

文章编号: 1001-3806(2009)03-0329-04

灰度遥感图像去云技术及其质量的分析

江兴方^{1,2}, 项少华¹, 陶纯堪²

(1. 江苏工业学院 数理学院, 常州 213164; 2. 南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

摘要: 为了尽可能地呈现灰度遥感图像的信息, 对灰图遥感图像分别用小波变换法、改进型多尺度 Retinex 算法、同态滤波法进行了图像增强处理, 分别采用亮度、对比度、亮度与对比度乘积、图像信息熵和变换后的图像与原始图像相比较的保真度等指标对增强后的图像进行分析。结果表明, 以采用多尺度 Retinex 算法增强后, 在亮度平均值附近 1 倍标准差截断、拉伸后得到的图像亮度、对比度、亮度与对比度乘积最高, 图像质量最好; 小波变换后得到的图像对比度和信息熵最高, 去云效果较好; 取参量 $n=1$ 的同态滤波法增强后得到的图像其保真度最高, 与原图像最接近, 去云效果一般; 改进型多尺度 Retinex 算法和小波变换分别对乌云和白云去除效果最佳。

关键词: 信息光学; 小波变换; 多尺度 Retinex; 同态滤波; 信息熵

中图分类号: O438 **文献标识码:** A

Analysis of quality of removing cloud for monochromatic remote sensing images

JIANG Xing-fang^{1,2}, XIANG Shao-hua¹, TAO Chun-kan²

(1. School of Mathematics and Physics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2. School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to show the best information of monochromatic remote sensing images, it was processed with the algorithms of wavelet transform, advanced multi-scale Retinex, and homomorphic filter respectively. The criterions of brightness, contrast degree, production of brightness multiplying with contrast degree, information entropy, fidelity were applied to evaluate the quality for the images enhanced by 7 methods and original images. The results showed 3 points. Firstly, the values of brightness, contrast, and production of brightness multiplying with contrast were largest and their image quality was best when the images handled by multi-scale Retinex and stretched the range of $k=1$ time standard deviation near the mean brightness. Secondly, the values of contrast and information entropy were biggest and their image quality was well when the images handled by wavelet transform with a high-pass filter. Finally, the value of fidelity was largest in all algorithms and their image quality was common when the images handled by homomorphic filter with $n=1$. The algorithms of advanced multi-scale Retinex and wavelet transform were best for removing black cloud and white cloud in remote sensing images respectively.

Key words: information optics; wavelet transform; multi-scale Retinex; homomorphic filter; information entropy

引言

图像增强的目的就是通过对某种算法增强某些信息, 抑制不需要的信息。例如在遥感图像去云技术中, 需要抑制低频成分中的云信号, 从而尽可能更多地从遥感图像中获取信息。对于灰度图像提高亮度、对比度, 实现图像增强的算法有很多, 诸如小波变换、多尺度 Retinex

算法、同态滤波法等等, 它们在图像增强中有什么特点呢? 下面将采用亮度、对比度、亮度与对比度乘积、图像的信息熵、保真度等指标来讨论几种图像增强算法所得到的图像。

1 小波变换

小波变换是时频局域化的分析方法, 巧妙地采用了非均匀的分辨率, 较好地解决了时间和频率分辨率的矛盾, 即在低频段采用高的频率分辨率和低的时间分辨率, 而在高频段则利用低的频率分辨率和高时间分辨率, 这样就能有效地从信号中提取信息。小波变换在去噪声领域得到了深入的研究, 取得了非常好的结果^[1]。小波变换用于图像增强方面同样在图像高频部分, 可以取得较好的时间分辨率, 在图像的低频部分, 可以取得

基金项目: 江苏省现代光学技术重点实验室开放基金资助项目(KJS0730)

作者简介: 江兴方(1963-), 男, 副教授, 博士, 主要从事图像增强及实时图像增强方向的研究、物理教学与多媒体教学软件开发。

E-mail: xfjiang@jpu.edu.cn

收稿日期: 2008-02-20; 收到修改稿日期: 2008-07-01

较好的频率分辨率,从而能有效地从图像信号中提取所需要的信息,特别是在1989年MATLLAT提出了小波变换的多分辨分析后,实现了信号的快速分解和重构。与此同时,从小波分析延伸出来的小波包分析是一种对信号进行更加细致的分析与重构方法,不但对低频部分进行分解,而且对高频部分作更加细致地刻画,对于信号的分析能力更强。设 $\{V_j | j \in Z\}$,构成 $L^2(R)$ 上的正交分辨率分析,其尺度函数和对应的小波函数分别是 $\varphi(t)$ 与 $\Psi(t)$,它们满足双尺度差分方程:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \sqrt{2} \sum_{n \in Z} h_n \varphi(2t - n), \Psi(t) = \\ &= \sqrt{2} \sum_{n \in Z} g_n \varphi(2t - n) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\{h_n\}$ 和 $\{g_n\}$ 满足条件 $\sum_n h_{n-2k} h_{n-2l} = \delta_{kl}$, $\sum_n h_n = \sqrt{2}$, $g_n = (-1)^n h_{1-n}$,根据正交小波的定义, $\{\varphi(t-n) | n \in Z\}$ 与 $\{\Psi(t-n) | n \in Z\}$ 构成 V_0 和 W_0 的正交基。对于固定尺度情形,定义了一系列递归函数: $H_0 = \varphi(t)$, $H_1 = \Psi(t)$, $H_{2m}(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} h_n H_m(2t - n)$, $H_{2m+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} g_n H_m(2t - n)$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots, K$,则函数序列 $\{H_m(t) | n \in Z\}$ 称为由 $H_0 = \varphi(t)$ 确定的正交小波包。设 $H_m(t)$ 经平移与伸缩变换生成函数 $H_{m,j,l} = 2^{j/2} H_m(2^j t - l)$ 。再假设 $V_j^m(x) = \text{span}\{H_{m,j,l} | l \in Z\}$,称 V_j^m 为小波包空间。

对于 $g_j^m \in V_j^m$,则 $g_j^m(x)$ 可表示为: $g_j^m(x) = \sum_l d_l^{j,m} H_{m,j,l}(x)$,根据小波包的定义,可以直接得出小波包分解和重构算法:

$$\begin{aligned} d_l^{j,2n} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{k-2l} d_k^{j+1,n}, d_l^{j,2n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{k-2l} d_k^{j+1,n}, \\ d_l^{j+1,n} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k \{h_{k-2l} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}\} \end{aligned} \quad (2)$$

2 改进型多尺度 Retinex 算法

1963-12-30, LAND 在俄亥俄州首次提出了 Retinex 的思想^[2],经过了 McCANN, RAHMAN, JOBSON, COOPER 等人^[3-6]的研究,定型为中心/包围的形式:

$$R_l(i, j) = \log I_l(i, j) - \log [F_k(i, j) * I_l(i, j)], \quad (l = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中, $l = 1, 2, 3$ 分别表示红、绿、蓝3个通道, $I_l(i, j)$ 为每个像素的亮度值, $F_k(i, j)$ 表示中心/包围函数:

$$F_k(i, j) = A \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (4)$$

对于单尺度 Retinex 来说,用较小的 σ 进行图像增强,结果突出图像的细节,用较大的 σ 进行图像增强,结果呈现出原图像的色调,因此,采用多尺度 Retinex 既

突出图像的细节,又呈现图像的色调。

JIANG 等人^[7]研究了改进型多尺度 Retinex 算法,按照文献[5]中的思想,采用图像亮度平均值附近1倍标准差截取灰度值后进行拉伸的方法,其得到的图像在亮度与对比度乘积方面明显高于以2倍、3倍标准差截取后进行拉伸的方法得到的图像,从而达到改善图像质量的目的。

3 同态滤波

利用同态滤波法进行图像增强处理是把频率过缓和灰度变换结合起来的一种处理方法,它是把图像的照明反射模型作为频域处理的基础,利用压缩亮度范围和增强对比度来改善图像质量^[8]。一幅图像 $f(x, y)$ 可以用它的照明分量 $f_i(x, y)$ 和反射分量 $f_r(x, y)$ 来表示,其中照明分量为低频部分,反射分量是高频部分,记作: $f(x, y) = f_i(x, y) f_r(x, y)$ (5) 取对数后得 $\ln f(x, y) = \ln f_i(x, y) + \ln f_r(x, y)$ 进行 Fourier 变换:

$$\mathcal{F}\{\ln f(x, y)\} = \mathcal{F}\{\ln f_i(x, y)\} + \mathcal{F}\{\ln f_r(x, y)\} \quad (6)$$

令 $z(u, v) = \mathcal{F}\{\ln f(x, y)\}$, $I(u, v) = \mathcal{F}\{\ln f_i(x, y)\}$, $R(u, v) = \mathcal{F}\{\ln f_r(x, y)\}$,则:

$$z(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (7)$$

再采用高通滤波,保留高频成分,抑制低频成分。例如在遥感图像中常常有云的影响,无法判读云区的信息,而云在遥感图像中正好属于低频成分,故采用高通滤波的方法可以在一定程度上消除遥感图像中云的影响。

理想的高通滤波器为:

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & (D(u, v) \leq D_0) \\ 1, & (D(u, v) > D_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $H(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$,截止频率 D_0 的 n 阶 Butterworth 高通滤波器的传递函数为:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u, v)}\right]^{2n}} \quad (9)$$

改进型的高通滤波器为:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1) \left[\frac{D_0}{D(u, v)}\right]^{2n}} \quad (10)$$

则高通滤波表示为:

$$S(u, v) = H(u, v) z(u, v) = H(u, v) I(u, v) + H(u, v) R(u, v) \quad (11)$$

逆变换为:

$$s(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{S(u, v)\} = \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) I(u, v)\} + \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) R(u, v)\} = I + R \quad (12)$$

经过同态滤波后的图像为:

$$\hat{f}(x,y) = e^{s(x,y)} = e^{I+R} = f_I(x,y)f_R(x,y) \quad (13)$$

4 结果分析

文献[5]中给出了图像的亮度与对比度乘积来判断图像质量的方法,对于 $M \times N$ 的图像 $g(i,j)$, $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$, 由亮度(简称为 b)和对比度的定义:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M g(i,j)}{M \times N}, C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [g(i,j) - b]^2}{M \times N}} \quad (14)$$

图像信息熵的表示式为^[9]:

$$E = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \quad (15)$$

增强后的图像与原始图像的差异可用保真度来衡量,保真度大则失真小。设原始图像为 $g(i,j)$, 增强后的图像为 $\hat{g}(i,j)$, 则保真度定义为:

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - \hat{g}(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2} \quad (16)$$

实验中以7幅图像分别进行高通滤波的小波变换实现图像增强^[10], 采用多尺度 Retinex 增强后在亮度平均值附近 k 为 1, 2, 3 倍标准差进行截断后拉伸, 采用 n 为 1, 2, 3 的同态滤波进行图像增强。图1中只列出了2幅原始图像、小波变换、多尺度 Retinex ($k = 1$)、同态滤波 ($n = 1$) 增强后的图像。

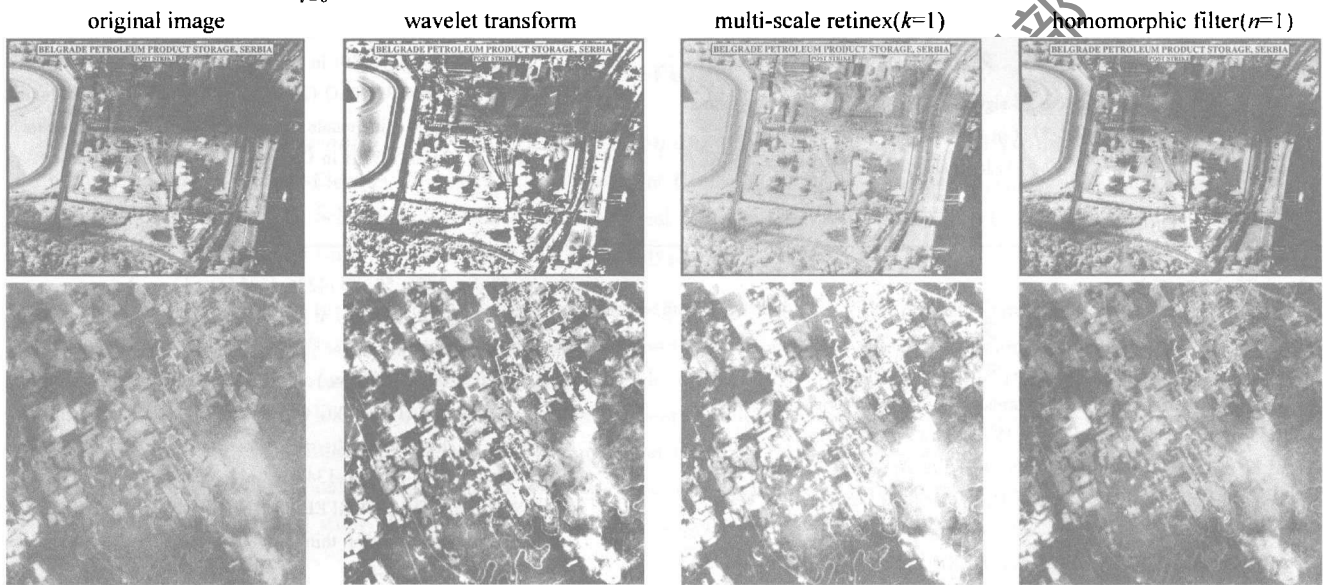


Fig. 1 Comparing of images handled by wavelet, multi-scale Retinex, and homomorphic filter

实验中选择的7个图像是灰度图像, 故在研究小波变换、多尺度 Retinex ($k = 1$)、多尺度 Retinex ($k = 2$)、多尺度 Retinex ($k = 3$)、同态滤波 ($n = 1$)、同态滤

波 ($n = 2$)、同态滤波 ($n = 3$) 等7种增强算法之后, 进一步研究了所得图像在直方图均衡化后的情况, 计算结果在表1中列出。

Table 1 Comparing of mean vaules in brightness, contrast, production of brightness × contrast, information entropy, fidelity for 7 methods

	brightness		contrast		production		entropy		fidelity	
	normal	equalization	normal	equalization	normal	equalization	normal	equalization	normal	equalization
original image	128.8	127.5	43.53	74.61	4260	7400	7.201	7.937		
wavelet	126.8	127.9	78.37*	74.47	7702	7411	7.739*	7.937	0.8645	0.9291
Retinex ($k = 1$)	171.2*	128.0*	58.47	75.59*	7795*	7526*	7.227	7.844	0.8395	0.9771
Retinex ($k = 2$)	150.6	127.5	38.10	74.61	4497	7401	6.339	7.999*	0.9247	0.9793
Retinex ($k = 3$)	143.1	127.5	33.30	74.62	3711	7403	6.856	7.940	0.9386	0.9787
high pass filter ($n = 1$)	128.6	127.5	53.49	74.58	5322	7396	7.523	7.954	0.9829*	0.9934*
high pass filter ($n = 2$)	122.8	127.5	41.23	74.59	3935	7396	7.319	7.948	0.9644	0.9420
high pass filter ($n = 3$)	110.8	127.5	36.06	74.6	3116	7398	7.131	7.940	0.9120	0.8589

表1中列出了原始图像与7幅图像增强后及其均衡化后得到图像平均的亮度、对比度、亮度与对比度乘

积、信息熵、保真度之间的比较, 表中“*”表示同一比较项目中取值最大的一种算法。

5 结论

从图像增强的角度来看,带有高通滤波的小波变换算法增强后得到的图像,其对比度与信息熵取得最大,去云效果较好;采用多尺度 Retinex 算法增强后在亮度平均值附近以 $k=1$ 倍标准差进行截断再拉伸得到的图像,其亮度、亮度与对比度的乘积,以及均衡化后的图像其亮度、对比度、亮度与对比度乘积都是最大,图像质量最佳;采用多尺度 Retinex 增强后在亮度平均值附近 $k=2$ 倍标准差进行截断后拉伸得到的图像均衡化后,信息熵最大;同态滤波法 ($n=1$) 增强后得到的图像其保真度最大,与原图像最接近,去云效果一般。由此进一步得到,改进型多尺度 Retinex 算法去除乌云效果最佳,小波变换算法去除白云效果最好。

参考文献

- [1] MALLAT S. A wavelet tour of signal processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 322-372 (in Chinese).
- [2] McCANN J J. Retinex at 40 [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 6-7.
- [3] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODSELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- [4] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODSELL G A, et al. Impact of multi-scale Retinex computation on performance of segmentation algorithms [J]. SPIE, 2004, 5438: 171-182.
- [5] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODSELL G A. The statistics of visual representation [J]. SPIE, 2002, 4736: 25-35.
- [6] COOPER T J, BAQAI F A. Analysis and extensions of the Frankle-McCaan Retinex algorithm [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 85-92.
- [7] JIANG X F, TAO Ch K. Physical idea of the Retinex theory in color image enhancement and the influence of image quality in different intercepted region of image intensity [J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 127-129 (in Chinese).
- [8] RUAN Q Q. Processing of digital image [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 234-274 (in Chinese).
- [9] TAO Ch K, TAO Ch K. The theory of optical information [M]. Beijing: Science Press, 2004: 20 (in Chinese).
- [10] JIANG X F, PAN G W, TAO Ch K. A method based on spline curve for eliminating cloud in remote sensing image [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 581-583 (in Chinese).

(上接第 309 页)

参考文献

- [1] LENGFELLNER H, KREMB G, SCHNELLBÖGL A, et al. Giant voltage upon surface heating in normal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films suggesting an atomic thermopile [J]. A P L, 1992, 60(4): 501-503.
- [2] LENGFELLNER H, ZEUNER S, PREITTL W, et al. Thermoelectric effect in normal-state $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films [J]. Europhysics Letters, 1994, 25(5): 375-378.
- [3] ZAHNER T H, SCHREINER R, STIERSTORFER R, et al. Off-diagonal seebeck effect and anisotropic thermopower in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ thin films [J]. Europhysics Letters, 1997, 40(6): 673-678.
- [4] ZHANG P X, LEE W K, ZHANG G Y. Time dependence of laser-induced thermoelectric voltages in $\text{La}_{1-x}\text{Mn}_x\text{MnO}_3$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films [J]. A P L, 2002, 81(21): 4026-4028.
- [5] ZEUNER S, LENGFELLNER H, PREITTL W. Thermal boundary resistance and diffusivity for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films [J]. Phys Rev, 1995, B51(17): 11903-11908.
- [6] LI X H, HABERMEIER H U, ZHANG P X. Laser-induced off-diagonal thermoelectric voltage in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ thin films [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 211(1/3): 232-237.
- [7] TAN S L, ZHANG H, CUI W D, et al. Laser-induced thermoelectric voltage effect in $\text{La}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{MnO}_3$ thin films doped with Ag [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4226-4231 (in Chinese).
- [8] ZHANG P X, WEN X M, GU M M, et al. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film room-temperature laser power meter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29(3): 205-208 (in Chinese).
- [9] CUI W D, ZHANG H, ZHANG G Y, et al. Laser-induced thermoelectric voltage of atomic layer thermopile materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 130-134 (in Chinese).
- [10] ZAHNER T H, STIERSTORFER R, RERNDL S R, et al. Picosecond thermoelectric response of thin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films [J]. Physica, 1999, C313(1/2): 37-40.
- [11] KWOK H S, ZHENG J P, YING Q Y, et al. Nonthermal optical response of Y-Ba-Cu-O thin films [J]. A P L, 1989, 54(24): 2473-2475.
- [12] FRENKEL A, SAIPI M A, VENKATESAN T, et al. Optical response of nongranular high- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting thin films [J]. J A P, 1990, 67(6): 3054-3068.
- [13] CARR G L, QUIJADA M, TANNER D B, et al. Fast bolometric response by high T_c detectors measured with subnanosecond synchrotron radiation [J]. A P L, 1990, 57(25): 2725-2727.
- [14] HAGEN S J, WANG Z Z, ONG N P, et al. Anisotropy of the thermal conductivity of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ [J]. Phys Rev, 1989, B40(13): 9389-9392.