

模糊遥感图像总变分优化恢复方法

秦世引¹, 魏晓明¹, 刘远民¹, 满益云²

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191

2. 北京空间机电研究所, 北京 100076

摘要 针对遥感图像在成像与传输过程中的退化而导致的图像模糊与噪声干扰, 提出了一种基于调制传递函数(MTF)估算与总变分优化的图像恢复方法。通过分析调制传递函数曲线的幅频特性, 阐释了基于 MTF 的遥感图像恢复机制, 为抑制噪声干扰和扩大适用范围而采用了一种新的 MTF 曲线分段逼近策略, 并以实验结果验证了该方法较之常规模型的优越性。进而, 针对噪声条件下模糊遥感图像的恢复问题, 采用改进的快速总变分优化方法实现了对强噪声模糊遥感图像的有效恢复。实验结果表明, 本文提出的恢复方法能够在有效抑制噪声的同时更好地保留图像细节和纹理信息, 为强噪声干扰模糊遥感图像的恢复处理提供了高效的解决方法。

关键词 图像复原; 调制传递函数; 总变分优化; 去噪

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.14.003

A Restoration Method of Blurred Remote Sensing Images Based on Total Variation Optimization

QIN Shiyin¹, WEI Xiaoming¹, LIU Yuanmin¹, MAN Yiyun²

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China

Abstract In view of blurred remote sensing images with the noise resulted in some degradations during imaging and transmission processes, a kind of restoration method is proposed based on MTF estimation and total variation optimization. The restoration principle of blurred remote sensing images with noise is elucidated in depth through a thorough analysis of frequency characteristics of MTF. In order to deal with the noise, a new piecewise approximation strategy for MTF estimation is employed, which has the general applicability and outperforms the conventional models in overcoming noise disturbance by experiment demonstrations. Moreover, aiming at the restoration processing of blurred remote sensing images with noise, an improved method of fast total variation optimization is adopted to achieve the optimal restoration effect. A series of experimental results indicate that proposed restoration method could preserve more details and texture information of images besides its satisfactory performance of eliminating noise, thus it could provide an effective approach to the restoration processing of remote sensing images with heavy noise.

Keywords image restoration; MTF; total variation optimization; denoising

0 引言

在遥感图像的获取过程中, 大气环境、光学传感器、卫星平台等多个环节都可能导致图像退化, 引起图像质量下降。在成像系统中, 通常用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 表征该系统的退化模型。对于线性系统而言, 各个子环节的 MTF 乘积就是整个成像系统的 MTF。而在实际成像过程中, 由于大气环境的多变性, 姿态精度等多种因

素的变化会引起系统 MTF 的变化, 此时直接获取精确的 MTF 曲线存在一定的困难, 针对这一问题, 利用所获取的退化图像直接进行 MTF 估计和测算就成为当前研究主流^[1-5]。2002 年, T. Choi^[6]提出了刃边法, 为系统 MTF 的估计提供了可行的途径。但是, 刃边法需要获得较为理想的刃边目标, 在实际应用中, 由于无法设置面积较大的人工靶标, 使理想刃边目标的获取遇到严重困难^[7], 该方法的实用性也受到挑战。针对

收稿日期: 2010-10-18; 修回日期: 2011-04-12

基金项目: 中国高技术研究发展计划 (863 计划) 重点项目 (2008AA12A216); 国家自然科学基金项目 (60875072)

作者简介: 秦世引, 教授, 研究方向为图像处理与模式识别、大规模复杂系统、多机器人混杂系统, 电子信箱: qsy@buaa.edu.cn

这种情况, Françoise Viallefont-Robinet 等^[8]对刃边法进行了改进, 通过对原始的自然刃边的合理修正和补偿, 提高了刃边质量, 从而增强了刃边法的实用性。然而, 改进的刃边法只适合于分辨率较高的遥感图像, 对于中低分辨率的遥感图像而言, 提取刃边信息也非常困难。

在工程应用中, 为了使 MTF 的测算简便实用, 根据实际经验, 学者们提出了基于特殊曲线的 MTF 估算方法, 由 Nyquist 频率处的 MTF 信息获取整条 MTF 曲线, 其中最常用的有高斯曲线和 Sinc 曲线。但是, 由于这两种曲线在整个频域范围内的平缓性, 难以体现低、中、高各个不同频段的特殊幅频特性, 在处理结果中所涉及的纹理和细节信息就难以很好地恢复, 而对于噪声污染严重、非高斯模糊的退化遥感图像, 更是存在着较大的局限性。面对这种情况, 本文根据大量的实验结果分析, 提出一种新的通过分段曲线逼近的 MTF 测算方法。利用该方法所获的系统 MTF 进行图像恢复的效果表明, 该方法在保留和凸显图像细节和纹理信息等方面具有更好的性能, 明显优于通过高斯曲线和 Sinc 曲线所逼近的系统 MTF 的恢复效果。

另一方面, 在常规的基于 MTF 的图像恢复方法中, 主要是根据图像退化模型直接进行逆滤波实现。这种方法需要知道噪声分布, 或能够对噪声模型进行较为准确的估计, 倘若忽略噪声的存在会使复原图像出现严重的 Gibbs 效应, 严重地影响恢复效果。传统的维纳滤波方法, 可以在一定程度上抑制噪声的影响, 但在保持细节信息方面还存在着不足。基于总变分法优化的图像复原方法充分利用了非线性优化的优点, 具有良好的棱边保持特性和噪声抑制能力, 但由于其优化时目标函数的非线性, 存在计算复杂度高、运行速度慢的问题。本文针对此不足对算法进行了改进, 提出了一种基于频域的总变分优化求解策略。实验表明, 相对于定点迭代等总变分优化求解策略, 本文给出的方法, 在保证图像恢复质量的同时在时效性上有了显著提高, 可为遥感图像的恢复处理提供一种高效实用的解决方法和技术工具。

1 遥感图像退化模型分析

尽管遥感图像的退化成因非常复杂, 但其退化机制模型与一般图像的退化过程模型也有相似之处。设 $f(x, y)$ 为原目标图像, $g(x, y)$ 为观察到的退化图像, $h(x, y)$ 为系统点扩散函数, $n(x, y)$ 为加性噪声, 则

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

式(1)表明, 退化图像的形成主要取决于原图像与多因素影响下系统的点扩散函数的卷积作用, 其中还包括了相应的噪声。对式(1)两边同时作傅里叶变换有

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

若对 $H(u, v)$ 的幅值作归一化, 使其零频率处的幅值为 1, 则称此归一化后的模值为 MTF, 即

$$MTF(u, v) = |H(u, v)| / k \quad (3)$$

这里, k 为 $H(u, v)$ 在零频率的幅值。通常, 用 MTF 表征遥感图像的模糊程度, 对于各向同性的模糊图像 (如高斯模糊或散焦模糊), 由于其点扩散函数 $h(x, y)$ 在空间域满足对称性, 根据二维傅里叶变换的性质可知, $H(u, v)$ 应为实函数。此时, 由式(2)、式(3)可得

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot MTF(u, v) \cdot k + N(u, v) \quad (4)$$

式(4)即为遥感图像的退化模型, 对该式变形可得

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{k \cdot MTF(u, v)} - \frac{N(u, v)}{k \cdot MTF(u, v)} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在遥感图像的模糊恢复过程中, 首先要获取 MTF 信息, 然后才能利用特定的复原算法对图像进行恢复处理。

2 MTF 的特性与频率曲线模型

2.1 MTF 频谱曲线的物理意义

作为空间频率的函数, 考虑到 MTF 的各向同性对称特点, 用相应的 MTF 曲线即可表征调制过程的幅频响应特性, 其值域在 0—1 之间, 特征参数包括截止频率、Nyquist 频率 (截止频率的 50%) 等。由于在截止频率之后其贡献可忽略, 常规的 MTF 曲线都以截止频率为标称频率。图 1 给出了一种有代表性的 MTF 特性曲线, 其中横坐标为按截止频率值进行标称化之后的空间频率值, 纵坐标为调制传递函数的幅值。

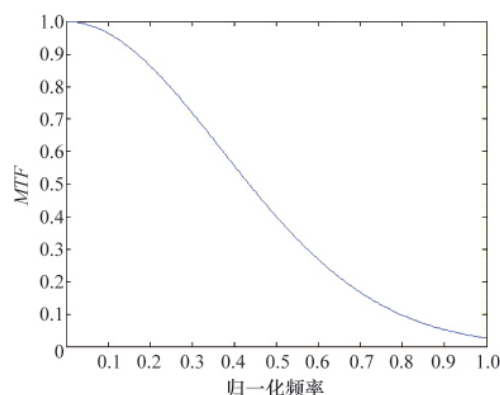


图 1 MTF 特征曲线示例

Fig. 1 Example of MTF characteristic curve

MTF 在一定程度上影响着退化遥感图像的质量, 从某种意义上讲, 可将 MTF 曲线视为表征对比度和分辨率的物理量, 其物理意义可以解释为: 在低频段的幅值特性反映了成像系统的反差, 幅值越高, 则反差越大, 即对比度越大; MTF 曲线在中高频段体现了成像系统的分辨率和再现细节的能力。在同一频率下, MTF 值越大, 成像系统的分辨率越高, 突显细节的能力越强。综合起来讲, 若 MTF 曲线所包围的区域越大, 曲线下降越平缓, 则成像系统的整体性能越高。

在实际工程应用中, 根据 MTF 曲线的下降趋势, 常采用高斯函数或 Sinc 函数进行逼近。由于高斯函数与 Sinc 函数都满足 MTF 曲线的单调性与零频处的逼近条件, 调节其特征参

数,可以达到适定的逼近精度。但这种逼近方法适用范围窄,在噪声强度大、模糊成因复杂的条件下难以有效实现 MTF 补偿。所以,本文提出了一种新的 MTF 曲线拟合模型。

2.2 MTF 曲线的分段逼近策略

在工程应用中,对于给定的成像系统,其 MTF 在 Nyquist 频率处的幅值通常是已知的,设为 T 。那么,根据这一先验信息就可利用现有的高斯函数或 Sinc 函数模型估计 MTF 曲线。根据高斯函数模型,有

$$MTF(x)=k_1 \cdot \exp \left[-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2} \sigma} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中 x ($0 \leq x \leq 1$) 为归一化的频率, μ, σ, k_1 为待定参数。由 MTF 曲线的对称性,可以得到 $\mu=0$ 。根据 MTF 在零频处的逼近条件 $MTF(0)=1$,可以定出 $k_1=1$ 。再根据给定的 Nyquist 频率处的幅值 T ,即可定出 σ ,进而确定完整的 MTF 曲线。图 2 中实线为 Nyquist 频率处的幅值 $T=0.2$ 时按此高斯函数模型所估算的 MTF 曲线。

假定系统的 MTF 满足 Sinc 函数模型,则有

$$MTF(x)=k_2 \frac{\text{sinc} x}{cx} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (7)$$

其中 c, k_2 为待定参数,给定条件 $MTF(0)=1$ 和 Nyquist 频率处的幅值 T ,即可确定完整的基于 Sinc 函数模型的 MTF 曲线。图 2 中虚线为 $T=0.2$ 时按此模型估计的 MTF 曲线。

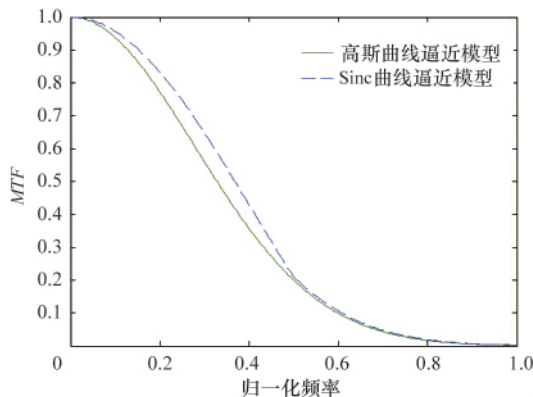


图 2 基于高斯模型与 Sinc 模型的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves based on Gaussian model and Sinc model

由图 2 可知,基于上述两种特殊的函数曲线模型,可在一定程度上较好地逼近系统 MTF 的幅频特性,但是,由于在高频段的幅值明显趋于 0,而噪声成分又往往处于高频段,据式(5)可知,这样会导致恢复结果受高频噪声的干扰加剧。为了得到更好的恢复效果,必须有抑制高频噪声的有效措施,最明显的一点就是应避免高频段截止频率附近的系统 MTF 取值太小。所以,依据前述的高斯曲线模型和 Sinc 函数曲线模型逼近系统的 MTF 将会对含噪图像的恢复造成严重干扰,必须采用对高频噪声有抑制作用的 MTF 逼近策略和模型。另外,上述两种模型结构单一,只能适用于由高斯模糊产生的退化遥感图像,而对于模糊成因复杂、模糊类型未知的遥感

图像,或者模糊参数本身较大的情况,这两种模型就存在一定的局限性。本文从工程应用实际出发,结合 MTF 曲线的物理意义,提出了关于系统 MTF 曲线的分段逼近策略和模型。在分段逼近策略下,一种可选的曲线模型如下式:

$$MTF(x)=\begin{cases} 1 & 0 \leq x < c_1 \\ \left(\frac{c_1}{x} \right)^\gamma & c_1 \leq x < c_2 \\ \left(\frac{c_1}{\sqrt{x^2 + \frac{x}{c_2} \cdot (x-c_2)^2}} \right)^\gamma & c_2 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, c_1, c_2, γ 为可调参数, $0 < c_1 < 0.5, 0.5 \leq c_2 < 1, \gamma > 0$ 。参数 c_1 和 c_2 为 MTF 按低频、中频、高频三段进行频率划分的分段点,可以通过当前待处理图像的模糊程度与噪声水平进行调控。参数 γ 反映了 MTF 在中、高频段的下降速度, γ 越大, MTF 下降得越快,反之则下降得越缓慢。可根据退化图像的细节丰富程度调节 γ ,以选择合适的 MTF 模型进行恢复。

若 MTF 曲线在 Nyquist 频率处的幅值 T 可知,则由式(8)所述分段函数的第 2 段表达式可以确定参数 c_1 ,即

$$c_1=0.5 \cdot T^{\frac{1}{\gamma}} \quad (9)$$

实际应用中,可以根据待恢复图像的对比度、细节纹理信息的显著性、受噪声污染的程度调整分段逼近函数模型的结构参数。图 3 给出了 $T=0.2, \gamma=1.1, c_2=0.5$ 时的分段逼近曲线模型与高斯曲线模型和 Sinc 函数曲线模型的直观对比。

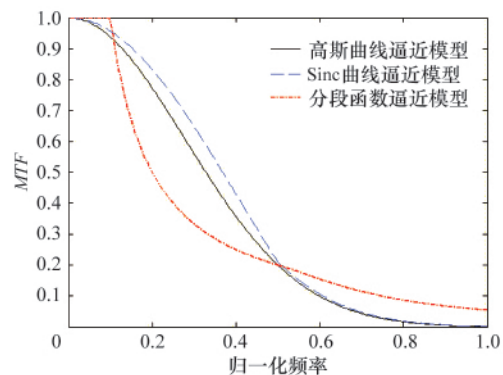


图 3 基于不同模型的 MTF 曲线比较

Fig. 3 MTF curves based on different models

从图 3 可以看出,式(8)所给出的 MTF 曲线模型更适合于细节信息不明显,且受噪声污染较严重的遥感图像。对于此类图像,由于细节不明显,而图像的细节主要体现在中、高频段,因此在 MTF 中所反映出的是低频部分的幅值较高,而中、高频度的幅值相对较低,尤其在中频段呈现快速下降的趋势;同时由于噪声强度较大,也需要对高频段的 MTF 进行一定程度的补偿,以防止由于高频部分的幅值过低而带来的噪声放大现象。后面的实验结果表明,该模型可以很好地符合此类模糊遥感图像的退化模型,为后面的恢复工作提供了保证。

3 基于总变分优化的频域复原策略和算法

3.1 图像复原的总变分正则化优化模型

根据式(1)所给出的图像退化模型,当噪声可以忽略时,图像复原的解算问题可以表示为如下最小化决策模型:

$$\min_f J(f) = \min_f \frac{1}{2} \|h * f - g\|^2 \quad (10)$$

但当噪声不可忽略时,上式的最优解显然不是式(1)的解,对此可以采用总变分正则化模型^[9-12]:

$$\min_f J(f) = \min_f \left\{ \frac{\lambda}{2} \|h * f - g\|^2 + J_r(f) \right\} \quad (11)$$

式中, λ 为规整化参数,

$$J_r(f) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{D_f} |\nabla f| dx dy \quad (12)$$

其中, $\nabla f = (f'_x, f'_y)^T$ 。由于图像是离散化像素点的集合,所以可以用卷积的方式得到 ∇f , 即 $\nabla f = (d_x * f, d_y * f)^T$, d_x, d_y 分别为横向差分算子与纵向差分算子, D_f 是图像 f 的支持域。式(11)的 Euler-Lagrange 方程为

$$\lambda \cdot h * (h * f - g) + L(f) f = 0 \quad (13)$$

式中 $L(f)$ 是一个椭圆型偏微分算子,它作用于函数 ρ 定义为

$$L(f)\rho = -\nabla \cdot \left[\frac{\nabla \rho}{\sqrt{|\nabla f|^2 + \beta}} \right] \quad (14)$$

式中, $\nabla \cdot \mathbf{v}$ 为向量 $\mathbf{v}$ 的散度。 β 为一非常小的正数,以保证分母不为零,通常取 $\beta = 10^{-8}$ 。

由于式(13)中存在非线性算子,直接求取最优解会遇到一定的解算困难,目前空域的大多数解决方法是首先对其进行线性化,其中应用比较广泛的线性化方法是 Vogel 提出的定点迭代法^[10-11],该方法在空域的迭代过程中通过引用前一步优化得到的 f^m 计算算子 $L(\cdot)$,从而将非线性方程转化为线性方程:

$$[\lambda \cdot h * h + L(f_m)] f_{m+1} = \lambda \cdot h * g \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (15)$$

这里, m 为迭代次数。但由于该方法在利用式(14)求得 $L(\cdot)$ 算子的过程中计算量较大,导致整个优化求解时间比较长,这在某种程度上也限制了它的应用。在本文的遥感图像总变分恢复过程中,通过引入惩罚项改变目标函数的形式,并利用 Parseval 定理将空域上的卷积运算问题转换为频域中的乘积运算,从而大大缩短了运行时间。

3.2 一种新的总变分频域复原策略和实现算法

通过引入惩罚项 w ,运用罚函数理论,可将式(11)转化为

$$\min_{f, w} J(f) = \min_{f, w} \left\{ \frac{\lambda}{2} \|h * f - g\|^2 + \int |w| dx dy + \frac{\alpha}{2} \int |w - \nabla f|^2 dx dy \right\} \quad (16)$$

其中 $\alpha > 0$ 。由惩罚函数理论可知,当 $w = \nabla f$ 时,决策模型(16)的最优解也就等价于式(11)的最优解。在数值算法中,可通过不断加大权值 α 使 w 和 ∇f 得以不断逼近。关于决策问题(16)的求解,可采用交叉定点迭代法。具体步骤如下。

步骤 1 固定 f , 则式(16)等价于

$$\min_{w_m} \left\{ \frac{\alpha_m}{2} \int |w_m - \nabla f_m|^2 dx dy + \int |w_m| dx dy \right\} \quad (17)$$

极小化问题(17)的必要条件为

$$\alpha_m (w_m - \nabla f_m) + \text{sgn}(w_m) = 0 \quad (18)$$

解之可得

$$w_m = \text{sgn}(\nabla f_m) \cdot \left(|\nabla f_m| - \frac{1}{\alpha_m} \right) \quad (19)$$

步骤 2 再固定 w , 则式(16)等价于

$$\min_{f_{m+1}} \left\{ \frac{\lambda}{2} \|h * f_{m+1} - g\|^2 + \frac{\alpha_m}{2} \int |w_m - \nabla f_{m+1}|^2 dx dy \right\} \quad (20)$$

由于 $\nabla f_{m+1} = (d_x * f_{m+1}, d_y * f_{m+1})^T$, 代入式(20)并展开有

$$\min_{f_{m+1}} \left\{ \frac{\lambda}{2} \|h * f_{m+1} - g\|^2 + \frac{\alpha_m}{2} \int |w_m - d_x * f_{m+1}|^2 dx dy + \frac{\alpha_m}{2} \int |w_m - d_y * f_{m+1}|^2 dx dy \right\} \quad (21)$$

步骤 3 上式根据 Parseval 定理可得

$$\min_{f_{m+1}} \left\{ \int |H \cdot F_{m+1} - G|^2 dudv + r_m \int |W_m - A \cdot F_{m+1}|^2 dudv + r_m \int |W_m - B \cdot F_{m+1}|^2 dudv \right\} \quad (22)$$

其中 $r_m = \alpha_m / \lambda$, $A, B, H, F_{m+1}, W_m, W_{my}$ 分别为 $d_x, d_y, h, f_{m+1}, w_m, w_{my}$ 的傅里叶变换,而 H 可根据系统 MTF 和相应的边界条件换算求得。

步骤 4 决策问题(22)的最优解必要条件为

$$H^* (H \cdot F_{m+1} - G) - r_m A^* (W_m - A \cdot F_{m+1}) - r_m B^* (W_m - B \cdot F_{m+1}) = 0 \quad (23)$$

其中, H^* 为 H 的共轭函数, A^* 和 B^* 分别为 A 和 B 的共轭算子。

解方程(23)可得

$$F_{m+1} = \frac{H^* \cdot G + r_m (A^* \cdot W_m + B^* \cdot W_{my})}{|H|^2 + r_m (|A|^2 + |B|^2)} \quad (24)$$

根据式(24),可进行 F_{m+1} 的迭代更新。根据罚函数法的收敛条件,当 α_m 递增趋于无穷(足够)大时,即可求得最优解。

总结上述分析推算结果,给出含噪模糊图像的快速总变分优化恢复算法如下:

输入:待恢复的退化图像 g ;

输出:恢复处理结果(图像) $\hat{f}$ 。

初始化: $f_0 = g$, 惩罚因子 $\alpha = \alpha_0$, 规整化参数 λ , 惩罚因子 α 的最大值 $\alpha_{\max}$; 容差参量 ε , 迭代次数 m 赋初值 $m = m_0 = 0$ 。

While $\alpha_m < \alpha_{\max}$

(1) 固定 f_m , 按 $w_m = \text{sgn}(\nabla f_m) \cdot \left(|\nabla f_m| - \frac{1}{\alpha_m} \right)$ 求得 w_m ;

(2) 计算 W_m, W_{my} 以及 $r_m = \frac{\alpha_m}{\lambda}$;

(3) 固定 w_m , 按 $F_{m+1} = \frac{H^* \cdot G + r_m (A^* \cdot W_m + B^* \cdot W_{my})}{|H|^2 + r_m (|A|^2 + |B|^2)}$ 更新 F_m ;

(4) 将 F_{m+1} 进行反变换得到 f_{m+1} ;

(5) 若 f_{m+1} 满足收敛条件,则跳出循环;否则令 $\alpha_{m+1}=2\alpha_m$, $m=m+1$ 并返回(1)。

end

输出 $\hat{f}=f_{m+1}$, 程序结束。

上述恢复算法是通过迭代寻优获取优化解的 f_{m+1} 的收敛条件为 $\left| \frac{f_{m+1}-f_m}{f_m} \right| < \varepsilon$, 其中 ε 为设定的容差参量。

4 实验结果与分析

4.1 面向不同应用需求的质量指标

随着遥感技术的快速发展,如何对遥感图像的影像质量进行评价成为遥感图像处理中一个重要问题。现在有关图像质量评定的客观评价标准根据有无原始图像可分为有参考的标准与无参考的标准^[13-15]。由于模糊退化的遥感图像很难得到实际的原始图像,PSNR 等有参考评价参数难以获得。而对于灰度平均梯度(GMG)这类无参考的客观评价标准,在无已知原始图像的情况下能较好地反映图像的边缘信息和纹理变化特征,非常适于遥感图像的清晰度量。其计算公式为:

$$GMG = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\nabla I_x^2 + \nabla I_y^2)}}{n} \quad (25)$$

式中, ΔI_x 和 ΔI_y 分别表示图像在 x 方向与 y 方向上相邻像素间的灰度差, n 表示图像的像元数。在一定范围内, GMG 值越大, 表示图像的清晰度越高, 复原效果越好。该方法计算方便, 但由于只是停留在数学统计意义上, 而未考虑人眼实际看到的效果, 有可能会得到与实际不符的情况。例如, 当图像的噪声强度加大时, 其 GMG 值也会增加, 但实际上图像的质量却在下降。为了克服 GMG 在这方面的局限性, 引入了基于人类视觉系统(HVS)对比度的客观评价标准, 该方法充分考虑了人眼的实际感受, 所得结果可与人眼特征的评价结果符合得更好^[13,16]。它的评价公式为

$$\eta = \frac{2\sigma_f\sigma_g}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2} \quad (26)$$

其中, σ_f 和 σ_g 分别为恢复后图像和模糊图像的方差, η 反应了恢复后图像的对比度和细节的丰富程度, η 数值越小, 表明恢复后的图像与模糊图像差距越大, 在一定范围内恢复效果越好。

4.2 实验结果与恢复质量评价

为了展示本文 MTF 模型的合理性, 采用分段函数逼近方法进行了 MTF 补偿, 图 4(a) 是一幅噪声强度较大的未知模糊类型的退化遥感图像, 对于产生该图像的成像系统, 仅可知其 MTF 在 Nyquist 频率处的幅值为 0.2。图 4(b)、4(c) 分别给出了基于高斯曲线模板的 MTF 模型和本文提出的分段逼近补偿法所获 MTF 模型的复原效果, 这里分段逼近补偿所采用的参数为 $c_1=0.2, \gamma=1.0, c_2=0.8$, 复原中的 TV 算法采用的是 Vogel 的定点迭代来计算。从图 4 中可看出这两种模型都能提高图像质量, 但对比图 4(c) 和 4(b), 可以看出基于本文

MTF 模型的复原图像质量要明显好于高斯曲线逼近 MTF 模型的恢复效果, 可使图像更为清晰, 细节更明显。为了进一步说明采用本文的分段逼近模型在确保图像细节和纹理信息方面的优势, 图 4(d)、4(e) 通过提取图像中的边缘及细节部分进行了对比。图 4(f) 显示了退化图像以及基于不同模型的恢复结果中各行平均的灰度轮廓, 可见本文的 MTF 模型在对比度的改善上也有更大的优势。

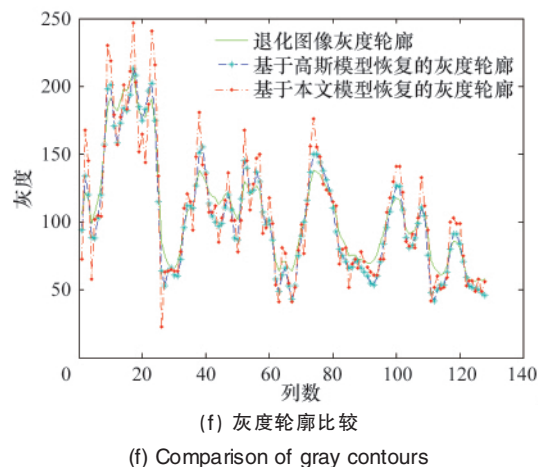
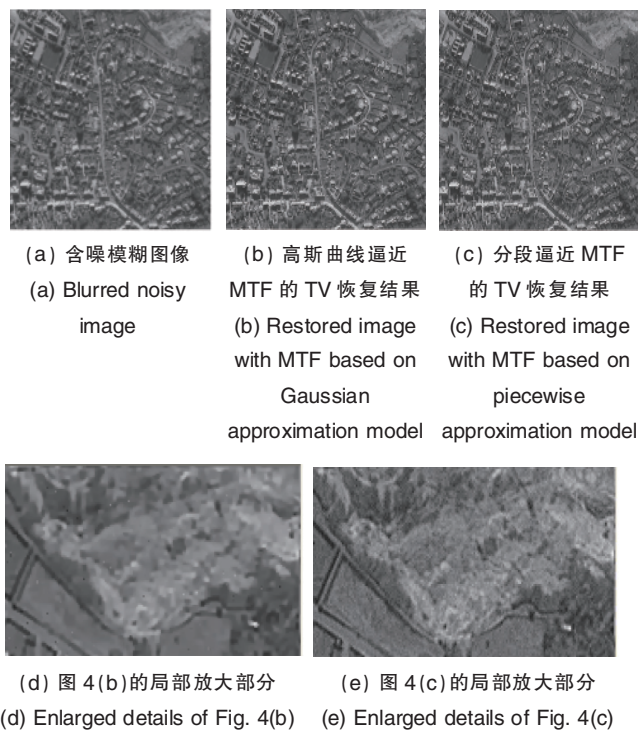


图 4 采用不同 MTF 模型的复原效果比较

Fig. 4 Restoration comparison with different MTF models

表 1 给出了本文提出的分段函数逼近 MTF 的恢复效果与基于高斯曲线模板逼近 MTF 的恢复效果之定量指标比较。从表 1 可以看出, 在采用本文分段函数逼近模型进行复原后, 在保持图像均值不变的前提下, 图像的方差由 764.1 提高到 1452.3, 相比较于采用高斯模型恢复后的方差, 信息量有了更大程度的提升。GMG 由 7.6159 增加到 21.3304, 使得图像

的边缘得到了增强;而关于 HVS 的度量也表明图像清晰度的改善是十分显著的。

表 1 不同 MTF 模型下复原图片的质量评价
Table 1 Quality evaluation of restored images with different MTF models

图像	均值	方差	灰度平均梯度	人类视觉系统评价指标
含噪模糊图像(输入)	0.3950	764.1	7.6159	1.0
高斯曲线逼近 MTF 的 TV 恢复图像	0.3950	1202.6	12.2833	0.9053
分段逼近 MTF 的 TV 恢复图像	0.3950	1452.3	21.3304	0.8145

参照图 4 及表 1 中的相关内容可以看出,相对于高斯模型,本文给出的 MTF 曲线补偿方法对于噪声复杂的模糊遥感图像有更好的适应性。

为了显示本文提出的快速总变分优化模型在处理遥感

图像上的优势,在采用本文提出的 MTF 模型的基础上,分别采用维纳滤波、传统的总变分优化方法与频域快速总变分优化的方法对如图 5(a)所示的一幅未知模糊类型的模糊遥感图像进行恢复,依次得到了如图 5(b)—5(d)所示的复原效果。图 5(e)—5(h)为各自的细节放大部分。

由图 5(a)—5(d) 知,复原后图像的纹理信息不同程度地得到了丰富。而对比图 5(e)和 5(h)可知,利用快速总变分优化恢复后的图像,高频信息的提升更为显著,即边缘等细节信息的恢复更为明显。由图 5(f)、5(h)可知,经过快速总变分优化方法复原后的遥感图像较维纳滤波恢复的结果,细节更清晰,纹理更丰富,边缘处的灰度对比也更加突出,因此整个图像的视觉效果更好。同时通过分别比较图 5(c)、5(d),图 5(g)、5(h)可知,采用快速总变分优化方法与采用传统 TV 方法相比,恢复效果得到了很好的保持。而通过综合表 2 给出的定量指标比较,可以看出本文提出的频域快速 TV 恢复算法在时效性方面具有更为明显的优势,不仅在 GMG、HVS 等质量指标上有不同程度的提升,而且其运行时间相对于传统的定点迭代求解总变分优化问题的方法减少了约 85%。

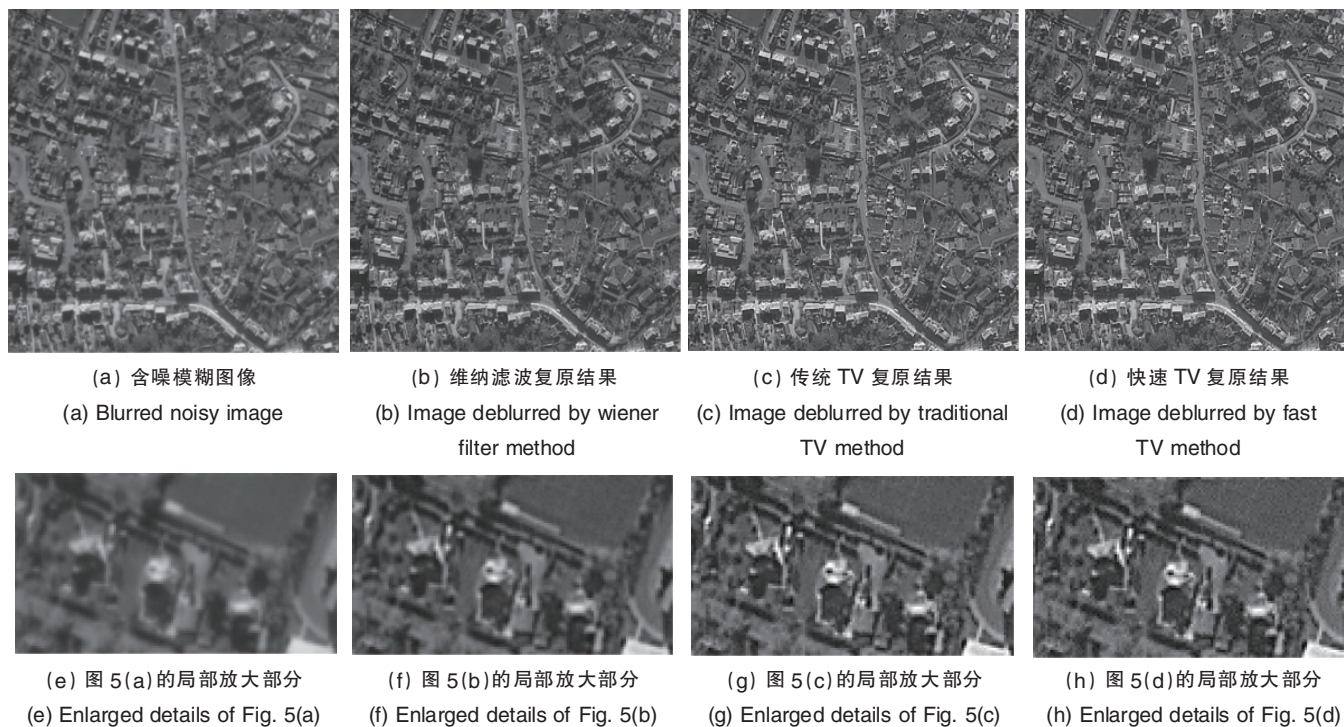


图 5 采用不同复原方法的处理效果比较

Fig. 5 Restoration comparison with different deblurring methods

表 2 采用不同复原方法的性能评价

Table 2 Quality evaluation of restored images by different deblurring methods

图像	均值	方差	灰度平均梯度	人类视觉系统评价指标	算法运行时间/s
含噪模糊图像(输入)	0.3969	919.3	7.7870	1.0	—
维纳滤波恢复输出图像	0.3890	1182.9	13.0978	0.9691	0.3688
传统 TV 恢复输出图像	0.3969	1678.9	20.1246	0.8425	19.0563
本文提出的频域快速 TV 恢复的输出图像	0.3969	1705.1	22.0070	0.8355	2.9375

5 结论

利用 MTF 曲线复原遥感图像, 很重要的一点是 MTF 曲线估计的准确性, 基于此本文引入了一种参数可调的分段函数逼近的 MTF 曲线估计模型。实验结果表明, 对于噪声程度较大、模糊成因复杂的遥感模糊图像, 该模型相对于传统的高斯曲线模型与 Sinc 曲线模型有更强的适应性。另外, 在基于 MTF 曲线的复原中, 为了有效地保留图像的边缘和细节同时对噪声进行有效的抑制, 本文将总变分优化模型应用到了图像恢复过程中, 同时对其进行了合理的改进与优化, 使其在时效性上得到了显著的提高。实验结果表明, 该方法在保证恢复性能指标的前提下, 运行时间上缩短为传统方法的 1/7—1/6。

参考文献 (References)

- [1] 周春平, 宫辉力, 李小娟. 遥感图像 MTF 复原国内研究现状 [J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(1): 27-32.
Zhou Chunping, Gong Huili, Li Xiaojuan. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(1): 27-32.
- [2] 陈强, 戴奇燕, 夏德深. 基于 MTF 理论的遥感图像复原 [J]. 中国图象图形学, 2006, 11(9): 1299-1305.
Chen Qiang, Dai Qiyang, Xia Deshen. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(9): 1299-1305.
- [3] Latry C, Despringre V, Valorge C. Automatic MTF measurement through a least square method [C]//Proceedings of the SPIE, 2004, 5570: 233-244, doi: 10.1117/12.564796.
- [4] Hwang H, Choi Y W, Kwak S, et al. MTF assessment of high resolution satellite images using iso 12233 slanted-edge method [C]//Proceedings of the SPIE, 2008, 7109: 710905, doi:10.1117/12.800055.
- [5] 曾勇, 于晋, 陈世平. 基于调制传递函数的航天遥感图像恢复研究 [J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(2): 11-17.
Zeng Yong, Yu Jin, Chen Shiping. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(2): 11-17.
- [6] Choi T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method [D]. Brookings, SD: South Dakota State University, 2002.
- [7] Viallefont-Robinet F, Léger D. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3531-3545.
- [8] 朱近, 潘瑜, 徐涛, 等. 基于弯曲刃边的中低分辨率遥感影像 MTF 计算方法 [J]. 遥感信息, 2009(3): 3-6.
Zhu Jin, Pan Yu, Xu Tao, et al. *Remote Sensing Information*, 2009(3): 3-6.
- [9] Osher R S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physical D*, 1992, 60: 259-268.
- [10] Chan T F, Wong C K. Total variation blind deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(3): 370-375.
- [11] Vogel C R, Oman M E. Fast, robust total variation-based reconstruction of noisy, blurred images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(6): 813-824.
- [12] Ding H Y, Bian Z F. Remote sensing image restoration based on TV regularization and local constraints [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1577-1580.
- [13] 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, 30(2): 18-25.
Wang Biao, Jiang Zhiguo, Zhao Danpei. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 18-25.
- [14] Kim J S, Cho M S. Study on the methods of digital image quality evaluation [C]. IEEE Region 10 Conference, TENCON, Nov 21-24, 2004, 1: 359-362.
- [15] 何静, 程新文, 姚远. CBERS01 卫星 02 号星图像 MTF 复原及其结果分析评价 [J]. 测绘科学, 2007, 32(2): 108-111.
He Jing, Cheng Xinwen, Yao Yuan. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(2): 108-111.
- [16] 杨威, 赵剡, 许东. 基于人眼视觉的结构相似度图像质量评价方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1): 1-4.
Yang Wei, Zhao Yan, Xu Dong. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(1): 1-4.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·

“2011 年全国桉树论坛”征文

由中国林学会主办的“2011 年全国桉树论坛”将于 2011 年 9 月 15—17 日在广州召开。
 征文范围: 桉树育苗、育种、栽培、生态、病虫害防治、加工利用、发展战略、可持续经营等所有桉树研究和技术。

征文截止日期: 2011 年 8 月 20 日。

通信地址: 广东湛江市人民大道中 30 号, 桉树中心 (524022) 周群英

联系电话: 0759-3382819; 传真: 0759-3380921; 电子信箱: qyzhou999@sina.com。

会议网址: www.csf.org.cn/html/xinwenzixun/tongzhigonggao/20110421/3694.html。

