

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

中国图像工程:2011 章毓晋(603)

植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)

滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)

提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)

均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)

图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)

改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)

联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)

Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)

局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)

结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5月16日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京9718信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-68407995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第0346号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TN911, TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0729-11

论文引用格式: 孟天佑, 汪云甲. 遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 729-739

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价

孟天佑^{1,2}, 汪云甲^{1,2}

1. 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 徐州 221116;
2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 大多数原始的遥感影像由于其灰度分布集中在较窄的范围内, 影像的细节不够清晰, 对比度较低。为了使影像的灰度范围拉开或使灰度均匀分布, 从而增大反差, 增强影像细节信息, 通常采用的方法为直方图均衡化。通过对信息熵定义的阐述, 引出直方图均衡化的图像增强算法。通过分析传统直方图均衡化算法中存在的缺陷, 进而基于分段映射思想提出一种改进的理想直方图均衡化算法。同时, 为了对传统算法和改进算法进行定量化地分析比较, 基于同时对比度以及人类视觉对比度分辨率限制和模糊数学的相关思想, 分别提出基于加权几何平均数法的合成平均对比度和细节评价参数的定义。最后, 采用同时对比度、基于加权几何平均数法的合成平均对比度以及细节评价参数作为定量评价的指标, 对所提出的改进算法进行了定量评价。评价结果表明, 该改进算法的图像增强效果优于传统的直方图均衡化算法。

关键词: 理想直方图均衡化; 同时对比度; 合成平均对比度; 细节评价参数

Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality

Meng Tianyou^{1,2}, Wang Yunjia^{1,2}

1. China University of Mining and Technology Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Xuzhou 221116, China;
2. China University of Mining and Technology School of Environment Science and Spatial Informatics, Xuzhou 221116, China

Abstract: The intensity distribution of most original remote sensing images concentrated in a narrow range, resulting in unclear image details and low contrast of the image. Histogram equalization is commonly used to distribute the gray levels of an image uniform which can increase the contrast of images and enhanced the details. Through the elaboration of the definition of comentropy, we draw forth the image enhancement algorithm of histogram equalization. Then, we put forward an improved algorithm of ideal histogram equalization, which is based on piecewise mapping thoughts through the analysis of the defects existing in the traditional histogram equalization. In addition, we relate and analyze the implementation of the improved algorithm in this paper. Meanwhile, in order to do the quantitative analysis and comparison between the traditional algorithm and the modified algorithm, we use synthetic average contrast, and details evaluation parameters, which are based on simultaneous contrast, the contrast resolution limit, and fuzzy mathematics. Finally, we use simultaneous contrast, synthetic average contrast, and details evaluation parameters as the indexes of quantitative evaluation and quantitative evaluation of the improved algorithm. The results of quantitative evaluation show that the image enhancement effect of the improved algorithm proposed in this paper is better than the algorithm of traditional histogram equalization.

Key words: ideal histogram equalization; simultaneous contrast; synthetic average contrast; details evaluation parameters

收稿日期: 2011-07-20; 修回日期: 2012-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174287); 国家科技支撑计划子课题(2011BAB01B06-06)

第一作者简介: 孟天佑(1987—), 男, 中国矿业大学环境与测绘学院摄影测量与遥感专业硕士研究生, 主要从事 InSAR 算法与应用以及遥感图像处理研究。E-mail: cumtrsty@gmail.com

0 前言

图像增强(image enhancement)是图像处理过程中所采用的最基本方法,它一般被作为各种图像分析与处理时的预处理过程。图像增强的主要目的是通过修正图像的灰度等级,从而改善图像的视觉效果,并最终提供直观、清晰、适合于分析的图像。在图像增强处理过程中,直方图均衡化(histogram equalization)是最常用、最重要的用于拉伸图像对比度的算法之一。该算法是将随机分布的图像直方图修改成均匀分布的直方图,又被称为拉平扩展,其实质是对图像进行非线性拉伸,重新分配图像像元,使一定灰度范围内像元的数量大致相等。而如果以数学的观点进行讨论,则直方图均衡化就是把一个概率密度函数通过某种变换变成均匀分布的随机概率密度函数^[1-3]。

假设一幅图像具有 n 级灰度,其第 i 级灰度出现的概率为 p_i ,定义第 i 级灰度所含的信息量(熵值)为^[4]

$$I(i) = \log_2 \frac{1}{p_i} = -\log_2 p_i \quad (1)$$

则整幅图像的信息熵可以定义为^[5]

$$C = \sum_{i=0}^{n-1} p_i I(i) = - \sum_{i=0}^{n-1} p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

图像的信息熵越大,则图像所包含的信息量也越大,图像的质量也相对越好。理论上已经证明,当图像的灰度均匀分布时,图像信息熵达到最大值^[6],即当

$$p_0 = p_1 = p_2 = \dots = p_{n-1} = \frac{1}{n} \quad (3)$$

时,式(2)中的 C 达到最大值。根据上述的论断,不难得出若一幅图像中的像元均匀的占有全部可能的灰度级,则这样的图像有高对比度以及多变的灰度色调,从而显示为一幅灰度级丰富且动态范围大的图像^[7-8]。直方图均衡化的图像增强算法便是基于此思想而提出的。

但是在传统的直方图均衡化算法中,由于其所采用的是一对一或者多对一的映射方法,即根据预先确定的图像均衡化后每个灰度级理论上的像元频率,将原始图像中的某一个灰度级或某几个灰度级映射为完成均衡化后的图像中的某一个灰度级,由于采用这种映射关系无法分割某些像元频率出现高

的灰度级中的像元,因此传统直方图均衡化算法的均衡效果并不理想,均衡化后每个灰度级的像元频率只能做到近似相等。为了解决传统直方图均衡化算法中的这一缺陷,提出一种改进的理想直方图均衡化算法。

1 改进的理想直方图均衡化算法

根据上述对于传统直方图均衡化算法不能实现直方图的理想均衡的原因分析,可以得出为了实现直方图的理想均衡化,最直接有效的方法就是打破传统直方图均衡化算法中所采用的灰度级一对一或者多对一的映射方法,转而重新寻找其他的途径以实现灰度级的多对多或者一对多映射。

1.1 图像像元重排序

为了实现算法的后续步骤,需先对图像进行相应的预处理,即根据图像像元的灰度值对其进行由小到大的排序操作。

在本文算法中,图像像元重排序主要是基于数组元素查找的思想。即先确定数组中元素的上下限,然后在该范围内以 1 为步长执行循环。循环的初始值和循环的终止条件分别取为数组的上限和下限,在循环体中以当前循环的循环值作为基准,在数组中进行查找,若查找到符合基准的数组元素,则返回该元素在数组中的索引值,否则返回数值 -1。

排序的结果存储在一个新的 1 维数组中,该数组的下标对应排序的次序,而数组中存储的元素是排序前各个像元在数组中的索引值。即该一维数组的下标对应图像像元重排序后的次序,而该下标所对应的数组中的元素为该像元在图像中的原始位置。对存储排序结果的 1 维数组进行上述的设置,是为了便于实现算法后续步骤中的灰度级映射。

1.2 根据原始图像的灰度级进行均匀分段

完成上述像元重排序之后,再根据原始图像的灰度级数进行均匀分段并依据排序结果将像元均匀分布到各个分段中。

原始图像的最大灰度级数可确定为

$$gs = \max_{1 \leq i \leq n} DN(i) - \min_{1 \leq i \leq n} DN(i) + 1 \quad (4)$$

式中, gs 为原始图像的最大灰度级数, n 为图像中像元的总数, i 表示图像中的第 i 个像元, $DN(i)$ 为图像中第 i 个像元的灰度值,通过两个求最值的定义

式 $\max_{i \in N} DN(i)$ 和 $\min_{i \in N} DN(i)$ 可以分别求出图像所有像元灰度值中的最大值和最小值,其中 $N = \{x | 1 \leq x \leq n\}$ 。与此同时,假定均匀分段的分段数目为 sn ,为了确保不丢失原始图像中的灰度级信息,应令均匀分段的分段数目 sn 等于原始图像的最大灰度级数,即令 $sn = gs$ 。

每一个均匀分段中的像元数目可确定为

$$pc = \frac{\sum_{i=1}^x \frac{i}{i} \times \sum_{j=1}^y \frac{j}{j}}{sn} \quad (5)$$

式中, pc 为每一个均匀分段中的像元数目, x 和 y 分别为2维图像数组每一维的大小。通过 $\sum_{i=1}^x \frac{i}{i} \times$

$\sum_{j=1}^y \frac{j}{j}$ 即可求得图像中像元的总数。

分布在每一个均匀分段中的像元数目应该基本相等,各个分段之间最多允许相差一个像元,而在很多情况下这也是无法避免的情况,因为无法保证图像中像元的总数一定能够恰好整除分段段数。

根据式(5)得到每一个均匀分段中像元的基本数目后,所剩余的像元数目可由式(5)的反推公式确定:

$$lc = \sum_{i=1}^x \frac{i}{i} \times \sum_{j=1}^y \frac{j}{j} - \sum_{n=1}^p \frac{n}{n} \times \sum_{m=1}^s \frac{m}{m} \quad (6)$$

式中, lc 为所剩余的像元数目, p 和 s 分别表示每一个均匀分段中像元的基本数目和均匀分段的分段数目。

通过 $\sum_{n=1}^p \frac{n}{n} \times \sum_{m=1}^s \frac{m}{m}$ 即可求得已均匀分布到每一个均匀分段中的像元总数。若图像中像元的总数恰好能够整除分段段数,即 $\sum_{i=1}^x \frac{i}{i} \times \sum_{j=1}^y \frac{j}{j} = \sum_{n=1}^p \frac{n}{n} \times \sum_{m=1}^s \frac{m}{m}$,则此时根据式(6)容易得到 $lc = 0$ 。

1.3 灰度级多对多映射

为了实现灰度级的多对多映射,本文算法中引入一种基于分段映射思想的图像像元灰度值的变换函数,可简单的表示成式(7)形式

$$DN'(k) = T_j(DN^i(k)) \quad (7)$$

式中, $DN^i(k)$ 表示图像第 k 个像元的灰度值, $DN'(k)$ 表示图像第 k 个像元经过灰度变换后的灰度值, T 表示灰度变换函数。 i 表示图像第 k 个像元在像元重排序后的排序值, j 表示均匀分段中的第 j 个分段。

灰度变换函数 T 的具体变换关系如式(8)所示

$$T_j(DN^i(k)) = \begin{cases} \lceil \frac{\min_{1 \leq l \leq n} DN(l) + j_1 - 1}{i_1} \rceil \\ \lceil \frac{\min_{1 \leq l \leq n} DN(l) + j_2 - 1}{i_2} \rceil \\ \lceil \frac{\min_{1 \leq l \leq n} DN(l) + j_3 - 1}{i_3} \rceil \end{cases} \quad (8)$$

式中, i 和 j 的关系为

$$[i, j] = \begin{cases} j_1 = 1, 1 \leq i_1 \leq pc + 1 \\ 1 < j_2 \leq lc, pc \times (j_2 - 1) + j_2 - 1 < i_2 \leq pc \times j_2 + j_2 \\ lc < j_3 \leq sn, pc \times (j_3 - 1) + lc < i_3 \leq pc \times j_3 + lc \end{cases} \quad (9)$$

式中, pc 表示每一个均匀分段中像元的数目, lc 表示剩余的像元数目, sn 表示均匀分段的分段数目。

1.4 灰度变换函数 T 的实现思路

灰度变换函数 T 实现的基本思路是先按均匀分段的先后顺序,将各个分段中的所有像元的灰度值分别重新赋值为 $\min_{i \in N} DN(i)$, $\min_{i \in N} DN(i) + 1$, $\min_{i \in N} DN(i) + 2, \dots, \min_{i \in N} DN(i) + sn - 1$ 。然后,根据各个分段中的每个像元在重排序过程中保存的在原始图像中的位置关系,将经过灰度变换的各个像元的灰度值映射回原始图像中。

由于在绝大多数情况下,图像中像元的总数并不一定能够恰好整除分段段数,因此分布在每一个均匀分段中的像元数目很难达到绝对相等。为了达到最佳的均衡化效果,本文中灰度变换函数 T 所采取的方法是将剩余的 lc 个像元均匀的分配到前 lc 个分段中,使前 lc 个分段中与后 $(sn - lc)$ 个分段中的像元数目各自相等,且两部分分段之间的像元数目的差值为1,从而在最大限度上保证均衡化效果趋于理想状态。

若某一分段为均匀分段中的第 j 个分段,则其像元分配的具体原则如下:

1) $1 \leq j \leq lc$

此时,经过像元重排序后,排序值满足式(10)的像元将被分配入第 j 个分段,并将其灰度值重新赋值为 $\min_{i \in N} DN(i) + j - 1$ 。通过式(10)可以容易得出此时第 j 个分段中的像元数目为 $pc + 1$ 。

$$pc \times (j - 1) + j - 1 < i \leq pc \times j + j \quad (10)$$

2) $lc < j \leq sn$

此时,经过像元重排序后,排序值满足式(11)的像元将被分配入第 j 个分段,并将其灰度值重新赋值为 $\min_{i \in N} DN(i) + j - 1$ 。通过式(11)可以容易得

出此时第 j 个分段中的像元数目为 pc 。

$$pc \times (j_3 - 1) + lc < i \leq pc \times j_3 + lc \quad (11)$$

2 图像细节及对比度的定量评价指标

为了对图像的细节和对比度进行定量评价,本文引入同时对比度的定义,并同时提出细节评价参数的定义以及基于加权几何平均数法的合成平均对比度的定义。

2.1 细节评价参数

为了对图像的细节进行定量评价,提出细节评价参数的定义,其定义为

$$DEP = \sum_{i=1}^n CN_i \quad (12)$$

式中, DEP 为细节评价参数,其数值用于定量衡量图像的细节信息。 CN_i 表示衡量目标中第 i 个灰度级对于衡量目标细节的贡献度, n 为衡量目标中所包含的灰度级级数。

由于衡量目标中的灰度级对于衡量目标细节的贡献度的大小是一个模糊的概念,因此根据灰度级对于衡量目标细节贡献度的相关特性,引入模糊数学隶属函数中的偏大型升岭形分布函数^[9-11],来数值化灰度级对于衡量目标细节的贡献度(图1)。

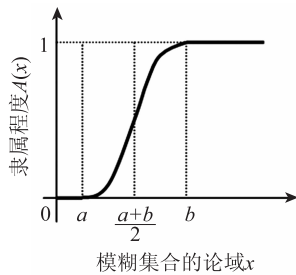


图1 升岭形分布

Fig. 1 Litres ridge distribution form

灰度级对于衡量目标细节的贡献度为

$$CN_i = \begin{cases} 0 & pn = 0 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{pc} \left[pn - \frac{pc}{2} \right] & 0 < pn < pc \\ 1 & pn \geq pc \end{cases} \quad (13)$$

式中, CN_i 表示衡量目标中第 i 个灰度级对于衡量目标细节的贡献度, pn 是指衡量目标中第 i 个灰度级所包含的像元数目。 pc 表示衡量目标中像元总

数均匀分布到各个灰度级上时,每个灰度级所包含的像元数量,即当衡量目标的信息熵达到最大值时,各个灰度级中所包含的像元数量。

阈值 pc 的确定由信息熵入手。根据引言中对于信息熵的阐述可知,图像的信息熵越大,则图像所包含的信息量也越大,图像的质量也相对越好。而理论上也已经证明,当图像的灰度均匀分布时,图像的信息熵达到最大值。

因此,当某个灰度级所包含的像元数目等于当衡量目标的信息熵达到最大值时的各个灰度级中所包含的像元数量时,该灰度级对于衡量目标细节的贡献度就已经达到最大值,即为1。即使该灰度级所包含的像元数目再增加,它对于衡量目标细节的贡献度也无法继续增加。

2.2 同时对比度

客观世界中,如果不存在对比度就不存在图像。即使一幅图像中有不同灰度的信息存在,如果没有达到人类视觉的对比度分辨率阈值,也没有可以被视觉认知的图像存在^[12-14]。关于对比度的定义存在很多不同的意见^[15],本文采用同时对比度的定义。

所谓的同时对比度是指与图像处理中的不同灰度的空间分布相关的对比度^[16]。本文采用灰度差的绝对值作为同时对比度的定义,其定义式如式(14)所示^[17]

$$C_d = \text{abs}(L_t - L_b) \quad (14)$$

式中, C_d 为同时对比度, L_t 表示图像中目标的平均灰度, L_b 表示图像中背景的平均灰度。按 Windows 的 24 位位图规范, L_t 与 L_b 的取值范围为 $[0, 255]$ 。

2.3 基于加权几何平均数法的合成平均对比度

由于同时对比度在计算时需要分别计算出图像中目标和背景的平均灰度,这就不得不涉及将目标与背景从图像中分离出来的问题。目前,解决这类问题的方法主要有图像分割和边缘检测两种。但是,对于同时对比度的计算,这两种方法的分离精度并不理想。特别是碰到复杂图像时,例如遥感影像,其分离的效果还有待商榷。

为了定量评价复杂图像的对比度,避开目标与背景分离的问题,本文在同时对比度定义的基础上提出基于加权几何平均数法的合成平均对比度的定义。该对比度先基于同时对比度的定义,分别计算 x 方向和 y 方向上的平均对比度 C_x 和 C_y , 然后利用

加权几何平均数法,将两者合成为整幅图像的对比度。其定义式如式(15)所示

$$C = \sqrt{C_x^f \times C_y^f} \quad (15)$$

式中, C 为基于加权几何平均数法的合成平均对比度,其数值用于定量衡量图像的对比度。 C_x 和 f_x 以及 C_y 和 f_y 分别为 x 方向和 y 方向上的平均对比度以及所占的权重。其中, $\sum f = f_x + f_y$ 。

权重 f_x 和 f_y 随着 2 维图像尺寸大小的改变而变动,两者最终的权重值由 2 维图像的列数和行数确定,即

$$\begin{cases} f_x = \text{测量目标的列数} = s[1] \\ f_y = \text{测量目标的行数} = s[2] \end{cases} \quad (16)$$

式中, s 是由 IDL 的内置函数 `size()` 返回的一个 1 维数组,该数组中包含了 2 维图像数组的大小和类型信息。其中, $s[1]$ 和 $s[2]$ 的数值分别表示构成 2 维图像的列数和行数。

x 方向和 y 方向上的平均对比度 C_x 和 C_y 定义为

$$\begin{cases} C_x = \frac{\sum_{y=0}^{s[2]-1} \sum_{x=0}^{s[1]-2} \text{abs}(I[x,y] - I[x+1,y])}{s[2] \times (s[1] - 1)} \\ C_y = \frac{\sum_{x=0}^{s[1]-1} \sum_{y=0}^{s[2]-2} \text{abs}(I[x,y] - I[x,y+1])}{s[1] \times (s[2] - 1)} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $I[x,y]$ 为衡量目标中像素点 (x, y) 的灰度值。

但是,由于人类视觉对于图像的对比度存在着分辨率阈值,因此并不是每一个灰度差值都会对人类的视觉系统产生影响。而如果这部分无效的灰度差值进行累加,则累加后其产生的数值将会对最终的合成平均对比度的数值产生严重影响。

为了消除无效的灰度差值对于合成平均对比度的不利影响,本文引入文献[18]中提出的人类视觉对比度分辨率阈值的数学模型,利用该数学模型计算在相应的暗视觉环境(背景平均灰度值小于 31)或者明视觉环境(背景平均灰度值大于 63)中的对比度分辨率阈值,然后以该阈值对式(17)中的 x 方向和 y 方向上的平均对比度 C_x 和 C_y 的数值进行限制,防止无效的灰度差值进行累加。

人类视觉对比度分辨率阈值的数学模型为

$$Y(X) = \begin{cases} 22.9818 \times e^{-0.0571X} & 0 \leq X \leq 47 \\ 2.1298 - 0.01376 \times X + 4.851 \times 10^{-5} X^2 & 47 \leq X \leq 255 \end{cases} \quad (18)$$

式中, X 为背景的平均灰度值; Y 为对比度分辨率阈值随背景平均灰度值 X 变化的函数。

设 $GD = \text{abs}(I[x_1, y_1] - I[x_2, y_2])$, 则式(17)中的灰度差值在对比度分辨率阈值的限制下,其取值规则为

$$GD = \begin{cases} 0 & GD < Y(X) \\ GD & GD \geq Y(X) \end{cases} \quad (19)$$

由于在计算合成平均对比度时,不区分图像中的前景目标与背景,因此在式(19)中, X 用衡量目标整体的平均灰度值来替代背景的平均灰度值。

3 结果分析

本文改进算法以及定量评价指标基于 IDL 编程实现,改进算法在与传统的直方图均衡化算法进行了大量的对比实验后结果显示,文中改进算法的图像增强效果,在图像对比度和细节方面明显优于传统的直方图均衡化算法。文中的传统直方图均衡化算法基于文献[19]中提出的思路,在 IDL 中编程实现。

在对遥感影像的均衡化效果进行对比度的定量评价时,为了避免前面 2.3 节中提到的目标与背景分离的问题,这里将采用文中提出的基于加权几何平均数法的合成平均对比度来替代同时对对比度进行遥感影像对比度的定量评价。采用 Landsat-5 的 TM 影像以及 QuickBird 影像进行对比分析,两幅影像的相关信息如表 1 所示。本文改进算法与传统算法对于 TM 影像的增强效果如图 2—图 4 所示,对于 QuickBird 影像的增强效果如图 5—图 7 所示。

表 1 两幅遥感影像的相关信息
Table 1 The information of the two remote sensing images

遥感影像	波段	影像大小	Map Info
TM 影像	1	Samples = 400 Lines = 400	Proj: GEOTIFF
	2		Pixel: 30 Meters
	3		Datum: WGS-84
QB 影像	1	Samples = 1 024 Lines = 1 024	Proj: UTM, Zone 13N
	2		Pixel: 2.8 Meters
	3		Datum: WGS-84

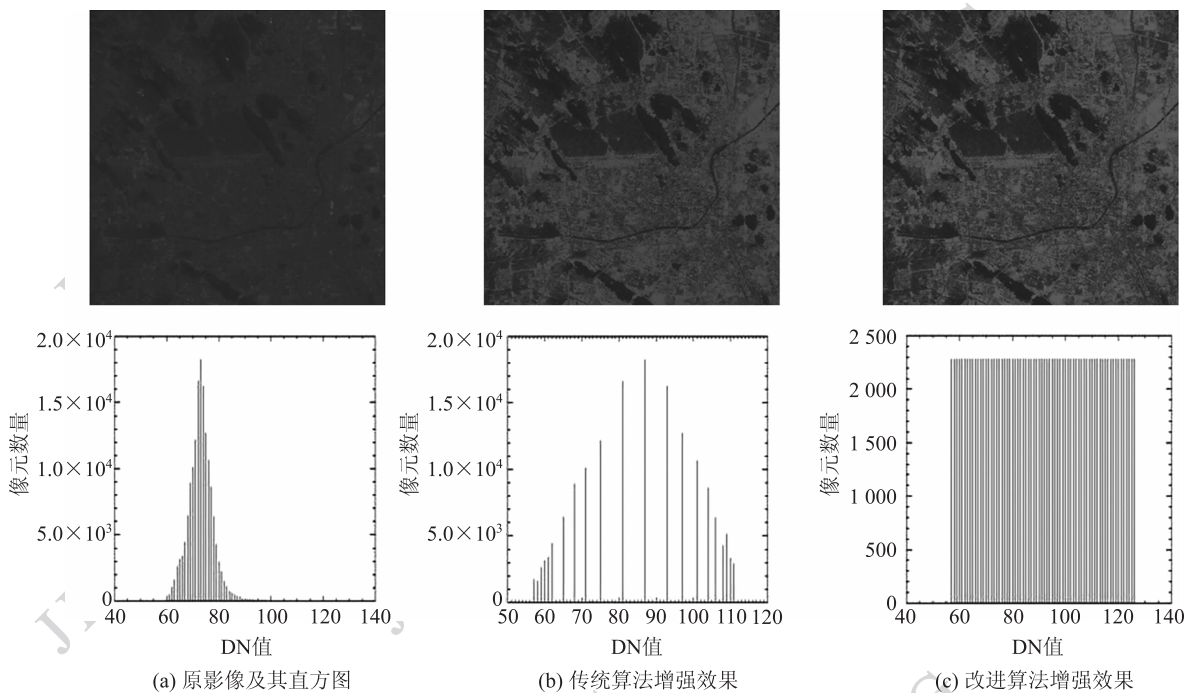


图 2 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于 TM Band1 影像的增强效果
 Fig. 2 The effect of TM Band1 image enhancement via the two different algorithms

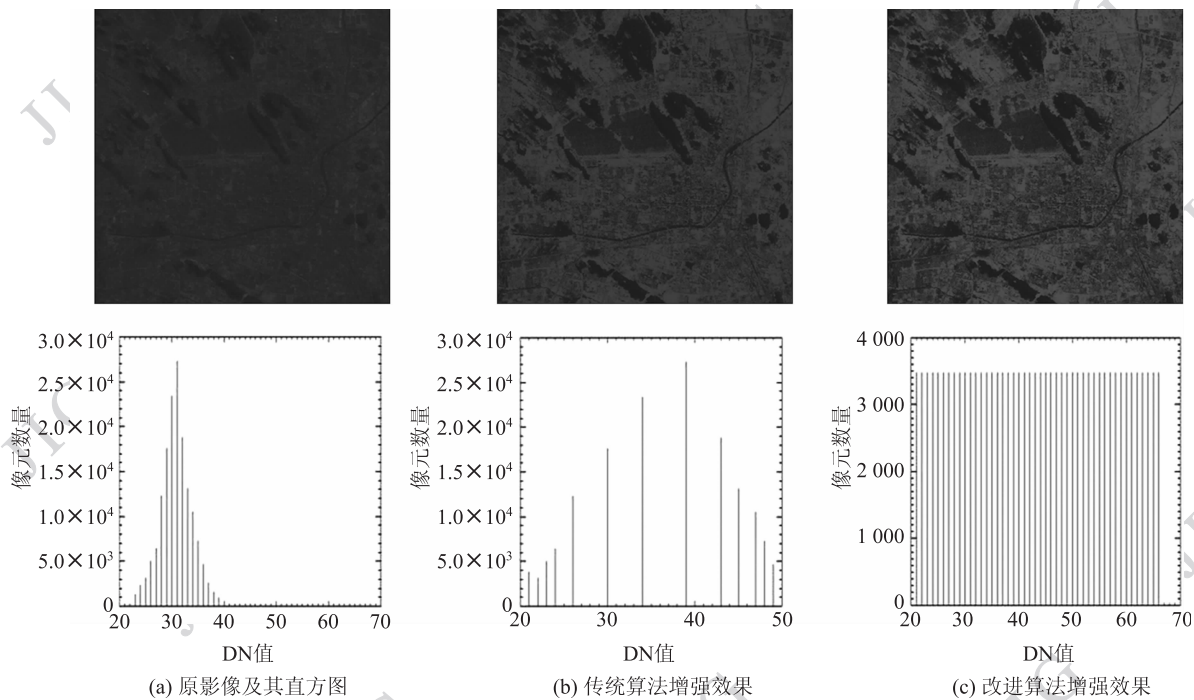


图 3 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于 TM Band2 影像的增强效果
 Fig. 3 The effect of TM Band2 image enhancement via the two different algorithms

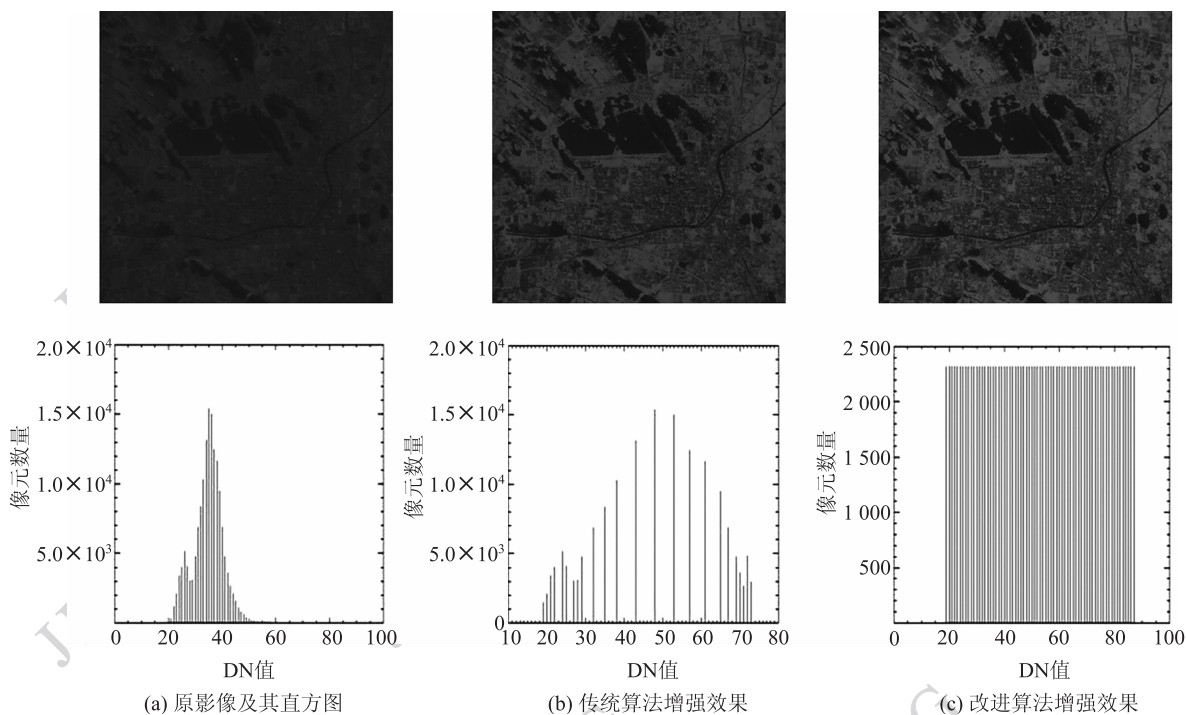


图4 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于TM Band3影像的增强效果
 Fig.4 The effect of TM Band3 image enhancement via the two different algorithms

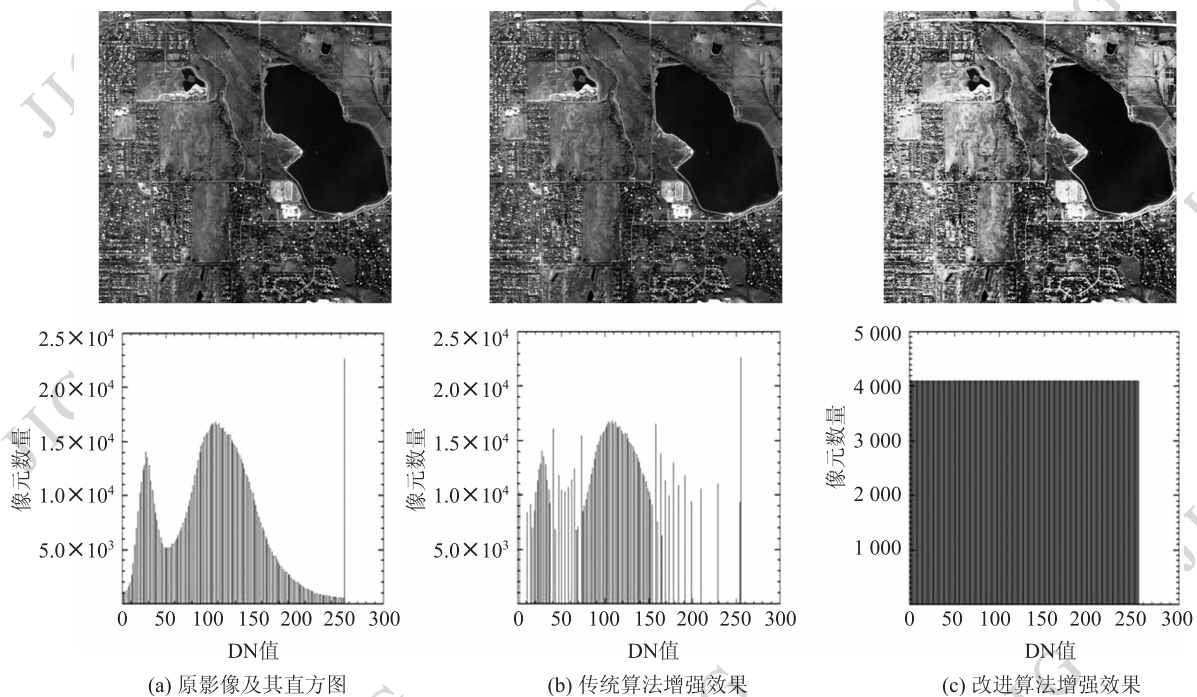


图5 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于QB Band1影像的增强效果
 Fig.5 The effect of QB Band1 image enhancement via the two different algorithms

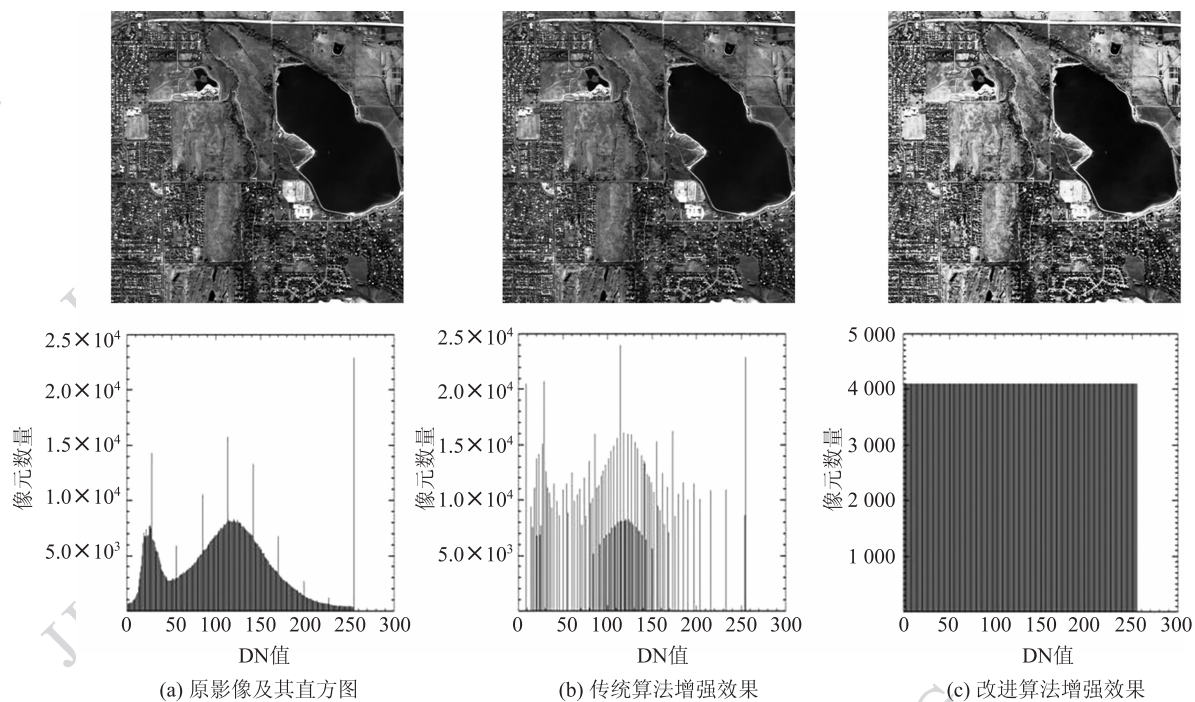


图6 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于QB Band2影像的增强效果
 Fig.6 The effect of QB Band2 image enhancement via the two different algorithms

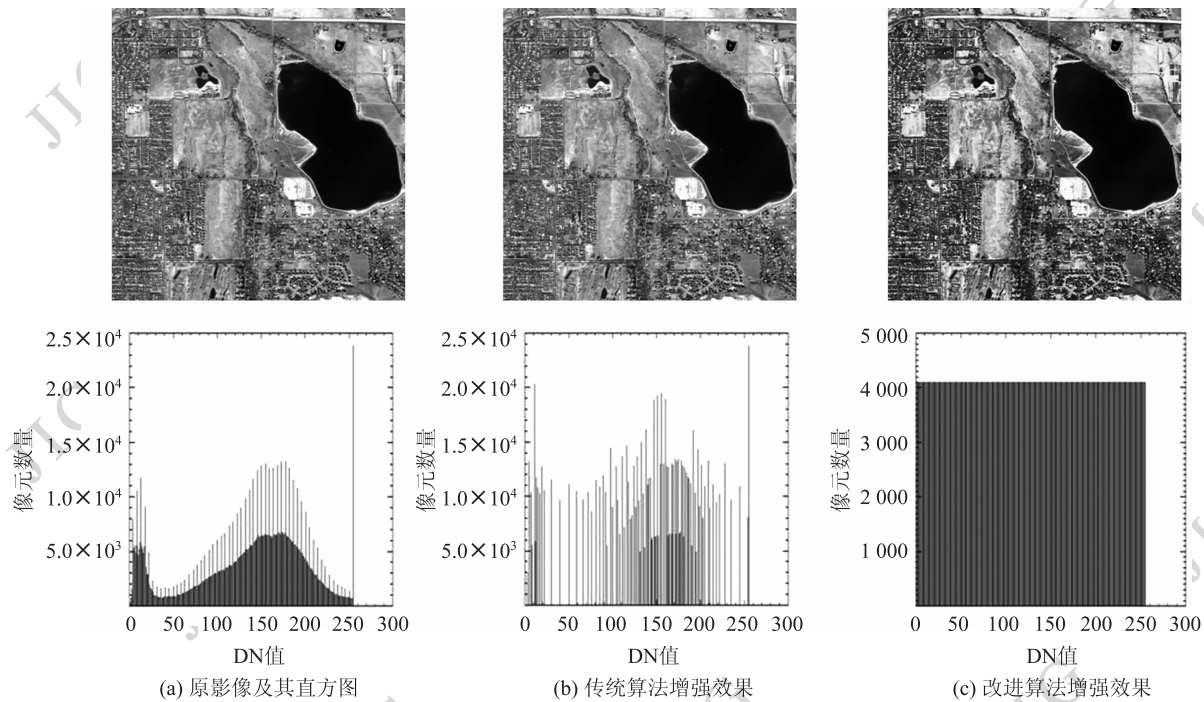


图7 改进算法与传统的直方图均衡化算法对于QB Band3影像的增强效果
 Fig.7 The effect of QB Band3 image enhancement via the two different algorithms

文中提出的改进算法,在分别处理 TM 影像以及 QB 影像时,所花费的时间如表 2 所示。

表 2 改进算法处理两幅影像各自所需的时间

Table 2 The time of improved algorithm handles the two images

遥感影像	波段	影像大小	处理时间/s
TM 影像	1	Samples = 400 Lines = 400	3
	2		3
	3		3
QB 影像	1	Samples = 1024 Lines = 1024	17
	2		17
	3		17

根据表 2 中的数据可以看出,文中改进算法在处理同一遥感影像的不同波段时,所花费的时间相同,由此可以分析得到改进算法在处理不同的遥感影像时,各个波段之间存在的差别并不会影响到算

法的运行时间,所处理的各种遥感影像会对算法的运行时间产生影响的唯一因素为影像的大小,即影像所包含的像元数目。

通过比较分析表 2 中的数据易知,影像越大,所包含的像元数目越多,算法处理影像所需的时间也就越长。当所处理的影像包含的像元数目非常巨大时,改进算法的运行时间将会十分漫长。由此可以看出,该算法目前在运行效率方面还存在缺陷,有待进一步完善。

从图 2—图 4 中可以看出,由于大多数原始的遥感影像其灰度分布集中在较窄的范围内,从而导致影像细节不够清晰,对比度较低。通过直方图均衡化增强后,根据表 3(TM 影像部分)中的数据可以看出,不论是传统算法还是改进算法,都大幅度的提升了原影像的对比度,其各自的提升幅度如表 4 所示。

表 3 原影像以及经增强后影像的定量评价指标

Table 3 The quantitative evaluation index of the original image and the enhanced image

遥感影像	波段	定量评价指标	原影像	传统算法	改进算法
TM 影像	1	合成平均对比度 C	1.739 7	7.086 6	9.227 4
		细节评价参数 DEP	21.282 1	20.198 7	70.000 0
	2	合成平均对比度 C	0.317 0	3.382 3	5.782 0
		细节评价参数 DEP	14.584 1	13.419 8	46.000 0
	3	合成平均对比度 C	1.114 9	6.539 2	8.260 7
		细节评价参数 DEP	24.373 0	23.354 2	69.000 0
QB 影像	1	合成平均对比度 C	14.387 3	14.548 1	19.771 7
		细节评价参数 DEP	107.562 0	84.000 0	256.000 0
	2	合成平均对比度 C	15.177 9	15.210 9	19.671 5
		细节评价参数 DEP	177.479 0	96.000 0	256.000 0
	3	合成平均对比度 C	12.718 0	12.654 0	16.864 3
		细节评价参数 DEP	175.962 0	96.804 6	256.000

表 4 两种不同算法对于影像对比度的提升幅度

Table 4 The enhancement range of two different algorithms

遥感影像	波段	提升幅度/%	
		公式	改进算法
TM 影像	1	$\frac{C_E - C}{C} \times 100\%$	430.401 8
	2		1723.974 8
	3		640.936 4

表 4 中, C_E 为经直方图均衡化增强后 TM 影像的合成平均对比度; C 为 TM 影像未增强前的合成平均对比度。

通过表 4 中的数据可以看出,虽然传统算法和改

进算法都提升了原影像的对比度,但是改进算法对于原影像对比度的提升幅度要明显大于传统算法,因此文中改进算法对于遥感影像的增强效果,在影像对比度方面要明显优于传统的直方图均衡化算法。

同时,通过分析表 3(TM 影像部分)中的数据以及图 2—图 4 中的直方图分布状态可以发现,传统的直方图均衡化算法在影像增强过程中由于丢失了部分灰度级信息,因此增强后的影像在细节信息方面有小幅度的下降。而文中的改进算法在将原影像的像元分布扩展到整个灰度级范围的同时,也很好的保留了原影像的灰度级信息,使影像的信息熵在增强后达到了最大值,明显的增强了影像的细节信息。

而对于高空间分辨率的遥感影像,从图5—图7以及表3(QB影像部分)中的数据可以看出,传统的直方图均衡化算法对于高空间分辨率的遥感影像已经完全失去增强效果,反而会由于丢失影像中的部分灰度级信息,而导致影像细节信息的减弱。而对于文中所提出的改进算法,通过对比分析图5—图7中影像的视觉效果以及比较表3(QB影像部分)中的数据可以看出,其对于高空间分辨率的遥感影像仍然有较明显的增强效果,但是与文中TM影像的增强效果相比较,则存在很大程度的下降,特别是在影像对比度方面,由于原始QB影像的灰度分布范围已经很广,其对比度数值已经很高,所以改进算法对其的提升非常有限。改进算法对于TM影像和QB影像的对比度以及细节信息的提升幅度如表5所示。

表5 改进算法对于影像对比度和细节信息的提升幅度

Table 5 The enhancement range of the improved algorithm

遥感影像	波段	提升幅度%		
		公式	对比度	细节信息
TM 影像	1		430.401 8	228.914 9
	2	$\frac{IC_E - C}{C} \times 100\%$	1723.974 8	215.412 0
	3		640.936 4	183.100 2
QB 影像	1		37.424 7	138.002 3
	2	$\frac{ID_E - D}{D} \times 100\%$	29.606 2	44.242 4
	3		32.601 8	45.486 0

表5中, IC_E 为经文中改进算法增强后TM影像或QB影像的合成平均对比度, C 为相应的TM影像或QB影像的原始影像的合成平均对比度, ID_E 为经文中改进算法增强后TM影像或QB影像的细节评价参数, D 为相应的TM影像或QB影像的原始影像的细节评价参数。

通过表5中的数据可以明显的看出,改进算法对于TM影像和QB影像的对比度以及细节信息虽然都有增强,但对QB影像的提升幅度远低于对TM影像的提升幅度,尤其是体现在影像的对比度方面。

另外,由于人类的视觉系统对于色彩差异的分辨能力要强于对灰度级别的分辨能力^[20],因此分别对增强前后的TM Band1、TM Band2和TM Band3 3个通道进行真彩色增强处理,并通过比较分析3幅合成的真彩色影像的视觉效果,与前面定量分析的结果进行相互印证。

TM Band1、TM Band2和TM Band3 3个通道在进行真彩色增强处理以后,其各自的实现效果如图8所示。

基于定量分析的结果,并通过与图8中3幅真彩色影像的视觉效果的相互印证,可以得出结论:改进算法对于遥感影像的增强效果,在影像对比度和细节方面都优于传统的直方图均衡化算法,特别是在影像细节信息方面,优势明显。

4 结 论

传统的直方图均衡化算法可以快速而有效的增强图像的整体对比度,但其存在的缺点是均衡化后各灰度级无法达到理想的均衡状态且容易丢失原图像中的灰度级信息。在充分分析传统的直方图均衡化算法的基础上,本文提出的理想直方图均衡化算法,实现思路清晰,易于实现,均衡化后各灰度级基本上达到理想的均衡状态,且不会丢失任何灰度级信息,同时图像的信息熵在均衡化后能够达到最大值。通过大量的对比实验,本文提出的改进算法的



(a) 增强前3波段真彩色增强处理效果

(b) 传统算法增强后3通道真彩色增强处理效果

(c) 文中算法增强后3通道真彩色增强处理效果

图8 TM1、TM2和TM3 3个通道进行真彩色增强处理后的效果图

Fig.8 The effect picture of true color enhancement processing with TM1, TM2 and TM3 channel

有效性已经得到验证,同时实验还表明,该算法在图像增强方面,特别是对于遥感影像的增强,具有一定的实用价值。

文中提出的两类定量评价指标,即基于加权几何平均数法的合成平均对比度和细节评价参数,并不是完全数学上的推导和堆砌,两类指标都是基于人类视觉系统对于图像的认知特征,因此两类指标其本身的意义明晰,定量评价的结果也更符合人类自身的视觉系统对于图像的认知。例如,在基于加权几何平均数法的合成平均对比度的定义中,同时对对比度构建 x 方向和 y 方向上的平均对比度 C_x 和 C_y ,然后利用人类视觉对比度分辨率阈值来限制 C_x 和 C_y 的数值,以此消除无效的灰度差值对于合成平均对比度的不利影响,使其最终的数值结果更符合人类的主观视觉。

参考文献(References)

- [1] Chang Q R, Jiang P A, Zhou Y, et al. Introduction of Remote Sensing Technology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 219-225. [常庆瑞, 蒋平安, 周勇, 等. 遥感技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 219-225.]
- [2] Tang G A, Zhang Y S, Liu Y M. Remote Sensing Digital Image Processing [M]. Beijing: Science Press, 2004: 124-169. [汤国安, 张友顺, 刘咏梅. 遥感数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 124-169.]
- [3] Ruan Q Q. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 178-234. [阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 178-234.]
- [4] Fan C X, Xu B X, Wu C K, et al. Tongxin Yuanli [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 6-9. [樊昌信, 徐炳祥, 吴成柯, 等. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 6-9.]
- [5] John Z M. An Information Theoretic Approach to Content Based Image Retrieval [D]. Baton Rouge: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2000.
- [6] Liao Q N. New color image encryption and decryption algorithm [J]. Computer Engineering, 2010, 36 (17): 144-146. [廖琪男. 一种新的彩色图像加密和解密算法[J]. 计算机工程, 2010, 36 (17): 144-146.]
- [7] Cao J L, Lv H B, Tan X B. Histogram modification methods without image details losing [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9 (5): 631-635. [曹聚亮, 吕海宝, 谭晓波. 可保留图像细节的直方图修正法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9 (5): 631-635.]
- [8] Zhang Y, Liu X, Li H F. Self-adaptive image histogram equalization algorithm [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41 (4): 630-633. [张懿, 刘旭, 李海峰. 自适应图像直方图均衡算法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41 (4): 630-633.]
- [9] Peng Z Z, Sun W Y. Fuzzy Mathematics and Applications [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 1-10. [彭祖贻, 孙韞玉. 模糊数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 1-10.]
- [10] Chen S Q. On fuzziness and its problem of mathematics [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1998, 12 (1): 26-33. [陈世权. 论模糊性及其数学问题[J]. 模糊系统与数学, 1998, 12 (1): 26-33.]
- [11] Jiang Z J. Fuzzy Mathematics Course [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 10-50. [蒋泽军. 模糊数学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 10-50.]
- [12] Xie Z X, Hu Q, Wang Z F, et al. A NR-IQA based on product of information entropy and contrast [C] // Proceedings of 2008 International Symposium on Information Science and Engineering. Los Alamitos, California, USA: IEEE Computer Society, 2008: 608-611.
- [13] Xie Z X, Liu Y H, Hu Q. A Method of No-reference Image Quality Assessment Based on Information Entropy and Contrast: China, CN 101345891A [P]. 2009-01-14. [谢正祥, 刘玉红, 胡琴. 基于信息熵和对比度的无参考图像质量评价方法: 中国, CN 101345891A [P]. 2009-01-14.]
- [14] Xie Z X, Wang Z F, Liu Y H, et al. A Method Acquiring the Best Image in Lower Layer Image Mining: China, CN 101419707A [P]. 2009-04-29. [谢正祥, 王志芳, 刘玉红, 等. 底层图像挖掘中获取最佳图像的方法: 中国, CN 101419707A [P]. 2009-04-29.]
- [15] Stevens S S. To honor fechner and repeal his law [J]. Science, 1961, 133 (3446): 80-86.
- [16] Xie Z X, Wang Z F, Xiong X L, et al. Color image quality assessment based on noise model of human vision perception and color image quality optimization [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15 (10): 1454-1464. [谢正祥, 王志芳, 熊兴良, 等. 基于视觉感知噪声模型的彩色图像质量评价和彩色图像质量最佳化[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15 (10): 1454-1464.]
- [17] Sanchez-Marin F J, Srinivas Y, Jabri K N, et al. Quantitative image quality analysis of a nonlinear Spatio-Temporal filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10 (2): 288-295.
- [18] Wang Z F, Liu Y H, Wang Y, et al. Measuring the contrast resolution limits of human vision based on the modern digital image processing [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2008, 25 (5): 998-1002. [王志芳, 刘玉红, 王颖, 等. 基于数字图像处理的人类视觉对比度分辨率限制测定[J]. 生物医学工程学杂志, 2008, 25 (5): 998-1002.]
- [19] Du P J. Principles and Applications of Remote Sensing [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 131-138. [杜培军. 遥感原理与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 131-138.]
- [20] Sun J B. Principles and Applications of Remote Sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 171-181. [孙家枋. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 171-181.]