

基于 MTF 理论的遥感图像复原

陈强 戴奇燕 夏德深

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094)

摘要 由于遥感图像成像过程中受传感器性能下降、大气扰动等因素影响,致使图像质量退化。为了改善遥感图像质量,从图像质量退化原理分析,提出了一种基于调制传递函数(modulation transfer function, MTF)理论的图像复原方法。该方法主要包括去噪和 MTF 拉伸两部分。针对遥感图像的特点,给出了一种有效的基于频域的去噪方法。为了能够调节频谱拉伸的程度,还给出了一种指数调节 MTF 曲线的方法。中巴(中国和巴西)卫星红外遥感图像的实验结果表明,该方法有效地提高了图像的对比度(对于实验图像来说,较复原前图像对比度提高了 7 倍多,方差也由原来的 8.77 提高到 17.37)、熵等图像要素,从而改善了图像的质量。

关键词 图像复原 MTF 去噪 中巴红外遥感图像

中图法分类号: TP391.1 TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)09-1299-07

Restoration of Remote Sensing Images Based on MTF Theory

CHEN Qiang, DAI Qi-yan, XIA De-shen

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

Abstract Due to the effect of a sensor, atmosphere etc, remote sensing images are degenerated. To improve the quality of remote sensing images, this paper proposes an image restoration approach based on the modulation transfer function(MTF) according to the analysis of the image degeneration theory. Our method mainly includes two parts: denoising and MTF compensation. An effective denoising method on the frequency space is presented according to the characteristics of remote sensing images. An exponent adjusting method of MTF curve is presented to adjust the MTF compensation degree. The experimental results with CBERS images proved that our method is effective to improve the image factors, such as image contrast, entropy etc, so as to compensate degenerated images.

Keywords image restoration, modulation transfer function(MTF), denoising, CBERS images

1 引言

图像复原是为了抑制图像退化而利用有关图像退化性质的知识来进行图像预处理的方法。图像复原的目的是将质量下降(退化)的图像进行相应处理,以改善图像质量。由于图像退化的原因可能有很多种,如光电传感器的非线性、物体与摄像机间的相对运动、大气的扰动等,因此根据不同的退化原因,出现了很多种图像复原方法,如逆滤波^[1~3](去卷积)、维纳滤波^[4,5]、约束最小平方滤波^[6]等。

遥感图像的光学信息获取与传输过程要经过大

气、光学系统、CCD 等一系列环节,由于各个环节均可能对图像产生退化作用,引起图像质量的下降,因此对退化的模糊图像进行复原是遥感图像处理中需要解决的问题,也是一个热点和难点。本文给出了一种基于 MTF(modulation transfer function)理论的图像复原方法,它与以前的高分辨率图像 MTF 补偿方法^[7]的不同点在于去噪方法和 MTF 下降曲线的选择。

2 图像质量退化原理

假定 $f(x, y)$ 为原目标图像, $g(x, y)$ 为观察到的退化图像,则

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (1)$$

其中 $h(x, y)$ 为点扩展函数。符号“ $*$ ”表示卷积。上式表示原图像通过与相应的点扩展函数作卷积而得到退化图像的过程。对式(1)两边同时作傅里叶变换则得到

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) \quad (2)$$

其中 $H(u, v)$ 的值为复数,可以表示成

$$H = |H| \cdot e^{i\varphi} \quad (3)$$

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),即

$$MTF = |H| / k \quad (4)$$

其中 k 为 H 在零频率的幅值。由式(2)~式(4)得

$$G = F \cdot MTF \cdot k \cdot e^{i\varphi} \quad (5)$$

假定 MTF 在作用于频谱图像 F 时,其以频谱中心为圆心的等半径圆上的 MTF 值相同,则可以将式(5)简化为

$$G = F \cdot MTF \cdot k \quad (6)$$

上面的图像质量退化过程是假定没有噪声的理想情况。实际成像过程中,噪声的引入是不可避免的,假定噪声图像为 $n(x, y)$,则式(1)应改写为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (7)$$

相应地由式(7)可得

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N(u, v) \quad (8)$$

式(6)应改写为

$$G = F \cdot MTF \cdot k + N \quad (9)$$

3 基于 MTF 理论的图像复原

根据上面的图像质量退化原理分析可知:如果已知或已计算得到图像的 MTF 下降曲线,或者知道相应的点扩展函数(point spread function, PSF),那么就可以复原退化图像,以提高图像质量。

目前大部分图像复原方法都是在假定已知 PSF 的基础上做的,如去卷积方法、Wiener 滤波方法等。本文主要采用 MTF 下降曲线来复原图像,其基本思想是通过计算图像采样系统的 MTF 曲线在不同空间频段的下降程度来反推实际图像频谱中高频部分的上升程度。由于图像在采集数字化的过程中损失的主要是高频信息,其在图像上表现为细节、边缘等的模糊,因此提升图像的高频信息即能提高图像分辨率,也就改善了图像质量。

本文的图像复原步骤如下:

(1)首先计算采样系统的 MTF 曲线,其中对于高

分辨率图像,可以采用刀刃法或脉冲法求解^[8,9],但是,对于低分辨率图像(如中巴卫星红外遥感图像),现有的用于计算高分辨率图像的 MTF 方法就不适用了,这里采用在实验室条件下用仪器测得的 8 个不同 Nyquist 频率处的 MTF 值来近似中巴卫星红外遥感图像的 MTF 曲线。这里的 8 个 MTF 值为 $\{0.39, 0.39, 0.35, 0.29, 0.21, 0.14, 0.07, 0.04\}$ (如图 1 所示);然后对这 8 个 MTF 值进行插值和归一化,即可得到如图 2 所示的较密集的 MTF 值。为了模拟一簇 MTF 下降曲线,本文将 MTF 值改写为如下形式:

$$MTF = MTF^t \quad 0 < t < 2 \quad (10)$$

这里的 t 起调节 MTF 下降程度的作用。图 3 为 t 取不同值时的 MTF 曲线,由图 3 可知, t 越大,MTF 曲线下降得越快;反之, t 越小,MTF 曲线下降得越慢。在用 MTF 曲线复原图像时,可以通过调节 t ,即通过选择合适的 MTF 下降曲线来复原图像,以便获得较好的复原效果。

这里假定大气质量很好,可以忽略大气的 MTF,另外,还忽略了与探元运行方向相平行方向和

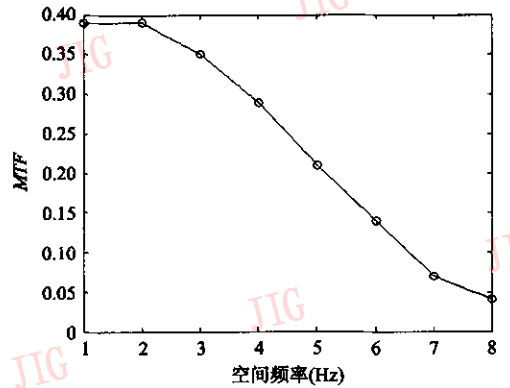


图 1 实验室测得的 8 个频率处的 MTF 值
Fig. 1 MTF measured at 8 frequencies in the lab

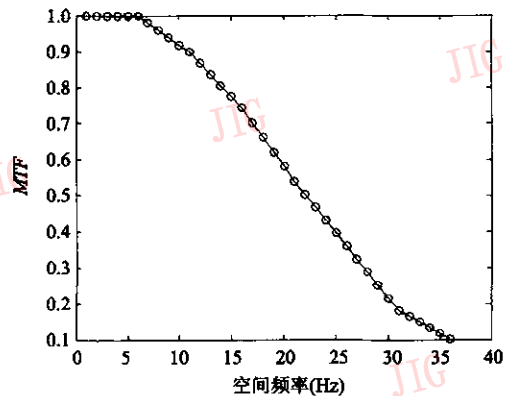


图 2 插值和归一化后的 MTF 值
Fig. 2 MTF after interpolation and normalization

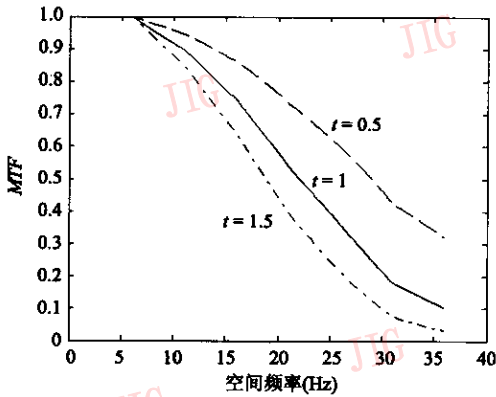


图3 t取不同值时的 MTF 值

Fig. 3 MTF for different t

垂直方向的 MTF 值的差别。实际上探元运行方向的 MTF 值和与探元运行方向相垂直方向的 MTF 值是不同的,这是由探元运动引起的。由于本文采用的 MTF 值曲线是在实验室条件下求得的,没有考虑探元的运动,所以为了简化计算,这里没有考虑探元运动引起的两个方向 MTF 值的差别。

(2)去噪。用 MTF 复原图像时,主要是提升图像的高频部分,但由于噪声也是高频部分,所以如果对噪声不进行抑制,则很可能导致复原后的图像含有很多噪声,以至于把有效信息给掩盖了。去噪方法主要有各向同性滤波(如高斯滤波)和各向异性滤波(如总变差方法^[10])。由于各向同性滤波在去除噪声的同时丢失了较多细节信息,而中巴卫星红

外遥感图像本身就比较模糊,细节不够丰富,如果再用各向同性滤波进行平滑,则细节丢失太多,因而不利于最后提高图像质量。基于总变差方法的各向异性滤波虽然能够在去除噪声的同时,能较好地保持细节信息,但复杂度较高。

为此,本文采用了如下的频域去噪方法:

- ①对原图像作傅里叶变换来得到频谱图像 R ;
- ②去除频谱图像 R 中的孤立亮点,即对图像 R 中的每一点 (x, y) 为简化处理,图像边界点不考虑)作如下处理:

$$T(i, j) = R(x, y) - R(x - 2 + i, y - 2 + j) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (11)$$

$$S(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } T(i, j) > 0.3 \cdot R(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

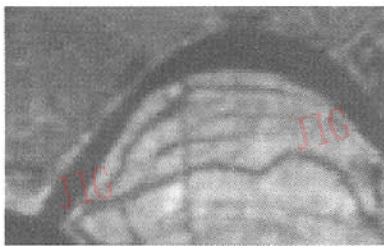
$$R(x, y) = \begin{cases} 0.5 \cdot R(x, y) & \text{if } \text{sum}(S) > 6 \\ R(x, y) & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

- ③对处理后的频谱图像 R 做傅里叶反变换,同时将灰度均值调整到与原图相同。

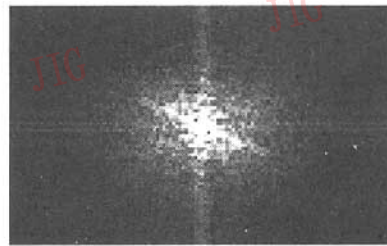
图4为上述基于频域方法的去噪过程。图4(a)为一幅南京地区的中巴卫星遥感红外图像,图4(b)为与原图对应的频谱图像,图4(c)为去除孤立点后的频谱图像,图4(d)为去噪后的结果图。从图4(d)的可以看出,上述方法在去除噪声的同时,还增强了图像的对对比度。

(3)对去除孤立点后的频谱图像进行 MTF 复原。由式(9)可得如下恢复原目标频域图像 F 的方法:

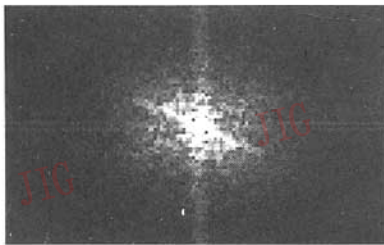
$$F = (G - N) / (MTF \cdot k) \quad (14)$$



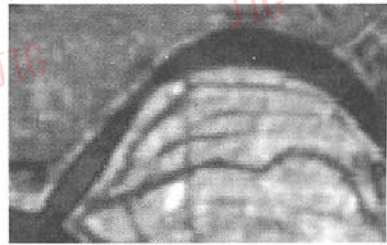
(a) 原中巴卫星遥感红外图像



(b) 原图的频谱图像



(c) 去除孤立点后的频谱



(d) 去噪结果图

图4 基于频域的去噪

Fig. 4 Denoising based on frequency theory

令 $R = G - N$ 为去除孤立点后的频谱图像,同时令 $k = 1$, 则式(14)可简化为

$$F = R / MTF \quad (15)$$

在用式(15)进行 MTF 拉伸时,有两个问题需要处理,其中第 1 个问题是 MTF 曲线的下降程度的选择。笔者在处理中巴卫星红外遥感图像时发现, t 取 $[0.8, 1]$ 之间时效果较好, 本文取 $t = 0.8$; 第 2 个问题是不同频率处的归一化后的 MTF 值如何与频谱图像的频率相对应。实际上很难确定 MTF 曲线的频率值与频谱图像的频率值的对应关系。这里, 可将 MTF 曲线的最高频率与图像频谱的最高频对应。

图 5 为图 4(c) 频谱图像经过 MTF 拉伸后的频谱图像。将图 5 与图 4(c) 相比较可见, 高频部分得到了较显著的增强。

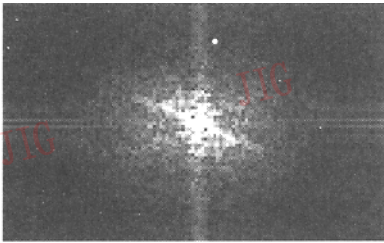
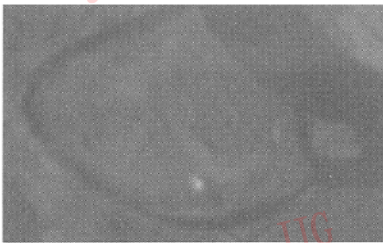


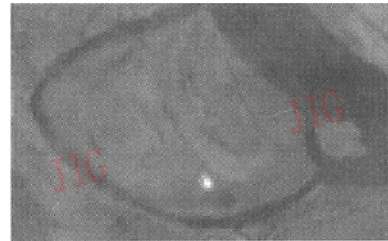
图 5 图 4(c) 经过 MTF 拉伸后的频谱图像

Fig. 5 Frequency image by enlarging MTF for Fig. 4(c)

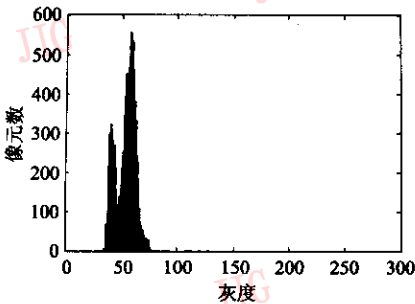
最后, 对经 MTF 拉伸后的频谱图像进行傅里



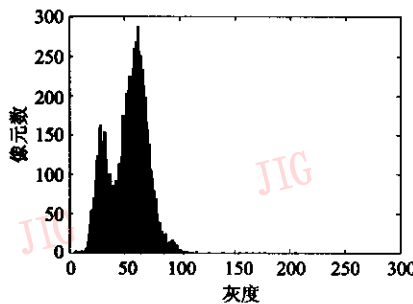
(a) 复原前图像



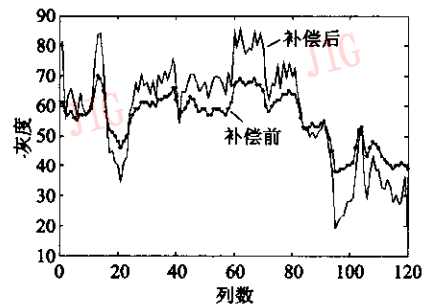
(b) 复原后图像



(c) 复原前图像的直方图



(d) 复原后图像的直方图



(e) 两幅图像的某一相同行的灰度轮廓

图 7 复原前后的效果对比

Fig. 7 Effect comparison between the images of before and after restoration

叶反变换。为了使复原后的图像与原图的能量基本保持一致, 应将复原后图像的灰度均值调整到与原图相同。图 6 为经 MTF 复原后的图像。将图 6 与图 4(a) 相比较可知: 从视觉效果上看, 复原后的图像明显比原图清晰, 噪声也得到了较好的抑制。

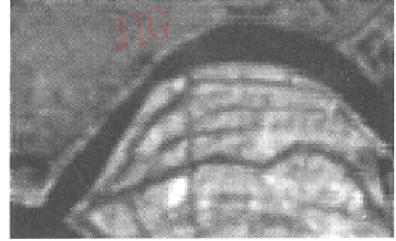


图 6 MTF 复原后的图像

Fig. 6 Restored image based on MTF theory

4 实验结果和分析

图 7 是复原前后图像的比较。图 7(a) 是一幅原始中巴卫星红外遥感图像, 图 7(c) 是其对应的直方图。图 7(b) 是经过 MTF 复原后的结果图像, 图 7(d) 是其对应的直方图。从图 7(c) 和图 7(d) 直方图可见, 复原后图像的灰度分布明显比复原前图像的灰度分布更广阔, 不仅纹理信息更丰富, 而且边缘更加突出。为了定量地表示复原前后的差别, 本文

显示了复原前后图像某一相同行的灰度轮廓(见图 7(e))。从图 7(e)可见,基于 MTF 的复原使得原图中灰度值较低的像素变得更低,而使原图中灰度值较高的像素变得更高,从而增强了图像的对对比度。表 1 是复原前后两幅图像的参数对比。

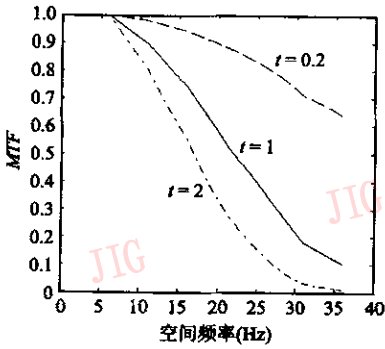
表 1 两幅图像的参数对比

Tab.1 Parameter comparison of two images

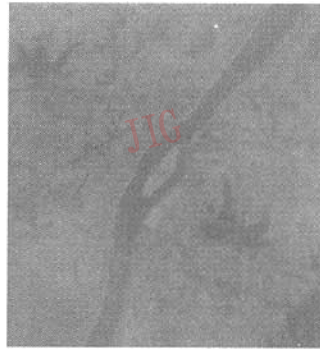
	均值	方差	对比度	熵	细节能量
图 7(a)	53.75	8.77	7.69	8.04	7.72
图 7(b)	53.75	17.37	55.83	10.51	36.51

从表 1 可以看出,在保持前后两幅图像灰度均值的情况下,图像的方差由 8.77 提高到 17.37,对比度提高了 7 倍多,熵和细节能量也都得到了提高。综上所述,基于 MTF 理论复原后的图像,不仅信息量有较大的提高,而且图像变清晰,图像的分辨率也有较大提高。

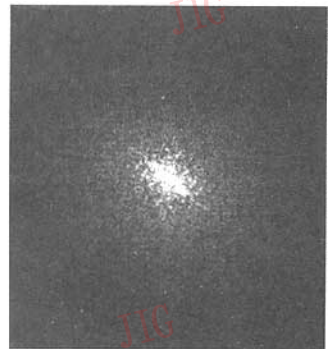
图 8 为用不同 MTF 下降曲线进行图像复原的效果比较。图 8(a)为 t 分别取 0.2, 1 和 2 时的 MTF 下降曲线,图 8(b)为原图像。图 8(c)为用 $t=0.2$ 时的 MTF 拉伸后的频谱图,图 8(d)为对应的复原图像。图 8(e)为用 $t=1$ 时的 MTF 拉伸后的频谱图,



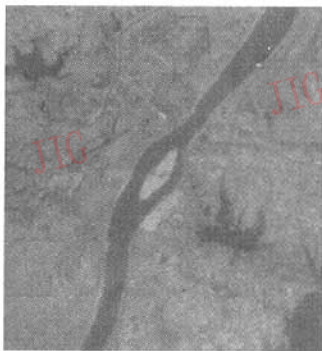
(a) 不同 MTF 下降曲线



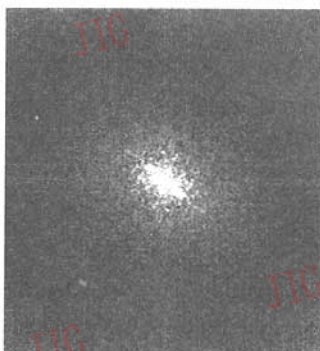
(b) 原图像



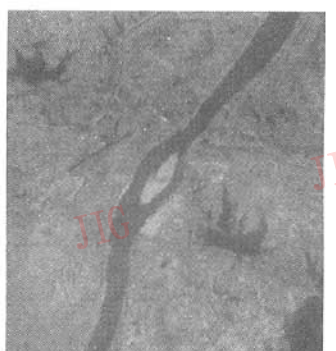
(c) $t=0.2$ 时的频谱图



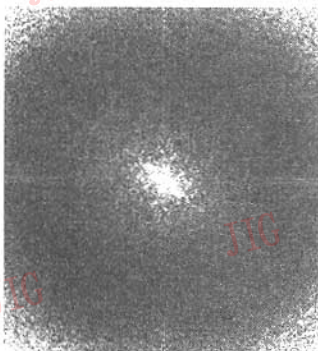
(d) $t=0.2$ 时的复原图像



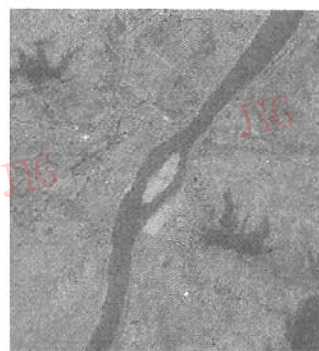
(e) $t=1$ 时的频谱图



(f) $t=1$ 时的复原图像



(g) $t=2$ 时的频谱图



(h) $t=2$ 时的复原图像

图 8 不同 MTF 下降曲线的复原效果比较

Fig. 8 Comparison of restorations on different MTF

图 8(f)为对应的复原图像。图 8(g)为用 $t=2$ 时的 MTF 拉伸后的频谱图,图 8(h)为对应的复原图像。比较图 8(d),图 8(f)和图 8(h)可知,当 t 取 1 时,能够在有效地复原图像的同时,较好地抑制噪声;当 t 取 0.2 时,虽然能够很好地抑制噪声,但复原效果不如 $t=1$ 时的复原效果;当 t 取 2 时,虽然图像的高频部分得到了显著的增强,但是复原图像中噪声太多。由此可见,当 t 取 1 左右时,复原效果较好。

图 9 为用不同去噪方法去噪后的复原图像效果比较。图 9(a)为原图,图 9(b)为用本文去噪方法去噪后的 MTF 曲线拉伸频谱图,图 9(c)为对应的复原图像。图 9(d)为经过高斯滤波后的拉伸频谱图,图 9(e)为对应的复原图像。图 9(f)为经过总变差去噪后的拉伸频谱图,图 9(g)为对应的复原图像。

方法去噪后的拉伸频谱图,图 9(g)为对应的复原图像。比较图 9(c),图 9(e)和图 9(g)可知,高斯滤波和总变差方法都不适合中巴红外遥感图像的去噪,而本文提出的基于频域的去噪方法则能够很好地去噪和能够取得较好的图像复原效果。

图 10 为用 MTF 方法复原的图像与基于 PSF 的 Wiener 滤波方法的复原图像的比较。这里的 PSF 是由实验室测得的 MTF 曲线反推得到的。图 10(a)为原图,图 10(b)为用 MTF 进行复原的图像,图 10(c)为 Wiener 滤波的复原图像。比较图 10 中的 3 幅图像可知:用本文的 MTF 复原方法较基于 PSF 的 Wiener 滤波的复原方法可更明显地拉大图像的对比度。

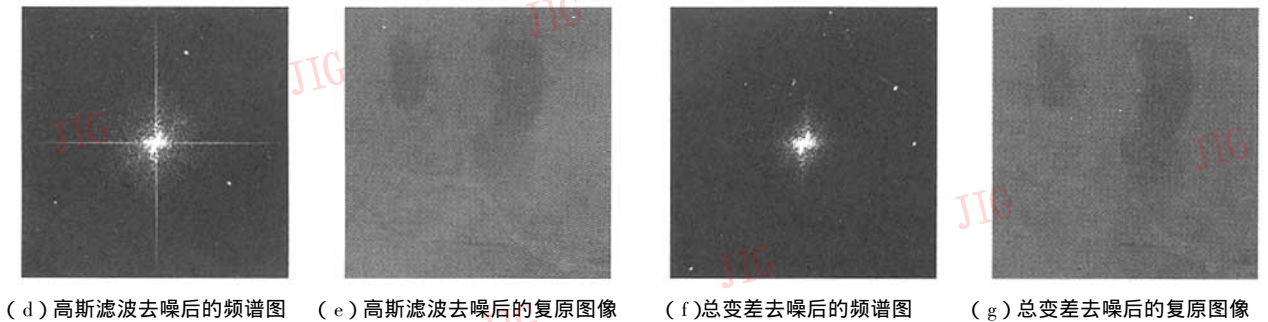
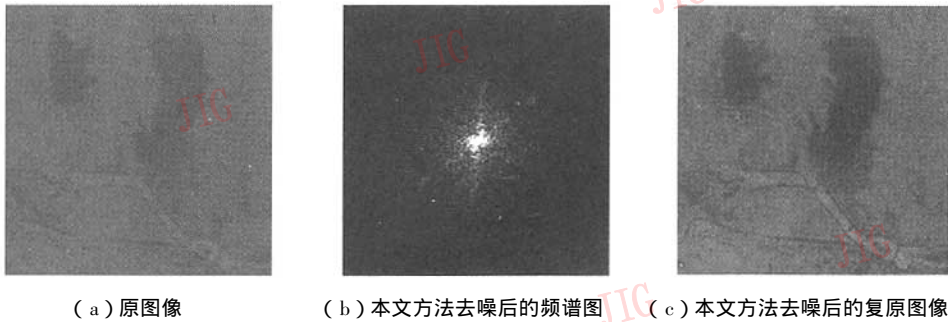


图 9 几种不同去噪方法的复原效果比较

Fig. 9 Comparison of restorations with some different denoising methods

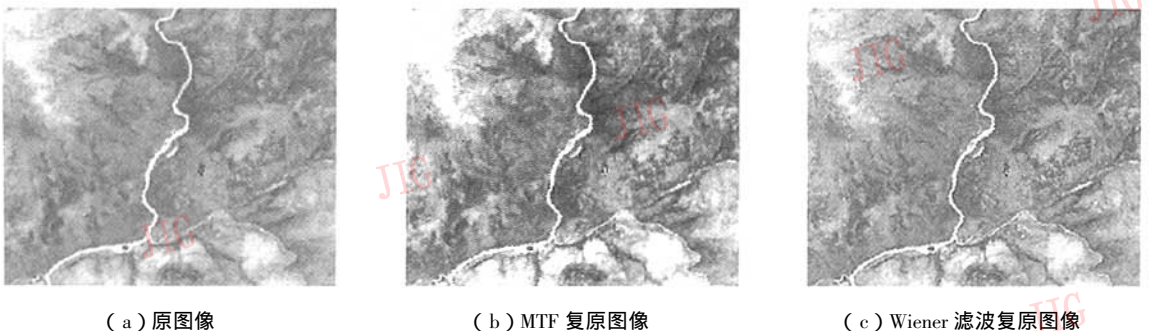


图 10 MTF 复原与基于 PSF 的 Wiener 滤波复原的结果比较

Fig. 10 Comparison of restorations between using MTF theory and using Wiener filter based on PSF

表 2 为图 10 中 3 幅图像的参数比较,用本文方法复原图像的细节能量较基于 PSF 的 Wiener 滤波的方法提高了约 30%,对比度也提高了,它客观地说明了两种方法在复原图像时的差别。

表 2 图 10 中不同图像的参数对比

Tab.2 Comparison of parameters of the images in Fig. 10

	均值	方差	对比度	熵	细节能量
图 10(a)	119.76	33.15	198.08	12.01	154.47
图 10(b)	120.13	59.35	1038.02	13.51	594.25
图 10(c)	119.87	37.88	719.76	13.05	416.49

本文在对中巴卫星红外遥感图像进行复原时,采用了实验室测量得到的 MTF 下降曲线。对于其他非中巴卫星红外遥感图像,则可以先采用刀刃法或脉冲法计算得到 MTF 下降曲线后,再进行 MTF 复原,但是如果 MTF 下降曲线计算不是很准确的话,则复原效果可能没有预期的那样理想。

5 结 论

采用 MTF 下降曲线复原图像,在已知或已准确计算出 MTF 下降曲线的情况下,可以有效地复原图像,以改善图像质量。为了抑制噪声的影响,本文采用了新颖的频域处理方法,即通过从一簇 MTF 下降曲线中选择一条合适的曲线来拉伸频谱图像,这样可以扩大适用范围和提高复原效果。中巴卫星红外遥感图像的复原实验结果证明了本方法的有效性。

参考文献(References)

1 Sondhi M M. Image restoration: The removal of spatially invariant

degradations[J]. Proceedings IEEE on Special Issue on Picture Processing ,1972 ,60(7):842 ~ 853.

2 Andrews H C , Hunt B R. Digital image restoration[M]. Englewood Cliffs , New Jersey , USA : Prentice-Hall , 1977.

3 Hong Han-yu , Zhang Tian-xu. Investigation of restoration algorithm for degraded images caused by aero-optics effects using multi-resolution blind deconvolution[J]. Chinese Journal of Computers , 2004 ,27(7):952 ~ 963. [洪汉玉 张天序. 基于多分辨率盲目去卷积的气动光学效应退化图像复原算法[J]. 计算机学报 2004 ,27(7) 952 ~ 963.]

4 Helstrom C W. Image restoration by the method of least squares[J]. Journal of the Optical Society of America , 1967 ,57(3) 297 ~ 303.

5 Guan L , Ward R K. Restoration of randomly blurred images by the Wiener filter[J]. IEEE Transactions on Acoustics , Speech & Signal Processing , 1989 ,37(7) 589 ~ 592.

6 Hunt B R. The application of constrained least squares estimation to image restoration by digital computer[J]. IEEE Transactions on Computer , 1973 ,22(9) 805 ~ 812.

7 Krupinski E A , Johnson J , Roehrig H , et al. Using a human visual system model to optimize soft-copy mammography display : influence of MTF compensation[J]. Academic Radiology , 2003 ,10(9) : 1030 ~ 1035.

8 Greer P B , Van Doorn T. Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method[J]. Medical Physics , 2000 ,27(9) 2048 ~ 2059.

9 Choi Taeyoung. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function(MTF) Measurement using Edge and Pulse Method[D]. Brookings , South Dakota , American : South Dakota State University , 2002.

10 Weichert J , ter Haar Romeny B M , Viergever M A. Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing , 1998 ,7(3) 398 ~ 410.