

基于小波去噪的 T-ray 图像复原

吴 伟¹, 毕 岗²

(1. 浙江大学 信息学院 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027;
2. 浙江大学 城市学院 信息与电子工程系, 浙江 杭州 310015)

摘要: 针对实时 THz 脉冲(T-ray)成像系统所成图像分辨率低、受 $1/f$ 相关噪声干扰严重的特点, 提出一种新的基于小波去噪的 T-ray 图像复原算法。对 T-ray 图像进行离散小波变换后, 先利用广义交叉确认估计出各个分辨率层的噪声阈值, 然后对每个分辨率层的高频子带进行迭代去噪, 最后对去噪后的 T-ray 图像采用 Jasson-Van-Cittert 算法进行复原处理以提高分辨率。实验结果表明, 该方法在提高 T-ray 图像分辨率的同时, 能显著地抑制 THz 成像系统的 $1/f$ 相关噪声。创新之处在于以广义交叉确认作为 T-ray 图像中 $1/f$ 噪声的估计方法, 大幅度提高了图像信噪比(~ 5 dB), 避免了噪声带来的复原算法中的不适定问题, 达到较好的图像复原效果。

关键词: T-ray 图像; 小波去噪; $1/f$ 噪声; 广义交叉确认; 图像复原

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2776(2005)05-0592-05

Image restoration in T-ray imaging based on wavelet de-noising

WU Wei¹, BI Gang²

(1. Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. City College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to improve the spatial resolution and reduce $1/f$ noise of real-time THz pulses (T-ray) imaging system, a new method based on wavelet de-noising and Jasson-Van-Cittert (JVC) image restoration algorithm was presented. After making wavelet transform to a T-ray image, generalized cross validation (GCV) was used to estimate the optimal threshold and de-noising was done in the high frequency sub-bands respectively. The JVC image restoration algorithm was applied to the de-noised T-ray image for resolution improving. Experimental results show that this method can suppress $1/f$ noise successfully and improve the resolution of T-ray image significantly.

Key words: T-ray imaging; Wavelet de-noising; $1/f$ noise; Generalized cross validation; Image restoration

0 引言

THz 脉冲成像^[1], 或称“T-ray 成像”技术自 1995

年由 Hu 和 Nuss 最初实现以来, 一直得到了人们广泛的关注。THz 成像系统基于 THz-TDS(THz-时域谱)技术, 具有相位敏感的成像能力。由于某些材料在 THz

波段具有特有的吸收性质和不同的折射率大小,利用透射 THz 脉冲的相位信息,不同的材料很容易被分辨。因此,THz 成像技术在安全检查、生产质量控制、化学成份分析和生物医学诊断等领域展示了特有的应用潜力^[1,2]。

关于 THz 脉冲成像系统的详细描述,可参阅参考文献[3]。最初的 T-ray 成像系统基于逐点扫描成像,有三个明显的弱点:所成图像分辨率低、噪声干扰严重和成像速度缓慢(10~20 pixels/s)^[1]。由于衍射极限的限制,T-ray 图像的分辨率通常只有几百微米,远达不到实际应用的要求。为了克服这一不足,采用了近场成像技术,比较成功的有 Zhang 的动态孔径,Mitrofanov 的亚微米孔径,van der Valk 的无孔径尖锥技术等,目前分辨率基本上都达到了 10 μm 左右^[4-6]。THz 成像系统的噪声源主要有由超短脉冲激光器和啁啾 THz 响应导致的 1/f 噪声,激光光子的量子噪声(泊松分布)以及电光晶体中的群速度失配。1/f 噪声是一种弱平稳的相关噪声,也是 THz 成像系统主要的噪声源。在采用相干检测技术和锁相放大器后,可以很好地抑制 1/f 噪声,检测到 THz 脉冲的信噪比可达到 10^[7]。近场成像和锁相放大器分别提高了 T-ray 图像的分辨率和信噪比,然而在大多数情况下,对成像速度的要求是很高的,传统的逐点扫描明显不能满足要求,于是提出了基于 CCD 的实时成像系统^[3]。但在实时成像系统中,无法再使用近场成像技术和利用锁相放大器,且一个 THz 脉冲的能量被分散到整个成像面,因此图像的信噪比很低、分辨率也不高。

我们的目标是利用数字图像处理方法提高实时 T-ray 图像的分辨率和信噪比。一般而言分辨率的提高可以通过图像复原来得到,然而复原本身是一种不适定问题(ill-posed problem),对噪声十分敏感,容易在提高分辨率的同时放大噪声。虽然许多复原算法都会进行正则化(Regularization)以处理这种噪声放大,但这需要更多的技巧和对噪声先验的了解^[8]。因此更好的办法是在图像复原处理之前对 T-ray 图像进行去噪处理。基于此,提出首先利用小波变换去除 T-ray 图像的 1/f 噪声,并结合 Jasson-Van-Cittert (JVC) 图像复原算法,在有效去除图像噪声的同时得到 T-ray 图像的较好复原。考虑到通常小波去噪理论都是假设噪

声是平稳的白噪声,而 THz 脉冲成像系统中的 1/f 噪声具有完全不同的统计性质,因此我们需要首先对 1/f 噪声的小波变换性质做出分析,并找到相应的 1/f 噪声小波处理方法。

1 T-ray 图像 1/f 噪声小波处理

1.1 基本小波理论

小波变换将信号在一个由小波函数 $\psi(x)$ 的整数平移和尺度伸缩所构成的规范正交基上展开。对于信号 $f(t)$,可以用小波正交基表示,也可以由其小波变换系数重构:

$$f_n^m = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_n^m(t) dt \quad (1)$$

$$f(t) = \sum_m \sum_n f_n^m \psi_n^m(t) \quad (2)$$

式中 m, n 分别表示伸缩和平移指数; f_n^m 为 $f(t)$ 在平移伸缩系 $\psi_n^m(t)$ 上的小波变换。对于二进制小波变换,小波基函数可以表示为:

$$\psi_n^m(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - n) \quad (3)$$

小波基 $\psi(t)$ 的傅里叶变换记为 $\Psi(\omega)$, 则 $\psi_n^m(t)$ 的傅里叶变换为:

$$F[\psi_n^m(t)] = 2^{-\frac{m}{2}} \Psi(2^{-m} \omega) e^{-j(n2^{-m})\omega} \quad (4)$$

1.2 1/f 相关噪声的小波去噪

小波去噪主要有如下三个步骤:

- (1) 对信号进行小波分解;
- (2) 对小波系数进行阈值化去噪;
- (3) 利用去噪后小波系数重构信号。

去噪的关键在于阈值的估计和阈值的处理方式。通常采用 Donoho 和 Johnstone 提出的阈值估计公式(5)和(6)所示的软阈值处理方法。

$$\delta = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (5)$$

式中 N 为信号长度; σ 为噪声的方差。

软阈值:

$$f_{n,\delta}^m = \begin{cases} 0 & |f_n^m| < \delta \\ 1 - \frac{\delta}{|f_n^m|} & |f_n^m| \geq \delta \end{cases} \quad (6)$$

该阈值被证明在平稳高斯白噪声下是渐进最优阈值^[9]。

在THz成像系统中的1/f噪声是一种弱平稳的相关噪声,Donoho阈值只有对于平稳高斯白噪声才具有最优意义,因此如对1/f噪声使用此阈值函数必将影响去噪效果。为此必须对1/f噪声的小波变换性质进行分析,以得到合适的1/f噪声小波阈值处理方式。

考虑如下的T-ray图像序列模型:

$$y(t) = g(t) + x(t) \quad (7)$$

式中 $y(t)$ 表示 T-ray 图像; $g(t)$ 表示背景图像; $x(t)$ 为 1/f 噪声。1/f 噪声是一种弱平稳相关的随机过程,其功率谱密度为:

$$S(\omega) = \sigma_x^2 / |\omega|^\lambda \quad (8)$$

式中 σ_x^2 是方差; λ 是 1/f 过程的参数, $0 \leq \lambda \leq 2$ ^[10]。1/f 噪声的自相关函数可以写成:

$$R(\tau) = E[x(t)x(t-\tau)] \quad (9)$$

它与谱密度 $S(\omega)$ 构成一个傅里叶变换对。

对公式(7)两边进行小波变换,得到:

$$y_n^m = g_n^m + x_n^m \quad (10)$$

x_n^m 的自协方差:

$$\begin{aligned} E[x_n^m x_n^{m'}] &= E \left[\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_n^m(t) x(\tau) \psi_n^{m'}(\tau) dt d\tau \right] = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E[x(t)x(\tau)] \psi_n^m(t) \psi_n^{m'}(\tau) dt d\tau = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R(t-\tau) \psi_n^m(t) \psi_n^{m'}(\tau) dt d\tau = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_n^m(t) [R(t) * \psi_n^{m'}(t)] dt \end{aligned}$$

根据 Parseval 能量关系,及公式(4)、(8)和(9)得到:

$$E[x_n^m x_n^{m'}] = \frac{2^{-(m+m')/2}}{2\pi} \times$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_x^2}{|\omega|^\lambda} \Psi(2^{-m}\omega) \Psi^*(2^{-m'}\omega) e^{-j(n2^{-m}-n'2^{-m'})\omega} d\omega \quad (11)$$

从公式(11)可以看出 1/f 噪声 $x(t)$ 的小波系数 x_n^m 是非平稳的。

我们的目标是估计出噪声项 x_n^m 的阈值 δ , 然后通过公式(6)对 y_n^m 进行阈值化处理去除 x_n^m , 得到干净的小波系数 g_n^m , 从而通过小波重构公式(2)得到去噪后的 T-ray 图像 $g(t)$ 。然而问题是 1/f 噪声 $x(t)$ 的小波变换 x_n^m 是非平稳的, 从而无法根据公式(4)得到一个统一的去噪阈值 δ 。

然而通过公式(11)可以发现, 当 $m=m'$ 时, 有:

$$E[x_n^m x_n^{m'}] = \frac{2^{-m}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_x^2}{|\omega|^\lambda} |\Psi(2^{-m}\omega)|^2 e^{-j(n-n')2^{-m}\omega} d\omega \quad (12)$$

即对每一个小波变换分辨率层 m, x_n^m 的自相关函数 $E[x_n^m x_n^{m'}]$ 只与 x_n^m 和 $x_n^{m'}$ 间的位置差 $n-n'$ 有关。因此在每一个小波变换分辨率层 m 上, 1/f 噪声 $x(t)$ 的小波变换 x_n^m 是弱平稳的。特别是, 当 $n=n'$ 时还可以得到 x_n^m 的方差 $Var(x_n^m) = \sigma^2 2^{-\lambda m}$, 其中

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_x^2}{|\omega|^\lambda} |\Psi(\omega)|^2 d\omega$$

至此, 得到 1/f 相关噪声在各个分辨率层上是弱平稳的, 因此可以在每个分辨率层上对小波系数进行各自的阈值计算。即在每一个分辨率层 m 上会有不同的阈值 δ_m , 然后可以根据公式(6)软阈值法去噪。

接下来需要对阈值 δ_m 做出合理的估计。均方误差函数(MSE)是常用的阈值选取准则, 它指出了重建信号同原信号在均方意义上的偏离程度, 但是由于在实际中, 原信号是无法预知的。广义交叉确认(Generalized Cross Validation, GCV) 不需要原信号的先验值和噪声方差的估计, 它作为 MSE 的一个估计, 可以得到渐进意义上的最优阈值^[11]。

广义交叉确认估计最优阈值 δ 的公式为:

$$GCV(\delta) = \frac{\frac{1}{N} \left\| y_n^m - y_{n,\delta}^{m'} \right\|^2}{\left[\frac{N_0}{N} \right]^2} \quad (13)$$

式中 $\| \cdot \|$ 表示基于内积的欧几里德范数; N 为小波系数总个数; N_0 表示通过公式(6)软阈值法置为 0 的小波系数个数。

对于带有 $1/f$ 噪声的图像信号 $y(t)$, 其小波变换系数 y_n^m 需要在每个分辨率层上进行各自的阈值计算, 易求得分辨率层 m 上的 GCV 为:

$$GCV(\delta_m) = \frac{\frac{1}{N_m} \left\| y_n^m - y_{n,\delta}^{m'} \right\|^2}{\left[\frac{N_{0,m}}{N_m} \right]^2} \quad (14)$$

2 Jasson-Van-Cittert 复原算法

Schildknecht 等人^[12]于 2002 年首次采用 Jasson-Van-Cittert 图像复原算法对 T-ray 图像进行去卷积复原。但由于没有进行去噪处理, 复原的效果并不理想。本文把图像复原放在 T-ray 图像小波去噪之后, 可以保证复原算法不受噪声干扰。JVC 算法是一个迭代的连续去卷积过程, 通过不断自动调整松弛项系数, 收敛到原始图像的一个近似。其算法定义如下^[13]:

令上标 k 表示迭代次数, 从 $k=0$ 开始, 初始值 $O^{(0)}(x, y) = I(x, y)$ 。

$$I^{(k)}(x, y) = O^{(k)}(x, y) \otimes PSF(x, y) \quad (15)$$

$$O^{(k+1)}(x, y) = O^{(k)}(x, y) + r(x, y) [I(x, y) - I^{(k)}(x, y)] \quad (16)$$

这里

$$r(x, y) = C \left[1 - \frac{2}{B-A} \left| O^{(k)}(x, y) - \frac{1}{2}(A+B) \right| \right] \quad (17)$$

式中 A, B 分别为所复原图像 $O^{(k)}(x, y)$ 的最小值和最大值; C 是松弛项常数。考虑公式(7)的 $r(x, y)$, 可以发现不管 $O^{(k)}(x, y) \rightarrow A$ 或 B , 都有 $r(x, y) \rightarrow 0$ 。因此, 若在任何 (x, y) 处的迭代 $O^{(k)}(x, y)$ 接近于 A 或 B 的

话, 下一个迭代值 $O^{(k+1)}(x, y)$ 及随后的迭代值将仍为此值, 这限定了输出 $O(x, y)$ 必须服从 $A \leq O(x, y) \leq B$ 。另一方面, $r(x, y)$ 的存在使得该迭代是一个高度非线性的、受约束的过程, 并保证了迭代的收敛性和收敛速度。

3 T-ray 图像处理实验结果与分析

综合上文之讨论, 可以建立如图 1 所示的 T-ray 图像处理框图模型(WD-JVC), 并对图 2(a)所示的 T-ray 图像处理。

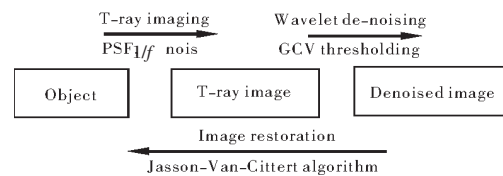


图 1 T-ray 图像处理框图模型

Fig.1 Flow diagram of T-ray image processing

从图 2(b)可以看出, 不经过小波去噪, 直接地进行 JVC 去卷积复原处理, 使得图像噪声在去卷积的过程中被放大。图 2(c)表明小波去噪有效抑制了 T-ray 图像的 $1/f$ 噪声, 但图像依旧模糊, 分辨率很低。图 2(d)显示了小波去噪和 JVC 图像复原算法结合的优点, T-ray 图像的 $1/f$ 噪声得到有效抑制, 分辨率同时得到明显提高。

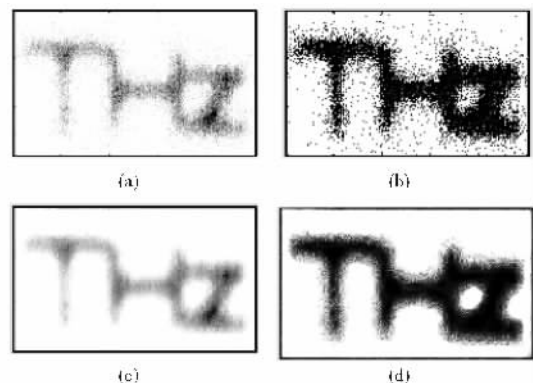


图 2 T-ray 图像处理前后的比较

Fig. 2 Comparison of T-ray images before and after various processing stages

复原算法好坏的一个常用标准是均方误差函数:

$$MSE = \frac{1}{N} \|g' - g\|^2 \quad (18)$$

表示处理后的图像与真实图像之间的误差,而实际上我们往往无法得知真实图像的先验知识。前文已经指出广义交叉确认是 MSE 的一个估计,计算时不需要真实图像的先验信息,故可以方便地作为评价各种复原算法好坏的指标。

表 1 为本文提出的基于小波去噪的 T-ray 复原算法(WD-JVC)与经典的维纳滤波法和 Jasson-Van-Cittert 复原算法的比较。

表 1 三种算法处理效果的比较

Tab.1 Comparison of the result of three different algorithms

	Original image	Wiener filters	JVC algorithm	WD-JVC
GCV	754.7	3122.4	2824.7	193.4
SNR/dB	15.8	9.7	10.1	21.3

4 结束语

THz脉冲所成图像分辨率低、受 $1/f$ 噪声干扰严重,普通的图像复原算法在提高分辨率的同时会对噪声有放大作用,从而导致图像信噪比的降低。基于弱平稳相关 $1/f$ 噪声的小波变换只在每一个分辨率层上平稳这一事实,提出在 T-ray 图像信号小波变换的各个分辨率层上分别进行小波去噪,其中每一层的去噪阈值采用广义交叉确定原理进行估计。最后利用 Jasson-Van-Cittert 图像复原算法对去噪后的 T-ray 图像进行复原处理,以提高图像分辨率。实验表明,相对于传统的去卷积图像复原算法,本文的方法在有效去除 T-ray 图像噪声的同时能显著提高分辨率。

参考文献:

- [1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [2] Mittleman D M, Rune H, Nuss M C. T-ray imaging [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 679-692.
- [3] Mickan S, Abbott D, Munch J, et al. Analysis of system trade-off for terahertz imaging [J]. Microelectronics Journal, 1999, 31(7): 503-514.
- [4] Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging [J]. Optics Communications, 1998, 150: 22-26.
- [5] Chen Q, Zhang X C. Semiconductor dynamic aperture for near-field terahertz wave imaging [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(4): 608-614.
- [6] Yuna T, Xu J Z, Zhang X C. Development of terahertz wave microscopes [J]. Infrared Physics and Technology, 2004, 45: 417-425.
- [7] Cai Y, Brener I, Lopata J, et al. Coherent terahertz radiation detection: direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection [J]. Applied Physics Letters, 1998, 73: 1604-1606.
- [8] Gonzalez R C, Wintz P. Digital Image Processing [M]. New York: Addison-Wesley, 1977. 221-225.
- [9] Stephane Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. Carolina: Academic Press, 1999. 344-346.
- [10] Ninness B. Estimation of $1/f$ noise [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(1): 32-46.
- [11] Jansen M, Malfait M, Bultheel A. Generalization cross validation for wavelet thresholding [J]. Signal Process, 1997, 56: 463-479.
- [12] Schildknecht C, Kleine-Ostmann T, Knobloch P, et al. Numerical image enhancement for THz time-domain spectroscopy [A]. Terahertz Electronics Proceedings, IEEE Tenth International Conference [C]. USA: IEEE, 2002. 57-160.
- [13] Huang T S. Picture Pressing Digital Filtering [M]. London: Springer-Verlag, 1979. 242-244.

征订消息

我部尚有部分会议资料(《2002年全国光电技术学术交流会论文集》(上、下册),《2004年全国光电技术学术交流会论文集》(上、下册)),内容涉及光电总体技术;光电探测;制导及目标特性研究;光电子器件技术;光学系统设计及光学元件加工技术;图像处理与目标识别技术;光电系统测试与仿真技术;光电系统应用。有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系。