

文章编号: 2095-4980(2015)04-0556-06

2.52 THz 傅里叶数字全息中噪声影响仿真

崔珊珊, 李琦, 胡佳琦

(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 150080)

摘要: 傅里叶数字全息具有抗撕毁性等优点, 如能应用于太赫兹(THz)成像将具有重要意义。根据现有面阵探测器参数进行了2.52 THz傅里叶数字全息仿真实验, 通过对目标分别添加高斯噪声和椒盐噪声后再现, 研究了目标噪声对其影响。实验结果证明, 高斯噪声方差小于0.20时, 再现像虽然受到噪声影响但完全可以分辨, 经过均值滤波和中值滤波后, 图像轮廓变得清晰; 当高斯噪声方差大于0.20时, 再现像淹没在噪声中, 滤波难以分辨出目标, 且均值滤波比中值滤波效果好; 当椒盐噪声密度为0.20时, 目标的再现像被淹没, 均值滤波和中值滤波均能使目标重新被观察到, 且均值滤波效果相对较好。

关键词: 太赫兹成像; 数字全息; 傅里叶全息; 噪声影响

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0556

Simulation on the effect of noise on 2.52 THz Fourier digital holography

CUI Shanshan, LI Qi, HU Jiaqi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150080, China)

Abstract: With the capability of shearing resistance, Fourier digital holography will be of great significance once applied to terahertz imaging field. In this paper, the 2.52 THz Fourier digital holography is simulated based on the parameters of surface array detector. Then the reconstructed image can be obtained for a certain object using Fourier holography. By adding Gaussian noise and salt pepper noise to the object, the influences of noise on the object are studied with the mean and median filters. The experimental results reveal that, the reconstructed image can be distinguished though affected by noise, when the variance of Gaussian noise is below 0.20, and image contours become distinct after filtering; when the variance of Gaussian noise is above 0.20, the reconstructed image cannot be distinguished even filtered. When the density of salt and pepper noise reaches up to 0.20, the reconstructed image submerges, but it can be observed again by mean filtering or median filtering. Therein the mean filtering is superior to median filtering.

Key words: terahertz imaging; digital holography; Fourier holography; noise effect

太赫兹成像是太赫兹技术中最具有实用价值的研究方向之一, 介于毫米波到红外波之间的太赫兹波, 以其强穿透力, 在无损伤探伤、公共安全、医疗检测等领域将发挥巨大作用^[1-2]。太赫兹全息技术将全息术用于太赫兹成像的研究, 可以克服衍射孔径的限制, 实现高分辨率图像的获取, 是当今太赫兹成像领域的前沿技术之一^[3]。

傅里叶全息图由于具有抗撕毁性、再现算法简单等优势, 对于实时记录高质量数字全息图具有重大意义, 在全息存储、特征识别和信息隐藏等方面具有独特优势^[4-6]。但傅里叶全息图的再现会受到零级衍射光的影响, 因此需要对傅里叶全息图做消零级处理。全息图减平均值, 相移技术, 数字相减法, 空域滤波, 频域滤波是数字全息再现中5种常用的消零级方法, 其中4步相移法的消除效果较好。考虑到实时再现、计算复杂度实用性及对目标影响较小等因素, 本文选用拉普拉斯算符对全息图进行处理^[7-9]。

在实际应用当中, 外界干扰、光电器件及系统电路等都会使图像携带一定噪声, 其中高斯噪声和椒盐噪声是图像处理领域2种最经典的噪声, 因此本文主要针对这2种噪声展开了研究。

收稿日期: 2014-09-26; 修回日期: 2014-12-8

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61377110); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20112302110028)

据了解, 目前尚未有关于太赫兹数字全息中噪声影响的研究, 而噪声对太赫兹傅里叶数字全息的影响研究对提高太赫兹成像质量具有一定的实际意义和科研价值。因此本文对 2.52 THz 离轴傅里叶变换全息进行了仿真实验, 通过对全息图作拉普拉斯算符处理, 消除再现像中的零级衍射光, 并在原图像中添加噪声, 利用均值滤波和中值滤波对再现像进行处理, 从而分析了噪声对再现结果的影响以及不同滤波方法对图像的改善效果。

1 傅里叶变换全息原理

将物体置于透镜的前焦面, 设物光为 $g(x_0, y_0)$, 利用透镜的傅里叶变换性质, 在透镜的后焦面上就得到了物光的傅里叶频谱, 记录过程如图 1 所示。后焦面上的物光频谱可表示为:

$$G(\xi, \eta) = \frac{\exp(j2kf)}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0) \exp[-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

参考光为物平面上 (a, b) 处的点光源, 可表示为:

$$r(x_0, y_0) = \delta(x_0 - a, y_0 - b) \quad (2)$$

物光和参考光在后焦面上的干涉强度分布为:

$$I(\xi, \eta) = 1 + G^2 + G \exp[j2\pi(a\xi + b\eta)] + G^* \exp[-j2\pi(a\xi + b\eta)] \quad (3)$$

式中: $\xi = x/\lambda f$; $\eta = y/\lambda f$ 。

采取平行光垂直入射到全息图平面上, 再做一次逆傅里叶变换就可以直接得到再现像。数字再现时, 再现像中不仅会出现原始像, 而且会出现物光波的自相关项、晕轮光和共轭像, 可将晕轮光和自相关项(零级衍射光)看作全息图的低频成分, 原始像和共轭像看成全息图的高频成分^[10]。

为了消除中心处的零级衍射光对再现像的影响, 需要滤除全息图的低频成分。这里利用拉普拉斯算法对透镜后焦面上的全息图进行处理, 以去除全息图中低频成分, 再进行逆傅里叶变换得到再现结果。考虑到对角线的值, 本文采用图 2 中的拉普拉斯算子模板对全息图进行处理。

2 实验结果及分析

基于上述原理, 以字母 T 作为研究对象进行了仿真成像实验。在仿真实验中, 入射波长为 118.83 μm , 后焦面上的探测器像素数为 124×124 pixels, 大小为 12.4 mm×12.4 mm, 透镜焦距 f 为 1.5 cm, 参考光位置参数 a, b 分别为 0.4 cm 和 0.5 cm, 目标 T 本身大小为 16×20 pixels, 如图 3 所示。

根据以上条件, 得到傅里叶全息图, 采用拉普拉斯算符对全息图进行处理, 并分别对处理前后的全息图再现, 仿真结果由图 4 给出。本实验中为了对处理后图像进行客观评价, 引入均方差(MSE)和信噪比(R_{SN}) 2 个较常用的评价参数对图像处理效果进行评估:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [X(i, j) - \bar{X}]^2 \quad (4)$$

式中: M, N 为图像的大小; $X(i, j)$ 为各点的灰度值; \bar{X} 为图像灰度的平均值。 MSE 值越小, 则去噪效果越明显。

$$R_{SN} = \frac{E(X)}{\sqrt{\text{var}(X)}} \quad (5)$$

R_{SN} 是图像灰度的平均值与方差之比, 其值越大, 滤波效果越好。

通过图 4 可以看出, 经过拉普拉斯算符处理后的全息图中低频成分大大减小, 高频成分相对加强, 再现像中心处零级衍射光被大大削弱, 图像的信噪比和均方差均有较大提高, 视觉上图像的边缘更加清晰, 对比度增强, 再现效果明显改善。

考虑到外界干扰、系统本身的限制等因素, 场景可能会受到噪声的污染, 常见的噪声类型有高斯噪声和椒盐噪声等。本文在原图像上添加这两种噪声, 进行了噪声对太赫兹傅里叶数字全息影响的仿真研究。对目标图像分别加入均值为 0, 方差为 0.05, 0.15 和 0.20 的高斯噪声, 图 5 为添加高斯噪声后的图像。

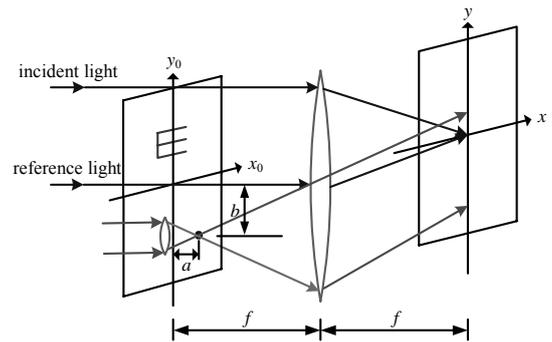


Fig.1 Sketch of Fourier holographic recording
图 1 傅里叶全息记录过程示意图

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

Fig.2 3×3 Laplacian template
图 2 3×3 拉普拉斯算子模板

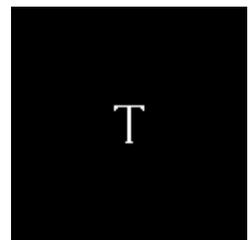


Fig.3 Original image
图 3 原图像

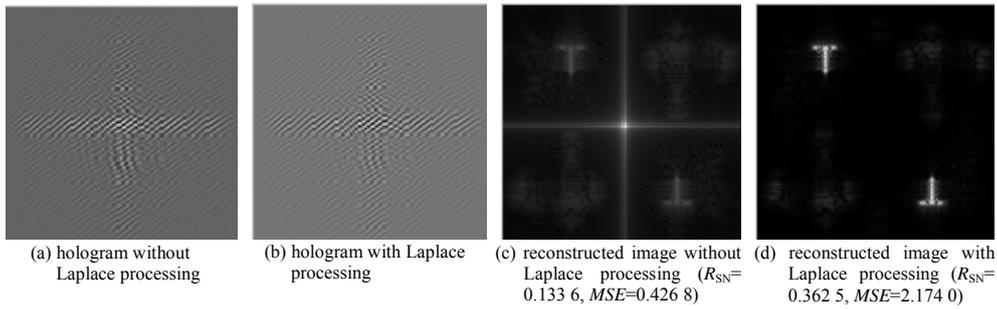


Fig.4 Reconstructed images without and with Laplace processing
图 4 拉普拉斯算符处理前后对比

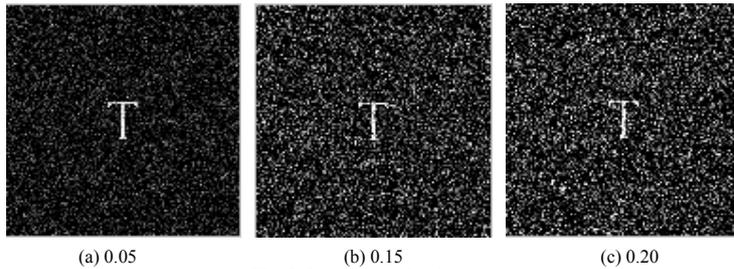


Fig.5 Gaussian noise images
图 5 含高斯噪声的图像

原图像经上述傅里叶全息仿真记录和再现，得到的结果如图 6 所示。可以看出，当噪声方差为 0.05 时，再现像中虽然可以观察到噪声，但字母 T 的轮廓还比较清晰，由于全息图的低频成分被滤除，再现像中心处的噪声并不明显，原始像和共轭像附近的噪声比较明显；随着噪声方差的增大，再现像中噪声增大，字母 T 轮廓的清晰度逐渐降低；当噪声方差增大到 0.20 时，字母 T 几乎淹没在噪声中。

为了更直观地看到图像强度分布，水平扫描上述再现图像中第 30 行的 1~60 列，即图 6 中横线所标注的位置，观察噪声方差对再现图像中第 30 行的影响，图 7 为扫描结果。可知，当噪声方差为 0.05 时，再现像的强度较大，且其附近分布的噪声强度较低，扫描到再现像时会有很明显的尖峰出现；随着噪声方差增大，再现像附近的噪声强度值逐渐增大，越来越接近再现像的强度值；当噪声方差增大到 0.20 时，再现像与噪声的强度差距较小，在第 30 行上再现像淹没在噪声中。

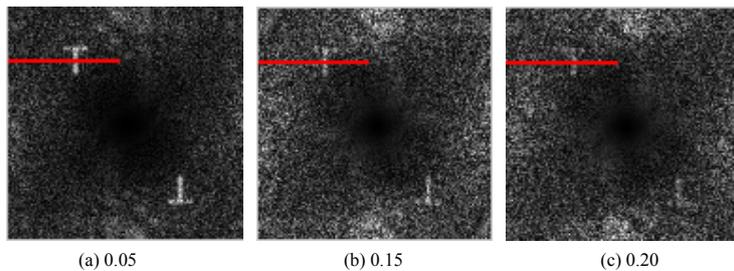


Fig.6 Reconstructed results of Gaussian noise image
图 6 含高斯噪声图像的再现结果

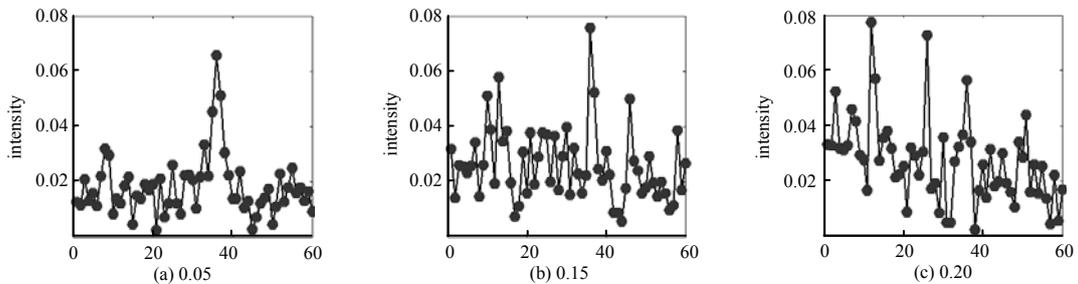


Fig.7 Scanning results of Fig.6
图 7 图 6 的扫描结果

由于图 6 的再现像中含有大量噪声，在实际应用中，为了便于机器对图像的识别，通常会对图像做滤波处理，因此对再现像分别做 3×3 窗口的均值滤波和中值滤波处理，滤波结果如图 8 所示，表 1 中给出了相应的图像质量参数。由图 6 和图 8 对比，可看出图像的清晰度得到了提高，目标的再现像轮廓更明显。但当高斯噪声方

差达到 0.20 时, 这两种滤波都不能使目标清楚地被观察到, 其中图 8 中方差为 0.15 时均值滤波比中值滤波得到的目标再现像更清晰一些。根据表 1 所给出的数据, 均值滤波对图像 R_{SN} 的提高和 MSE 的减小都优于中值滤波。因此, 在本实验中对于高斯噪声图像的再现像均值滤波比中值滤波效果好。

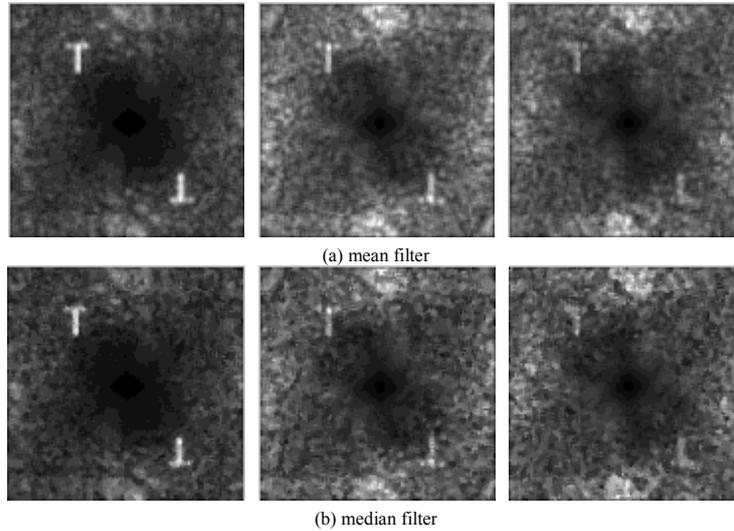


Fig.8 Filtering results of Fig.6
图 8 图 6 的滤波结果

然后在原图像中加入椒盐噪声, 所加噪声密度分别为 0.05, 0.15 和 0.20, 其含噪图像如图 9 所示。含噪图像经太赫兹傅里叶数字全息仿真再现, 结果如图 10 所示。由再现结果可知, 当噪声密度为 0.05 时, 图像中可观察到目标的再现像, 且图像的对对比度较大; 随着噪声的增大, 再现结果受噪声影响增大, 越来越模糊; 当噪声密度达到 0.20 时, 目标的再现像难以分辨。

对图 10 中再现像进行扫描, 其扫描结果如图 11 所示。从扫描结果可以看出, 当噪声密度为 0.05 时, 目标再现像与噪声的强度差别较大; 当噪声密度增大, 再现像附近像素的噪声强度也增大, 导致其轮廓变模糊; 当噪声密度增大到 0.20 时, 二者强度大小接近, 因而在第 30 行上再现像淹没。

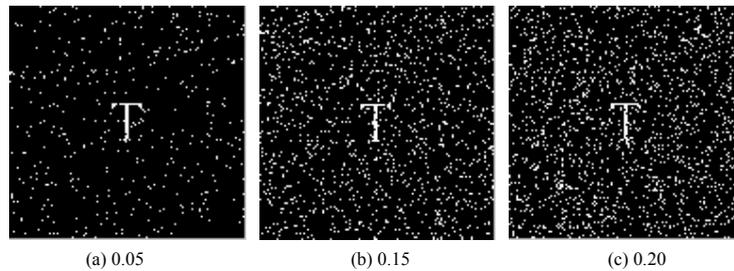


Fig.9 Salt and pepper noise images
图 9 含椒盐噪声的图像

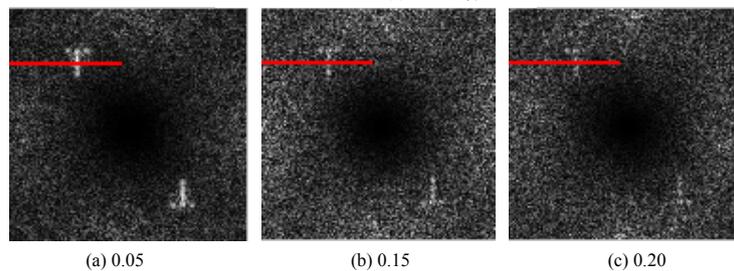


Fig.10 Reconstructed results of salt and pepper noise image
图 10 含椒盐噪声图像的再现结果

对图 10 中的再现像分别经均值和中值滤波处理, 结果见图 12, 相应的 R_{SN} 和 MSE 值见表 2。由图 12 可看出, 字母 T 亮度得到加强, 轮廓也更加明显, 当椒盐噪声密度达到 0.20 时, 这 2 种滤波方式都能够使淹没的目标重新被观察到, 说明通过滤波手段减弱了全息图中噪声对目标的影响。表 2 还给出了不同图像的信噪比和均方差, 可以发现, 当噪声密度为 0.15 时, 相比均值滤波的结果, 中值滤波后的再现像较为模糊。表 2 中无论是 R_{SN} 值还是 MSE 值都表明, 均值滤波有更好的去噪效果。因此对含椒盐噪声图像的再现像均值滤波效果相对更好。

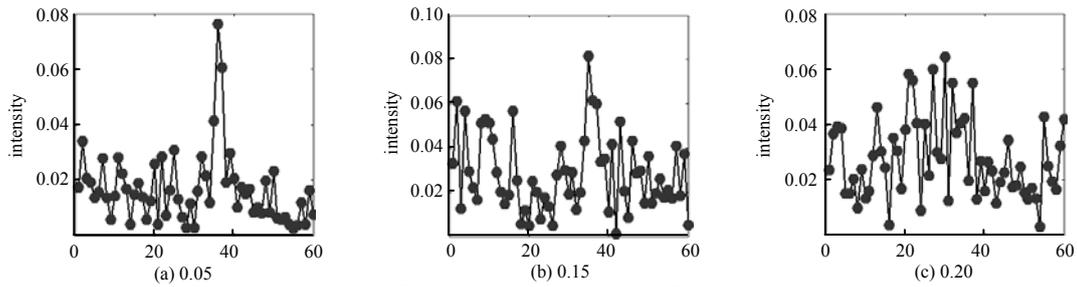


Fig.11 Scanning results of Fig.10

图 11 图 10 的扫描结果

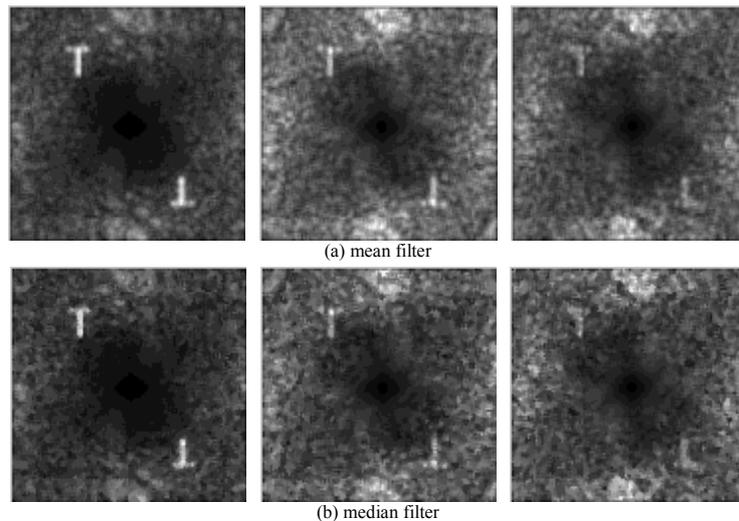


Fig.12 Mean filter and median filter results of Fig.10

图 12 图 10 的均值滤波和中值滤波结果

表 1 图 6 和图 8 中各图像的 R_{SN} 和 MSE Table1 R_{SN} and MSE of different images in Fig.6 and Fig.8

noise variance	R_{SN}			MSE		
	noisy image	mean filtering	median filtering	noisy image	mean filtering	median filtering
0.05	1.462 1	2.107 9	1.972 8	5.643 0	2.637 1	2.816 8
0.15	1.566 5	2.411 3	2.220 6	15.006 3	6.154 6	6.704 0
0.20	1.557 6	2.433 4	2.250 2	17.999 9	6.730 6	7.484 7

表 2 图 10 和图 12 中各图像的 R_{SN} 和 MSE Table2 R_{SN} and MSE of different images in Fig.10 and Fig.12

noise variance	R_{SN}			MSE		
	noisy image	mean filtering	median filtering	noisy image	mean filtering	median filtering
0.05	1.379 9	2.031 6	1.913 5	6.006 2	2.701 5	2.750 2
0.15	1.466 2	2.317 1	2.178 3	16.353 8	6.367 4	6.497 8
0.20	1.518 9	2.462 1	2.288 2	21.396 2	7.995 5	8.518 3

由以上 2 个噪声仿真实验可知,对于受高斯噪声和椒盐噪声的傅里叶全息再现图像,均值滤波的去噪效果均优于中值滤波,这说明中心像素与其邻域的统计平均值相关性更强,更趋于线性关系;而中值滤波是一种非线性滤波,更关注统计中间值,适于椒盐噪声等。

3 结论

本文基于已有的探测器的参数条件,对 2.52 THz 傅里叶数字全息进行了仿真研究,并讨论了噪声对其再现结果的影响。通过采用拉普拉斯算符对傅里叶全息图进行处理,消除了再现像中心的零级衍射光。对原图像添加高斯噪声后再现,发现高斯噪声方差小于 0.20 时,再现像虽然受到噪声影响但完全可以分辨,经过均值滤波和中值滤波后;高斯噪声的方差大于 0.20 时,再现像几乎完全淹没,经过均值滤波和中值滤波,其轮廓依然无法分辨,且均值滤波方式效果比中值滤波效果好。加入椒盐噪声后的原图像再现,当噪声密度为 0.20 时目标淹没,但经过均值滤波和中值滤波后目标又可以观察到,且均值滤波效果相对较好。

参考文献:

- [1] 李琦,姚睿,丁胜辉,等. 遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究[J]. 中国激光, 2011,38(7):0711001. (LI Qi,YAO Rui, DING Shenghui,et al. Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011,38(7):0711001.)

- [2] 李昕磊,李飏. 实时太赫兹探测与成像技术新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012,49(9):090008. (LI Xinlei,LI Biao. Review on progress of real-time THz sensing and imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9):090008.)
- [3] LI Qi, XUE Kai, LI Yunda, et al. Experimental research on terahertz Gabor inline digital holography of concealed objects[J]. Applied Optics, 2012,51(29):7052-7058.
- [4] 陈蔓丽,狄红卫. 傅里叶计算全息图的数字再现及混叠的消除[J]. 光学技术, 2007,32(3):364-366. (CHEN Manli,DI Hongwei. Digital reconstruction of Fourier CGH and the elimination of aliasing image[J]. Optical Technique, 2007, 32(3):364-366.)
- [5] 陈大庆,顾济华,周皓,等. 基于相位恢复的傅里叶变换全息图像数字水印[J]. 光学学报, 2009,29(12):3311-3316. (CHEN Daqing,GU Jihua,ZHOU Hao, et al. An image digital watermarking with phase retrieval algorithm and Fourier transformation hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2009,29(12):3311-3316.)
- [6] 刘惠萍,于佳,于丽,等. 傅里叶变换数字全息图的记录与再现及实时化研究[J]. 光学仪器, 2013,35(5):33-35. (LIU Huiping,YU Jia,YU Li, et al. Realtime storage and reproduction of digital Fourier transform holograms[J]. Optical Instruments, 2013,35(5):33-35.)
- [7] 张亚萍,张建强,许蔚,等. 波前重建中的高通滤波消零级衍射干扰研究[J]. 光学学报, 2011,31(11):82-87. (ZHANG Yaping,ZHANG Jianqiang,XU Wei, et al. Elimination of the influence of zero-order diffraction using highpass filter in wavefront reconstruction[J]. Acta Optica Sinica. 2011,31(11):82-87.)
- [8] 曾然,赵海发,刘树田. 数字全息再现像中零级干扰噪声消除及图像增强研究[J]. 光子学报, 2004,33(10):1230-1232. (ZENG Ran,ZHAO Haifa,LIU Shutian. Zero-order image elimination in digital holography by means of image processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2004,33(10):1229-1232.)
- [9] 刘雯雯,戴宜全,康新,等. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. 光学学报, 2008,28(5):856-859. (LIU Wenwen,DAI Yiquan,KANG Xin, et al. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. Acta Optica Sinica, 2008,28(5):856-859.)
- [10] 苏显渝,吕乃光,陈家璧. 信息光学原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2010:91-94. (SU Xianyu,LY Naiguang,CHEN Jiabi. The Principle of Information Optics[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2010:91-94.)

作者简介:



崔珊珊(1990-), 女, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像. email:hitcss@126.com.

李琦(1963-), 女, 黑龙江省牡丹江市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光与太赫兹成像及图像处理.

胡佳琦(1990-), 女, 辽宁省铁岭市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像.