

改进的 MTF 遥感影像复原算法研究

柴雅琼^{①·②}, 冯钟葵^②, 齐东楷^{①·②}, 郭擎^②

(^① 中国科学院研究生院, 北京 100049; ^② 中国科学院, 对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘要: 基于传统的图像复原算法——逆滤波, 提出了改进的 MTFC 遥感图像复原算法。通过对比分析图像不同频点的补偿函数曲线以及不同补偿因子的复原效果, 优化了 MTFC 算法, 在提高图像质量的同时较好地抑制了噪声。同时, 采用不同的卫星遥感图像验证了算法的适用性, 体现了其应用价值。

关键词: MTFC; 遥感图像复原; 算法;

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.016

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)119-0078-06

An Improved MTFC Restoration Algorithm for Remote Sensing Image

CHAI Ya-qiong^{①·②}, FENG Zhong-kui^②, QI Dong-kai^{①·②}, GUO Qing^②

(^① Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

^② Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract: This paper proposes an improved MTF restoration algorithm for remote sensing image based on inverse filtering, a traditional image restoration method. The improved algorithm is accomplished by optimizing the compensating curve shape at different frequency and the compensating factor. The quality of resultant image is better than before and the quantitative results are satisfying. Moreover, the optimal algorithm is adaptive to various remote sensing images and it overcomes the limited adaptability of former work.

Key words: MTFC; remote sensing image restoration; algorithm

1 引言

在遥感卫星地面数据处理中, 图像复原是图像数据处理的重要内容, 对于提高遥感图像质量有重要作用^[1]。图像复原是指去除或减轻图像在获取过程中发生的像质退化, 这些退化包括由光学系统^[2]、探测器^[3]、电路和运动^[4]等造成的图像模糊, 以及源自电路和光度学因素的噪声^[5]。图像复原是对退化的图像进行处理, 使它恢复或趋向于没有退化的理想图像^[6]。已有的遥感图像复原算法中, 如凸集投影法, 广义交叉验证法等, 在处理图像的同时, 又不可避免地引入新的噪声, 因此如何将复原后图像的

信噪比控制在可接受的范围内, 是遥感图像复原的一大挑战^[7~8]。

MTF (Modulation Transfer Function) 是系统幅频特性的表征, MTF 值越高, 通过成像系统的景物在辐射空间的高频成分越丰富, 图像的清晰度也就越高。MTFC (MTF Compensation) 即 MTF 补偿, 是对成像系统的 MTF 进行提升, 作用在 MTF 值较低的图像上^[9], 以达到 MTF 值较高的应用效果。

以往, 采用 MTFC 来复原遥感图像的工作, 多是从传感器、大气、以及传感器与大气的相对运动等方面分别或综合考虑^[10~12], 由于 MTF 补偿处理将

收稿日期: 2011-02-28 修订日期: 2011-05-06

作者简介: 柴雅琼(1986~), 硕士, 研究方向: 遥感地面系统与技术。

E-mail: yqchai@ceode.ac.cn

通讯作者: 冯钟葵, 研究员, 硕导。

E-mail: zkf@ceode.ac.cn

— 78 —

引入新的高频噪声,而且 MTF 补偿的越高,引入的噪声越大,从而降低了图像的整体质量^[13]和图像的动态范围^[14~15],因此,期望得到较高的 MTF 和新引入的噪声,也是 MTFC 算法复原遥感图像的一对矛盾。本文拟寻求 MTFC 的优化处理,用以平衡这一矛盾,既能提高图像清晰度,同时又能有效控制噪声,并弥补之前 MTFC 方法适用性比较单一的不足。

逆滤波是典型的图像复原算法^[16],本文在逆滤波的基础上,提出了改进的 MTFC 算法,在已知凸曲线补偿效果较好的情况下,对图像的归一化频率曲线在不同频率点对补偿曲线、以及补偿因子进行优化,分析对比它们的补偿结果;同时,采用不同的卫星遥感图像进行算法的验证。

2 MTFC 算法原理

从成像过程来看,图像复原是针对引起图像退化的原因,建立退化模型,并根据模型得到退化前的图像。采用 MTFC 复原遥感图像,是在频域下对退化模型进行补偿,得到近似的退化前的图像。假定成像系统为线性移不变系统,且噪声是加性的,在统一的线性代数范畴内,成像系统可以用一个简单的通用图像退化模型来表示,如图 1 所示:

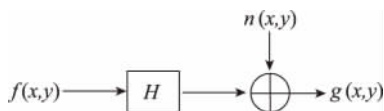


图 1 退化模型

在这个模型中,一个作用在输入图像 $f(x,y)$ 上的系统 H 与加性噪声 $n(x,y)$ 的联合作用导致产生退化图像 $g(x,y)$ 。根据这个模型恢复图像,即在给定 $g(x,y)$ 和 H 的基础上得到对 $f(x,y)$ 的某个近似的过程(这里假设已知 $n(x,y)$ 的统计特性)。

根据最小二乘原理,采用被 H 模糊的图像与观测到的图像 $g(x,y)$ 之间的差在均方意义最小的准则下来估计结果。在频域下, $G(u,v)$ 、 $F(u,v)$ 分别是 $g(x,y)$ 、 $f(x,y)$ 的傅立叶变换,将 $H(u,v)$ 看作一个滤波函数,则它与 $F(u,v)$ 的乘积是退化图像 $g(x,y)$ 的傅里叶变换,而用 $H(u,v)$ 去除 $G(u,v)$ 就是一个逆滤波过程。将 $\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)}$ 的结果求傅里叶反变换就得到恢复后的图像:

$$\hat{f}(x,y) = F^{-1}[\hat{F}(u,v)] = F^{-1}\left[\frac{G(u,v)}{H(u,v)}\right]$$

实际上, $H(u,v)$ 随频率增长而很快衰减,甚至

在低频段就有了很大的衰减,而噪声则多在高频范围,衰减速度比较慢。为避免 $H(u,v)$ 值太小,导致结果出现不定值,因此逆滤波复原常局限于中低频区域进行,且适用于信噪比较高的情况。

从逆滤波出发,把系统函数 $H(u,v)$ 看作复数,可以表示为 $H = |H| \cdot e^{i\varphi}$,其中 $|H|$ 是幅值, φ 为相位。若对幅值作归一化,使得零频率的幅值为 1,则称此归一化的幅值为调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)。将 $H(u,v)$ 替换为 $k \cdot MTF(u,v)$,重写上式为:

$$\hat{f}(x,y) = F^{-1}\left[\frac{1}{k \cdot MTF(u,v)}G(u,v)\right]$$

为了达到提升 MTF 的效果,对上式进行修改为:

$$\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)} = \left[\frac{1}{\gamma'(u,v)k \cdot MTF(u,v)}\right]G(u,v)$$

其中, $\gamma'(u,v)$ 是实现在频域下对不同频率段的补偿,从而有针对性地提升 MTF。

再令:

$$\gamma(u,v) = \frac{1}{\gamma'(u,v)k \cdot MTF(u,v)}$$

可将 $\hat{F}(u,v)$ 简化为 $\hat{F}(u,v) = \gamma(u,v)G(u,v)$ 。为达到进一步提升 MTF 的目的,理论上 $\gamma(u,v)$ 应恒大于 1,但为了适应不同遥感图像的 MTFC 复原,需对 $\gamma(u,v)$ 进行不同程度地衰减或放大^[11],方法之一是使用指数方式,即: $\hat{F}(u,v) = G(u,v)[\gamma(u,v)]^\alpha$,其中 α 为补偿因子,恒大于等于 0,此时 MTFC 补偿函数为:

$$MTFC(u,v) = [\gamma(u,v)]^\alpha = \left[\frac{1}{\gamma'(u,v)k \cdot MTF(u,v)}\right]^\alpha$$

3 MTFC 优化算法

从前文看到,通过调整 γ' 及 α 可以实现对 MTF 的补偿,本文提出的 MTFC 算法的优化,可以分为两步进行:选择重点频段对 γ' 进行补偿和运用不同的补偿因子进行优化。

在文献^[14]中已知, γ' 选用凸曲线比凹曲线或直线对图像的补偿效果更好。因此,本文根据补偿的频段的不同,在图像的归一化频率曲线上,低频补偿峰值定在 1/3 频点处,中频补偿峰值在 1/2 处,高频补偿峰值在 2/3 处,同时补偿曲线的一阶导数在补偿达到峰值处为 0;为了不至于对原图像过补偿,本文将补偿后的峰值设为 1.55;另外,考虑到高频噪声,在截止频率处,补偿后峰值为 1.11;设零频率处补偿后

值为 1。本文用三次多项式表示补偿曲线 γ' ，根据以上 4 个约束条件，可求解 $\gamma' = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 方程，得到在低、中、高频的 γ' 归一化凸曲线如下：

$$\begin{aligned} \gamma_1' &= 5.2948x^3 - 9.288x^2 + 4.1432x + 1 \\ \gamma_2' &= 1.3709x^3 - 3.789x^2 + 2.5381x + 1 \\ \gamma_3' &= -0.7325x^3 - 0.8492x^2 + 1.7317x + 1 \end{aligned}$$

其中， γ_1' 、 γ_2' 、 γ_3' 分别为重点补偿低频、中频、

高频的信息，而适当补偿其他频率的信息。对 MTF 的补偿运算均在频域下进行，输入 x 是归一化频率曲线的频率， γ_1' 、 γ_2' 、 γ_3' 是补偿曲线的幅值。归一化频率曲线的截止频率是 1，因此 γ_1' 、 γ_2' 和 γ_3' 的补偿峰值分别为 1/3, 1/2 和 2/3，改进后的 γ' 归一化频率曲线用图 2 表示。对补偿结果进行傅里叶反变换，即得到复原后的图像。

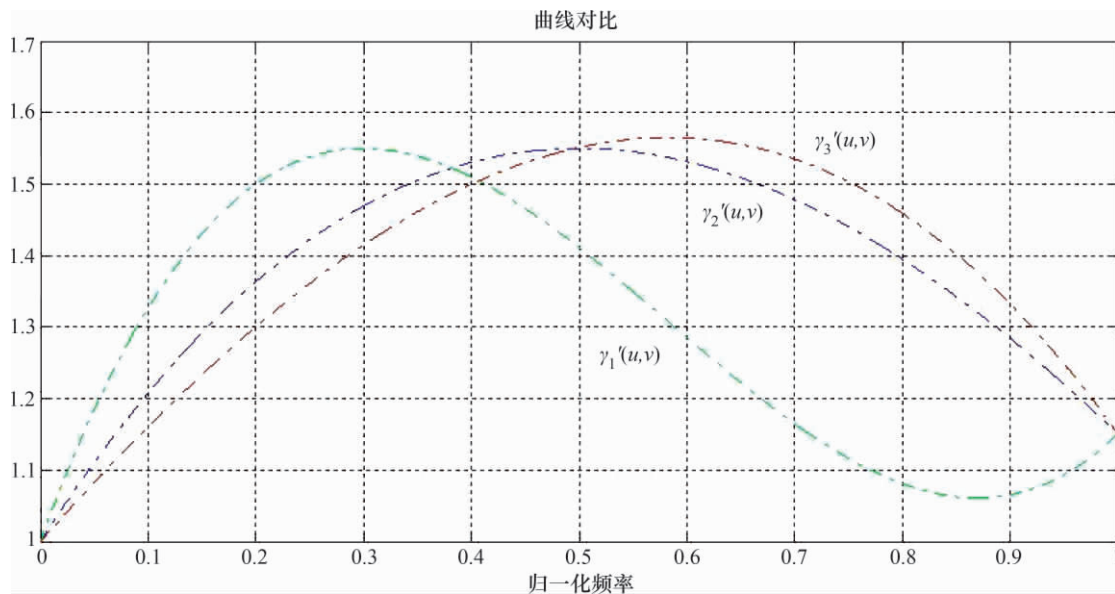


图 2 γ' 归一化频率曲线

MTFC 在提高图像清晰度的同时，也会不同程度地引入噪声，补偿因子 α 可以进一步优化补偿效果，在图像清晰度和噪声之间寻求平衡。在前文第 2 章中已提到，补偿因子 α 应恒大于等于零，本文分别以 1.5、1 和 0.5 为补偿因子进行实验，并在下一章给出实验结果和分析讨论。

以上的 MTFC 优化算法相对简单，并且可以通过对 γ' 和补偿因子 α 的调整，平衡期望更高的 MTF 和 MTFC 新引入噪声对图像的影响。 $[\gamma(u, v)]^\alpha$ 的取值与图像的噪声水平有关：与噪声相比，信号随着频率升高，下降较快，高频部分主要是噪声，因此对 $\gamma'(u, v)$ 应重点补偿中频部分，适当补偿高频信息。

4 结果分析与方法的应用

对于遥感图像复原而言，由主观与客观两种评价方式评估复原效果。主观评价方式即是由人眼对复原后图像和原图像进行比对；客观评价方式通常用描述图像特征的参数评价图像，比如信噪比，熵等参数^[17]。在遥感图像复原的工作中，大多数结合客观评价方式和部分描述图像特征的参数来评价图像复原的效果^[7~9, 12~14]。本文给出复原前后图像的同

时，为了更客观地反映图像复原的效果，对复原前后图像的相关评价指标也进行了计算。

4.1 MTFC 曲线形状优化结果

本文首先以法国 SPOT4 遥感图像为例，对补偿曲线进行优化设计，对图像分别在低、中和高频作重点补偿，结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出，中频补偿后图像的标准差减小最多，而熵和均方梯度则增加最多，信噪比最大。因此，结合滤波的优缺点，本文选用中频补偿，即较大程度地补偿中频信息，适当补偿高频信息。

表 1 不同频率 MTFC 的补偿对比

补偿范围 参数值	原图	不同频段补偿后结果		
		低频 γ_1'	中频 γ_2'	高频 γ_3'
平均灰度	135.27	123.81	122.01	120.67
标准差	108.92	103.88	100.83	105.23
标准差增加百分比	0.00%	-4.63%	-7.43%	-3.39%
信噪比	1.00	0.95	0.97	0.97
熵	6.67	6.97	7.21	6.91
熵增加百分比	0.00%	4.50%	8.10%	3.60%
均方梯度	59.63	62.6	65.06	64.63
增加百分比	0.00%	4.98%	9.11%	8.39%

4.2 MTFC 补偿因子优化结果

补偿结果见表 2 和图 3, 其中, 图 3(a)、(b) 和 (e) 补偿因子分别为 1.5、1 和 0.5 的结果, 图 3(c)、(d) 和 (g) 是图 3(a)、(b) 和 (e) 放大 1 倍后的图像。从表 2 和图 3 可以看出, 补偿因子越大, 噪声也越大, 由图 3 处理后图像与原图(图 3(f)与图 3(h))的

对比可以看出, 过补偿的图像由于引入了更多的噪声, 补偿结果几乎比原图像退化程度更大。

由表 2 看到, 补偿因子为 0.5 时, 信噪比相对其他补偿因子的补偿结果最大, 熵的增加和均方梯度的增加相对最大, 能达到补偿效果和控制噪声的折中, 因此本文选择补偿因子 α 为 0.5。

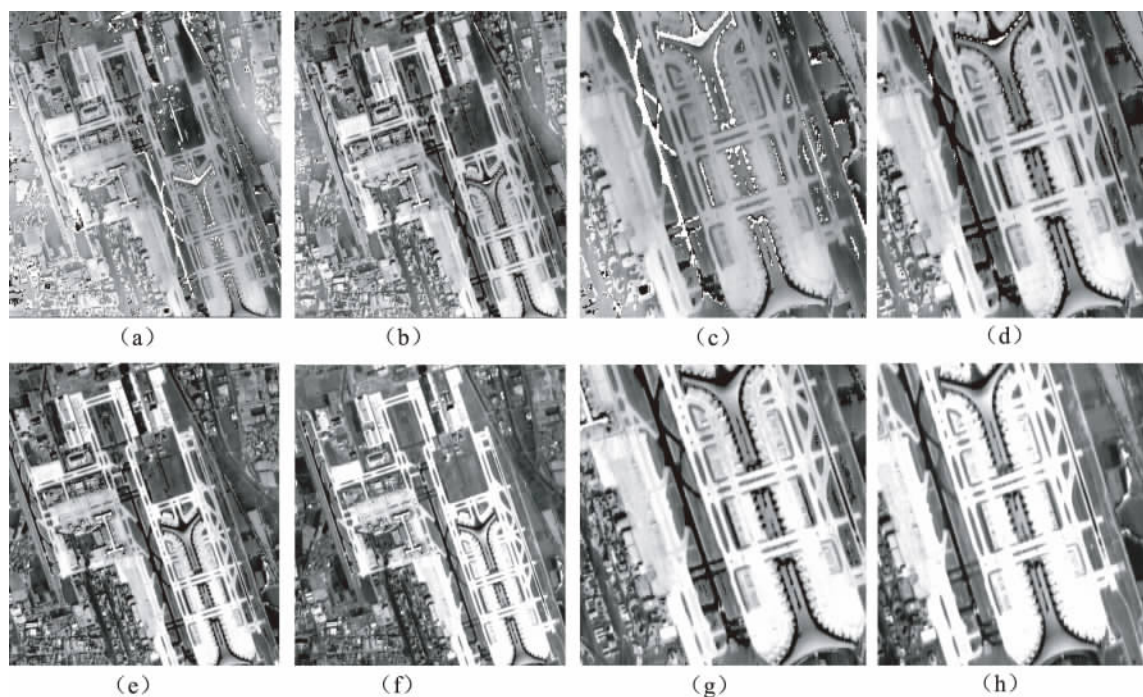


图 3 不同补偿因子结果对比

表 2 不同补偿因子 MTFC 的补偿对比

参数值	α	原图	不同补偿因子补偿后结果		
			0.5	1	1.5
平均灰度		135.27	122.01	95.98	96.79
标准差		108.92	100.83	90.74	72.37
标准差增加百分比		0.00%	-7.43%	-16.69%	-33.56%
信噪比		1.00	0.96	0.83	0.66
熵		6.67	7.21	7.37	7.52
熵增加百分比		0.00%	8.10%	10.50%	12.74%
均方梯度		59.63	65.06	53.21	42.85
梯度增加百分比		0.00%	9.11%	-10.77%	-28.14%

图 3(e) 和 3(g) 分别显示了补偿因子为 0.5 的中频补偿后图像与放大一倍后图像, 图 3(f) 和 3(h) 分别显示了原图以及其放大一倍后图像。从处理后的图像中能看到更多的细节信息: 原图像过亮的部分处理后能看到机场的主跑道, 这与表 2 中图像的

熵增大是一致的, 表示图像包含的信息量增多; 处理后图像的房屋和道路的分界更明显, 边界处更清晰, 这与表 2 中图像的均方梯度变大是一致的, 表示图像的边沿清晰度提高了。

和其他应用 SPOT 图像进行遥感图像复原的工作相比, 尽管评价指标不尽相同, 但从复原后的图像增加的图像细节来看, 本文的方法增加了中频的信息量, 提高了图像质量, 并在一定程度上抑制了高频噪声^[18-19]。

图 4 是原图与经过中频补偿、补偿因子为 0.5 处理后图像的直方图对比, 从处理后的直方图来看, 图像灰度分布更均匀, 像素累积峰值有所减小, 这与图像的均方差减小是一致的。在直方图中, 中频部分有第二个尖峰, 符合中频补偿理论上的预期结果。从直方图最右侧的峰值坐标来看, 原本集中在最大值 (255) 的像素累计减少近三分之一, 灰度值为 150~200 的像素累计值增多, 说明 MTFC 在抑制了高频噪声的同时, 补偿了中频信息。

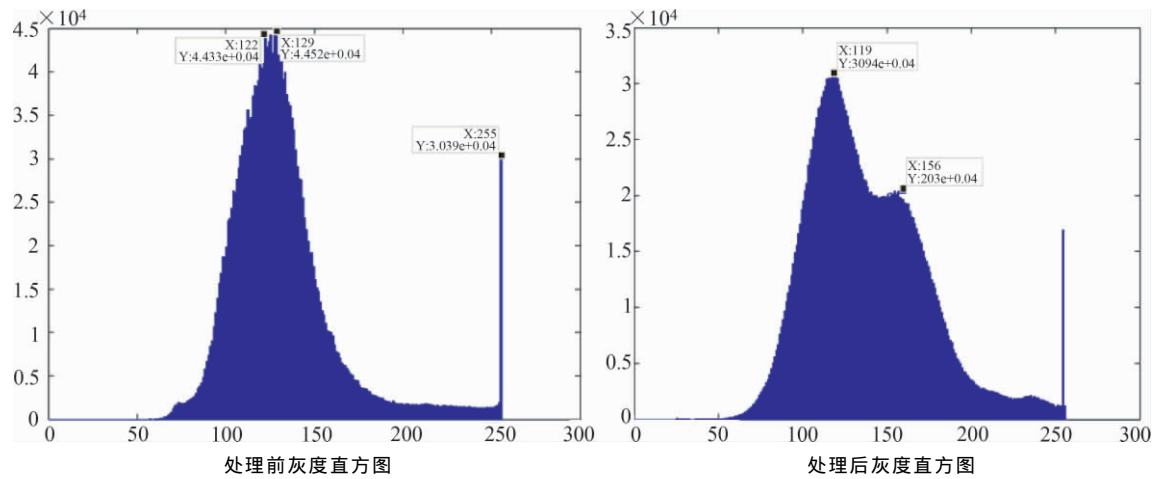


图 4 处理前后灰度直方图对比

4.3 适用性讨论

为了验证本文提出的改进 MTFC 算法的适应性,本文还对 Landsat-5 卫星的 TM 图像、IRS 卫星的 LISS4 图像运用了同样的算法进行处理,处理结果分

别如图 5 和图 6 所示。其中,图 5(a)和图 5(b)、以及图 6(a)和图 6(b)分别是原始图像和处理后图像,图 5(c)和图 5(d)、以及图 6(c)和图 6(d)分别是图 5(a)、图 5(b)和图 6(a)、图 6(b)放大的结果。

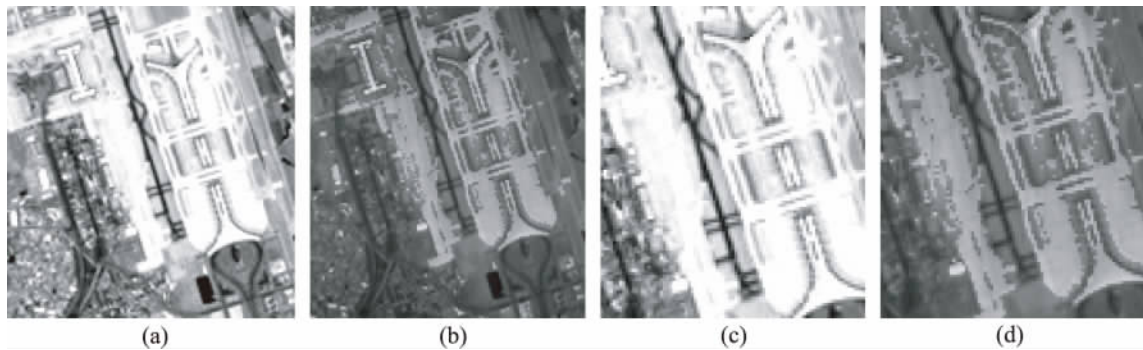


图 5 Landsat 卫星 TM 图像 MTFC 前后对比

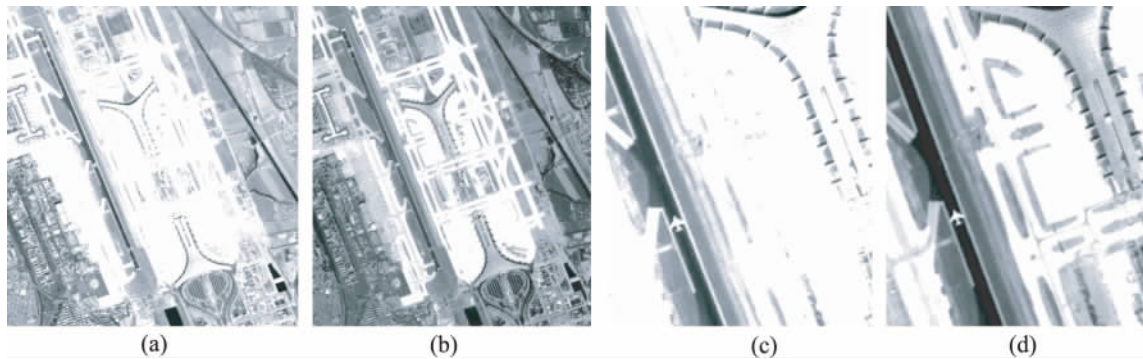


图 6 IRS 卫星 LISS 图像 MTFC 前后对比

从图 5 和图 6 可以看出,采用本文提出的改进 MTFC 算法复原后,图像的清晰度得到了明显提高,处理效果很显著,因此,本文的算法对遥感图像的复原效果,具有很好的适应性和应用价值。

5 结束语

本文采用重点补偿图像中频信息、优化补偿因子的改进 MTFC 算法,对遥感图像进行了 MTFC

补偿处理,在提高图像清晰度的同时也能较好地抑制噪声。对 SPOT4 图像、Landsat-TM 图像和 IRS-P6 的处理结果说明,本文算法对不同的遥感图像有较好的适用性。

下一步工作可考虑根据图像的 MTF 以及图像信息的主要频段来决定 MTFC 补偿曲线,实现对重点补偿的频段的自适应处理。

参考文献

- [1] 陈世平. 航天遥感科学技术的发展[J]. 航天器工程, 2009(3).
- [2] 王彪, 姜志国, 赵丹培. 遥感图像运动模糊恢复方法及评价标准研究[J]. 航天返回与遥感, 2009(3).
- [3] 陈奋, 赵志明. 遥感影像反卷积复原处理[J]. 数据采集与处理, 2008(3).
- [4] 厉银喜, 潘晖, 冯钟葵. 阻尼器磨损对 TM 图像质量的影响及解决方案[J]. 遥感信息, 2000(2).
- [5] Banham, M. R., Katsaggelos, A. K. . Digital image restoration[J]. IEEE Signal Processing Magazing, 1997, 14(2): 24—41.
- [6] Rafeal C. , Gonzalez Richard E. , Woods. 数字图像处理[M]. 电子工业出版社, 2005.
- [7] Joao P. Papa, Leila M. G. Fonseca, Lino A. S. , de Carvalho. Projections onto convex sets through particle swarm optimization and its application for remote sensing image restoration[J]. Pattern Recognition Letters, 2010(3): 1876—1886.
- [8] Peng Liu, Dingsheng Liu. Selection of regularization parameter based on generalized cross-validation in total variation remote sensing image restoration[J]. Image and Signal Processing for Remote Sensing, 2010(9): 7830—7831.
- [9] 满益云, 陈世平, 刘兆军, 等. MTF 在光学遥感成像系统优化设计中的应用研究[J]. 航天返回与遥感, 2007(12).
- [10] 董涛, 董慧颖. 基于大气调制传递函数的天气退化图像复原方法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2006(10).
- [11] 周春平, 宫辉力, 李小娟, 等. 遥感图像 MTF 复原国内研究现状[J]. 航天返回与遥感, 2009(3).
- [12] 姚芳, 万幼川, 胡晗, 等. 基于 MTF 的遥感影像复原算法研究[J]. 遥感信息, 2010(4).
- [13] 陈世平, 姜伟. 航天光学采样成像系统 MTF 的优化设计与 MTF 补偿[J]. 航天返回与遥感, 2007(12).
- [14] 曾湧, 陈世平, 于晋. 光学遥感成像系统调制传递函数补偿技术[J]. 中国空间科学技术, 2010(8).
- [15] Robert Ryan, Braxton Baldrige Robert A. , Schowengerdt etc. IKONS spatial resolution and image interpretability characterization[J]. Remote Sensing of Environment, 2003(88): 37—52.
- [16] 薛良峰, 齐欢. 图像复原的逆滤波器技术讨论[J]. 自动检测技术, 2002, 2003(88): 21(5).
- [17] K. J. Hermiston, D. M. Booth NIIRS and objective image quality measures[J]. Computer Analysis of Image and Patterns Lecture Notes in Computer Science, 1999(1689): 385—394.
- [18] Xinbing Chen, Shizhi Yang, Xianhua Wang. Satellite image blind restoration based on surface fitting and iterative multi-shrinkage method in redundant wavelet domain[J]. Optk-International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(21): 1909—1911.
- [19] C. Pinila Ruiz, F. J. Ariza Lopez. Restoring SPOT images using PSF-driven deconvolution filters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(12): 2379—2391.

(上接第 41 页)

参考文献

- [1] 李家国. HJ-1B IRS 热红外通道在轨绝对辐射定标与应用研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010.
- [2] Slater P N, Bigger S F, Thome K J, et al. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors[J]. J. of Atomspheric and Oceanic Technology, 1996, 13(2): 349—359.
- [3] 戎志国, 邱康睦, 胡秀清, 等. FY-2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 408—412.
- [4] Schott J R, Julia A. Barsi, Bryce L. Nordgren, et al. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(1—2): 108—117.
- [5] 朱利. 热红外辐射定标及地表温度反演研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2008.
- [6] 张勇. 遥感传感器热红外数据辐射定标研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [7] A. Berk, G. P. Anderson, P. K. Acharya, et al. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER's MANUAL[R]. U. S. : AIR FORCE RESEARCH LABORATORY, 2003.
- [8] 胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY21C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标[J]. 遥感学报, 2002, 6(5): 328—333.
- [9] 韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. HJ-1B 热红外波段在轨绝对辐射定标[J]. 遥感学报, 2010, 14(6): 1219—1225.
- [10] 胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖对 FY-1C、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标[J]. 空间科学学报, 2001, 21(4): 370—379.