

基于傅立叶-小波 HMT 方法的卫星图像恢复*

龙 兴 明

(重庆师范大学 物理与信息技术学院, 重庆 400047)

摘 要:卫星图像的恢复是一个病态逆问题。本文提出降质卫星图像在傅立叶域中进行 Wiener 反卷运算后,在复数小波域中利用隐 Markov 树(HMT)进行去噪的傅立叶-小波 HMT 图像恢复算法。典型卷积加噪线性降质卫星图像的仿真实验结果表明,建议的基于傅立叶-小波 HMT 方法在客观指标,以及视觉效果上都比常用的 Wiener 恢复算法有较大的提高。

关键词:病态逆问题;降质卫星图像;图像恢复

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2005)03-0080-03

Satellite Image Restoration Based on HMT-ForWaRD Method

LONG Xing-ming

(College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract:The satellite image restoration is an ill-condition problem. In this paper the degraded satellite images are restored by our suggested HMT ForWaRD method, in which the degraded image is deblurred by Wiener filter in Fourier domain and then the remained unwanted white gaussian noises are removed by hidden Markov tree (HMT) method in the complex wavelet domain. The simulation is done for solving the typical convolution and noised linear degraded satellite image and its results show that the suggested satellite image restoration method performs better than common Wiener restoration method by visual feelings and objective criteria.

Key words:ill-condition problem;degraded satellite image;image restoration

降质卫星图像的恢复是从卷积加性高斯噪声的观测图像 y 恢复理想图像 x 的估计的过程。该模型可以描述为,理想输入图像 x 与一个冲击响应为 h 的 LTI 系统相卷积;然后经加性高斯噪声干扰后获得观测图像 y 。该模型可由下式表示

$$y = h \otimes x + n \quad (1)$$

式(1)中, \otimes 表示卷积算子; n 是方差为 σ^2 的平稳高斯白噪声信号。

直接对式(1)进行广义求逆,所得恢复图像边缘振荡明显、视觉效果很差。近年来,许多作者为了提高图像恢复效果提出了大量的直接和迭代恢复算法,尤其是 R. Neelamani 提出的傅立叶-小波调整(ForWaRD)直接算法,它充分利用了傅立叶域与小波对信号的有效表示,从而极大地提高了图像恢复质量。本文讨论了基于傅立叶域的反卷,以及复数

小波域中 HMT 模型去噪的正则化(HMT ForWaRD)直接算法对降质卫星图像的恢复。并同常用的 Wiener 恢复算法进行了对比,发现建议算法对降质卫星图像的恢复无论在客观指标以及视觉效果上都有明显的优势。

1 傅立叶-小波 HMT 恢复算法

傅立叶-小波 HMT 恢复算法通过以下两个阶段来实现:傅立叶域中的平稳逆滤波以及小波域中的隐 Markov 树(HMT)去噪。

1.1 傅立叶域中的平稳逆滤波

平稳逆滤波器的频域响应为:

$$G_{\alpha}(f) = \left(\frac{1}{H(f)} \right) \left(\frac{|H(f)|^2 P_x(f)}{|H(f)|^2 P_x(f) + \alpha \sigma^2} \right) \quad (2)$$

其中, $H(f)$ 为式(1)中 h 的傅立叶变换, $P_x(f)$

* 收稿日期:2005-03-04 修回日期:2005-04-05

资助项目:重庆师范大学校级科研项目(04XLY019)

作者简介:龙兴明(1976-),男,四川绵竹人,讲师,硕士,研究方向:图像处理与计算机应用。

为信号 x 的功率谱密度, α 为调整参数, 当 $\alpha = 1$ 时, 式(2)称为 Wiener 逆滤波器。

用(2)式平稳逆滤波器对观测图像 y 进行滤波后有:

$$\hat{y} = \text{IFFT}\{\text{FFT}(y)G_{\alpha}(f)\} = G_{\alpha}^{wf}x + G_{\alpha}^{wf}n \quad (3)$$

(3)式中, IFFT 与 FFT 表示快速傅立叶逆变换与正变换; $G_{\alpha}^{wf}x$ 与 $G_{\alpha}^{wf}n$ 分别表示平稳逆滤波后的保留图像成份与泄露噪声部分。

1.2 小波域中的隐 Markov 树去噪

在复数小波域中, 采用 M. Crouse 提出的隐含 Markov 树模型对(3)式中的泄露噪声部分进行去噪处理似乎更为合理。由于该方法利用 HMT 模型描述小波域中自然图像在各尺度之间的相关特性, 因此提高了小波域中的图像去噪能力。(3)式在小波域中可以表示为:

$$\eta_{j,l} = \zeta_{j,l} + n_{j,l} \quad (4)$$

这里, $\eta_{j,l}$ 、 $\zeta_{j,l}$ 与 $n_{j,l}$ 分别表示 \hat{y} 、 $G_{\alpha}^{wf}x$ 与 $G_{\alpha}^{wf}n$ 在 j 尺度下第 l 个小波变换系数; $G_{\alpha}^{wf}n$ 为方差为 ν_j 的零均值白色高斯噪声。

对于参数为 $\theta\{P(s_l = n), \varepsilon_l^j, \sigma_l^j\}$ 的 HMT 模型中, 自然图像的小波系数 $\zeta_{j,l}$ 的概率分布 $P_{\zeta_{j,l}}(\zeta_{j,l})$ 通过 N_s 个零均值方差为 σ_l^j 的混合高斯模型表示; 并

且每个方差 σ_l^j 由相应的隐含状态 s_l 决定, 即:

$$P_{\zeta_{j,l}}(\zeta_{j,l}) = \sum_{n=1}^{N_s} P(\zeta_{j,l} | s_l = n) P(s_l = n) \quad (5)$$

这里, $P(s_l = n)$ 表示 N_s 个状态中第 n 个状态的概率; $P(\zeta_{j,l} | s_l = n) = \frac{1}{\pi\sigma_l^j} e^{-|\zeta_{j,l}|^2/\sigma_l^j}$ 表示在第 n 个状态下的小波系数的概率。

假定从父尺度 r 到子尺度 j 的转换概率矩阵 $\varepsilon_l^j = P(s_l = j | s_{p(l)} = r)$ 是相等的, 根据 EM 算法可以获得 HMT 模型的参数估计值 $\hat{\theta}$ 为:

$$\hat{\theta} = \{\hat{P}(s_l = n), \hat{\varepsilon}_l^j, \hat{\sigma}_l^j\} = \arg \max_{\theta} P(\{\eta_{j,l}\} | \theta) \quad (6)$$

若 j 尺度下的方差估计值 $\hat{\sigma}_l^j$ 通过观测图像的小波系数 $\eta_{j,l}$ 获得, 那么第 n 个状态的概率所需参数 σ_l^j 可根据(4)式对 ν_j 矫正后获得:

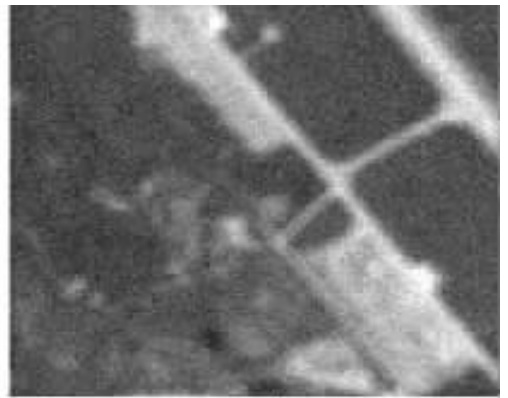
$$\sigma_l^j = (\hat{\sigma}_l^j - \nu_j)_+ = \begin{cases} \hat{\sigma}_l^j - \nu_j, & \hat{\sigma}_l^j - \nu_j > 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

因此, 去噪后小波系数 $\zeta_{j,l}$ 的估计值为:

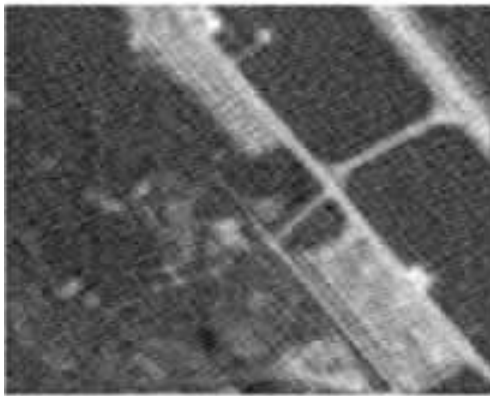
$$\hat{\zeta}_{j,l} = E_{\zeta} [P(\zeta_{j,l} | \eta_{j,l})] = E_{\zeta} [P(\eta_{j,l} | \zeta_{j,l}) P(\zeta_{j,l})] = \sum_{n=1}^{N_s} P(s_l = n | \eta_{j,l}) \frac{\sigma_l^j}{\sigma_l^j + \nu_j} \eta_{j,l} \quad (8)$$



(a) 卫星图像



(b) HMT模型去噪 (SNR=10dB)



(c) Wiener方法去噪 (SNR=10dB/PSNR=23.04dB)



(d) HMT模型去噪 (SNR=15dB/PSNR=33.56dB)

图 1 “海南岛”卫星图像去噪

2 降质卫星图像仿真

实际观测图的“海南岛”卫星图像如图 1(b), 假定该观测图为理想卫星图像(图 1(a))经过了拍摄系统的冲击响应 h (等效于半径为 7 个单位像素的圆形冲击函数)并受到白高斯噪声干扰后获得。

利用上述建议的算法对观测卫星图像进行恢复,首先根据式(3)进行 Wiener 反卷滤波处理;然后利用具有平移不变性的双树-复数小波变换(DT-CWT)对经过 Wiener 反卷后的图像进行小波分解;最后在复数小波域中利用 HMT 去噪,其中选择混合高斯模型的数目 $N_s = 2$, EM 算法迭代的初始值设为: $\hat{P}(s_l = n) = 1/N_s, \hat{\epsilon}_l^r = 0.3/N_s, \hat{\sigma}_l = \sigma_{J;wf}$ 。

利用建议的恢复算法仿真结果如图 1(d), 而采用经典的 Wiener 滤波去噪恢复结果如图 1(c)。可见建议的基于傅立叶-复数小波 HMT 方法的恢复图像比 Wiener 滤波去噪恢复具有更好的视觉效果。另外,从 ISNR(提升信噪比)和 SNR(信噪比)两个指标看,建议算法比 Wiener 滤波去噪恢复算法有约 1dB 的提高。

3 结论

通过利用提出的基于傅立叶-小波 HMT 恢复方

法对降质卫星图进行仿真实验。实验结果表明:建议的降质卫星图恢复算法是可行的,并且无论是从客观性能指标(ISNR/SNR)还是实际的视觉效果上它都比常用的 Wiener 反卷恢复算法有较大的提高。

参考文献:

- [1] 龙兴明,周静,马燕. 基于复数小波的图像恢复算法研究[J]. 信息与控制,2004,33(4):408-412.
- [2] SANCHEZ-AVILA C. Wavelet Domain Signal Deconvolution with Singularity-preserving Regularization[J]. Mathematics and Computers in Simulation,2003,61(3):165-176.
- [3] CROUSE M. Wavelet-based Statistical Signal Processing Using Hidden Markov Models[J]. IEEE Trans Signal Processing 1998,46(4):886-902.
- [4] NEELAMANI R. Inverse Problems in Image Processing [D]. Ph. D. thesis, Department of Electronics and Computer Engineering . Rice University,2003.
- [5] FERNANDES F C A. Directional Shift-insensitive Complex Wavelet Transforms with Controllable Redundancy [D]. Rice University, Department of Electronic and Computer , Anuary 2002.

(责任编辑 许文昌)

启 示

在中国科学技术信息研究所信息分析中心组织的评定中,本刊经过多项学术指标综合评定及同行多位专家评议推荐,自 2005 年第 1 期起,被收录为“中国科技论文统计源期刊”,即中国科技核心期刊。

本刊编辑部启

2005 年 8 月

