

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0229-05

基于马尔可夫随机场的太赫兹扫描图像 去噪算法仿真研究

李 琦 尹奇国 丁胜晖 姚 睿 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 在太赫兹(THz)扫描成像中,激光光斑的大小限制了成像的分辨率,同时激光器功率波动噪声的存在严重影响了成像质量。基于马尔可夫随机场(MRF)的模拟退火算法(SA)应用了 Bayesian 推理准则,考虑了模型的先验知识,使得图像处理的可信度提高。将基于 MRF 模型的方法应用于仿真的 THz 扫描图像的噪声处理中,仿真研究了高斯噪声、降温次数和内循环次数等参数对去噪效果的影响。实验中去噪效果通过图像的信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)评价,测得了降温次数和内循环次数与信噪比和均方根误差的关系曲线。仿真实验结果表明,利用 MRF 模型的方法能够较好地抑制高斯噪声,并且图像的细节也能得到较好的保持。

关键词 图像处理;太赫兹;马尔可夫随机场;去噪

中图分类号 TN957.52 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0229

Simulation of Continuous-Wave THz Scanning Image Denoising Based on Markov Random Field

Li Qi Yin Qiguo Ding Shenghui Yao Rui Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract In terahertz (THz) scanning imaging system, the image resolution is constrained by the size of beam spot, while the image quality is greatly affected by the fluctuation of the laser output power. Considering the prior information, Bayesian rule is applied to improve the confidence of image processing based on Markov random field (MRF) and simulated annealing (SA) algorithm. An MRF model is applied to denoise the simulated THz scanning image. Simulations are carried out to study the effect on the denoising result from the parameters such as Gaussian noise, cooling times, and inner iterative times. The effect of the denoising method is evaluated by observing the signal to noise ratio (SNR) and the root mean square error (RMSE). The relationships among cooling times, inner iterative times, SNR and RMSE are obtained. The simulation results show that the MRF method can effectively suppress the Gaussian noise while preserving the image details as well.

Key words image processing; terahertz; Markov random field; denoising

1 引 言

由于光源和探测器的限制,目前的太赫兹(THz)成像技术一般采用逐点扫描的形式^[1,2],因而 THz 光源输出功率的波动、光斑尺寸的大小以及 THz 探测器的性能,直接影响到成像质量,并且使得图像噪声的统计特性比较复杂。另外,由于 THz 波段处在远红外,相对于可见光与红外而言,成像分辨率较低。目前国内外相关研究者已对 THz 图像的降噪处理做

了相关研究^[3~5]。德国 C. Schildknecht 等^[3]提出了 Jansson-Van-Cittert(JVC)算法用于 THz 时域光谱图像的数字图像增强处理,通过此算法可以改善实验中由于低分辨率及有限聚焦孔径引起的图像质量下降问题。在国内,浙江大学、首都师范大学和哈尔滨工业大学的相关研究者分别用滤波的方法对扫描和面阵 THz 图像进行了相关研究^[6~9]。在 THz 图像处理过程中,采用一般的图像滤波方法,由于没有考虑

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-23

作者简介: 李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像方面的研究。E-mail:hit_liqi@yahoo.com.cn

THz 成像模型的先验知识和噪声的特性,可能丢失图像信息,影响图像特征提取与识别的结果。

1984 年, S. Geman 和 D. Geman 将随机场理论应用到图像处理中, 引入了马尔可夫随机场(MRF)。MRF 本质上是一个条件概率模型, 结合 Bayesian 准则, 可以把问题归结为求解模型的最大后验概率(MAP)估计, 进而转化为求解最小化能量函数的组合优化问题。通常这一问题可由模拟退火(SA)算法来解决。SA 算法理论上是一种全局优化算法, 能够使能量函数收敛于全局的最小值。因此 SA 算法被广泛地应用于图像的去噪、分割、图像识别等领域, 并且通过不断改进其新解生成函数及温度更新函数, 取得了较好的效果。

连续 THz 波扫描图像在扫描过程中, 由于光斑有效孔径等因素的影响, 导致了在扫描相邻点时, 光斑覆盖区域发生重叠, 从而使得探测某一点的信息时包含了其邻域点的信息。而对于两个没有光斑覆盖区域重叠的点来说, 其取值是互不影响的。即, 此类 THz 图像具有马尔可夫性。2009 年, 本课题组将马尔可夫模型和模拟退火算法应用于真实的 THz 扫描图像去噪处理中, 取得了一定效果^[10]。为了更好地运用此方法, 有必要对影响方法效能的因素进行仿真研究。为此, 本文在已有的工作基础上, 仿真研究了高斯噪声、降温次数和内循环次数等参数, 对基于马尔可夫模型的太赫兹扫描图像去噪效果的影响。

2 连续 THz 成像模型及基于 MRF 的去噪原理

连续 THz 成像模型^[10, 11]由图 1 给出。从图中可以看出, 由于激光光斑具有有限的光斑半径, 扫描过程中对某一点的探测成像, 实际上是由透过实物后的激光光束在探测器上的合成结果, 某点的探测值 g_p 可表示为

$$g_p = \iint_D h(r)(1 - \alpha)\exp(-\beta L) ds, \quad (1)$$

式中 α, β 和 L 分别表示成像样品的反射损耗、吸收系数和厚度, D 是成像系统的孔径光阑, $h(r)$ 为 THz 激光光斑的光场分布, 可表示为

$$h(r) \propto \left[\frac{2J_1\left(\gamma \frac{kdr}{f}\right)}{\gamma \frac{kdr}{f}} \right]^2, \quad (2)$$

式中 $J_1(x)$ 是贝塞尔函数的一阶表达式, d/f 是孔径比, k 是 THz 光的波数, γ 是比例系数, 与激光输出的光斑分布有关。

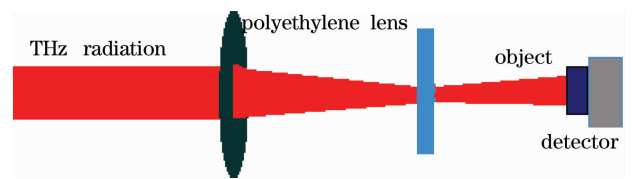


图 1 连续 THz 波透射扫描简图

Fig. 1 Schematic of CW THz transmission imaging

THz 扫描图像的分辨率受到许多成像条件的影响, 主要有成像扫描步长、THz 激光光斑光场分布以及成像光学系统的孔径光阑大小, 这些条件在成像系统中互相限制, 并且从本质上受 THz 光波长衍射极限的限制, 从而使得 THz 图像的分辨率在一定程度上难以继续提高。

基于 MRF 的图像恢复方法是建立在 Bayesian 准则之上的, 设 Y 为退化图像, X 为恢复图像, 则有

$$P(X | Y) = \frac{P(Y | X)P(X)}{P(Y)}, \quad (3)$$

式中 $P(Y)$ 为常数, $P(X)$ 为恢复图像的先验概率, $P(Y|X)$ 为退化图像 Y 的条件概率分布(也称为似然函数), $P(X|Y)$ 为后验概率。这样, 图像的恢复可归结为求解最大后验概率问题。先验概率 $P(X)$ 可以用吉布斯(Gibbs)分布来描述, 且考虑 THz 图像噪声近似服从高斯分布, 后验概率可表示为

$$P(X | Y) \propto \exp\left[-\sum_s \frac{1}{2\sigma^2}(y_s - x_s)^2 - \sum_{c \in C} V_c(x_s, s \in c)\right], \quad (4)$$

式中 c 表示簇, C 为由所有 c 构成的集合, V_c 称为簇势能函数。

求(4)式最大化问题可等价于求能量函数 $U(X|Y)$ 最小值。

$$U(X | Y) = \sum_s \frac{1}{2\sigma^2}(y_s - x_s)^2 + \sum_{c \in C} V_c(x_s, s \in c), \quad (5)$$

能量函数是一个客观性和主观性的共同体, 这是 MRF 方法优于一般方法的重要原因。

利用 SA 算法优化能量函数, 得到优化图像。采用的降温策略是

$$T^{(i+1)} = kT^{(i)}, \quad (6)$$

式中 T 代表温度, k 为小于 1 的衰减系数, i 为迭代次数。采用图像的信噪比(SNR)和均方根误差

(RMSE)评价图像的去噪效果,其定义为,

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N s(i,j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [r(i,j) - s(i,j)]^2}, \quad (7)$$

$$f_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [r(i,j) - s(i,j)]^2}, \quad (8)$$

式中 $s(i,j)$ 代表未加噪声的仿真图像, $r(i,j)$ 为噪声图像或使用降噪方法处理得到的结果。

3 仿真实验结果及分析

首先设计了一个仿真物,物体上各区域有不同的厚度分布,并通过仿真程序获得了反映厚度分布真实信息的理想 THz 透射图像,进而仿真得到激光光斑直径 2 mm,孔径光阑 2 mm,步长 1 mm 的实际透射图像^[11]。图 2 分别给出仿真物、理想 THz 透射图像和仿真 THz 图像。对比图 2(b),2(c)不难看出,仿真的实际图像较仿真的理想图像模糊,这正是表示由于相邻点激光光斑有部分重叠引起了图像分辨率降低。

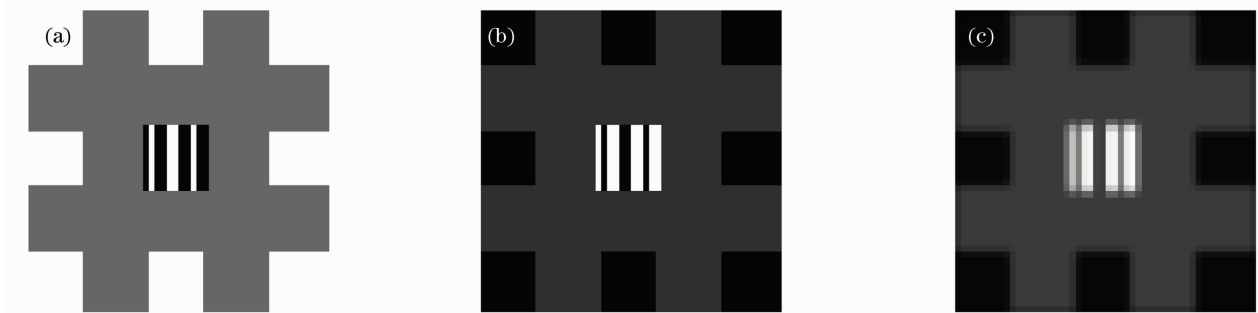


图 2 THz 透射成像的仿真图像。(a)仿真物,(b)仿真的理想图像,(c)仿真的实际图像

Fig. 2 Simulation results of THz transmission imaging

(a)simulation object, (b)simulation ideal image, (c)simulation actual image

在图 2(c)的基础上分别加入方差为 0.001 和 0.005 的高斯噪声并进行了处理(见图 3);降温次数设为 200 次, k 取值为 0.99,内循环次数设为 1。从处理后的效果可以看出,利用 MRF 模型的方法能

够较好地抑制噪声,并且图像的细节也能较好地保持,特别是明显减少了目标边缘处的模糊。表 1 记录了其 SNR 和 RMSE(10 次平均结果)。

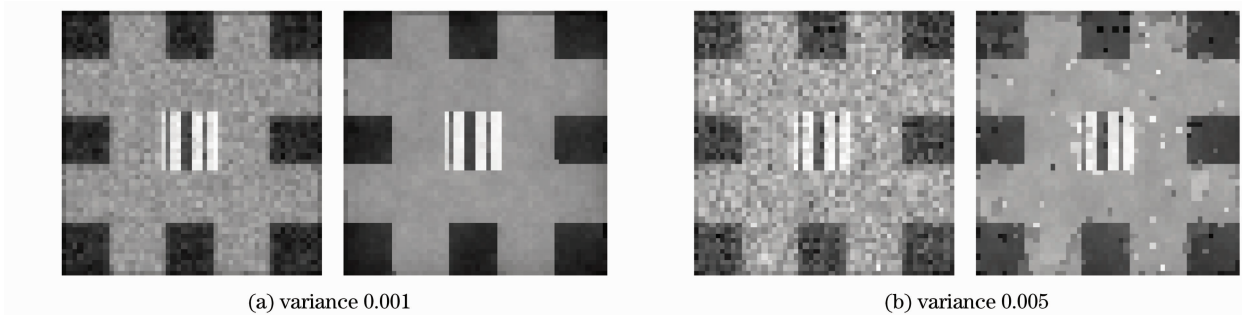


图 3 仿真图像及去噪结果

Fig. 3 Simulation images and denoising results

表 1 信噪比和均方根误差结果

Table1 Results of SNR and RMSE

	Simulation images with noise		MRF results	
	Variance 0.001	Variance 0.005	Variance 0.001	Variance 0.005
SNR /dB	21.8680	17.8342	23.7298	20.0318
RMSE	0.0201	0.0321	0.0163	0.0249

SA 算法中降温次数对去噪效果有较大影响。当降温次数不够时,将使得噪声抑制效果不足,而降温次数过多又将浪费过多的时间,因此,降温次数的定

性研究对于算法的应用有着重要的意义。图 4 为在低噪声的情况下不同降温次数时的仿真图像处理结果。SNR 和 RMSE 随降温次数的变化关系如图 5 所

示。从图 5 可以看出,在降温次数较少时,去噪效果不明显,并且产生波动。这是由于在高温时将以较大概率接收差解,从而导致图像质量有恶化的可能,这是算

法跳出局部收敛达到全局收敛所需要的。但是当降温次数逐渐增大时,去噪效果显著提升,并在达到一定次数后趋于饱和,这与 SA 算法全局收敛的性质相吻合。

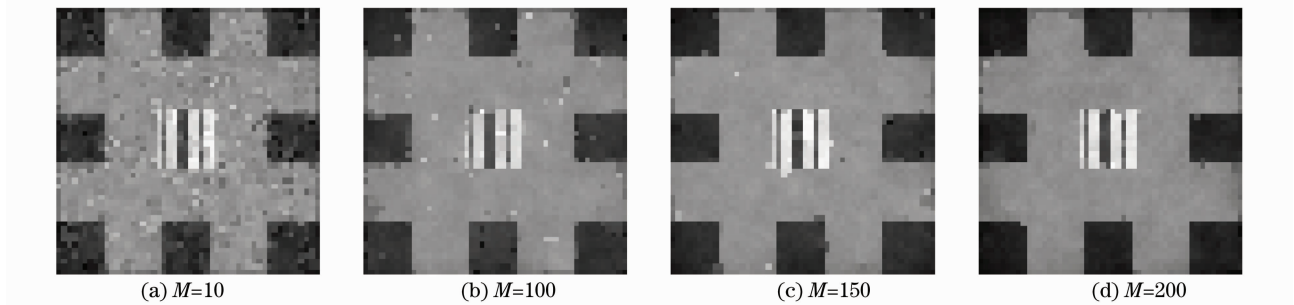


图 4 不同降温次数的去噪结果

Fig. 4 Denoising results with different cooling times

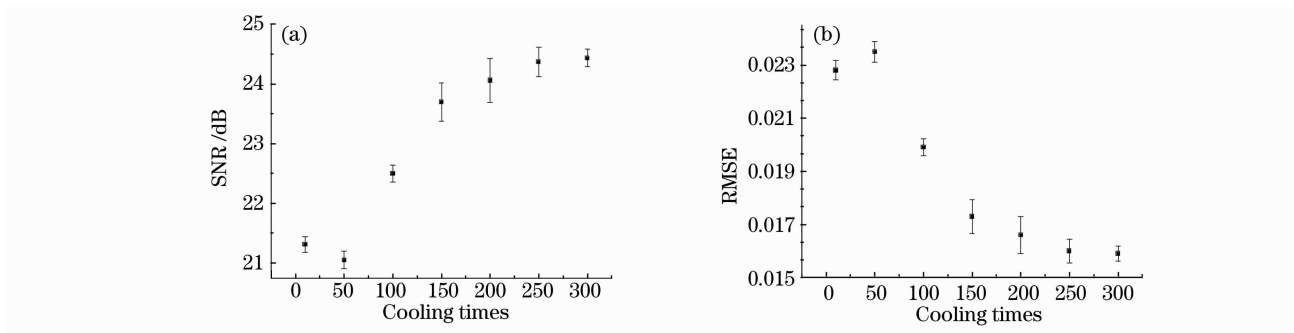


图 5 SNR(a)和 RMSE(b)与降温次数的变化关系

Fig. 5 Correlation between SNR (a) or RMSE (b) and cooling times

内循环次数是指在模拟退火过程中在同一温度下进行的迭代次数,内循环次数也在一定程度上影响着图像去噪的效果,研究内循环次数对去噪效果的影响可以为进一步提升图像的去噪效果提供参考。SNR 与 RMSE 随内循环次数变化关系如图 6

所示。此实验中,降温次数为 100 次,从图 6 可以看出,随着内循环次数的逐渐增大,图像去噪的效果也越来越好,在足够次数后达到饱和。从而在图像去噪过程中如果时间条件允许的情况下,可以通过适当增加内循环的次数来提升图像去噪的效果。

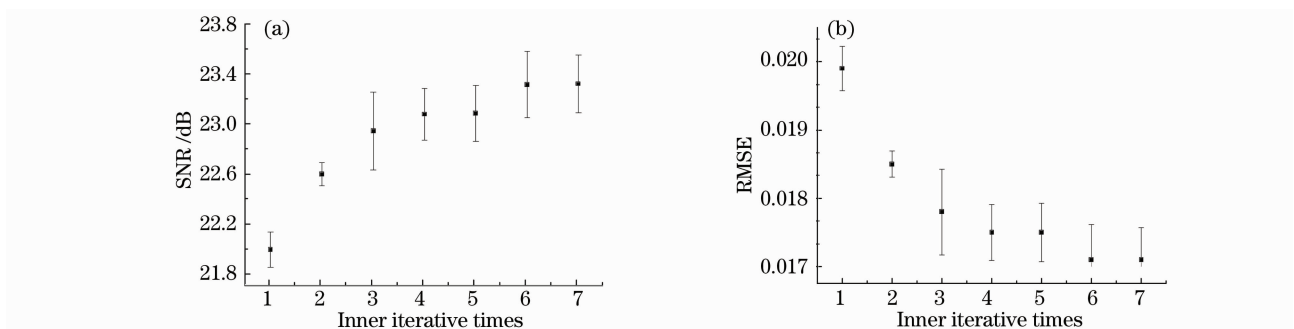


图 6 SNR(a)和 RMSE(b)与内循环次数变化关系

Fig. 6 Correlation between SNR (a) or RMSE (b) and inner iterative times

4 结 论

通过连续 THz 成像模型模拟出的实际透射图像,仿真研究了基于 MRF 的去噪算法。实验结果表明,利用 MRF 模型的方法能够较好地抑制噪声,并且

图像的细节也能较好地保持,特别是明显减少了仿真的实际图像中由于光学系统造成的目标边缘处的模糊,这是此方法的最大优点。在降温次数 100 次,内循环次数 6 次的条件下,可以得到较好去噪效果。

参 考 文 献

- 1 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
杨昆, 赵国忠, 梁乘森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 2 Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 50~52
邓朝, 邢春飞, 吕默等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 50~52
- 3 C. Schildknecht, T. Kleine-Ostmann, P. Knobloch *et al.*. Numerical image enhancement for THz time-domain spectroscopy [C]. 2002 IEEE Tenth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings, 2002, 157~160
- 4 Chae-Hwa Shon, Won-Yong Chong, Seok-Gy Jeon *et al.*. High speed terahertz pulse imaging in the reflection geometry and image quality enhancement by digital image processing [J]. *Int. J. Infrared Milli. Waves*, 2008, **29**(1): 79~88
- 5 Eddie L. Jacobs, Steve Moyer, Charmaine C. Franck *et al.*. Concealed weapon identification using terahertz imaging sensors [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120J
- 6 Wu Wei, Bi Gang. Image restoration in T-ray imaging based on wavelet denoising[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(5): 592~596
吴伟, 毕岗. 基于小波去噪的 T-ray 图像复原[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(5): 592~596
- 7 Zou Yuanyuan, Ge Qingping, Han Yu *et al.*. Stripe noise of THz image processing based on frequency filtering [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, **45**(17): 241~243
邹圆圆, 葛庆平, 韩煜等. 基于频域滤波的 THz 图像条纹噪声处理[J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(17): 241~243
- 8 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李琦, 姚睿, 单纪鑫等. 基于热像仪的 THz 成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 9 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. Preliminary study on 2.5 THz array real-time imaging and image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 84~88
李琦, 姚睿, 单纪鑫等. 2.5 THz 面阵实时成像及图像处理初步研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 84~88
- 10 Qi Li, Qiguo Yin, Rui Yao *et al.*. Continuous-wave THz image denoising based on Markov random field and simulated annealing algorithm [C]. *SPIE*, 2009, **7385**: 73850L
- 11 Qi Li, Qiguo Yin, Rui Yao *et al.*. Continuous-wave terahertz scanning image resolution analysis and restoration [J]. *Opt. Eng.*, 2010, **49**(3): 037007