

文章编号 1004-924X(2018)08-2092-08

HSI 色彩空间下的低照度遥感图像增强

邵 帅^{1,2*}, 郭永飞¹, 刘 辉¹, 袁航飞¹, 张择书¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:为了提高低照度遥感图像的可视性,提出了利用改进的多尺度 Retinex 算法与局部对比度自适应调整相结合的方法来改善图像质量。首先,把原始图像变换到 HSI 色彩空间,有效分离 H、S、I 分量;然后,然后在保持色调分量 H 不变的前提下,对亮度分量 I 利用改进的多尺度 Retinex 算法进行处理,对整幅图像进行亮度和对比度的初步调整,通过使用 Sigmoid 函数替换多尺度 Retinex 算法中的对数函数来减少数据丢失;为了使局部细节信息得到更好的改善,在利用改进的多尺度 Retinex 算法处理后进行自适应局部对比度增强,提高图像局部对比度;对饱和度分量 S 采用分段线性增强的方法进行处理;最后,将处理后的图像变换回到 RGB 空间。实验结果表明:图像信息熵由 5.79 提高至 6.65;图像感兴趣区域的局部对比度由 0.695 提高至 0.701,图像质量以及利用价值得到了提升。

关键词: HSI 色彩空间;低照度遥感图像;多尺度 Retinex 算法;Sigmoid 函数;局部对比度

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182608.2092

Low-illumination remote sensing image enhancement in HSI color space

SHAO Shuai^{1,2*}, GUO Yong-fei¹, LIU Hui¹, YUAN Hang-fei¹, ZHANG Ze-shu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

*Corresponding author, E-mail: damond0424@yeah.net

Abstract: In order to improve the visibility of low-illumination remote sensing images, an improved multiscale Retinex combined with a local contrast adaptive adjustment method was proposed. First, the original image was transformed into HSI color space and the hue component H, saturation component S, and brightness component I were effectively separated. The H component was unchanged, and an improved multiscale Retinex algorithm was applied to process the I component, to improve the overall brightness and contrast of the image. In this case, the Sigmoid function was used to replace the logarithm function in the multiscale Retinex algorithm to reduce the loss of image data. In order to improve the local detail information, local contrast adaptive enhancement was performed via image processing. Then the component S was processed by piecewise linear enhancement. Finally, the processed image was transformed to RGB color space. The experimental results indicate that the entropy

收稿日期:2018-01-12;修订日期:2018-03-03.

基金项目:吉林省科技发展计划青年科研基金资助项目(No. 20150520102JH)

of the image information is increased from 5.79 to 6.65, and the local contrast of the image interest area increased from 0.695 to 0.701. This indicates that the image quality and the applied value were effectively improved.

Key words: HSI domain; low illumination remote sensing image; multiscale Retinex algorithm; Sigmoid function; local contrast

1 引言

遥感图像广泛应用于军事侦察、地形测绘及气象学等多个领域,由于遥感图像的成像光照条件不足、曝光不足时,会产生低照度的遥感图像,导致图像信噪比低、颜色不饱和、对比度低等问题,为了更好地展现场景信息,突出图像的细节特征,增强低照度遥感图像是很有必要的^[1]。传统的图像增强方法包括基于空间域的灰度变换、直方图均衡化和基于频率域的同态滤波等方法^[2]。灰度变换方法,通过特定的变换函数把输入图像的强度进行变换,通常用线性函数或者对数函数直方图处理把输入图像的直方图修改为想要的直方图;同态滤波建立基于图像格式模型,分为反射分量和照度分量^[3-5]。虽然这些传统的算法一定程度上改善了图像质量,但是只对图像一或两个方面进行增强,不能有效改善低照度遥感图像的视觉效果。

近年来,Retinex 算法因其易于实现、运算速度快、参数少的特点引起了国内外学者的广泛关注。Retinex 理论由 Land^[6]在 1965 年提出的,并且成功应用到图像的动态范围压缩和图像色彩保真^[7]。Retinex 理论是一种基于空域的图像增强方法,根据人眼的视觉特性以及不同的图像应用场合,模拟大脑视觉皮层的成像原理,提出了不同的图像增强方法计算模型。随后,以 Land 等人的研究成果为基础,Jobson^[8]发展了单尺度 Retinex 算法(Single Scale Retinex, SSR)。随着 Retinex 算法的发展,目前大多数应用的有单尺度 Retinex、多尺度 Retinex 算法(Multi-Scale Retinex, MSR)和带色彩恢复的 MSR 算法(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)等。虽然这些 Retinex 算法在一定程度上改善了图像效果,但仍有不足之处,SSR 算法不能同时满足动态范围压缩和色彩恒定性。MSR 算法当原始图像不满足灰度域假设时,会造

成色彩失真现象。MSRCR 较好地避免了色彩失真现象,但是,对于较暗区域细节的增强效果不明显^[9-11]。Dong 等^[12]把低照度图像取反后,具有与雾天图像的相似性,把基于暗通道先验的去雾技术^[13]应用到低照度图像处理上,拓展了新的方向,但是对透射率的估计不够准确,降低了图像的保真度。

本文提出一种在 HSI(Hue, 色调; Saturation, 饱和度; Intensity, 亮度)色彩空间内,采用改进的多尺度 Retinex 与局部对比度自适应增强相结合的低照度遥感图像增强方法。原始图像从 RGB 色彩空间转换到 HSI 色彩空间,便于利用人眼视觉系统的特性进行图像处理;在保持色调分量 H 不变的前提下,对亮度分量 I 采用改进的 MSR 算法增强,对整幅图像进行亮度和对比度的初步调整,并使用 Sigmoid 函数替换 MSR 算法中的对数函数,来控制数据丢失;为了使局部细节信息得到更好的改善,再进行局部对比度增强;通过对不同的低照度遥感图像进行处理,验证了本文的方法。

2 算法概述

本文研究对象为低照度彩色遥感图像,其特点是灰度值较低、灰度范围窄、低灰度值部分占比较高。为了改善视觉效果,需要在处理时,提高较暗区域的亮度,使得图像亮度均匀,改善图像的边缘和细节,同时要实现色彩保持。因此,根据低照度遥感图像以上特点,以及对现有的处理方法的研究,提出了一种有效的低照度遥感图像增强方法。针对人眼视觉系统具有对亮度的敏感性要远高于对色彩的敏感性的特点,为了便于色彩的识别,在处理之前,把原始图像转换到 HSI 色彩空间。HSI 模型更符合人主观的描述和解释颜色的方式,图像被分成彩色和灰度信息,可使图像处理算法在 HSI 色彩空间方便的应用,简化处理工作量^[16]。随后,利用改进的 MSR 算法进行处理,采

用局部对比度自适应调整算法对处理结果进行进一步优化。本节主要包含以下内容:概述 Retinex 理论与介绍、对比分析 RGB 色彩空间与 HSI 色彩空间算法应用结果、以及 MSR 的改进方法、局部自适应调整算法、最后的饱和度分量处理与色彩恢复部分是为了保留原始的色彩信息。

本文方法主要包括以下步骤:

(1) 输入图像,转换到 HSI 色彩空间,得到色调 H 、饱和度 S 、亮度 I 三分量;

(2) 对亮度分量 I 进行改进的 MSR 算法增强,在全局上提高图像的清晰度,保留图像细节信息;

(3) 为了提高图像的局部对比度和提高图像可视性对(2)的结果进行局部对比度自适应增强;

(4) 保持色调分量 H 不变,对饱和度分量进行分段线性增强;

(5) 处理结果变换回到 RGB 色彩空间,同时进行原始图像色彩信息保护处理,输出增强后图像。

2.1 Retinex 理论

Retinex 理论解释了人眼视觉系统是如何感知景物图像的,Retinex 理论的目的是从图像中获取景物的反射特性,不考虑入射光的情况下得到景物的本来面貌^[14]。Retinex 理论认为一幅图像 $I(x, y)$ 可以由公式(1)表示:

$$I(x, y) = L(x, y) * R(x, y), \quad (1)$$

其中: $L(x, y)$ 代表图像的照度分量,包含了环境的亮度信息; $R(x, y)$ 代表图像的反射分量,体现了景物的反射特性。

Jobson 等人在 land^[8] 等人的研究基础上提出了单尺度 Retinex 算法(Single Scale Retinex, SSR),单尺度 Retinex 数学表达式如式(2):

$$\lg[R(x, y)] = \lg[I(x, y)] - \lg[F(x, y) * I(x, y)], \quad (2)$$

其中: $F(x, y)$ 为高斯卷积函数,对单尺度算法进行改进得到多尺度 Retinex 算法。多尺度 Retinex 算法可以看成是多个不同尺度上的单尺度 Retinex 的线性加权组合的结果,数学表达式为:

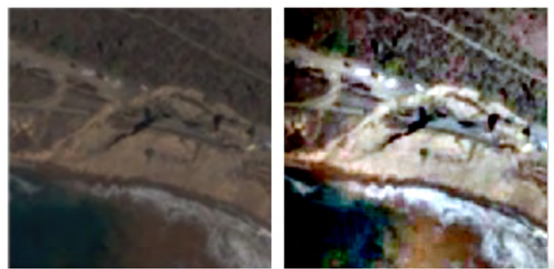
$$R_i(x, y) = \sum_{k=1}^k W_k (\lg[I_i(x, y)] - \lg[F_k(x, y) * I_i(x, y)]), \quad (3)$$

其中: $R_i(x, y)$ 为单尺度的 Retinex 算法的输出结果; $R_{MSR_i}(x, y)$ 为多尺度 Retinex 算法的输出结果;

$i=1, \dots, N$, 表示光谱带个数, $N=1$ 表示为灰度图像, $N=3$ 表示为彩色图像; K 表示尺度参数的总数,通常取 $K=3$, 当 $K=1$ 时,多尺度 Retinex 算法变成单尺度 Retinex 算法,表示对应第 K 个尺度的权重因子, $F_k(x, y)$ 代表尺度函数;通常选取高斯函数作为尺度函数^[15]。MSR 算法将不同尺度的处理后的结果加权组合,来实现色彩保真与图像细节信息的平衡。

2.1.1 RGB 色彩空间的 Retinex 方法

在 RGB 色彩空间应用 MSR 算法需要分别对 R、G、B 三通道的图像分量进行 MSR,再通过函数构造多维数组得到处理后的图像。本文实验对象选择 Digitalglobe 公司的 Worldview-2 卫星图像,Worldview-2 卫星能够提供 0.5 m 全色图像和 1.8 m 分辨率的多光谱图像。原始图像如图 1(a)所示,图像整体亮度值较低,清晰度较低;图 1(b)为 RGB 空间 MSR 算法处理之后的图像,分别对 R、G、B 3 个图像分量进行处理,改变了 R、G、B 三分量原有的比例关系,造成图像色彩结构不一致,提高了图像的亮度与对比度,但出现了色彩失真现象。



(a) 原始图 (b) RGB 域 MSR 结果
(a) Origin image (b) MSR in RGB domain

图 1 RGB 域 MSR 算法实验

Fig. 1 Experiment of MSR algorithm in RGB color space

2.1.2 HIS 色彩空间的 Retinex 方法

图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)、分别为原始图像(图 1(a))在 HSI 空间的色调分量、饱和度分量和亮度分量(彩图见期刊电子版)。图 2(d)为 HSI 域 MSR 算法结果,由于保持原始图像的色调和饱和度分量不变,图像增强色彩效果要好于 RGB 域中的结果,但是图像的局部对比度较低,细节增强不够明显,如图 2(d)中黑色矩形区域所示,此区域包含较多有用的信息,其局部对比度还需要进一步地改善。

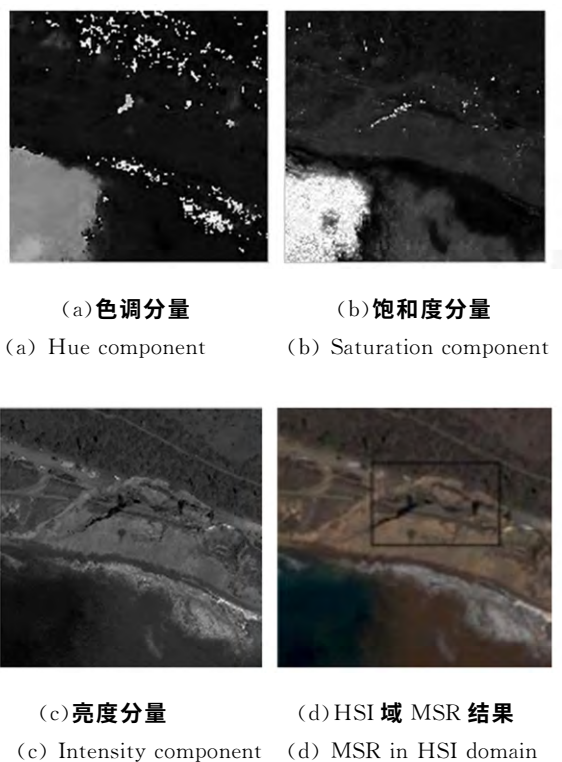


图2 HSI 空间的 MSR 算法

Fig. 2 Experiment of MSR algorithm in HSI domain

2.2 改进的多尺度 Retinex 算法

本文在分析已有的 MSR 算法的基础上进行改进,提出一种改进 MSR 算法。通常 MSR 算法可用公式(3)表示,其中每个尺度上的结果可以表示为:

$$R_{ssri}(x, y) = \log \left[\frac{I_i(x, y)}{F_k(x, y) * I_i(x, y)} \right], \quad (4)$$

公式(4)中的对数函数里面部分可以看作是当前像素与其在邻域内加权后的结果的比值,处理后的图像像素值会出现负值的情况,造成了像素值超出显示器的显示范围,通常会采用 gain/offset 方法对图像的像素值进行校正,此方法的缺点是会造成图像数据的损失,尤其是像素值较高和较低的区域。为了减少图像信息的损失,利用自定义的 Sigmoid 函数来替换 MSR 中对数函数,替换后公式(4)可写为:

$$R_{ssri}(x, y) = \text{Sigmoid} \left[\frac{I_i(x, y)}{F_k(x, y) * I_i(x, y)} \right], \quad (5)$$

Sigmoid 函数的曲线近似于对数函数,除了可以充当对数函数的作用还具有很多良好的性质,包括单调性、曲线光滑、良好的有界性等^[17]。公式(5)的等式右边是恒大于 0 的,因此只需考虑函数在零右侧的区域,当输入等于 1 时,表示当前像素

的亮度与周围像素的加权平均值相同,输出应该接近 0.5。Sigmoid 函数只有压缩的亮度值接近其边界,因此不需要裁剪,可以避免数据丢失。Sigmoid 函数曲线如图 4 所示。

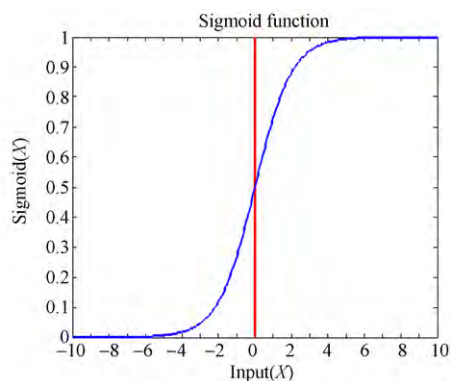


图3 Sigmoid 函数曲线

Fig. 3 Sigmoid function curve

选取合适的 Sigmoid 函数是本文算法的关键,选取的 Sigmoid 函数如下式所示:

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{a}{1 + e^{-kx+b}}, \quad (6)$$

其中: k 为曲线的陡峭程度, k 的值越大则算法的灵敏度越高, a 和 b 保证曲线的经过点 $(0, 0)$ 和 $(0.5, 1)$,通过实验表明当 k 取 5.5 时,效果最佳,函数曲线如图 4 所示,使用 Sigmoid 函数替换公式(3)中对数函数后,得到公式(7):

$$R_i(x, y) = \sum_{k=1}^K W_k \cdot S \left[\frac{I_i(x, y)}{F_k(x, y) * I_i(x, y)} \right]. \quad (7)$$

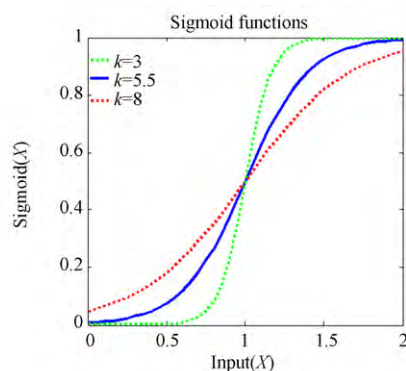


图4 Sigmoid 函数曲线

Fig. 4 Sigmoid function curve

2.3 局部对比度自适应调整

根据人眼视觉系统的感知特性,人眼可以适应较暗、较亮的光照环境,但当图像的灰度值较低

时,分辨力下降,局部对比度会降低,且人眼对局部对比度更为敏感,人类视觉关注早期能快速锁定图像亮度和对比度突出的区域^[18]。对比度主要反映了图像内不同对象之间的差异,这种差异出要体现在图像的细节信息、图像清晰度上,对视觉效果影响较大,本文在 MSR 算法增强后进行局部对比度增强(Adaptive Contrast Enhancement, ACE),ACE 算法采用反锐化掩模技术,把图像分成低频反锐化掩模部分和高频部分,之后把高频部分放大来改善图像的细节信息,对高频信息的放大倍数即为对比度增益,接下来关键在于对比度增益的计算,对于低照度图像的对比度增益计算,可以利用统计学的两个重要统计,均值和方差,局部均值和局部方差可以反映局部亮度的视觉特性。

本文的局部对比度增强算法如下:

首先,选择改进的 MSR 算法处理后的图像像素值 $f(i, j)$, 定义局部区域是以 $f(i, j)$ 为中心,窗口大小为 $(2X+1) \times (2X+1)$ 的区域, X 为一个整数,局部平均值 $M_{i,j}$ 可由公式(8)计算:

$$M_{i,j} = \frac{1}{(2X+1)^2} \sum_{k=i-X}^{i+X} \sum_{n=j-X}^{j+X} f(k, n). \quad (8)$$

局部方差 $\sigma_{i,j}^2$ 由公式(9)计算:

$$\sigma_{i,j}^2 = \frac{\sum_{k=i-X}^{i+X} \sum_{n=j-X}^{j+X} [f(k, n) - M_{i,j}]^2}{(2x+1)^2}. \quad (9)$$

增强后的中心像素用 $h(i, j)$ 来表示,本文的局部自适应对比度增强算法如式(10)所示:

$$h(i, j) = M_{i,j} + \frac{\alpha}{\sigma_{i,j}} [f(i, j) - M_{i,j}]. \quad (10)$$

然后, α 为自适应调节因子,其取值如式(11)所示:

$$\alpha = \begin{cases} 1.2 & 120 < P(I) \leq 180 \\ 1.5 & 40 < P(I) \leq 120 \\ \pi/2 & P(I) \leq 40 \end{cases}, \quad (11)$$

其中: I 代表图像亮度分量的灰度值,其取值范围为 $(0, 255)$, $P(I)$ 表示对像素值分布统计后的结果,代表着超过 60% 像素数属于当前区间。当 60% 图像的像素灰度值低于 40 时,表明图像较暗,此时取值较大,同理,当超过 60% 图像的像素灰度值高于 180 时,图像较亮,此时取值较小。因此,对比度增益是自适应的,与局部均方差成反比,由于图像的边缘以及其他变化较陡区域的局部均方差值较大,对比度增益值较小,可以避免造

成振铃效应。相反地,在图像灰度变化缓慢地区域局部均方差值较小,对比度增益过大会放大噪声,因此,本文给出了一个最大值 $A_{\max}$ 来限制对比度增益,如式(12)所示:

$$\frac{\alpha}{\sigma_{i,j}} \leq A_{\max}. \quad (12)$$

本文局部处理方法能够避免在噪声较低的区域造成过度平滑的现象。

2.4 饱和度分量处理

在保持色调分量 H 不变的条件下,对饱和度分量采用分段线性变换的方法进行处理。根据饱和度和值大小的不同进行调整,避免原始图像色彩结构出现尖锐变化,在 HSI 色彩空间下饱和度分量 S 的计算公式如式(13)所示:

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)], S \in (0, 1). \quad (13)$$

调整后的饱和度分量用 S' 表示,计算公式如式(14)所示:

$$S' = \begin{cases} 1.2S + 0.1 & 0 < S \leq 0.2 \\ S & 0.2 < S \leq 0.8 \\ 0.9S - 0.1 & 0.8 < S \leq 1 \end{cases}. \quad (14)$$

饱和度和值被分为高(80%~100%)、中(20%~80%)、低(0%~20%)3个区间,饱和度过低时图像成灰色,中饱和度产生柔和的色调,过高的饱和度会带来色彩失真。对饱和度高的区间,利用线性函数降低调整;对饱和度值居中的区间保留原始图像的色调信息;对于饱和度值较低区间,采用较陡的线性函数提高。

2.5 色彩恢复

为了更好地保留原始图像的色彩信息,对增强后的图像进行了色彩恢复处理。本文通过线性处理使得增强后的图像色彩信息不失真,主要利用原始图像的 R、G、B 三分量的比例关系来对处理后的图像进行调整,色彩恢复方法如式(15)、(16)所示:

$$e(i, j) = \frac{I^e(i, j)}{I(i, j)}, \quad (15)$$

$$h_c(i, j) = e(i, j) f_c^e(i, j) \quad c \in R, G, B, \quad (16)$$

其中: $I(i, j)$ 表示原始图像在 HSI 色彩空间的亮度分量, $I^e(i, j)$ 为 $I(i, j)$ 处理后的结果, $f_c^e(i, j)$ 为本文方法处理后变换回 RGB 色彩空间的结果, $h_c(i, j)$ 为对 $f_c^e(i, j)$ 色彩恢复后的结果,从而保证 R、G、B 三分量的比例关系不变。

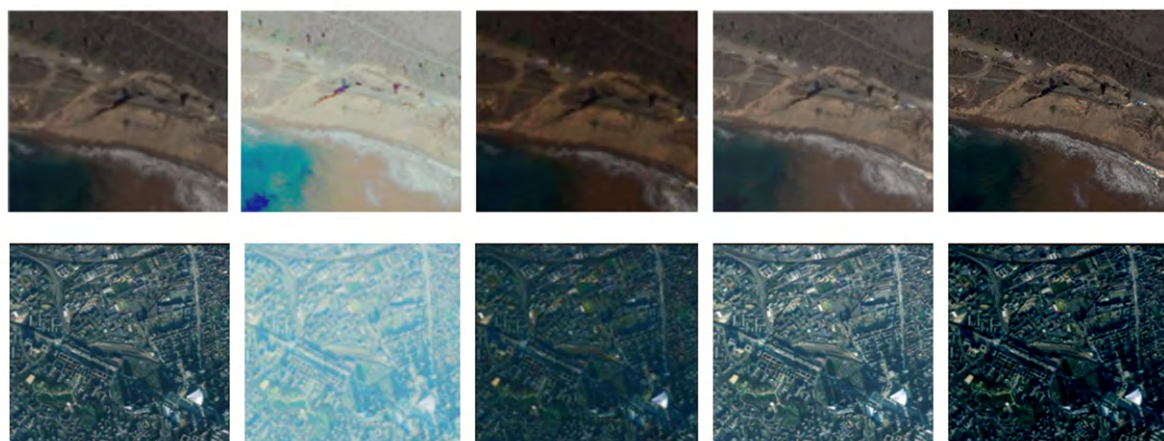
3 实验与分析

现有的图像评价方法分为主观评价方法和客观评价方法,前者主要靠人眼的观察来判断,后者根据模型来制定量化的指标^[19]。本文的主观评价部分主要对比了 MSRCR、直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)、Dong 的方法及本文算法的实验结果。客观评价通过对各算法结

果的指标计算进行的,利用图像的信息熵和图像的局部对比度为评价指标来验证算法的有效性。

3.1 实验结果对比

原始图像中的景物整体较暗,图像模糊、可视性低。为了验证本文算法的有效性,在 RGB 空间和 HSI 空间,对原始图像分别使用 MSRCR、直方图均衡化、Dong 的方法与本文改进的 MSR 与局部对比度自适应调整结合的算法进行实验分析,选取具有代表性的两幅图像结果如图 5 所示。



(a) 原始图像 (b) MSRCR 算法 (c) Dong 的方法 (d) 直方图均衡化 (e) 本文的方法
(a) Origin image (b) MSRCR algorithm (c) The method of Dong (d) HE (e) Ours method

图 5 图像实验结果对比

Fig. 5 Comparison of image experiment results

其中,图 5(a) 为输入的原始图像,图 5(b) 为 MSRCR 算法处理后的结果,图 5(c) Dong 的方法处理后的结果,图 5(d) 为直方图均衡化的结果,图 5(e) 为本文算法处理结果。图 5(b) 图像亮度过亮,在图像细节增强方面不足;图 5(c) 图像较暗而且模糊,清晰度提升不明显;图 5(d) 合并了图像的灰度级,一定程度上造成了图像的模糊,细节信息得不到有效地增强;图 5(e) 在图像的清晰度、亮度、色彩保真上均对原始图像进行了显著的改善,保留了原始图像的色彩信息,提高了图像的局部对比度,改善了图像的细节信息,图像变得更加清晰,获得了较好的视觉效果。

3.2 图像质量客观评价

3.2.1 图像信息熵

图像信息熵作为本文的图像质量的客观评价指标之一。数字图像中不同亮度的像素点在空间占据不同的区域,图像呈现不同的形状且所包含的信息量不同,图像形状的不确定性越大所包含

的信息量就越大,因此用信息熵来表示图像形状,图像信息熵越大,即图像的信息量越大^[19]。图像的信息熵计算公式如式(17)所示:

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \times \log_2(P_i), \quad (17)$$

其中: P_i 为灰度值等于 i 的像素数比上图像总像素数的值, N 为灰度级总数。图像信息熵取两幅原始图像各算法下的均值,结果如表 1 所示。

3.2.2 局部对比度

局部对比度 CI 如式(18):

$$CI = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (18)$$

其中 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别代表邻域内的图像最大灰度值和最小灰度值,彩色 RGB 图像的局部对比度计算如式(19):

$$CI = \frac{1}{3}(CI_R + CI_G + CI_B), \quad (19)$$

其中 CI_R 、 CI_G 、 CI_B 分别为图像 R 分量、 G 分量、 B 分量的局部对比度,利用各算法的局部对比度

的提高值 ΔCI 作为衡量图像质量的客观评价参数,计算公式如式(20):

$$\Delta CI = CI_E - CI, \quad (20)$$

其中: CI_E 为增强后的局部对比度值, ΔCI 取两幅原始图像在各算法处理后的均值,如表 1 所示:

表 1 图像质量评价
Tab. 1 Image quality evaluation

图像	算法	信息熵	ΔCI
图 5(a)	原始图像	6.233 4	0.000 0
图 5(b)	MSRCR 算法	6.305 7	0.003 2
图 5(c)	Dong 的方法	6.354 7	0.004 1
图 5(d)	直方图均衡化	6.435 4	0.004 6
图 5(e)	本文方法	6.654 8	0.005 6

4 结 论

本文针对低照度遥感图像的特点,提出了在 HSI 色彩空间利用改进的 MSR 算法与局部对比度自适应调整相结合的方法,并利用 Sigmoid 函数替换对数函数对 MSR 算法进行改进,避免图像数据的损失;利用局部对比度自适应调整方法提高图像的局部对比度,使得图像的边缘等细节信息有效的保留。实验结果表明,对于本文中的 Worldview-2 卫星实验图像,图像信息熵由 5.79 提高到 6.65;局部对比度由 0.695 提高到 0.701,通过主观评价和客观评价的综合分析,本文方法要优于传统的低照度遥感图像增强方法,有效地改善了低照度遥感图像的视觉效果。

参考文献:

- [1] JANG J H, KIM S D, RA J B. Enhancement of optical remote sensing images by subband-decomposed multi-scale Retinex with Hybrid Intensity Transfer Function [J]. *IEEE*, 2011, 8(5): 983-987.
- [2] 赵宏宇,肖创柏,禹晶,等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(4): 1048-1055.
ZHAO H Y, XIAO CH B, YU J, BAI L. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1048-1055. (in Chinese)
- [3] PRATT WK. *Digital Image Processing* [D]. 2nd ed. New York: Wiley, 1991.
- [4] JAIN AK. *Fundamentals of Digital Image Processing* [D]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
- [5] LIM JS. *Two-Dimensional Signal and Image Processing* [D]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.
- [6] LAND E H, MCCANN J. Lightness and Retinex theory [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [7] CHANG J L, IRENE CH, YI ZH, et al.. Enhancement of low visibility aerial images using histogram truncation and an explicit Retinex representation for balancing contrast and color consistency [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 16-26.
- [8] JOBSON DJ, RAHMAN Z, WOODDELL GA. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 1997, 6: 451-462.
- [9] 马忠丽,文杰. 融合边缘信息的单尺度 Retinex 海雾去除算法[J]. *计算机辅助设计图形学报*, 2015, 27(2): 217-225.
MA ZH L, WEN J. A single scale Retinex sea fog removal algorithm with edge information fusion [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2015, 27(2): 217-225. (in Chinese)
- [10] BISWAS B, ROY P, CHOUDHURI R, et al.. Microscopic image contrast and brightness enhancement using multi-scale Retinex and Cuckoo Search Algorithm [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 70: 348-354.
- [11] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODDELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1997, 6(7): 965-76.
- [12] DONG X, WANG G, PANG Y, et al.. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video [C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE*, 2011: 1-6.

- [13] HE K, SUN J, TANG X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(12):2341-2353.
- [14] 王彦臣,李树杰,黄廉卿. 基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1):70-76.
WANG Y CH, LI SH J, HUANG L Q. Enhancement of radiography based multiscale retinex[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):70-76. (in Chinese)
- [15] 葛微,李桂菊,程宇奇,等. 利用改进的 Retinex 进行人脸图像光照处理[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(4):1011-1020.
GE W, LI G J, CHENG Y Q, *et al.*. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):1011-1020. (in Chinese)
- [16] 陈博洋. 彩色遥感图像的亮度直方图局部线性化增强[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(2):502-508.
CHEN B Y. Local linear enhancement of luminance histogram of color remote sensing image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2):502-508. (in Chinese)
- [17] YIN X, GOUDRIAAN J, LANTINGA E A, *et al.*. A Flexible Sigmoid Function of Determinate Growth [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(3):361.
- [18] ZHANG H, ZHANG S, YADONG W U, *et al.*. Fast haze removal algorithm for single image based on human visual characteristics [J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(6):1753-1745.
- [19] 陈志刚,尹福昌. 基于 Contourlet 变换的遥感图像增强算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(10):2030-2037.
CHEN ZH G, YI F CH. Enhancement of remote sensing image based on Contourlet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):2030-2037. (in Chinese)

作者简介:



邵 帅(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,2013 年于长春理工大学获得学士学位,主要从事空间遥感图像处理技术方面的研究。E-mail:damond0424@yeah.net

导师简介:



郭永飞(1961—),男,吉林人,研究员,1990 年于中国科学院长春光学精密机械物理研究所获得硕士学位,主要从事图像处理及计算机应用技术方面的研究。E-mail:guoyf@ciomp.ac.cn