

基于光能分配的遥感图像增强

陈 强 纪则轩 孙权森 夏德深

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094)

摘 要 遥感图像对比度的下降主要是由于光学系统调制传递函数(MTF)的下降导致的, MTF 反映了光学系统分配光能的特性。根据图像的对比度下降原理, 提出了一种基于光能分配的遥感图像增强方法, 其基本过程是首先将图像低频部分的光能进行抑制, 然后通过 Gamma 校正将减少的低频部分的光能重新分配到高频部分, 得到对比度提高的增强图像。实验结果表明, 该方法实现简单, 且取得了较好的增强效果, 适用于遥感图像的增强。

关键词 图像增强 光能分配 调制传递函数(MTF) 遥感图像

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)11-2284-08

Remote Sensing Image Enhancement Based on Energy Distribution

CHEN Qiang, JI Ze-xuan, SUN Quan-sen, XIA De-shen

(The School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

Abstract The contrast reduction of remote sensing images is mainly because of the reduction of the modulation transfer function(MTF) of the optical system. And MTF represents the characteristic of the light energy distribution of the optical system. By analyzing the theory of contrast reduction, this paper presents a remote sensing image enhancement method based on energy distribution. Firstly, the image energy at the low frequency domain is decreased, and then the decreased image energy is allocated to the high frequency domain to obtain the enhancement result. The experimental results demonstrate that the proposed method is simple and effective, which is feasible for remote sensing image enhancement.

Keywords image enhancement, energy distribution, modulation transfer function(MTF), remote sensing image

1 引 言

图像增强就是使图像变得更清晰, 便于人们对图像的解释和理解, 或者为其他自动图像处理技术提供更好的输入。在遥感应用中, 经过正确增强处理后的高清晰图像对遥感应用可以起到促进作用。目前, 常用的图像增强方法可以粗略地分为两类^[1-3]: 基于空域的方法和基于频域的方法。空域方法主要是在空间域直接对图像的灰度值进行处理, 其中大部分方法基于直方图^[4-5], 另外还有基于

局部对比度测量和边缘信息的方法^[6-7]、基于偏微分方程(PDE)的方法^[8-9]。Land 首次提出了 Retinex 理论^[10], 并将它用于彩色图像的增强^[11-13]。基于 Retinex 的图像增强方法能够消除光照强度对图像的影响, 使阴影或者高光区域的图像信息能够更好地被人眼所观察。基于频域的方法是在图像的某种变换域内, 对图像的变换系数值进行修正, 然后通过逆变换获得增强图像。常用的基于频域的方法有反锐化掩模^[14]和同态滤波^[15]等。

由于遥感图像受光照的影响较小, 图像的对比度一般呈现整体偏低, 不容易出现自然图像经常存

基金项目: 国家自然科学基金项目(60805003, 60773172); 江苏省博士后基金项目(AD41158)

收稿日期: 2008-05-19; 改回日期: 2008-11-06

第一作者简介: 陈 强(1979 ~), 男, 讲师。2007 年于南京理工大学获模式识别与智能系统专业博士学位。主要研究方向为图像处理、计算机视觉和模式识别。E-mail: chen2qiang@mail.njust.edu.cn

在的阴影等局部对比度偏低的问题,所以全局的图像增强方法比局部的方法更适合于遥感图像增强。本文提出了一种全局的基于光能分配的遥感图像增强方法。遥感图像的对比度下降主要是由于光学系统调制传递函数(MTF)的下降造成的,而 MTF 反映了光学系统分配光能的特性,即图像的高频能量经 MTF 下降分配到了低频部分,从而导致图像的清晰度和对比度下降。本文方法的基本思想就是将部分低频能量重新分配到高频部分,但图像总的能量保持不变。

2 图像对比度下降原理

如果忽略噪声的影响,图像对比度的下降则可以由成像系统的 MTF 表示。下面首先对 MTF 的概念和物理含义进行简单分析。

MTF 是物理光学理论的一个概念,是光学系统的性能评价指标。对于光学系统的检验经常用到分划板。图 1(a)为金属靶标图像,图 1(b)为光源从金属靶标后面照射所形成的投影图像的亮度分布图。

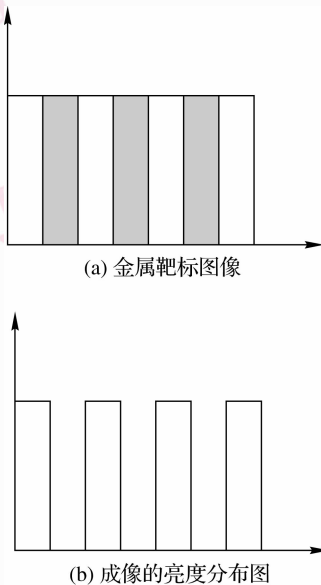


图 1 金属靶标图像及亮度分布图

Fig. 1 Metal target image and lightness distribution

如果金属靶标沿水平方向的黑白线条宽度如图 1 所示,则称为正弦波光栅靶标。以下的讨论针对正弦波靶标进行。

正弦波分划板上,每一个线对的宽度 p 称为空

间周期,单位为毫米。令空间频率为 v ,空间圆频率为 $w = 2\pi v = 2\pi/p$ 。正弦波光栅的亮度分布如图 2 所示。

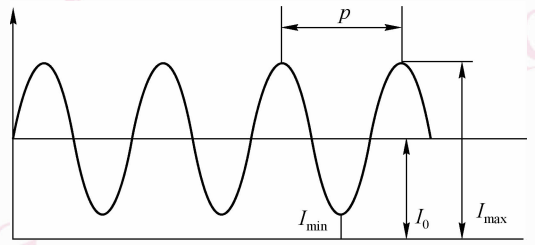


图 2 正弦波光栅空间周期示意图

Fig. 2 Diagram of space periodic sine wave raster

振幅为 I_a 的正弦波光栅的亮度分布表示式为

$$I(x) = I_0 + I_a \cos(wx) \tag{1}$$

为表达一个图像明暗的反衬程度,目前通用的一种方法叫做调制度,定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I_a}{I_0} \tag{2}$$

亮度不可能为负值,可知 $0 \leq M \leq 1$ 。

正弦波光栅成像后仍然表现为正弦波形式,如图 3 所示,虚线条为成像后的正弦波。假设光学系统横向放大率 p ,正弦波光栅像的宽度就放大为物体的 p 倍,物与像的 v 值通常是不一致,但空间频率改变只是几何属性,与光能改变情况无关。今后讨论 MTF 时,不考虑光学系统的光吸收和表面反射的损失。

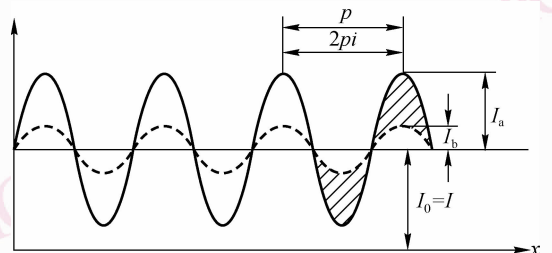


图 3 正弦波光栅成像前后的波形变化图

Fig. 3 Wave change of the sine wave raster imaging

从图 3 可见,像的振幅减小,用 I_b 表示, $I_b \leq I_a$, 所以 $M_{\text{像}} \leq M_{\text{物}}$ 。 $M_{\text{物}}$ 代表物体的调制度,同时也代表理想像的调制度。实际成像后,亮线条会变暗,暗线条将变亮,看起来没有成像前清晰。实际像的调

制度会降低,降低的程度因光学系统的不同而不同;同一个光学系统,又由于空间频率的不同而不同,它将随着线条的疏密而不同。调制度的降低程度要用 $M_{\text{像}}$ 和 $M_{\text{物}}$ 比较,因而定义某一频率 v 的调制传递函数值为

$$T(v) = \frac{M_{\text{像}}}{M_{\text{物}}} \quad (3)$$

$M_{\text{像}}$ 是空间频率的函数,所以 T 也是空间频率 v 的函数。所以包含各个空间频率 v 的 $T(v)$ 就叫做调制传递函数(MTF)。

MTF 表达了一个光学系统分配光能的特性。实际所用的精密光学仪器中,光能的吸收和反射所造成的损失并不显著地改变图像质量。通常情况下: $0 \leq T(v) \leq 1$ 。

MTF 之所以小于 1,只是体现光能分配的改变,而不是光能的损失。图 4 为光能分配改变图。亮线亮度降低所损失的光能(实线在上、虚线在下所夹的面积 S_1),正好补偿到暗线用做增加亮度所需的光能(虚线在上、实线在下所夹的面积 S_2)。在图像上表现为黑白分明的边界上,原来灰度高的会降低,而原来灰度低的会升高一些,边缘变得模糊。在频谱上表现为高频信息的损失和低频信号的增加。MTF 的值说明了光能改变的程度。

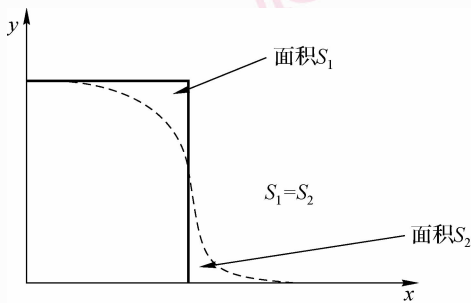


图 4 光能分配改变图

Fig. 4 Change of the light energy distribution

遥感图像的成像链路涉及成像过程的所有环节,如大气散射、光学系统、电路等^[16]。对于线性移不变和时不变系统,系统的 MTF 是各组成部分 MTF 的乘积。如果只考虑成像链路中引起图像质量退化的主要因素,可得到如下形式的成像系统 MTF^[17]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{sen}} \mathbf{H}_{\text{mov}} \mathbf{H}_{\text{opt}} \quad (4)$$

其中, \mathbf{H}_{sen} 表示传感器的 MTF,代表传感器获得的是在其敏感区域(通常是正方形)中接受的光子而不是某点上的,从而

$$\mathbf{H}_{\text{sen}}(\xi, \eta) = 4c^2 \text{sinc}(\pi\xi c) \text{sinc}(\pi\eta c) e^{-\beta c |\eta|} \quad (5)$$

其中, c 代表传感器的大小, ξ 和 η 是频域坐标, β 是常量。指数项考虑到相邻传感器之间的传导率,其中 $\beta \approx 0.9$ 。式(4)的第 2 项 \mathbf{H}_{mov} 表示平台运动 MTF。如果系统在 u 方向上移动了距离 d , 则

$$\mathbf{H}_{\text{mov}}(\xi) = \text{sinc}(d\pi \langle \xi, u \rangle) \quad (6)$$

其中, \langle, \rangle 表示内积。

\mathbf{H}_{opt} 表示光学系统的 MTF,它对信号的影响类似于将信号与一个复杂的传递函数卷积。CNES(法国空间研究中心)正在研制的卫星图像系统的精确模型如下:

$$\mathbf{H}_{\text{opt}}(\xi, \eta) = e^{-\alpha \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \quad (7)$$

其中, α 的值约为 2,表示在有效区域,传感器对图像的低通滤波比光学系统要强很多。

如果不考虑噪声的影响,图像的退化模型可以表示为

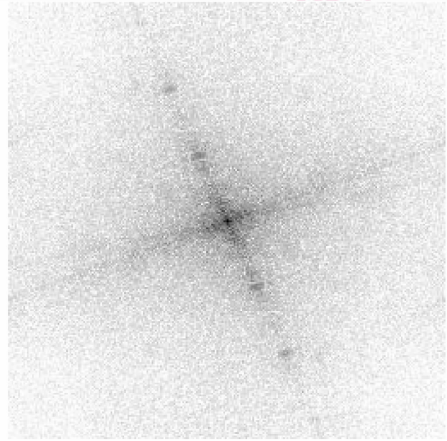
$$\mathbf{g} = F^{-1}(\mathbf{H}) * \mathbf{f} \quad (8)$$

其中, \mathbf{f} 和 \mathbf{g} 分别表示原始清晰图像和经成像链路退化后的图像, F^{-1} 表示傅里叶逆变换。由于成像系统 MTF 的和等于 1,类似于低通滤波器,所以退化前后图像的能量基本上保持不变。如图 5 所示为经式(4)退化的示意图,其中系统 MTF 分布的参数设置可以参见文献[17]。从图 5 可知,退化图像相对于原图来说,纹理等细节被平滑了,对应到频谱图像上就是高频信息减少了,但退化前后图像的能量基本保持不变(图 5(a)、(d)的均值分别为 110 和 113)。根据变换前后能量守恒原理可得:原始图像的高频能量分配到了低频部分,而退化前后图像的频谱总能量基本保持不变。

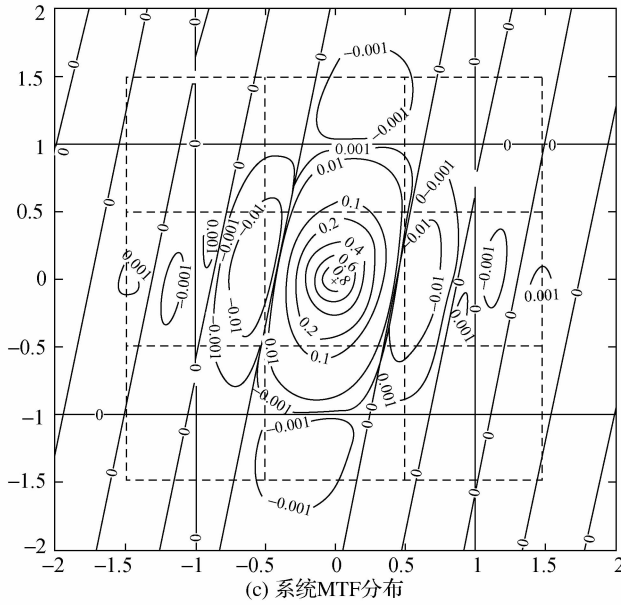
根据上述的分析,通过在频谱上重新分配高频信息和低频信息的能量,使低频信息增加的光能重新分配给高频信息,从而使边缘变得清晰,改善图像的视觉效果。



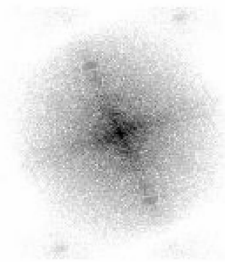
(a) 原始图像



(b) 原始图像对应的频谱图像



(d) 退化图像



(e) 退化图像对应的频谱图像

图 5 遥感图像退化示意图

Fig. 5 Remote sensing image degradation

3 基于光能分配的图像增强

图 6 为本文算法流程图。即首先对原始遥感图像做傅里叶变换得到频谱图像,然后对低频进行抑制得到低频抑制频谱图像,通过逆傅里叶变换得到低频抑制图像,最后对低频抑制图像进行 Gamma 校正,使校正后图像均值与输入原始图像的均值基本保持一致得到最终的增强结果。其中低频抑制的目的是减少低频信息的能量,均值调整的目的是在保持图像总的能量不变的基础上将减少的低频信息的能量分配给高频信息。



图 6 算法流程图

Fig. 6 Algorithm flow chart

3.1 低频抑制

由于遥感图像的大部分能量都集中在低频部分(频谱图像的中心位置),所以在频谱图像中低频处的幅值明显大于其他频谱位置处的幅值。令 f 为原始遥感图像, F 为由傅里叶变换得到的 f 的频谱图像, $|F|$ 表示 F 的幅值。假定点 (x, y) 为 $|F|$ 中最大值的坐标,即低频处的坐标,则取抑制函数为

$$F' = \begin{cases} kF & (x, y) \text{ 处} \\ F & \text{其他位置} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $0 < k < 1$ 为抑制常数。 k 越小表示低频抑制的程度越大,反之亦然。如果 k 取得太大(接近 1),则增强效果不明显;如果 k 取得太小(接近 0),则增强结果会出现失真。 k 的取值可以根据成像系统的 Nyquist 频率处的 MTF 值确定。当 Nyquist 频率处的 MTF 值较小时,表示图像退化后高频能量损失严重,则 k 应取较小值;反之亦然。由于本文主要针对中巴红外图像进行实验,所以成像系统的 MTF 分布相似。根据实验可知: k 取 0.5 左右比较合适。低频抑制式(9)的物理含义是减少图像中的低频部分的光能,然后通过 Gamma 校正将减少的低频部分的光能重新分配到高频部分。

3.2 Gamma 校正

对低频抑制后的频谱图像 F' 作逆傅里叶变换

得到低频抑制图像 g , 然后通过 g 做如下的 Gamma 校正得到最终的增强图像 r 。

$$r = 255(g')^\gamma \quad (10)$$

式中, g' 是归一化的低频抑制图像, γ 为 Gamma 校正因子。为了使增强图像的能量与原始图像的能量基本保持一致,取

$$\gamma = \frac{255m_{g'}}{m_f} + \tau \quad (11)$$

式中, m_g 和 m_f 分别为图像 g' 和 f 的灰度均值, τ 为常量。常量 τ 用于调整图像的整体亮度,如果由于传感器增益下降导致原始图像整体偏暗,则取 τ 为负常量,使 γ 趋近于 0,从而提高增强图像 r 的整体亮度。假定 $\tau = 0$,则 Gamma 校正因子 $\gamma > 1$,当归一化低频抑制图像的灰度均值大于原始图像的灰度均值,经 Gamma 校正后 g' 的整体灰度会降低,趋近于原始图像的灰度均值,从而尽量使增强前后的能量保持不变;当归一化低频抑制图像的灰度均值小于原始图像的灰度均值时, $\gamma < 1$,经 Gamma 校正后 g' 的整体灰度会提高,趋近于原始图像的灰度均值。

4 实验结果和分析

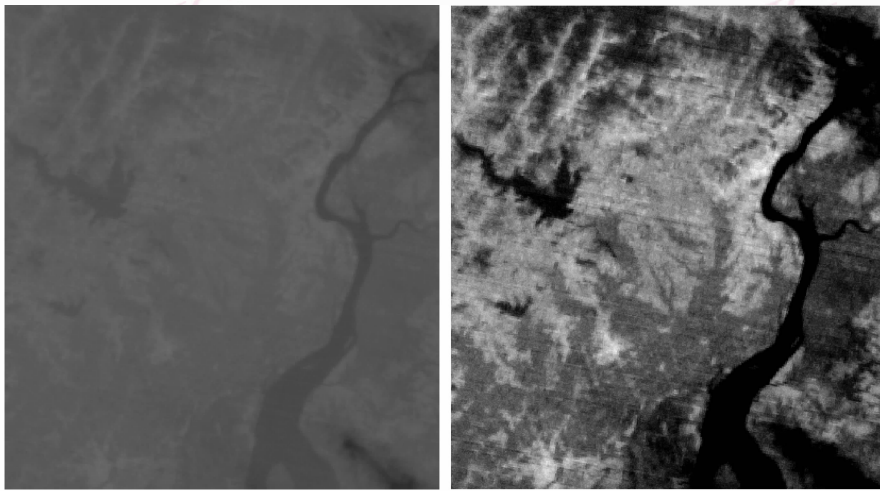
图 7 是增强前后的效果比较。图 7(a)为一幅中巴地球资源卫星红外遥感图像,图 7(b)为采用本文方法增强后的结果图,其中 $\tau = 0.7$ 。图 7(c)、(d)分别为图 7(a)和(b)的直方图。从直方图 7(c)、(d)可知,增强后图像的灰度分布明显比原图的灰度分布更广阔。从图 7(a)(b)的视觉直观上可以看出:增强结果图比原图更加清晰,对比度更强,纹理和边缘更加突出。为了定量地评价增强前后图像的质量,计算了图像的均值、方差等图像质量参数,具体计算结果如表 1。图像对比度为

$$Con = \sum_{n=0}^{255} n^2 \left\{ \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \hat{p}(i, j) \right\}$$

其中, $n = |i - j|$, \hat{p} 为灰度共生矩阵。图像清晰度表示影像边界的清晰程度,为

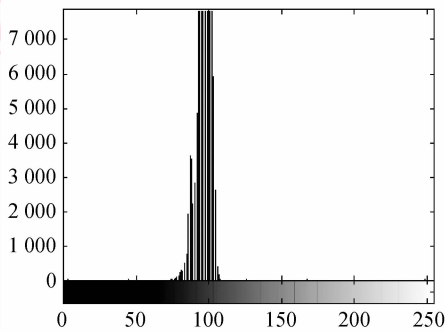
$$EAV = \sum_a^b (df/dx)^2 / \text{abs}(f(b) - f(a))$$

其中, df/dx 为垂直于边缘的灰度变化率, $f(b) \sim f(a)$ 为该垂直边缘方向的灰度差。图像细节能量为

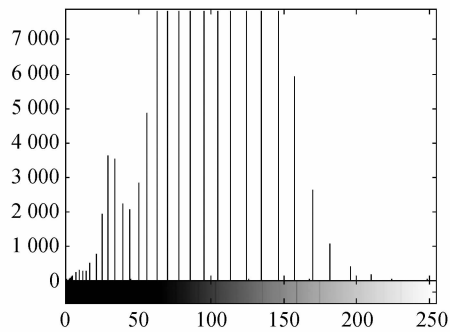


(a) 原图

(b) 增强结果图



(c) 原图的直方图



(d) 增强图像的直方图

图 7 增强前后效果比较

Fig. 7 Comparison of the original image and enhancement result

$$Det = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sigma_f^2(x, y)$$

其中, m 和 n 分别为图像的高度和宽度,

$$\sigma_f^2(x, y) =$$

$$\frac{1}{(2M + 1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x + i, y + j) - m_f(x, y)]^2$$

表示图像 f 中大小为 $(2M + 1) \times (2M + 1)$ 的区域方差,

$$m_f(x, y) = \frac{1}{(2M + 1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x + i, y + j)$$

为区域的均值。

从表 1 可知,在前后两幅图像灰度均值基本保持不变的情况下,图像的方差由 4.42 提高到 35.45,对比度提高了 80 倍多,清晰度和细节能量也都得到了显著提高。综上所述,基于光能分配原理增强后的图像,不仅信息量有较大的提高,而且图像变清晰,图像的质量也有较大提高。

表 1 增强前后图像的参数对比

Tab. 1 Comparison of image parameters

图 7	均值	方差	对比度	清晰度	细节能量
a	96.82	4.42	1.26	5.76	0.82
b	97.83	35.45	105.48	51.42	67.44

图 8 为各种图像增强方法的结果比较。从图 8 可知,直方图均衡化方法容易造成原图最暗和最亮区域尾部像元的反差丢失,其余方法的增强效果没有本文方法的增强效果明显,即本文方法在不丢失信息的条件下,具有显著的增强效果。表 2 为各种图像增强方法结果图像的参数对比,从表 2 也可知,本文方法相对于除直方图均衡化的其他方法,方差、清晰度等参数基本上都有所提高。

图 9 为本文方法应用于其他 3 幅遥感图像的增强结果,增强结果图像的视觉效果明显优于原始图像,有利于遥感图像进一步推广应用,如军事判读和城市规划等。

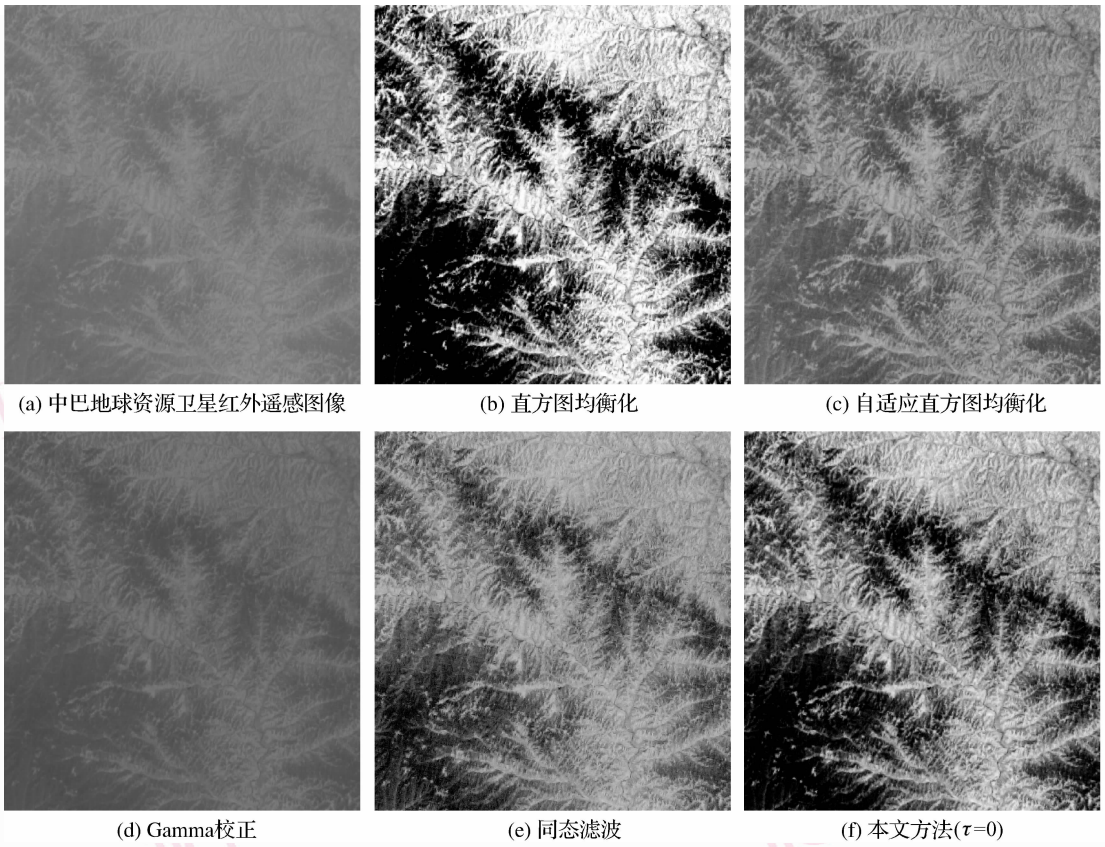


图 8 各种图像增强方法的结果比较

Fig. 8 Comparison of image enhancement results based on several methods

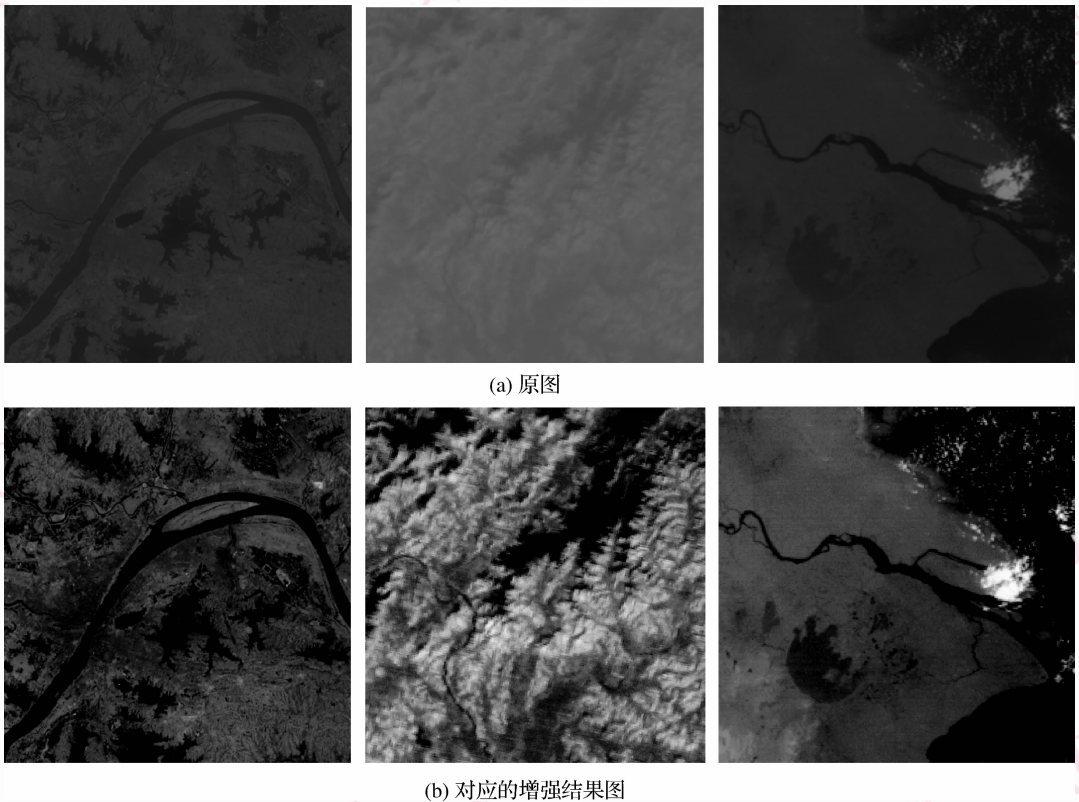


图 9 本文方法增强结果图

Fig. 9 Image enhancement results with our method

表 2 图 8 中图像的参数对比

Tab. 2 Comparison of image parameters of Fig. 8

图 8	均值	方差	对比度	清晰度	细节能量
a	119.27	6.93	5.08	11.6	3.64
b	127.48	74.88	593.6	121.6	427.81
c	120.59	18.57	62.81	40.83	45.03
d	102.4	7.14	5.62	12.11	4.0
e	121.31	30.49	204.5	75.99	119.73
f	117.08	47.47	190.65	79.15	168.4

5 结 论

针对遥感图像的特点,提出了一种基于光能分配的全局图像增强方法。依据图像对比度下降原理,通过将图像的低频部分的光能重新分配到图像的高频部分,从而尽量还原对比度下降前的光能分布,得到对比度显著的增强结果。实验结果表明,本文方法在不丢失有效信息的基础上,可以显著提高图像的对比度和清晰程度。

参考文献 (References)

- Gonzalez R, Wintz P. Digital Image Processing [M]. Norwood, MA, USA: Addison-Wesley, 1987.
- Castleman K. Digital Image Processing [M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.
- Rao D H, Panduranga P P. A survey on image enhancement techniques: classical spatial filter, neural network, cellular neural network, and fuzzy filter [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) [C], Bhubaneswar, India, 2006: 2821-2826.
- Pizer S M, Ambum E P, Austin J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variation [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, **39**(3): 355-368.
- Chen S D, Ramli A R. Minimum mean brightness error bihistogram equalization in contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, **49**(4): 1310-1319.
- Ji T L, Sundareshan M K, Roehrig H. Adaptive image contrast enhancement based on human visual properties [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, **13**(2): 573-586.
- Beghcladi A, Negrate A L. Contrast enhancement technique based on local detection of edges [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1989, **46**(2): 162-174.
- Yi D, Lee S. Fourth-order partial differential equations for image enhancement [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, **175**(1): 430-440.
- Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y Y. Image enhancement and denoising by complex diffusion processes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, **26**(8): 1020-1036.
- Land E. The Retinex [J]. Scientific American, 1964, **52**(2): 247-264.
- Land E, McCann J. Lightness and Retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, **61**(1): 1-11.
- Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, **6**(7): 965-976.
- Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for Retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, **52**(1): 7-23.
- Polesel A, Ramponi G, Mathews V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, **9**(3): 505-510.
- Voicu L I, Myler H R, Weeks A R. Practical considerations on color image enhancement using homomorphic filtering [J]. Journal of Electronic Imaging, 1997, **6**(1): 108-113.
- Chen Shi-ping, Jiang Wei. The MTF optimal design and MTF for spaceborne optical sampled imaging system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, **28**(4): 17-22, 27. [陈世平, 姜伟. 航天光学采样成像系统 MTF 的优化设计与 MTF [J]. 航天返回与遥感, 2007, **28**(4): 17-22, 27.]
- Almansa A, Durand S, Rougé B. Measuring and improving image resolution by adaptation of the reciprocal cell [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2004, **21**(3): 235-279.