

文章编号: 2095-4980(2016)04-0497-06

基于自适应流形高维滤波的太赫兹图像滤波算法

朱书进, 李跃华

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对太赫兹图像分辨率差, 噪声严重和信噪比低等不足, 提出了一种基于自适应流形高维滤波的太赫兹图像降噪算法。算法利用中值滤波滤除太赫兹图像的强噪声点, 再利用自适应流形高维滤波去除图像中的大部分噪声, 最后通过基于拉普拉斯高斯算子的边缘增强对二次滤波后的结果图像进行图像增强。实验结果表明, 该算法对于太赫兹图像有良好的降噪效果, 在滤除图像中噪声的同时, 图像的边缘和细节部分也得到了较好的保留。

关键词: 中值滤波; 自适应流形; 太赫兹图像; 图像去噪

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0497

A terahertz image denoising algorithm based on adaptive manifolds and high-dimensional filtering

ZHU Shujin, LI Yuehua

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: To improve the poor resolution and low signal-noise ratio of terahertz image, by using the adaptive manifolds and high-dimensional filtering, a terahertz image denoising algorithm is proposed. The median filter is firstly used to remove the serious noise in the terahertz image. Then the filtered image is processed by the adaptive manifolds for high-dimensional filtering where the most of remained noise is removed in this step. Finally the Laplace of Gaussian based edge enhancement method is performed to enhance the output image. The experimental results show that the proposed method performs well in removing the noise with edge and details preserving.

Key words: median filter; adaptive manifolds; terahertz image; image denoising

太赫兹(THz)辐射是从 0.1 THz 到 10 THz 的电磁辐射(1 THz 对应的波长为 0.3 mm), 位于电磁波谱中微波与红外波段之间^[1]。太赫兹电磁波成像, 相对于红外线和 X 射线具有非常强的互补特征, 特别适合于可见光不能透过, 而 X 射线成像的对比度又不够的场合^[2]。并且太赫兹电磁波的光子能量极低, 不会对人体和材料造成破坏和伤害, 因此太赫兹电磁波成像技术在生物医学、国防军事、安全检测和环境监测等方面都展现出了巨大的应用前景。但受探测器灵敏度天线的低通效应、成像系统的衍射效应等限制, 通常在太赫兹实际成像实验中, 获取的太赫兹图像信噪比低, 模糊严重, 分辨率差。通常这样的图像效果无法满足人们对图像的后续研究要求和正常的视觉要求, 这些缺点严重阻碍了太赫兹成像技术的进一步发展。因此, 如何提高太赫兹图像的空间分辨力, 是太赫兹成像技术所急需解决的关键技术之一。

为了提高太赫兹图像的分辨力, 增加系统硬件复杂度, 不可避免地面临着高昂的经济代价或目前暂时无法解决的技术困难; 图像超分辨处理技术在不增加系统硬件的前提下可以获取高于系统分辨力的图像观测, 是比较经济且有效的方案。太赫兹图像的超分辨算法通常分为两方面^[3]: a) 去噪, 滤除与场景目标无关的随机信号(主要形式为噪声), 去噪的过程一般不考虑系统的点扩散函数; b) 去卷积或超分辨, 它通常指恢复孔径衍射受限截止频率之外的高频信息。目前, 太赫兹图像的超分辨算法主要有 Lucy-Richardson^[4], 基于相位分析的复原算法^[5]、基于 Fienup 傅里叶相位恢复的复原算法^[6]和基于传统图像降噪算法, 如空域滤波、高斯平滑、频域滤波^[7-10]等。

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 南京理工大学研究生创新计划资助项目(KYLX15_0374)

高维滤波近年来受到了高度的关注并广泛应用于图像处理、计算机视觉和计算摄影等。Gastal 等人在 2012 年提出了自适应流形高维滤波算法(Adaptive Manifolds for High-dimensional Filtering, AM-HF)^[11], 自适应流形高维滤波具有无需先验知识和降噪效果优异等特点, 同时该算法也是第一个具有线性复杂度的高维滤波器。基于以上优点, 本文提出了一种基于自适应流形高维滤波的太赫兹图像滤波算法。

1 自适应流形高维滤波算法

自适应流形高维滤波算法的基本原理是以低维数据为基础, 通过选定限定窗口并遍历操作建立高维数据, 然后采用抛雪球方法处理这些高维数据, 并以高斯距离为权重投影每个数据到自适应流形; 最后, 采用迭代法实现数据的平滑并将平滑值对所有数据进行插值得到滤波后的数据。自适应流形高维滤波算法在无需任何先验知识和估计输入噪声的情况下, 通过数据拓维、主成分分析、平滑滤波和插值运算等即可实现良好的复原和降噪效果。自适应流形高维滤波算法的算法流程见图 1。

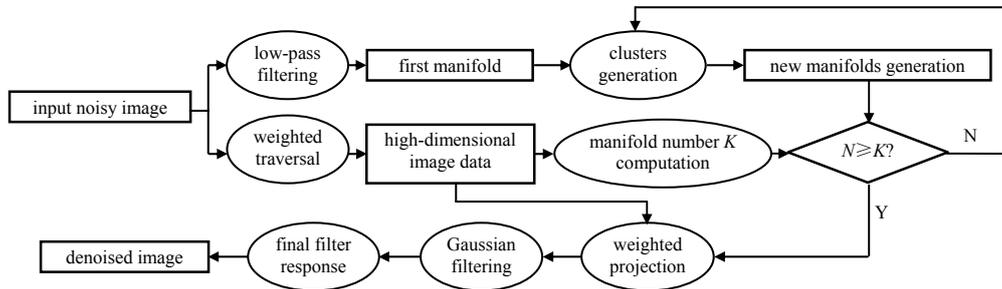


Fig.1 Flowchart of adaptive manifolds for high-dimensional filtering
图 1 自适应流形高维滤波算法流程图

对某一信号有 $f: S \subset \mathbf{R}^{d_s} \rightarrow R \subset \mathbf{R}^{d_r}$, 则假设该信号的空间 S 为 d_s 维, 范围 R 为 d_r 维。那么, 灰度图像的 $d_s=2$, $d_r=1$, 彩色图像的 $d_s=2$, $d_r=3$, 彩色视频图像的 $d_s=3$, $d_r=3$ 。给定一幅带噪图像, 经过限定窗口加权遍历后可建立一组高维的图像数据 f 。根据得到的高维数据图像计算自适应流形高维滤波的流形数 K :

$$K = 2^{2 + \max(2, \lceil H_S * L_R \rceil)} - 1 \quad (1)$$

式中: H_S 和 L_R 分别由空间标准差 σ_S 和范围标准差 σ_R 给出; $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。

$$H_S = \log_2 \sigma_S - 1 \quad (2)$$

$$L_R = 1 - \sigma_R \quad (3)$$

$$\sigma_S = \sqrt{\max \Sigma_S} \quad (4)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\min \Sigma_R} \quad (5)$$

假设 (p_i, η_{ki}) 为第 k 个 d_s 维的流形, η_{ki} 是由像素 $p_i \in S$ 扩展而来的第 k 个 d_s 维流形上的流形值。通过对原始带噪图像进行低通滤波, 产生第 1 个流形:

$$\eta_{1i} = (h_{\Sigma_S} * f)(p_i) \quad (6)$$

式中: $*$ 为卷积; h_{Σ_S} 为协方差矩阵为 Σ_S 的指数衰减线性递归低通滤波^[11]。

然后利用抛雪球算法将输入高维数据信号 f 中所有的像素 p_i 通过高斯距离加权投影到产生的流形中。 $\hat{\eta}_{ki}$ 表示加权投影后得到的值:

$$\Psi_1(\hat{\eta}_{ki}) = \phi_{\frac{\Sigma_R}{2}}(\eta_{ki} - f_i) f_i \quad (7)$$

式中 ϕ 为高斯滤波内核。

结合得到的投影值 $\hat{\eta}_{ki}$, 对每个自适应流形执行高斯滤波得到对应的平滑值 $\Psi_2(\hat{\eta}_{ki})$:

$$\Psi_2(\hat{\eta}_{ki}) = \sum_{p_j \in S} \phi_{\Sigma_\eta}(\hat{\eta}_{ki} - \hat{p}_j) f_j, \quad \Sigma_\eta = \begin{bmatrix} \Sigma_S & 0 \\ 0 & \Sigma_R/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\hat{p}_j = (p_j, f_j)$; Ψ_2 为 d 维空间的高斯滤波(一种卷积)。

利用流形 η_i 上像素的变化情况, 将其分成 C_+ 聚类(局部“向上”)和 C_- 聚类(局部“向下”)两大类。然后根据这些聚类产生新的流形 η_- :

$$\eta_-(p_i) = \frac{\sum_{p_j \in C_-} W_-(p_j) f_j}{\sum_{p_j \in C_-} W_-(p_j)} \quad (9)$$

$$W_-(p_j) = \theta(\eta_{1j} - f_j) h_{\Sigma_s}(p_i - p_j) \quad (10)$$

式中： h_{Σ_s} 为产生 η_1 的低通滤波； θ 为一个加权函数，其公式为：

$$\theta(\eta_{1j} - f_j) = 1 - \frac{\phi_{\Sigma_R}(\eta_{1j} - f_j)}{2} \quad (11)$$

流形 η_+ 也可以通过相似的步骤产生。流形 η_- 和 η_+ 同样经过式(4)~式(8)后可得到 η_- 、 η_{-+} 、 η_{+-} 和 η_{++} 。当流形的数量达到所需的数量 K 时，每个像素的最终响应 g_i 可通过所有流形上平滑值 $\Psi_2(\hat{\eta}_{ki})$ 的插值运算得到：

$$g_i = \frac{\sum_{k=1}^K w_{ki} \Psi_2(\hat{\eta}_{ki})}{\sum_{k=1}^K w_{ki} \Psi_2^0(\hat{\eta}_{ki})}, \quad w_{ki} = \frac{\phi_{\Sigma_R}(\eta_{ki} - f_i)}{2} \quad (12)$$

式中 $\Psi_2^0(\hat{\eta}_{ki})$ 为 $\Psi_1^0(\hat{\eta}_{ki})$ 的对应平滑值：

$$\Psi_1^0(\hat{\eta}_{ki}) = \frac{\phi_{\Sigma_R}(\eta_{ki} - f_i)}{2} \quad (13)$$

2 基于自适应流形高维滤波的太赫兹图像滤波

针对太赫兹图像分辨力差和噪声严重等特点，首先利用中值滤波处理太赫兹图像中的冲激噪声和条纹噪声，再利用自适应流形高维滤波滤除大部分的噪声。由于太赫兹图像经过 2 次滤波，降噪结果图像变得模糊，因此利用基于拉普拉斯高斯算子的边缘增强算法对降噪图像进行边缘增强。基于自适应流形高维滤波的太赫兹图像滤波的算法流程见图 2。



Fig.2 Flowchart of improved AMHF for terahertz image
图 2 基于改进自适应流形高维滤波的太赫兹降噪算法流程图

给定一幅太赫兹伪彩色图像 $f=[f_R, f_G, f_B]$ ，设置一定的滑动滤波窗，经过中值滤波后得到降噪图像 $g_{\text{median}}=[g_R, g_G, g_B]$ ：

$$g_{\text{median},i} = \text{med}\{f_i(x-m, y-n), (m, n \in W)\} \quad (14)$$

式中： med 为取中值操作； W 为二维滑动滤波窗口。

经过中值滤波后将降噪图像再进行自适应流形高维滤波处理，得到二次降噪图像 $g_{\text{AM-HF}}$ 。由于滤波也是一种平滑操作，因此经过 2 次滤波后，结果图像会产生过平滑效应。为了抑制过平滑现象和更好地识别目标，采用基于拉普拉斯高斯算法的边缘增强算法处理二次降噪图像。

$$g_{\text{log},i} = g_{\text{AM-NLM},i} + g_{\text{AM-NLM},i} * \nabla^2 G_i \quad (15)$$

式中 $\nabla^2 G_i$ 为拉普拉斯高斯算子：

$$\nabla^2 G_i = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{\sigma^2} - 2 \right) e^{-\frac{x_i^2 + y_i^2}{\sigma^2}} \quad (16)$$

式中 σ 为决定高斯滤波器宽度的高斯分布参数。

3 实验结果与分析

为了验证本算法的有效性，分别对仿真图像和实测图像进行实验。其中，中值滤波和自适应流形高维滤波分别记为 MF 和 AM-HF。MF 算法和本文的算法均用同一大小窗口，AM-HF 和本文的滤波算法参数设置也一致。为了客观地反映算法的性能，采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(Structural Similarity Index Measurement, SSIM)^[12]对算法进行评估。

$$SSIM(f, g) = \frac{(2\mu_f \mu_g + C_1)(\sigma_{fg} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2)} \quad (17)$$

式中： μ_f 和 μ_f^2 分别为 f 的均值和 f 的方差； σ_f 和 σ_{fg} 分别为图像 f 的标准差以及图像 f 和 g 的协方差； C_1 和 C_2 为小的常数，避免分母为 0 而出现不稳定的情况。

第 1 个实验见图 3，其中图 3(a)是加入高斯噪声和椒盐噪声的 Lena 图像，图 3(c)~图 3(e)分别为 MF,AM-HF 和本文算法的降噪结果图像。由图 3 可知，噪声图像经过中值滤波 MF 处理后，噪声得到了一定的抑制，但是大量噪声仍然未被滤除，图像质量不佳。这是由于中值滤波对椒盐噪声和冲激噪声的降噪性能优异，但对高斯噪声的滤波性能较差。对于 AM-HF 的降噪结果图像，大部分的噪声得到了有效的抑制，其图像质量明显优于 MF 的结果图像，但是依然残留了部分噪声。从主观视觉效果上，本文算法的结果图像效果最优，图像边缘和轮廓较为清晰，图像的平坦区域也较为光滑。本文的算法通过结合中值滤波和自适应流形高维滤波，同时利用拉普拉斯高斯算子的边缘增强算法，实现了对冲激噪声和椒盐噪声的优秀降噪性能，避免了 2 次滤波带来的过平滑现象，图像的边缘和细节较好地保留。



Fig.3 Results of three methods for Lena image
图 3 各算法对 Lena 图像的处理结果

图 4 表示 MF,AM-HF 和本文算法在不同噪声强度下的降噪性能。由图 4 可知，MF 在噪声强度较低时，算法性能与其他算法处于同一级别。但随着噪声强度的逐渐增强，MF 的性能表现非常不稳定，下降速度最快。AM-HF 总体的性能优于 MF，但在高噪时依然存在降噪不足的现象。本文的算法表现最为稳定，特别是在噪声较大时，其降噪性能明显优于 MF 和 AM-HF。从图 4(a)可以发现，MF 和 AM-HF 算法在低噪时略优于本文算法，这是由于拉普拉斯高斯算子的边缘增强对图像边缘进行增强的同时，图像中少量残留的噪声也被增强了，导致了 PSNR 的下降。

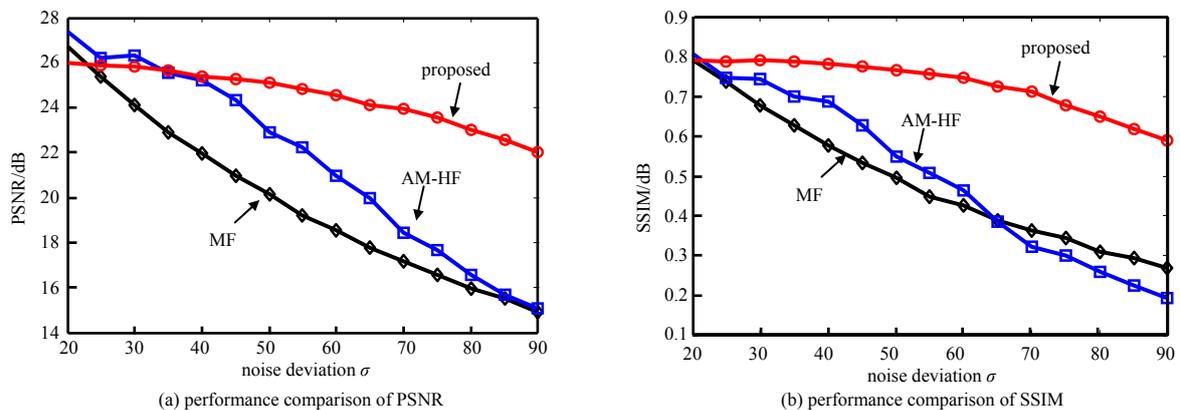


Fig.4 Performance of three methods in PSNR and SSIM
图 4 各算法 PSNR 和 SSIM 性能比较

第 2 个实验见图 5，其中图 5(a)为参考场景，图 5(f)为实测太赫兹图像，图 5(b)和图 5(g)分别为 MF 的处理结果和局部放大图，图 5(c)和图 5(h)为 AM-HF 的处理结果，图 5(d)和图 5(i)为经 MF 和 AM-HF 处理但未边缘增强的处理结果，图 5(e)和图 5(j)是本文算法的处理结果。从图 5 可以发现，MF 的处理结果图像中仍然残留大量噪声，并且结果图像较为模糊。AM-HF 的处理结果优于 MF 的结果，大部分噪声得到了很好的抑制，但是图像依然较为模糊。由于经过了 2 次滤波，图 5(d)图像存在过平滑现象，这也说明了后续增强算法的必要性。因此，本文算法的结果相对最优，图像的平坦区域较为光滑，图像细节得到较好的保留，同时图像的边缘最为清晰，更利于图像中的目标检测和识别。

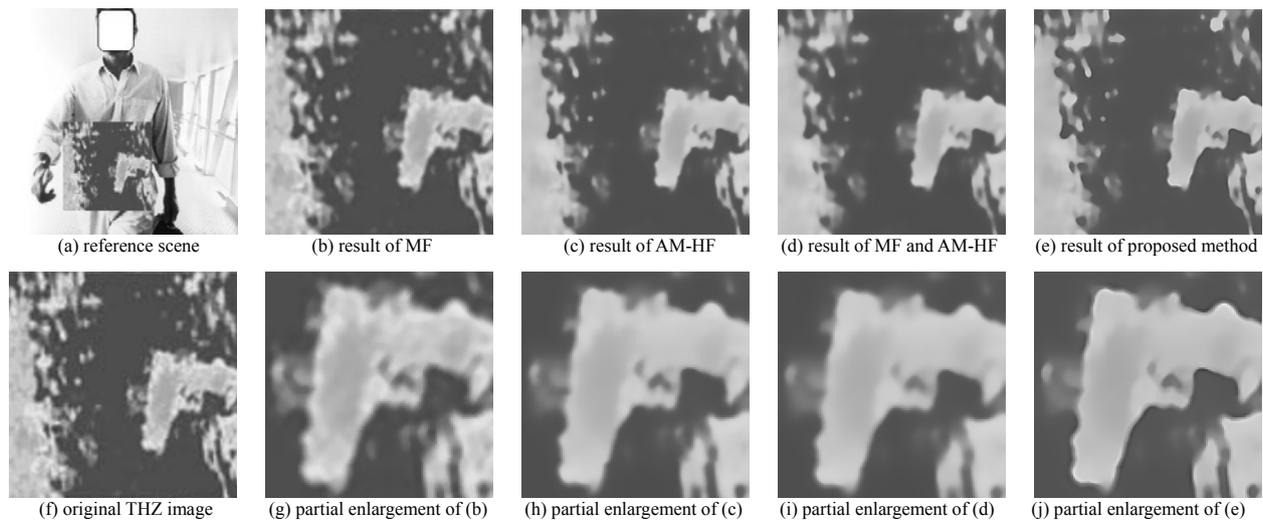


Fig.5 Results of three methods for terahertz image
图 5 各算法对太赫兹图像的处理结果

4 结论

本文结合了中值滤波和自适应流形高维滤波算法，获得了较好的降噪效果，同时利用了基于拉普拉斯高斯算子的边缘增强算法，避免了结果图像的过平滑。实验结果表明，本文算法对太赫兹图像有良好的降噪效果，结果图像的分辨力得到较大提升，图像质量也得到了较好的提高。由于基于拉普拉斯高斯算子的边缘增强算法对噪声较为敏感，图像的边缘和细节在被增强的同时，图像中残留的噪声和一些背景信息也得到了增强。如何在增强目标的边缘时避免背景和噪声增强是一个值得继续深入研究的问题。本文的中值滤波算法采用固定的滤波窗口，其无法根据不同的输入图像进行自适应地调整滤波窗口，这可能会导致算法的滤波性能不足或结果图像的模糊现象。由于中值滤波的滤波窗口可以根据图像像素是否为噪声进行自适应调整，因此如何检测和识别太赫兹图像中的噪声是另一个值得研究的问题。

参考文献：

- [1] 孙立民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. (SUN Limin,LI Jianzhong,CHEN Yu,et al. Wireless Sensor Networks[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2005.)
- [2] 韩煜,葛庆平,张存林,等. 基于小波变换的太赫兹图像识别[J]. 计算机工程与应用, 2008,44(2):241-244. (HAN Yu,GE Qingping,ZHANG Cunlin,et al. Terahertz image recognition based on wavelet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2008,44(2):241-244.)
- [3] WANG B Q,LI X. Near range millimeter wave radiometer passive image high resolution restoration[C]// Global Symposium on Millimeter Waves. Nanjing,China:[s.n.], 2008:325-328.
- [4] LI Q,YIN Q,YAO R,et al. Continuous-wave terahertz scanning image resolution analysis and restoration[J]. Optical Engineering, 2010,49(3):37007.
- [5] SONG Q,YU F,ZHAO Y,et al. The restoration of CW THz images based on phase analysis[C]// Proc. SPIE 7443, Applications of Digital Image Processing XXXII. San Diego,CA:[s.n.], 2009:74432G.
- [6] XIANG G,CHAO L,GUANG Y F. The realization of terahertz image reconstruction with high resolution based on the amplitude of the echoed wave by using the phase retrieval algorithm[J]. China Physics Letter, 2013,30(6):68401.
- [7] 徐利民,范文慧,刘佳. 太赫兹图像的降噪和增强[J]. 红外与激光工程, 2013,42(10):2865-2870. (XU Limin,FAN Wenhui, LIU Jia. Terahertz image noise reduction and enhancement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(10):2865-2870.)
- [8] 朱维文,赵跃进,朱慧时,等. 改进的均值滤波算法在太赫兹成像中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013,42(5):1241-1246. (ZHU Weiwen,ZHAO Yuejin,ZHU Huishi,et al. Improved median filter algorithm in the application of terahertz imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(5):1241-1246.)