

文章编号 1004-924X(2017)02-0502-07

彩色遥感图像的亮度直方图局部线性化增强

陈博洋*

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘要:针对遥感图像能量低的实际问题,提出了一种亮度直方图局部线性化图像增强方法来提高彩色遥感图像的可视效果。首先,对 RGB 模型描述的彩色遥感图像进行 HSI 变换,以有效分离 H、S 和 I 分量;其次,对亮度 I 分量进行传统的直方图均衡化,得到均衡化灰度映射曲线;然后,将图像梯度作为目标函数,求出最优的线性化折点位置,对灰度低端动态范围映射曲线进行线性化处理,得到局部线性化的灰度映射曲线;最后利用新的灰度映射曲线对图像进行增强处理。Himawari-8 真彩色图像增强实验结果表明,经亮度直方图局部线性化增强后,像素平均梯度由 73 提高到了 147,较传统的 RGB 域直方图均衡化的 123 及 HSI 域直方图均衡化的 134 高;图像信息熵由 5.87 提高到 6.63,全部优于传统的 RGB 域直方图均衡化和 HSI 域直方图均衡化。本文方法有效地改善了彩色遥感图像的可视效果,提高了图像对不同目标的辨识能力。

关键词:遥感;图像增强;HSI 模型;直方图均衡化;

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0502

Local linear enhancement of luminance histogram of color remote sensing image

CHEN Bo-yang*

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: chenby@cma.gov.cn

Abstract: Aimed at actual problem of low energy of remote sensing image, a local linear image enhancement method of luminance histogram was put forward to improve visual effect of color remote sensing image. Firstly, HSI transformation was performed on color remote sensing image described by RGB model to separate component H, S and I effectively; secondly, traditional histogram equalization was implemented to luminance I component and gained equalized gray level mapping curve; then, by taking image gradient as objective function, the location of optimum linear break point were determined and linear processing was conducted to mapping curve within dynamic range at low side of gray level and gained local linear gray level mapping curve; finally, new gray level mapping curve was adopted to enhance image. Experimental result of Himawari-8 true color image enhancement shows that after local linear enhancement of luminance histogram, level gradient of pixel increases from 73 to 147, and with traditional RGB domain histogram equalization, it only increases to 123, with HSI do-

收稿日期:2016-09-14;修订日期:2016-11-04.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 41375023)

main histogram equalization, it increases to 134, and information entropy of image increases from 5.87 to 6.63, so it can be conclusion that the proposed algorithm is superior than other two algorithms in all aspects. The method improves visual effect of color remote sensing image effectively and improves identification capability of image to different objectives.

Key words: remote sensing; image enhancement; HSI model; histogram equalization

1 引 言

图像是人类认识客观事物的重要载体。人眼对彩色图像的敏感度很高,可识别多达上万种颜色的细微变化。为使人眼快速地从卫星遥感图像中辨识出感兴趣目标,日本葵花 8 号静止气象卫星(Himawari-8)成像仪 AHI 设置了中心波长分别为 $0.47 \mu\text{m}$ 、 $0.51 \mu\text{m}$ 和 $0.64 \mu\text{m}$ 的真彩色通道,希望拍摄出符合人眼习惯的真彩色图像,真实反映目标事物的客观特征属性。由于遥感图像的固有能量弱、信噪比低,Himawari-8 的真彩色图像视觉效果并不好,为了充分发挥真彩色图像的作用,人们开展了真彩色图像增强研究。

彩色图像处理与增强是图像处理的重要分支,处理过程中一般采用 RGB 模型或 HSI(Hue-Saturation-Intensity)模型。由于 RGB 模型是基于笛卡尔坐标系的,模型简单、直观,易于编程及硬件实现,故显示系统一般都基于 RGB 模型。HSI 模型采用色调、饱和度和亮度来描述图像,它有两个重要特点:I 分量与图像的彩色信息无关,H 分量和 S 分量与人眼感受颜色的方式紧密相连,因此 HSI 模型非常符合人眼视觉系统的观察原理,便于借用人眼视觉系统的特性进行图像处理^[1]。无论在 RGB 域还是 HSI 域,直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)方法都是重要的增强方法,因此,人们提出了各种改进算法^[2-5],其中双直方图均衡^[6](Brightness Preserving Bi-histogram Equalization, BBHE),等面积双远子图均衡^[7](Equal area Dualistic Sub-Image Histogram Equalization, DSIHE),最小均值误差双直方图均衡^[8](Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization, MMBEBHE)等方法把直方图分成两个部分进行均衡化;递归均值法分离直方图均衡^[9](Recursive Mean-Separate Histogram Equalization, RMSHE)采用多次递

归进行分区域直方图均衡化,多直方图均衡^[10](Multi-Histogram Equalization, MHE),将直方图分解成多个子图进行处理。考虑图像的复杂性等,张云峰提出了基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡算法^[11]。除了用于直接提高图像的显示效果外,直方图均衡也用作均匀性校正等方面^[12-13]。

在工作中发现,传统直方图均衡及其改进算法对存在大量低亮度目标的遥感图像的增强效果不好,视觉效果改善不明显。针对彩色遥感图像特性,本文提出了基于 HSI 模型的亮度直方图局部线性化图像增强算法(Partial Linearisation Histogram Equalization, PLHE),该方法可以保证增强图像的灰度动态范围,且有效保留遥感图像中低亮度目标的特征。

2 RGB 域和 HSI 域直方图均衡化

HE 可以有效提高图像的亮度,HE 是通过把原始图像的直方图变换为较均匀的分布形式,以增加图像灰度的动态范围,提高图像的可辨识度。HE 有标准的处理过程,其既可以在 RGB 域进行又可以在 HSI 域进行^[14-15]。

2.1 RGB 域的 HE

在 RGB 域的 HE 要对 R、G、B 3 个分量图分别进行 HE,其采用累积函数使图像的像素灰度呈均匀化分布,从而达到提升图像视觉效果的目的。图 1(彩图见期刊电子版)是待处理的原始图像,RGB 域 HE 增强图像,HSI 域 HE 增强图像及 PLHE 的增强图像。图 1(a)是随机挑选的 Himawari-8 的原始彩色图像,其具备该类图像的一般性和代表性,即图像整体偏暗、色彩感不强、目标辨识能力偏低,图 1(b)是 RGB 域 HE 的增强图像,由图 1(b)可见,经过 RGB 域的 HE 增强后,图像的视觉效果有所提高,但是仔细观察可发现,图像有被蒙上一层“薄纱”的效果。这是因为

在地球圆盘区域外,也就是地球区域外是宇宙冷空间,冷空间图像是纯黑色的,其在图像上更明显;而且图 1(b)中色彩结构偏离了原始图像,原因是 RGB 的 3 个分量分别进行 HE,失去了彼此的相对关系,破坏了原有的色彩结构。

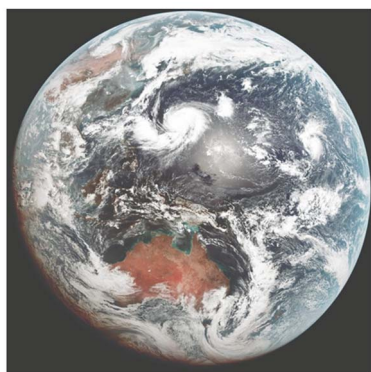
2.2 HSI 域的 HE

由 2.1 知,RGB 域 HE 虽提升了视觉效果,但图像却被蒙上了一层“薄纱”,且色彩结构发生了变化。而采用 HSI 模型则可以有效避免这个问题。因为 HSI 模型可以有效分离 I(亮度)分量和 H、S 分量,在 HSI 域进行亮度 HE 时,可以避免 H 分量和 S 分量的变化,从而很好地保留原始图像的色彩结构。

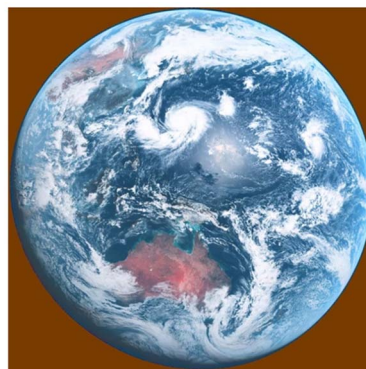
图 1(c)是 HSI 域内亮度 HE 的结果。观察图 1(c)可发现,图像整体亮度有所增加,视觉效



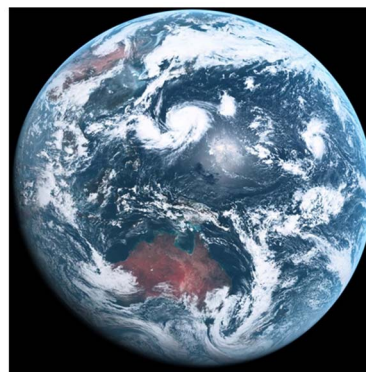
(a) 原始图像
(a) Original image



(b) RGB 域直方图均衡化增强图像
(b) Image enhanced by HE in RGB model



(c) HSI 域亮度直方图均衡化增强图像
(c) Image enhanced by HE in HSI model



(d) 亮度直方图局部线性化增强图像
(d) Image enhanced by PLHE

图 1 图像增强效果

Fig. 1 Image enhancement performances

果得到增强,陆地、云、海洋区分明显,相比图 1(b),图 1(c)保留了原始图像的色彩结构。由于新的灰度映射曲线是概率累积函数,函数特性使增强图像必然会出现高灰度值目标,但是低灰度值目标却无法得到很好的保持,图 1(c)中黑色背景区域出现了不希望出现的色彩,而存在大量的低灰度值目标是空间遥感图像的重要特征之一。

3 亮度直方图局部线性化图像增强

针对 RGB 域 HE 和 HSI 域亮度 HE 对遥感图像的增强效果比较差、增强图像出现色彩失真的问题,本文提出一种基于 HSI 模型的亮度直方图局部线性化图像增强方法。新的灰度映射曲线低端动态范围采用线性函数,考虑到线性函数可以保留低端动态范围、使增强图像保持原有色彩

结构,提高彩色遥感图像增强的可视化效果,处理结果见图 1(d)。具体流程见图 2。

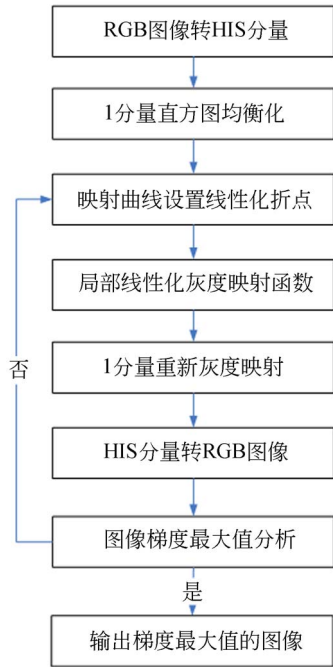


图 2 亮度直方图局部线性化图像增强算法流程
Fig. 2 Flow chart of image enhancement based on PLHE

PLHE 图像增强的具体处理流程如下:

(1) 将 RGB 图像转换为 HSI 模式
按照标准公式进行 RGB 图像到 HSI 的转换。

(2) 对亮度图像 I 进行直方图均衡化
按照标准公式对亮度图像 I 进行直方图均衡化。

(3) 直方图局部线性化处理
确定线性化折点 j , 折点以下部分采用线性灰度映射曲线 L_j , 折点以上部分采用 HE 灰度映射曲线 T_j , 则新的映射曲线为:

$$N_j = \begin{cases} L_j & T(k) \leq j \\ T_j & T(k) > j \end{cases} \quad (1)$$

(4) I 分量灰度映射
用新的映射曲线 N_j 对亮度图像进行灰度映射, 得到新的亮度图像 I' 。

(5) HSI 分量转换为 RGB 图像
利用 H、S 分量和新的亮度图像 I' , 进行 HSI 分量到 RGB 图像的转换。

(6) 确定折点位置

采用数值解方法计算折点的合理位置, 确定直方图局部线性化映射曲线, 即求出 $j @ \max\{\mu | \mu = \nabla [f(m, n) * (L_j + T_j)]\}$, $j=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1\}$, 其中 ∇ 是梯度算符, 用来确定 N_j 的理想形式; 同时输出合理折点 j 时的增强图像。

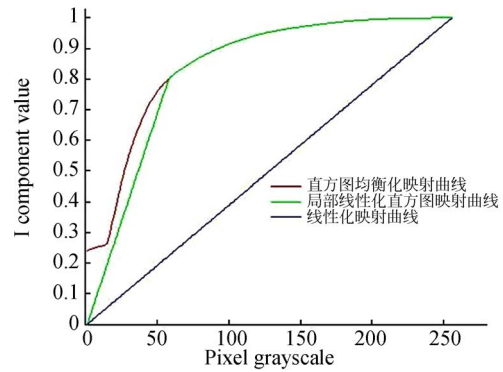


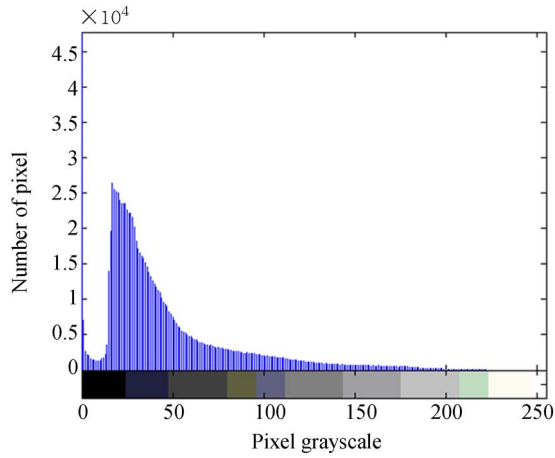
图 3 灰度映射曲线
Fig. 3 Gray scale mapping curves

图 3(彩图见期刊电子版)给出了针对图 1(a)最终确定的直方图局部线性化映射曲线, 线性化折点 $j=0.8$ 。由此可知, 本文提出的直方图局部线性化图像增强方法, 当 $j=0$ 时转化为传统的 HE, 当 $j=1$ 时转化为传统的线性化增强, 所以本文方法传统的 HE 和线性化增强的灵活形式, 兼具两种方法的优点。图 4 是不同方法均衡化的直方图。

图 4(a)~4(d)是图 1(a)~1(d)对应的直方图。由图 4 可知, 图 4(a)是原始图像的直方图, 图 1(a)的特点是整体偏暗, 大部分像素灰度集中在 30~70 之间。图 4(b)是 RGB 域 HE 增强图像的直方图, 从灰度分布上看, 其改变了原始图像的灰度分布特征; 而且由图 1(b)可以明显看出, 增强图像亮度有所增加, 但是色彩结构偏离了原始图像。图 4(c)是 HSI 域亮度 HE 增强图像的直方图, 由于在 HSI 域内仅对亮度直方图进行均衡化, 所以直方图结构和原始图像一致, 但是累积函数的特点导致灰度起点有所压缩。这导致图 1(c)色彩结构和原始图像保持一致, 但可视化效果却不够明亮鲜艳。图 4(d)是直方图局部线性化增强图像的直方图, 其直方图不仅保持了和原始图像一样的灰度分布特征, 还利用线性化增强扩展了低端的灰度动态范围; 图 1(d)显示的色彩结

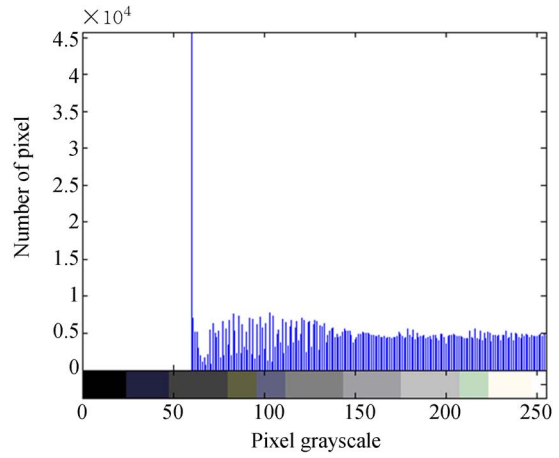
构和原始图像保持一致,灰度拉伸合理,陆地、海洋和云层得到有效分离。

综上所述,从主观效果上看,本文的直方图局部线性化增强图像较其它两种方法要好。



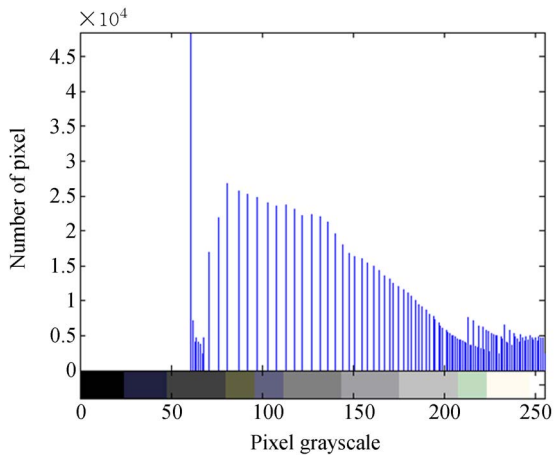
(a)原始图像直方图

(a) Histogram of original image



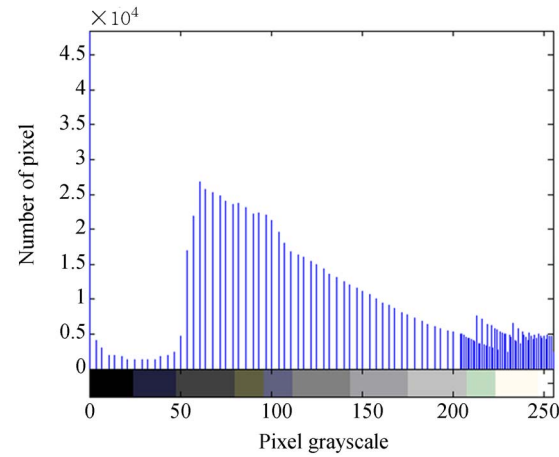
(b)RGB 域直方图均衡化增强图像直方图

(b) Histogram of image enhanced by HE in RGB model



(c)HSI 域亮度直方图均衡化增强图像直方图

(c) Histogram of image enhanced by HE in HSI model



(d)亮度直方图局部线性化增强图像直方图

(d) Histogram of image enhanced by PLHE

图 4 原始图像及不同方法增强图像的直方图

Fig. 4 Histograms of original image and corresponding enhanced images

4 图像质量评价

为了定量评价图像的增强效果,采用两种图像质量评价方法,来分析处理前后图像质量的改进情况。

4.1 像素平均梯度

图像像素平均梯度是把整幅图像的梯度和平均到每个像素上的均值,可以表征图像对景物细

节的表现能力,像素平均梯度越大,图像中的景物边缘越锐利、清晰。在试验中,采用索贝尔算子计算图像梯度^[16]。计算公式为:

$$TD_{avg} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

其中 G_x 、 G_y 分别是 x 和 y 方向的索贝尔算子。

4.2 信息熵

信息熵是香农从热力学中引进的信息度量标准,它是排除了信息冗余后的平均信息量。信息

熵用以描述图像中包含信息量的多少。显然,对高频景物细节表现清晰的图像包含的信息量大于表现不清晰的图像,所以信息熵从一定程度上体现了图像对景物细节的分辨能力^[17]。试验中采用的计算公式为:

$$CE = - \sum_{i=1}^N p(x_i) * \log_2(p(x_i)), \quad (3)$$

其中 $p(x_i)$ 是序号为 i 的图像灰度出现的归一化频率。图 1 中各图像的像素平均梯度和信息熵结果见表 1。

表 1 图像质量评价

Tab.1 Image quality evaluation

序号	图像	像素平均梯度	信息熵
图 1(a)	Himawari-8 原始图像	73.848 9	5.872 9
图 1(b)	RGB 域直方图均衡化增强	123.585 5	6.574 1
图 1(c)	HIS 域亮度直方图均衡化增强	134.998 3	6.583 9
图 1(d)	HIS 域直方图局部线性化增强	147.772 0	6.626 8

表 1 显示,采用本文提出的 HSI 域直方图局部线性化增强图像方法(图 1(d)),像素平均梯度从 73.85 提高到 147.77,信息熵从 5.87 提高到 6.63,效果优于传统的 RGB 域 HE 增强方法和

HSI 域亮度 HE 增强方法,图像质量和人眼可辨识度得以明显提升。

5 结 论

为提高彩色遥感图像的辨识能力,针对遥感图像的灰度分布特性,提出了基于 HSI 模型的亮度直方图局部线性化图像增强算法。该方法充分利用了线性化增强和直方图均衡化增强的优点,采用线性化增强对低端动态范围进行色彩保护,利用直方图均衡化在高端动态范围对灰度进行拉伸,达到了图像增强的目的,提高了图像的可视化效果。

以图像像素的平均梯度作为目标函数,通过科学设置灰度映射曲线的线性折点位置,获得了最优的灰度映射曲线,使增强图像的亮度直方图分布具有灰度空间动态范围的同时,保持了原始图像的色彩结构。对 Himawari-8 彩色图像进行增强处理,定量评价结果显示,像素平均梯度从 73.85 提高到 147.77,信息熵从 5.87 提高到 6.63,优于传统的 RGB 域 HE 和传统的 HSI 域亮度图像 HE 方法。

参考文献:

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing*[M]. Second Edition, Publishing House of Electronics Industry, 2008, 4: 233-235.
- [2] 赵文达, 续志军, 赵建, 等. 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7):1962-1968.
ZHAO W D, XU ZH J, ZHAO J, et al.. Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1962-1968. (in Chinese)
- [3] 刘欣悦, 黄廉卿. 利用多分辨率直方图特征分类数字 X 光乳腺图像[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 327-332.
LIU X Y, HUANG L Q. Classification of digital mammograms using multi-resolution histogram features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):327-332. (in Chinese)
- [4] 朱瑞飞, 贾宏光, 王超, 等. 应用参数化对数模型增强图像细节及对对比度[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4):1064-1070.
ZHU R F, JIA H G, WANG CH, et al.. Enhancement of image detail and contrast by parameterized logarithmic framework [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):1064-1070. (in Chinese)
- [5] 刘松林, 孙刚, 牛照东, 等. 基于相对相位直方图的数字表面模型数据与遥感图像配准[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1696-1705.
LIU S L, SUN G, NIU ZH D, et al.. Registration of DSM data and remote sensing image based on relative phase histogram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1696-1705. (in Chinese)
- [6] KIM Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, 43(1):1-8.
- [7] WANG Y, CHEN Q, ZHANG B M. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, 45(1): 68-75.

- [8] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions Consumer Actions. on Electronics*, 2003, 49(4): 1310-1319.
- [9] CHEN S D, RAMLI A P. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1301-1309.
- [10] MENOTTI D, NAJMAN L, FACON J, *et al.*. Multi-histogram equalization methods for contrast enhancement and brightness preserving [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(3): 1186-1194.
- [11] 张云峰. 基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(7): 695-702.
ZHANG Y F. Adaptive plate histogram equalization for infrared image based on scene complexity computation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(7): 695-702. (in Chinese)
- [12] 贺明, 张天一, 王亚弟, 等. 基于小波变换直方图规定的非均匀性校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3481-3485.
HE M, ZHANG T Y, WANG Y D, *et al.*. Non-uniformity correction algorithm based on wavelet transform histogram normalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3481-3485. (in Chinese)
- [13] 贺明, 王亚弟, 贺菁, 等. 双边滤波直方图均衡的非均匀性校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2621-2624.
HE M, WANG Y D, HE J, *et al.*. Non-uniformity correction algorithm based on bilateral filter histogram equalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2621-2624. (in Chinese)
- [14] 王勇, 刘雯. 改进的图像增强直方图统计方法[J]. *吉林大学学报: 信息科学版*, 2015, 33(5): 495-500.
WANG Y, LIU W. Improved image enhancement histogram-equalization method [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2015, 33(5): 495-500. (in Chinese)
- [15] 田小平, 乔东, 吴成茂. 基于双直方图均衡化的彩色图像增强[J]. *西安邮电大学学报*, 2015, 20(2): 58-63.
TIAN X P, QIAO D, WU CH M. Color image enhancement based on bi-histogram equalization [J]. *Journal of Xi'an University of Posts And Telecommunications*, 2015, 20(2): 58-63. (in Chinese)
- [16] 徐少平, 杨荣昌, 刘小平. 信息量加权的梯度显著度图像质量评价[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(2): 201-210.
XU SH P, YANG R CH, LIU X P. Information content weighted gradient salience structural similarity index for image quality assessment [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(2): 201-210. (in Chinese)
- [17] 杜欣宇, 陈丽芳, 刘渊. 基于分块信息熵的彩色图像融合算法[J]. *计算机系统应用*, 2015, 24(7): 22-28.
DU X Y, CHEN L F, LIU Y. Color image fusion algorithm based on block information entropy [J]. *Computer Systems Applications*, 2015, 24(7): 22-28. (in Chinese)

作者简介:



陈博洋(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2008年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,现为国家卫星气象中心风云四号地面系统工程主任设计师,主要从事空间遥感仪器顶层设计、遥感资料预处理和图像处理与评价。Email: chenby@cma.gov.cn