

太赫兹计算机辅助层析图像重构算法仿真研究

李运达, 李琦, 刘正君, 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: 由于太赫兹波具有独特的性质, 使得太赫兹成像技术成为目前的研究热点。太赫兹层析成像可以获得物体横截面的分布信息并可获得物体的三维重构图像, 因此也受到了广泛关注。文中对连续太赫兹层析成像进行了仿真研究。分别使用滤波反投影算法 (FBP) 和改进的联合代数重建算法 (MSART) 进行图像重构, 并且分析比较了高斯低通滤波 (GLPF) 以及数学形态学等数字图像处理方法对改善重构图像质量的效果。仿真结果表明: 在文中的仿真条件下, 使用 MSART 算法及相应的图像处理方法所需的最少投影方向数可以达到 9, 与真实成像实验结果相吻合。

关键词: 太赫兹; 计算机辅助层析成像; 仿真; 图像处理

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1228-08

Simulation on THz computed tomography image reconstruction methods

Li Yunda, Li Qi, Liu Zhengjun, Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150081, China)

Abstract: Terahertz (THz) radiation has many particular characteristics, which make THz image technology become the hot research area. As the distribution information of the cross section and the 3D reconstruction image of a sample can be obtained, THz computed tomography (CT) also attracts wide extensive attention worldwide. The simulation research was done based on continuous THz CT. The filtered back-projection (FBP) method and the modified simultaneous algebraic reconstruction technique (MSART) method have been utilized to reconstruct cross-section images, and the efficiency of the image processing operations such as the Gaussian low-pass filter (GLPF) and the morphological functions in mathematical morphology like open operation and close operation in improving reconstruction image quality has been compared and analyzed. It can be inferred from the simulation results that the required number of the projection directions using the MSART method and the corresponding image processing operations can only be 9, which is inosculate to the real imaging experiment results.

Key words: terahertz; computed tomography; simulation; image processing

收稿日期: 2012-09-08; 修订日期: 2012-10-13

作者简介: 李运达(1989-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹成像技术方面的研究。Email: liyunda_hit@yahoo.cn

导师简介: 李琦(1963-), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。Email: liqi2013@hit.edu.cn

0 引言

太赫兹波可穿透塑料、纸张、衣服等非金属和非极性物质,且较 X 辐射具有较低的光子能量,因此太赫兹成像技术受到广泛关注^[1-4]。计算机辅助层析成像(CT)可获得物体内部结构信息,并可重构出物体的三维图像。目前太赫兹 CT 已有近十年的发展历史^[5-8],最近几年主要集中在提高成像速度^[9]、三维重构及算法^[10-11]研究上。

目前在太赫兹 CT 应用最多的图像重构算法是滤波反投影算法(FBP)。这种方法运算速度较快,但为获得畸变较小的重构图像,需要尽可能多的投影方向数,一般需要 36 个以上,即每隔 5°测量一次,这样必然耗费大量时间。近年来,基于解线性方程组的迭代算法(如联合代数重建算法(SART)和顺序子集期望值最大化方法(OSEM))备受太赫兹 CT 研究人员的关注。这类算法运算速度较 FBP 慢,但是不需要较多的投影方向数,随着计算机和数字信号处理器的飞速发展,这类算法在提高成像时间和减少对目标辐射量等方面显示出越来越大的优势。参考文献[12]利用研究重建大尺寸物体的太赫兹 CT 重构方法比较了减少投影线个数对 FBP、SART 以及 OSEM 的重构效果的影响,验证了迭代方法可在没有明显降低重构图像质量的前提下减少成像时间的结论。实验中所需的最小投影方向数为 12。笔者的课题组也进行了利用 CO₂ 泵浦连续太赫兹气体激光器进行 2.52 THz 连续太赫兹层析成像的实验;并且为了提高成像速率,提出了基于改进的 SART 算法和形态滤波等图像处理方法对由实验获得的连续太赫兹投影图像进行重构。实验中进行图像重构所需的最小投影方向数仅为 9^[13]。

国内尚无利用参考文献[13]提出的方法进行太赫兹 CT 图像重构仿真的研究,文中对此重构方法进行了仿真,进一步证明了所用算法良好的重构效果以及可用于快速成像的能力。

1 算法原理

假设入射 THz 光是理想光束。当 THz 光照射物体时,出射光的衰减服从比尔指数定律,即物体的投影函数 $R(t, \theta)$ 可以表示为由物体吸收系数 $\mu(x, y)$ 沿

THz 传播路径的线积分,数学表达式如下:

$$R(t, \theta) = -\ln(I/I_0) = \int_{L(r, \theta)} \mu(x, y) dl \quad (1)$$

式中: r 为投影点距旋转中心轴的水平偏移量; $L(r, \theta)$ 表示 THz 激光的传播路径。

将物体按照固定步长平移,可以测量得到某一角度的所有投影数据。然后从 0°~180°等角度间隔转动精密转台,测得不同角度下的扫描平面的投影数据。将投影数据进行一维傅里叶变换,根据中心切片定理再对其进行二维傅里叶反变换即可得到物体横截面的分布函数。此即为 FBP 算法,其数学表达式如下:

$$\mu(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} P(v, \theta) \exp[j2\pi v(x\cos\theta + y\sin\theta)] |v| dv d\theta \quad (2)$$

将待重构图像区域 F 离散化为 $N=W \times H$ 的数字化图像 $F(i, j)$, 其中 W 和 H 分别代表图像的长度和宽度,且每一个网格代表一个像素。则待重构图像 F 与投影数据 R 之间满足的关系式为:

$$AF = R \quad (3)$$

式中: A 为 $M \times N$ 阶系数矩阵; $M = N_\theta \times N_p$ 为总投影数; N_θ 为投影方向数; N_p 为每个方向上的投影数目。

通过比较原始投影数据 R 与对第 k 次迭代结果 $F_{k,s-1}$ 直接使用 Radon 变换获得的投影数据 R_k , 从而对图像 $F_{k,s}$ 的每个数据进行更新。当所有的投影数据都被使用后一次迭代循环即完成; 当达到所设迭代次数后结束计算。此算法即为 SART 算法^[12], 迭代公式为:

$$F_{k,s} = F_{k,s-1} + \lambda \frac{\sum_p A(\theta_d, p) \left[\frac{R - R_k}{D} \right]}{\sum_p A(\theta_s, p)} \quad (4)$$

式中: $D = \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} A(\theta_d, p)$ 为图像横截面 (θ_s, p) 的范数;

$0 \leq d < N_\theta, p \in [0 \cdots N_p - 1]$, λ 为松弛因子,一般取 $\lambda < 1$, 作用是加速收敛。初始图像 $F_{0,0}$ 通常设为单位矩阵。

改进的联合代数重建算法(MSART)公式如下^[14]:

$$F_{k,d} = F_{k,d-1} + \lambda \frac{\sum_p A(\theta_d, p) \left[\frac{R - R_k}{D} \right] F_{k,d-1}(\theta_d, p)}{\sum_p A(\theta_d, p) F_{k,d-1}(\theta_d, p)} \quad (5)$$

高斯低通滤波器可表示为:

$$H(\mu, \nu) = e^{-D^2(\mu, \nu)/2\sigma^2} \quad (6)$$

式中: σ 为标准差, 且 σ 通常取作截止参数 D_0 。 $D(\mu, \nu)$ 为原点与傅里叶变换点的距离。

开运算和闭运算是数学形态学中重要的形态学函数。开运算和闭运算定义如下^[15]:

$$B \circ E = (B \ominus E) \oplus E \quad (7)$$

$$B \cdot E = (B \oplus E) \ominus E \quad (8)$$

式中: B 为输入图像; E 通常表示为结构系数 (Structure Element, SE)。 $B \oplus E$ 表示图像 B 被 E 膨胀, 表达式为 $B \oplus E = \{z | (\hat{E})_z \cap B \neq \phi\}$ 。 $B \ominus E$ 表示图像 B 被 E 腐蚀, 表达式为 $B \ominus E = \{z | (E)_z \subseteq B\}$ 。

为了对图像重构质量进行数值评价, 采用了平均结构相似度测量 (MSSIM) 指数^[16]:

$$MSSIM(F, F') = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(F_j, F_j') \cdot c(F_j, F_j') \cdot s(F_j, F_j') \quad (9)$$

式中: F 和 F' 分别代表参考图像和测试图像; $I(F_j, F_j')$ 、 $c(F_j, F_j')$ 、 $s(F_j, F_j')$ 分别表示测试图像和参考图像中对应像素的亮度、对比度和结构度。则:

$$I(F_j, F_j') = \frac{2\mu_{F_j} \mu_{F_j'} + C_1}{\mu_{F_j}^2 + \mu_{F_j'}^2 + C_1} \quad (10)$$

$$c(F_j, F_j') = \frac{2\sigma_{F_j} \sigma_{F_j'} + C_2}{\sigma_{F_j}^2 + \sigma_{F_j'}^2 + C_2} \quad (11)$$

$$s(F_j, F_j') = \frac{2\sigma_{F_j F_j'} + C_3}{\sigma_{F_j}^2 + \sigma_{F_j'}^2 + C_3} \quad (12)$$

式中: μ_{F_j} 和 $\mu_{F_j'}$ 、 $\sigma_{F_j}^2$ 和 $\sigma_{F_j'}^2$ 、 $\sigma_{F_j F_j'}$ 分别表示以对应的参考图像和测试图像像素为中心的图像窗口的均值、方差、协方差。常数 $C_1 = (K_1 L)^2$ 、 $C_2 = (K_2 L)^2$ 、 $C_3 = C_2$, 文中取值为: $L = 1$, $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$ 。

2 模型仿真

首先建立仿真模型, 为方便讨论, 假设一个像素的尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 建立一个外形尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的方形模型, 其内部有一个尺寸为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的十字孔型结构, 样本周围空气部分的尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。假设吸收系数为 0.14 mm^{-1} , 且折射率为 1.02, 故折射的影响可以忽略不计, 模型图像如图 1 所示。在此选择扫描步长为 1 mm 。在理想无噪声情况下, 分别在投影方向数为 180、120、90、72、60、45、36、30、20、18、15、12、10、9 和 6 时采用 FBP 算法 (斜

坡滤波) 和 MSART 算法进行图像重构, 其中 MSART 算法迭代 80 次。投影方向数为 30、20、18、15、12、10、9 和 6 时所得的结果如图 2 所示。

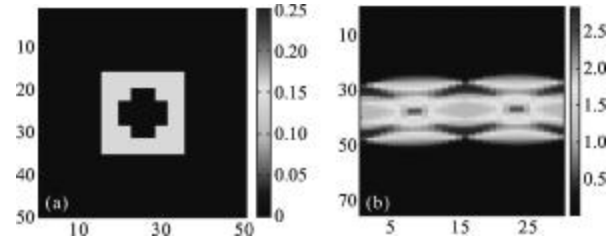


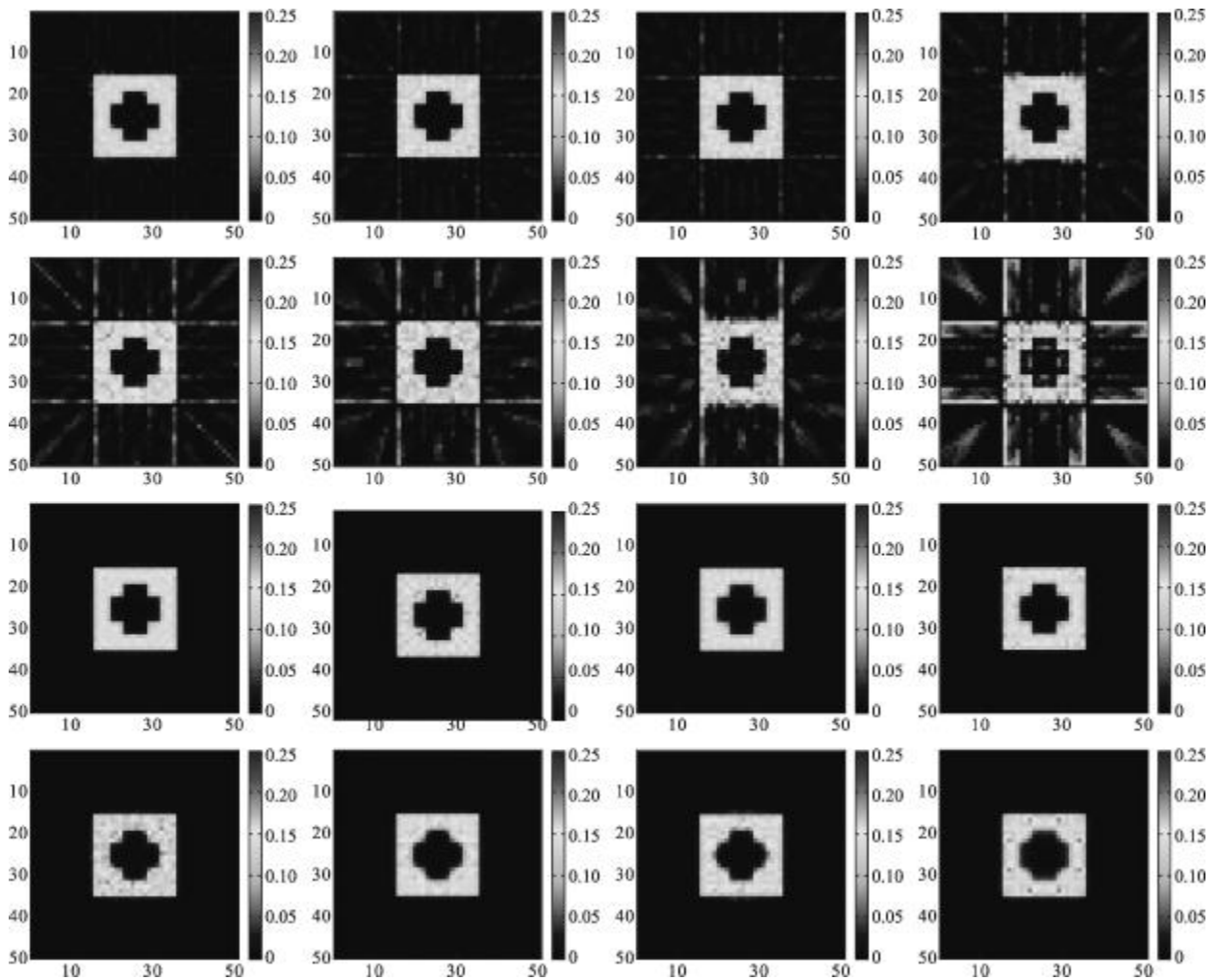
图 1 仿真模型图像及投影方向数为 30 时投影数据图

Fig.1 Images of simulation sample and projection data when $N_\theta = 30$

由图 2 可以看出, 采用 MSART 算法获得的重构图像比 FBP 算法的重构质量更好。从 MSSIM 曲线也可以看出明显差异, 其分量值曲线显示 FBP 算法重构结果的亮度比较参数和对比度比较参数受投影方向数减少的影响较大。FBP 算法 (斜坡滤波) 在投影方向数很少时重构质量很差, 出现较多的伪影, 图像分布不均匀。而且从 MSSIM 值曲线可以看出 FBP 算法所需投影方向数拐点为 30, 当投影方向数小于 30 时重构质量下降很明显, 说明在理想无噪声条件下对此模型进行准确重构所需最少投影方向数为 30。MSART 算法可以获得较好的重构图像, 模型周围伪影较少, 但可以看出当投影方向数减小为 6 时模型内部的十字结构已经变形, 说明此种条件下采用 MSART 算法所需的最少投影方向数大于 6, 而且此时投影方向数为 9 时重构效果较好, 此时 MSSIM 值为 0.9428。另外, 随着投影方向数的减少重构图像中的模型部分出现较多高频噪声, 这是由算法本身造成的, 所以对重构图像进行低通滤波或开运算、闭运算等图像处理操作以提高重构质量。

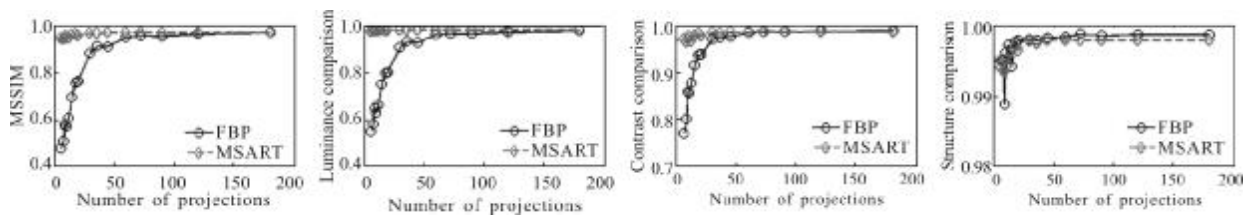
选择截止参数为 0.30 的 GLPF 对 MSART 算法获得的重构图像进行频域滤波, 迭代次数选为 100 次, 并对 FBP 算法获得的重构图像进行 Hann 滤波, 所得结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 对 FBP 算法采用 Hann 滤波可以在一定程度上减少伪影的数量, 但是效果不明显, 仍无法完全去掉伪影, 从 MSSIM 曲线也可看出此时所需的最少投影方向数仍为 30; 对 MSART 算法重构图像进行高斯低通滤波可以使重构图像上的高频噪



(a) FBP 算法重构图像(前 8 幅)和 MSART 算法结果(后 8 幅)

(a) Reconstructed images using FBP (first 8 images) and MSART (last 8 images)



(b) MSSIM 值及其分量曲线分布

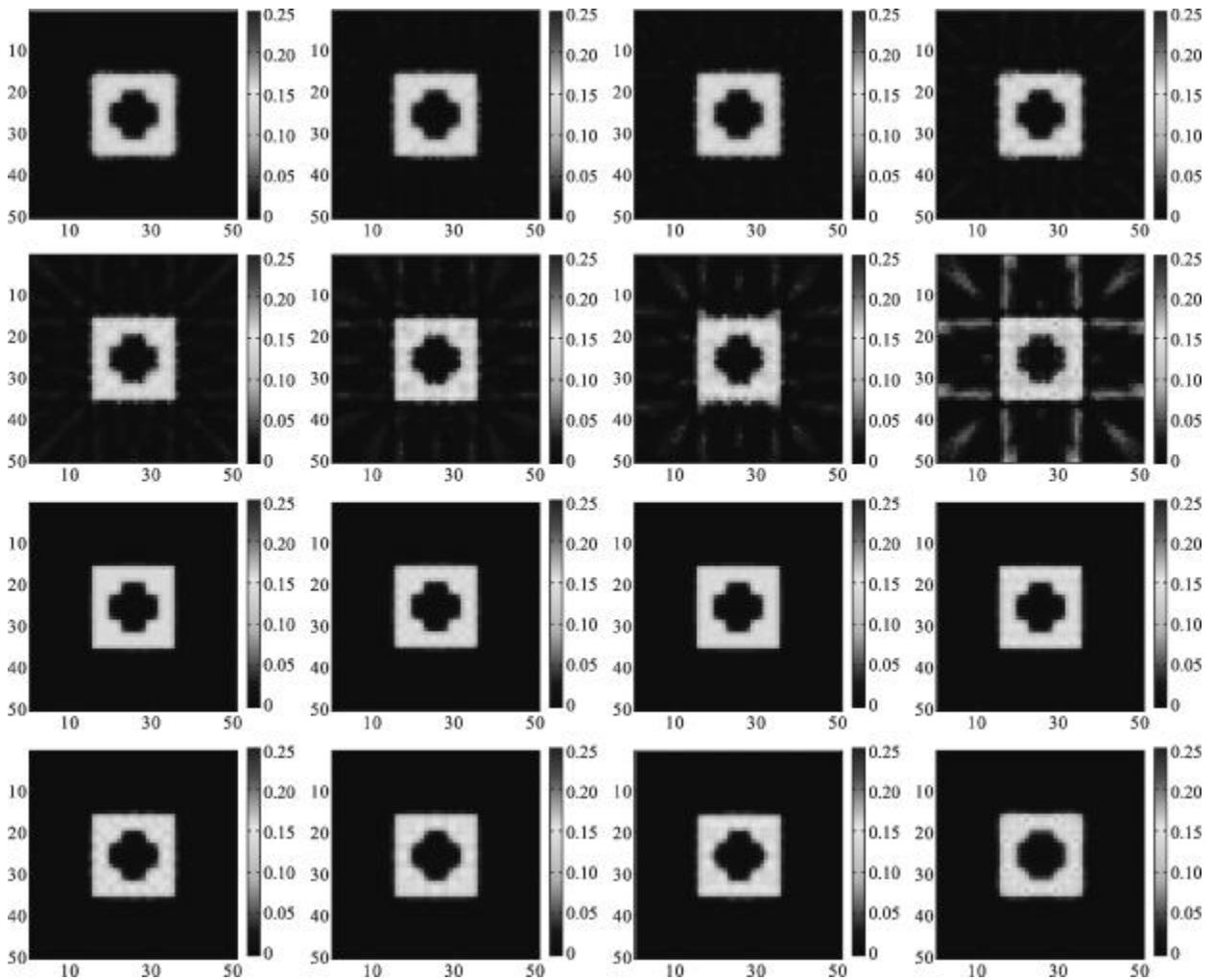
(b) MSSIM indexes and component values curves

图 2 仿真模型重构结果及 MSSIM 曲线

Fig.2 Reconstructed results of the simulation sample and MSSIM curves

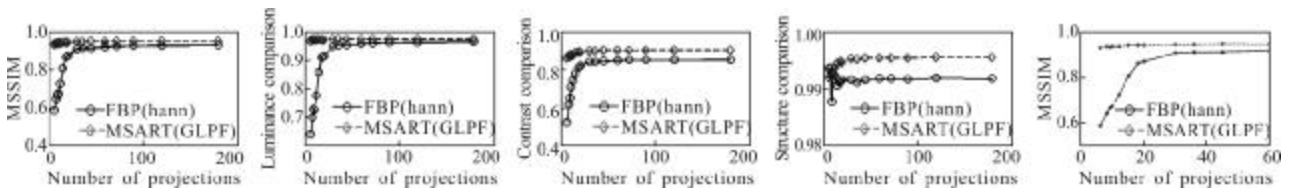
声减少,材料分布变得均匀,改善重构效果,但是投影方向数为 6 时十字结构仍然失真。而且此时当投影方向数为 9 和 10 时,十字结构也略有失真,直角

位置变得圆滑,这是由低通滤波引起的。当不严格要求重构精度时可忽略此失真,即认为投影方向数为 9 时的重构结果是准确的。



(a) 经滤波处理后 FBP 算法重构图像(前 8 幅)和 MSART 算法结果(后 8 幅)

(a) Reconstructed images using FBP (first 8 images) and MSART after filtering processing (last 8 images)



(b) 投影方向数为 6~60 时的 MSSIM 曲线

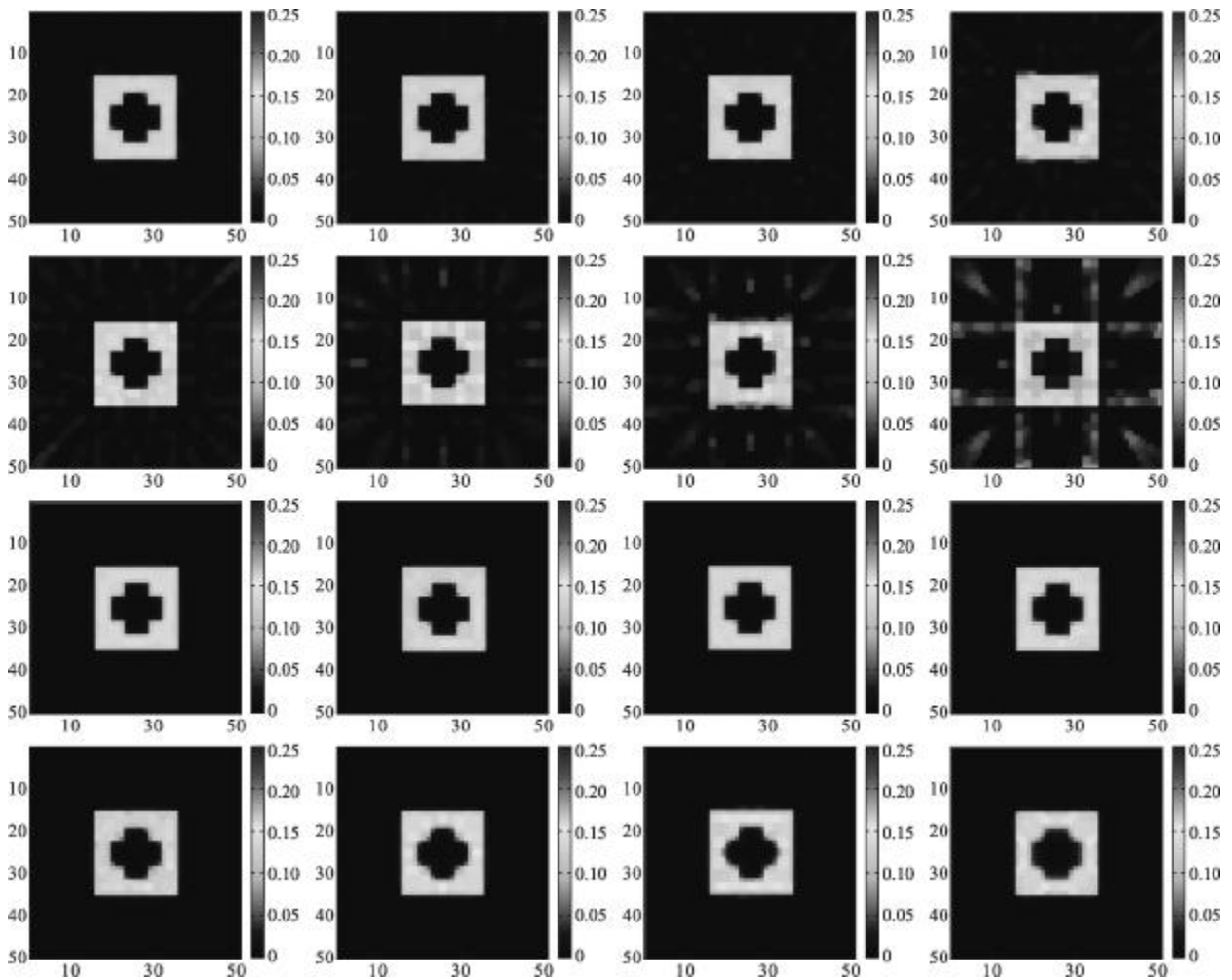
(b) MSSIM indexes curves when $N_p=6-60$

图 3 仿真模型经滤波处理重构图像及 MSSIM 曲线

Fig.3 Reconstructed results of the simulation sample after filtering processing and MSSIM curves

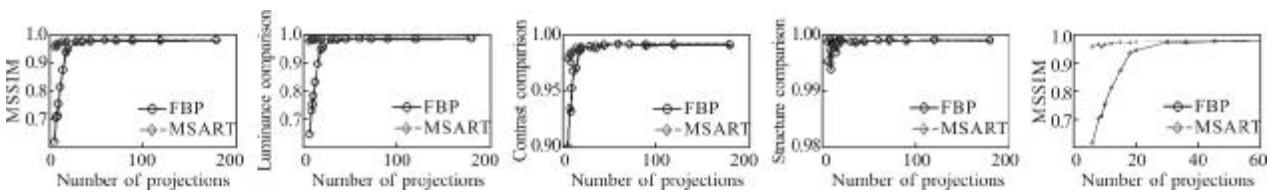
对 FBP 算法(斜坡滤波)和 MSART 算法进行开运算和闭运算处理,其中 MSART 算法迭代次数选择为 100 次,所得重构结果如图 4 所示。可以看出,采用开运算和闭运算后,FBP 算法重构图像质量有一定的改善,从 MSSIM 曲线可以看出此时所需最少

投影方向数为 20;采用 MSART 算法重构图像高频噪声减少,重构图像质量提高,投影方向数为 9 时十字畸变较小,但是图像仍然不是很均匀。即与 GLPF 相比,经过开运算和闭运算处理结果 MSSIM 值有所提高且畸变降低,但图像均匀性相对差一些。



(a) 经开运算和闭运算处理后 FBP 算法(斜坡滤波)重构图像(前 8 幅)和 MSART 算法结果(后 8 幅)

(a) Reconstructed images using FBP (ramp filter, first 8 images) and MSART (last 8 images) after open operation and close operation processing



(b) 投影方向数为 6-60 时的 MSSIM 曲线

(b) MSSIM indexes curves when $N_p=6-60$

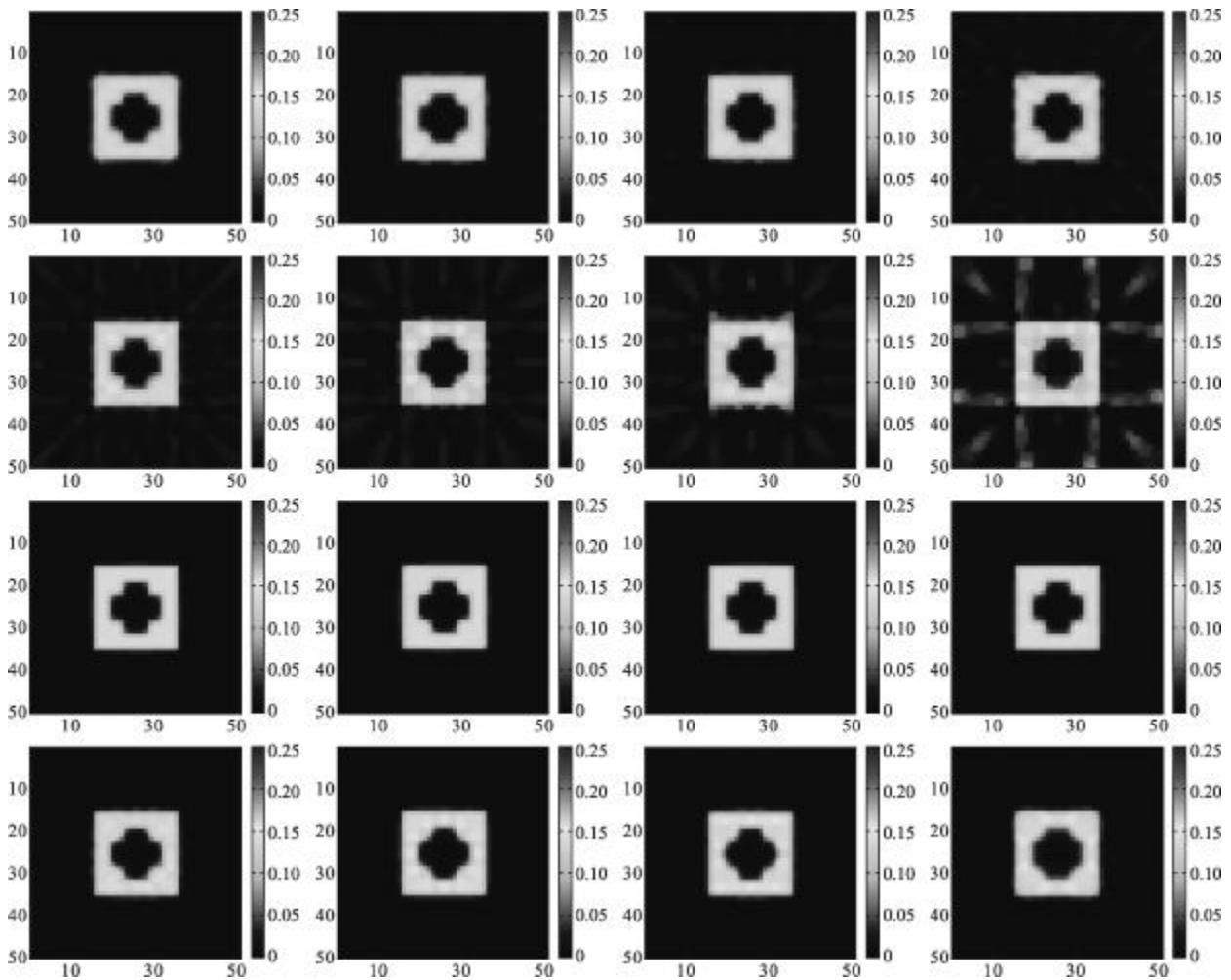
图 4 理想无噪声情况下 FBP(斜坡滤波)(前 8 幅)和 MSART 算法经开运算和闭运算处理后重构图像及 MSSIM 曲线图

Fig.4 Reconstructed results of the simulation sample using FBP(ramp filter) and MSART after open operation and close operation processing and MSSIM curves

最后对 FBP 和 MSART 算法进行滤波处理后再进行开运算和闭运算处理,其中 MSART 算法迭代次数选择为 100 次,所得重构结果如图 5 所示。可以看出,此时的重构效果相对较好,FBP 算法重构结果伪影有所减少,但仍然不能完全去除;对于 MSART

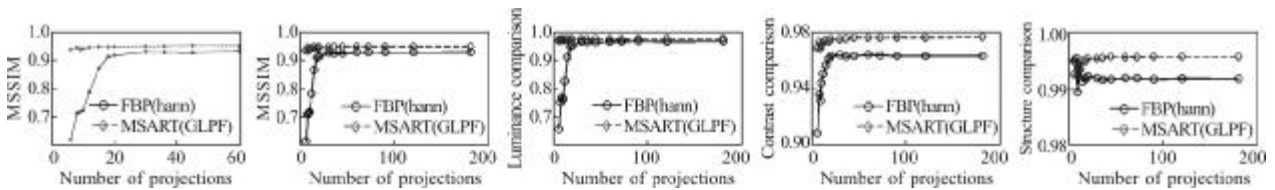
算法结果,投影方向数为 9 和 10 时有一点失真,但是均匀性得到提高,可以看作准确重构。从已获得的结果中还可以看出,当投影方向数为 12 时几乎无失真,重构质量好,且其 MSSIM 值一直较高。

总之,采用 FBP 算法获得的重构图像会受到伪



(a) 经开运算和闭运算及滤波处理后 FBP 算法(斜坡滤波)重构图像(前 8 幅)和 MSART 算法结果(后 8 幅)

(a) Reconstructed images using FBP(ramp filter, first 8 images) and MSART (last 8 images) after open operation, close operation and filtering processing



(b) 投影方向数为 6-60 时的 MSSIM 曲线

(b) MSSIM indexes curves when $N_p=6-60$

图 5 重构结果经开运算和闭运算以及滤波处理后重构图像及 MSSIM 曲线

Fig.5 Reconstructed results of the simulation sample after open operation, close operation and filtering processing and MSSIM curves

影的影响,且所需投影方向数也相对较多,经过一系列处理后,在理想无噪声条件下对所建立的模型进行重构所需投影方向数至少为 20。而采用 MSART 算法将获得质量较高的重构图像,重构图像基本无伪影,且经过一系列图像处理操作之后也几乎不含高频噪声,在投影方向数仅为 9 时即可看作完成准

确重构图像。在实验中,可以采用 MSART 算法进行图像重构,并进行 GLPF 以及开运算和闭运算处理,以提高重构图像质量。

3 结论

文中通过采用 FBP 算法和 MSART 算法进行图

像重构,对连续太赫兹层析成像进行了仿真研究。从实验结果可以看出,当投影方向数较少时采用 MSART 算法可以获得更好的重构结果。其中 FBP 算法重构结果有伪影且所需要的最小投影方向数为 30;MSART 重构结果较好,所需最小投影方向数为 9。然后分析比较了 GLPF 以及数学形态学中的开运算和闭运算等数字图像处理方法对改善重构图像质量的效果。可以看出 FBP 算法重构图像质量有所提高,所需的最小投影方向数为 20,但仍然不能完全去除伪影;采用 MSART 算法重构图像基本无伪影,且经过一系列图像处理操作之后也几乎不含高频噪声,在投影方向数仅为 9 时即可看作完成准确重构图像。仿真结果与真实成像实验结果相吻合,进一步证明了 MSART 算法较 FBP 算法有更好的重构效果以及可用于快速成像的能力。

参考文献:

- [1] Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo, et al. CW THz Standoff Imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 50-52. (in Chinese)
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(1): 50-52.
- [2] Li Qi, Xia Zhiwei, Ding Shenghui, et al. Image denoising of CW THz images by use of non-local mean[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 517-522. (in Chinese)
李琦, 夏志伟, 丁胜晖, 等. 采用非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 517-524.
- [3] Wang Shaohong, Ferguson B, Zhang Cunlin, et al. Terahertz computer tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(1): 120-124. (in Chinese)
王少宏, Ferguson B, 张存林, 等. Terahertz 波计算机辅助三维层析成像技术[J]. *物理学报*, 2003, 52(1): 120-124.
- [4] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 51-56.
- [5] 焦月英. 连续太赫兹波成像技术的研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008: 32-39.
- [6] 郑德伟. 连续太赫兹波层析成像实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 51-69.
- [7] Nicholas Karpowicz, Zhong Hua, Zhang Cunlin, et al. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 1-3.
- [8] Naoki Sunaguchi, Yoshiaki Sasaki, Norihide Maikusa, et al. Depth-resolving THz imaging with tomosynthesis [J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9558-9570.
- [9] Kato E, Nishina S, Irisawa A, et al. 3D spectroscopic computed tomography imaging using terahertz waves [C]//35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010.
- [10] Yin Xiaoxia, Brian W H Ng, Brad Ferguson, et al. Wavelet based local tomographic image using terahertz techniques [J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19: 750-763.
- [11] Abraham E, Younus A, Aguerre C, et al. Refraction losses in terahertz computed tomography [J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 2050-2055.
- [12] Recur B, Younus A, Salort S, et al. Investigation on reconstruction methods applied to 3D terahertz computed tomography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5105-5117.
- [13] Li Qi, Li Yunda, Ding Shenghui, et al. Terahertz computed tomography using a continuous-wave gas laser[J]. *Journal of Infrared [J]. Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, 33: 548-558.
- [14] Li Chunfang, Zhang Xinfeng, Pan Jinhu, et al. Modified simultaneous algebraic reconstruction technique and its application in CT from limited range [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2002, 13(7): 726-729. (in Chinese)
李春芳, 张新峰, 潘金虎, 等. 改进的联合代数重建法及其有限角投影重建[J]. *光电子·激光*, 2002, 13(7): 726-729.
- [15] Haralick Robert M, Sternberg Stanley R, Zhuang Xinhua. Image analysis using mathematical morphology [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, PAMI-9 (4): 532-550.
- [16] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2004, 13(4): 600-612.