偿算法，在阴影补偿过程中实现了频域和空间域相结合、纹理与色彩空间相结合，试验结果表明，与同态滤波、单一 HIS 色彩模型、小波变换和 HIS 色彩模型相结合等常用的阴影补偿算法相比，本文提出的算法补偿效果更好，更加有利于遥感影像地物信息的提取与识别。

#### 参考文献

[1] 姚花琴,杨树文,刘正军,等. 一种城市高大地物阴影检测方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 110-113. (YAO Huaqin, YANG Shuwen, LIU Zhengjun, et al. Shadow detection method of city large objects based on WorldView-2 image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(10): 110-113.)

[2] SUMATHY E, VIJAYALAKSHMI S. Shadow removal from remote sensing images by efficient inpainting method [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(8): 19989-19999.

[3] 曾敬文,王学文,侯文广. 连续局部阈值分割的阴影检测方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(11): 93-97. (ZENG Jingwen, WANG Xuwen, HOU Wenguang. A novel successive threshold shadow detection scheme [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(11): 93-97.)

[4] 王冰,安慧君,刘怀鹏. QuickBird 影像城市阴影信息的提取与消除[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(2): 255-262. (WANG Bing, AN Huijun, LIU Huaipeng. Study on city shadow extraction and elimination in QuickBird images[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(2): 255-262.)

[5] 罗艳,辛俊伟,何海清. WorldView-II 遥感影像的阴影检

测方法研究[J]. 测绘科学, 2017, 42(9): 132-142. (LUO Yan, XIN Junwei, HE Haiqing. Research on shadow detection method of WorldView-II remote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(9): 132-142.)

[6] 温兆飞,吴胜军,陈吉龙,等. 辐射特征支持下的城市高分影像阴影校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(1): 138-148. (WEN Zhaofei, WU Shengjun, CHEN Jilong, et al. Radiancetransfer process based shadow correction method for urban regions in high spatial resolution image[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(1): 138-148.)

[7] MOVIA A, BEINAT F C. Shadow detection and removal in RGB VHR images for land use unsupervised classification[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(24): 485-495.

[8] YANG Jian, HE Yuhong, JOHN C. Fully constrained linear spectral unmixing based global shadow compensation for high resolution satellite imagery of urban areas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38(6): 88-98.

[9] 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. (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.)

[10] ADELINE K R M, CHEN M, BRIOTTET X, et al. Shadow detection in very high spatial resolution aerial images; a comparative study[J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 80(142): 21-38.

[11] 王理政,林祥国,宁晓刚. 面向对象的高分辨率遥感影像阴影提取方法[J]. 测绘科学, 2017, 42(3): 108-113. (WANG Lizheng, LIN Xiangguo, NING Xiaogang. Object oriented method of shadow extraction from high resolution remote sensing imagery[J]. Science of Surveying and



- Mapping, 2017, 42(3): 108-113.)
- [12] 武明虎, 宋冉冉, 刘敏. 结合 HSV 与纹理特征的视频阴影消除算法[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(10): 1373-1380. (WU Minghu, SONG Ranran, LIU Min. Video shadow elimination algorithm by combining HSV with texture features[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(10): 1373-1380.)
- [13] SUNY A H, MITHILA N H. A shadow detection and removal from a single image using LAB color space [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2013, 13(1): 95-103.
- [14] 吕雪莹. 基于 Curvelet 变换的图像去噪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. (LYU Xueying. Research on the method based on the curvelet transform image denoising [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [15] 王蜜蜂, 缪剑, 李星全. 基于 RGB 和 HIS 色彩空间的遥感影像阴影补偿算法[J]. 地理空间信息, 2014, 12(6): 107-109. (WANG Mifeng, MIU Jian, LI Xingquan. Shadow compensation algorithm of remote sensing image based on RGB and HIS color space[J]. Geospatial Information, 2014, 12(6): 107-109.)
- [16] 韩延彬, 郭晓鹏, 魏延文, 等. RGB 和 HIS 颜色空间的一种改进的阴影消除算法[J]. 智能系统学报, 2015, 10(5): 769-774. (HAN Yanbin, GUO Xiaopen, WEI Yanwen, et al. An improved shadow removal algorithm based on RGB and HIS color spaces[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(5): 769-774.)
- [17] 崔永福, 李国发, 吴国忱, 等. 基于面波模拟和曲波变换的去噪技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 911-919. (CUI Yongfu, LI Guofa, WU Guozhen, et al. Denoising technique based on surface wave modeling and curvelet transform[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(3): 911-919.)
- [18] 王博, 张永军, 陈奇. 一种多尺度几何细节抽取的阴影处理算法[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 23-28. (WANG Bo, ZHANG Yongjun, CHEN Qi. A shadow processing algorithm based on extracted multiscale geometric details[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 23-28.)
- [19] 郝红侠, 刘芳, 焦李成. 基于 Curvelet 多方向差和多尺度积的图像去噪[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 39-42. (HAO Hongxia, LIU Fang, JIAO Licheng. Image denoising based on multi-directional difference and multiscale products of curvelet transform[J]. Journal Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(12): 39-42.)
- [20] BANKMAN, ISAAC N. Handbook of medical image processing and analysis [M]. Amsterdam: Elsevier, 2009: 35-57.

(责任编辑: 邓国臣)

(上接第 110 页)

- [13] USGS. Landsat 8(L8). Operation land imager(OLI) and thermal infrared sensor(TIRS) calibration notices [EB/OL]. (2013-12-04) [2017-03-06]. [http://landsat.usgs.gov/calibration\\_notices.php](http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php).
- [14] 徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747. (XU Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly launched Landsat8 satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 741-747.)
- [15] MONTEITH J L. Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms[C]// Symposium of the Society of Experimental Biology. [S. l.]: [s. n.], 1965: 205-234.
- [16] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]// Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. [S. l.]: The Royal Society, 1948.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56 [EB/OL]. [2017-03-06]. <http://www.fao.org/docrep/ir56/ir56.pdf>.
- [18] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R H. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.
- [19] FISHER J B, TU K P, BALDOCCHI D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 901-919.

(责任编辑: 路素军)