

太赫兹离轴数字全息消零级方法的 像质评价及其分析

汪泽文, 李琦, 袁静

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 在太赫兹离轴数字全息中,因其记录及再现距离较短,零级衍射会对再现像造成严重影响。利用三种图像质量客观评价指标,对 2.52 THz 离轴数字全息中使用复振幅复原法和拉普拉斯算子消零级方法得到的再现像进行了比较分析。以成像实验中的分辨率板为模型设计了仿真目标,根据实验获得的照明光和参考光的强度分布仿真了全息图,利用角谱法进行再现,最后对真实太赫兹数字全息图进行了相同的处理,所得结果与仿真结论基本吻合。复振幅复原法和拉普拉斯算子法均能很好的抑制零级衍射。相比拉普拉斯算子法,复振幅复原法的零级衍射亮度衰减率更高,再现像整体上峰值信噪比更高,在高分辨率的 0.2 mm 亮竖条纹区域具有更高的信噪比,图像质量更好。

关键词 成像系统; 太赫兹成像; 太赫兹离轴数字全息; 图像质量; 消零级方法; 客观评价指标

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111102

Image Quality Evaluation and Analysis of Zero-Order Diffraction Elimination Method in Terahertz Off-Axis Digital Holography

Wang Zewen, Li Qi, Yuan Jing

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

Abstract In terahertz off-axis digital holography, the zero-order diffraction will still cause bad effects on the reconstructed image, as a result of short recording and reconstruction distance. Using three image quality objective evaluation indexes, the reconstructed images are compared and analyzed. The images are obtained by using the complex-wave retrieval method and the Laplacian operator method to eliminate the zero-order diffraction in 2.52 THz off-axis digital holography. Besides, the simulation target is designed with resolution chart in the actual imaging experiment. The hologram is simulated according to the intensity distribution of illumination light and reference light got from the real experiment, then the angular spectrum method is used to reconstruct the hologram. Finally, the corresponding processing is also performed to the hologram in the real terahertz digital holography experiment, and the results fit well with the simulation conclusions. Both methods have good suppression of zero-order diffraction. Compared with the Laplacian operator method, the complex-wave retrieval method has a higher brightness attenuation rate of zero-order diffraction, and the reconstructed image of it has higher peak signal to noise ratio overall. What's more, it has higher signal to noise ratio in 0.2 mm bright vertical stripe area with high resolution, and the image quality is better.

Key words imaging systems; terahertz imaging; terahertz off-axis digital holography; image quality; zero-order diffraction elimination method; objective evaluation index

OCIS codes 110.6795; 090.1995; 100.2960

收稿日期: 2017-05-21; **收到修改稿日期:** 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)

作者简介: 汪泽文(1994—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: hit_wzw@163.com

导师简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

1 引言

太赫兹辐射能透过对可见光不透明的非金属、对非极性遮挡物,具有探测隐藏物体的能力,且其光子能量较低,不会对生物体造成损伤^[1]。在太赫兹二维面阵成像常用的焦平面成像方式中,大数值孔径的透镜不易获得,并且其带来的畸变以及光路装调难度不可忽略,而决定太赫兹数字全息系统数值孔径的记录面探测器尺寸相对较大,因此,太赫兹数字全息较易实现大数值孔径成像,能提高分辨率,具有广阔的应用前景。

虽然离轴全息能够将各级衍射项在空域上进行有效分离,但对于太赫兹离轴数字全息,由于其记录及再现距离较短,零级衍射项往往会与±1级衍射相混叠,从而导致再现像的对比度严重下降,再现目标变得暗淡不清且细节丢失,因此对零级亮斑的去除显得尤为必要。迄今为止,人们已提出多种用于数字全息零级像的消除方法^[2-8],其中相移法^[2]需在参考光路中引入相移装置,不利于太赫兹数字全息实时成像;定域灰度值变换法^[3]难以消除零级衍射与±1级衍射混叠区域处的零级噪声;对全息图在频域进行滤波^[4]或采用增加再现像面法进行消零^[5]时,选择合适滤波窗口的处理过程也较为繁琐。另外还有微分梯度法^[6]以及空域均值滤波法^[7],其原理与空域滤波法中的拉普拉斯算子(LO)法^[8]类似,这里不再赘述。

本文对太赫兹离轴数字全息中采用的两种消零级方法,即空域 LO 滤波法和复振幅复原(CWR)法^[9]进行了比较研究。这两种方法仅需对单幅全息图进行处理,且能够满足实时数字再现。在本课题组所做的太赫兹数字全息实验中,成像目标的分辨率接近系统的极限分辨率,实验所得单幅全息图消零再现结果中的目标易湮没在背景噪声中,将多幅全息图叠加平均后,探测器产生的随机噪声对单幅全息图的影响能得到有效抑制,从而能改善再现像的质量。本课题组曾对这两种方法的消零效果进行过主观评价^[10],但正确的客观评价更有说服力。本文根据实际成像的分辨率板设计了仿真目标,由实验获得的照明光和参考光强度分布仿真了多幅全息图;主要采用了三种图像质量客观评价指标:信噪比(SNR)、零级衍射亮度衰减率^[11]和峰值信噪比(PSNR),客观评价了两种方法对仿真和实验获得的多幅平均全息图的消零效果。仿真与实验所得结论均表明,CWR 法得到的图像质量更高,这对于太赫兹离轴数字全息消零级方法的选取具有指导意义。

2 原理简介

2.1 消零级方法

2.1.1 空域 LO 滤波法

LO 为微分算子,其消零级思路是直接在空域对数字全息图进行拉普拉斯变换,相当于在频域对数字全息图的频谱进行了高通滤波。全息图 $I_H(x, y)$ 经过拉普拉斯滤波后的结果 $I'_H(x, y)$ 可表示为

$$I'_H(x, y) = [I_H(x+1, y) + I_H(x-1, y) + I_H(x, y+1) + I_H(x, y-1)] - 4I_H(x, y), \quad (1)$$

此算子可表达成 3×3 掩模,即

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

2.1.2 CWR 法

假设在全息图中目标像素 (x, y) 处测得的全息图强度 $I_H(x, y)$ 、参考光相位 $\phi_r(x, y)$ 在全息记录面上随坐标 (x, y) 快速变化,而物光振幅 $o(x, y)$ 、物光相位 $\phi_o(x, y)$ 以及参考光振幅 $r(x, y)$ 为渐变变量,且在该目标像素的邻域范围内可近似为常量。在全息图每一目标像素 (x, y) 及周围 $M-1$ 像素构成的邻域范围内,将坐标简化后,得到 M 个非线性关系:

$$I_m = |o(x, y) \exp(i\phi_{om}) + r(x, y) \exp(i\phi_{rm})|^2 = o^2 + r^2 + 2or \cos(\phi_{om} - \phi_{rm}), \quad m = 1, \dots, M, \quad (2)$$

式中 I_m 、 ϕ_{om} 和 ϕ_{rm} 分别为目标像素 (x, y) 及其周围 $M-1$ 像素构成的邻域范围内第 m 个像素的光强值、物光相位和参考光相位, o 、 r 和 ϕ_o 分别为物光振幅 $o(x, y)$ 、参考光振幅 $r(x, y)$ 和物光相位 $\phi_o(x, y)$ 的坐标简化形式。

(2)式中的未知量 o 、 r 和 ϕ_o 可以通过最小二乘准则求解,即

$$\operatorname{argmin}_{r, o \in R^+} \sum_m \omega_m |I_m - (o^2 + r^2 + 2or \cos \phi_o \cos \phi_{rm} + 2or \sin \phi_o \sin \phi_{rm})|^2, \quad (3)$$

式中 ω_m 为高斯低通滤波函数生成的归一化非负权重,即 $\sum_m \omega_m = 1$ 。

ω_m 的加入有效减少了远离目标像素点强度所造成的影响,从而保证了物光复振幅近似为常量。为了将该非线性问题转化为线性问题,将(3)式进行了变量代换,即

$$\begin{cases} u = o^2 + r^2 \\ v = or \cos \phi_o \\ w = or \sin \phi_o \end{cases} \quad (4)$$

从而可以通过线性方程组求解,即

$$\begin{bmatrix} \sum_m \omega_m I_m \\ \sum_m \omega_m I_m \cos \phi_{rm} \\ \sum_m \omega_m I_m \sin \phi_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \sum_m \omega_m \cos \phi_{rm} & 2 \sum_m \omega_m \sin \phi_{rm} \\ \sum_m \omega_m \cos \phi_{rm} & 2 \sum_m \omega_m \cos^2 \phi_{rm} & 2 \sum_m \omega_m \sin \phi_{rm} \cos \phi_{rm} \\ \sum_m \omega_m \sin \phi_{rm} & 2 \sum_m \omega_m \sin \phi_{rm} \cos \phi_{rm} & 2 \sum_m \omega_m \sin^2 \phi_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据全息图频谱获得 0 和 ± 1 级衍射的频谱中心坐标分别为 (x_0, y_0) 、 (x_{+1}, y_{+1}) 和 (x_{-1}, y_{-1}) , 则(5)式中的 ϕ_{rm} 可由(6)式求出,即

$$\begin{cases} \phi_{rm} = k_x x + k_y y \\ k_x = \frac{2\pi(x_{+1} - x_0)}{D_x} \\ k_y = \frac{2\pi(y_{+1} - y_0)}{D_y} \end{cases} \quad (6)$$

式中 D_x 、 D_y 分别为探测器在 x 、 y 方向上的长度。由于太赫兹离轴数字全息中使用的探测器采样间隔较大且像素数目较少,对数字全息图补零至适当大小,可以提高由(6)式计算出的参考光波矢的准确性。

根据(5)式可以计算出 u 、 v 、 w 。由于太赫兹激光器输出的基模高斯光束并不理想,参考光的相位分布无法精确测得,因此物光及参考光的复振幅并不能准确获得,但物光及参考光的实振幅可通过下式获得^[10],即

$$\begin{cases} o = \{ [u - (u^2 - 4v^2 - 4w^2)^{1/2}] / 2 \}^{1/2} \\ r = \{ [u + (u^2 - 4v^2 - 4w^2)^{1/2}] / 2 \}^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

根据(7)式从原全息图 $I_H(x, y)$ 中减去 CWR 法获得的物光和参考光强度,获得消零级后的全息图强度为

$$I'_H(x, y) = I_H(x, y) - [o(x, y)]^2 - [r(x, y)]^2 \quad (8)$$

2.2 角谱再现法及像质评价方法

2.2.1 角谱再现法^[12]

将数值模拟的平面波参考光 R 作用于消零后的全息图 $I'_H(x, y)$ 获得用于再现的光波场分布:

$$i_2(x, y) = R \times I'_H(x, y) \quad (9)$$

根据角谱法对 $i_2(x, y)$ 进行傅里叶变换,计算其角谱分布:

$$A_2(f_x, f_y) = \mathcal{F}[i_2(x, y)] \quad (10)$$

式中 f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向上的空间频率。然后计算 $A_2(f_x, f_y)$ 在频域传播再现距离 z_1 后在再现像面上的角谱分布:

$$A_3(f_x, f_y) = A_2(f_x, f_y) \times \exp(ikz_1 \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}) \quad (11)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。由傅里叶逆变换计算出再现面上的光波场分布:

$$i_3(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[A_3(f_x, f_y)] \quad (12)$$

最后,对 $i_3(x, y)$ 求模平方即可得再现像:

$$I_3(x, y) = |i_3(x, y)|^2 \quad (13)$$

2.2.2 SNR、零级衍射亮度衰减率和 PSNR

利用 SNR 评价再现像中亮条纹区域的图像质量,因为像元间隔为 0.1 mm,所以单个亮条纹由多条间隔为 0.1 mm 的竖(横)线构成,假设单条竖(横)线包含 M 个像素,则均值 μ 定义为这 M 个像素光强值的平均值,标准差 σ 定义为这 M 个像素光强值的标准差,信噪比 R_{SN} 定义为再现像中组成亮条纹区域的单条竖(横)线各像素强度值的均值 μ 与标准差 σ 之比,即

$$R_{SN} = \frac{\mu}{\sigma}, \quad (14)$$

R_{SN} 值越高,说明图像质量越好。

为判断再现像中的零级衍射是否被成功减弱或者消除,通过计算消零处理前后的再现像零级衍射区域的光强值,可以得出零级衍射亮度的衰减率。设直接再现结果的零级衍射区域亮度为 Y_0 ,处理后再再现的该区域亮度为 Y_R ,则衰减率可定义为^[11]

$$\eta = \frac{Y_0 - Y_R}{Y_0}, \quad (15)$$

η 越大,即零级衰减越大,说明对应方法处理效果越好。

PSNR 是衡量图像品质的重要参数,其单位为 dB。对于两幅像素数为 $M \times N$ 的标准图像 X 和对其进行相应处理后得到的图像 Y ,计算方法为

$$R_{PSN} = 10 \times \lg \left[\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^{M \times N} (X_i - Y_i)^2} \right], \quad (16)$$

式中 X_i, Y_i 分别表示 X, Y 图像中的第 i 个像素的灰度值, R_{PSN} 值越高,说明经过处理后的图像质量越高,即该处理程序得到的效果越好。

3 仿真结果分析

仿真中设置的主要参数:频率为 2.52 THz,记录距离为 21 mm,激光器输出的准基模高斯光束的束腰半径为 6.5 mm,物光束腰位于记录面后 10 mm 处,参考光束腰在 CCD 面中心,记录面采样点数为 124×124 ,采样间隔为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,再现距离同样为 21 mm。

以真实全息成像实验中的分辨率板为模型设计了理想仿真目标。其大小为 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$,白色部分为空气,灰色部分为聚四氟乙烯材料,金属条纹分辨率板是附着在聚四氟乙烯材料上的,右上角为 0.6 mm 条纹,下部从左到右依次为 $0.4, 0.3, 0.2 \text{ mm}$ 条纹,如图 1 (a) 所示,金属条纹为图中的暗条纹,相邻暗条纹之间为同样大小的亮条纹。仿真中设置聚四氟乙烯材料对光的透射率为 0.9,空气对光的透射率为 1。实验获得的 80 帧平均照明光和参考光如图 1 (b)、(c) 所示,根据实验获得的照明光和参考光仿真了多幅全息图,对这些全息图取平均后再进行光强归一化所得结果如图 1 (d) 所示。

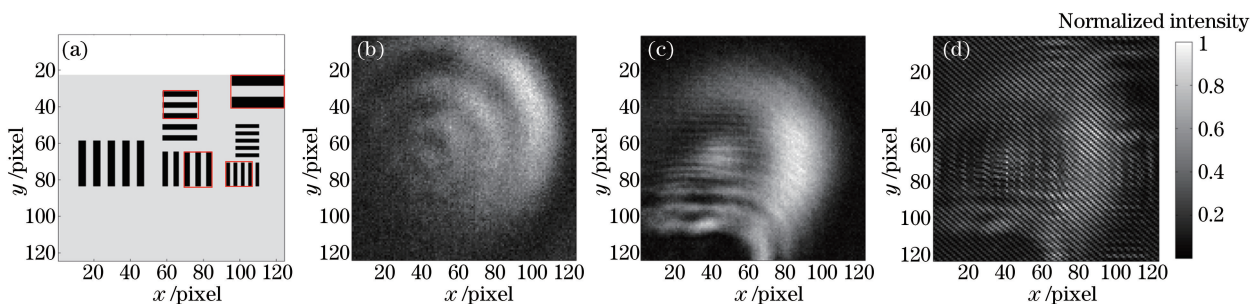


图 1 (a) 理想分辨率板;(b) 照明光;(c) 参考光;(d) 全息图

Fig. 1 (a) Ideal resolution chart; (b) illumination light; (c) reference light; (d) hologram

将图 1 (d) 补零至大小为 1024×1024 ,然后直接用与实验参考光波矢方向相同的平面波对其根据角谱法进行再现,所得结果如图 2 (a) 所示。位于图 2 (a) 中心的为 $+1$ 级像,即再现像,零级像位于 $+1$ 级像的右上角, -1 级像位于 $+1$ 级像的左下角。采用两种消零级方法得到的再现结果分别如图 2 (b)、(c) 所示。为方便比较分析,截取图 2 (a)、(c) 中心 124×124 大小的再现像,进行光强归一化后所得结果如图 2 (d)、(f) 所示。由图 2 (d) 可以看出零级像与 $+1$ 级像有部分重叠。

比较图 2 (e)、(f) 可以发现,CWR 法处理后的图像在亮条纹处整体效果优于 LO 法。为证实此主观评价的正确性,对再现像中目标亮条纹较清晰的区域[图 1 (a) 方框所示区域]进行强度扫描,计算所得 SNR 结果如图 3 (a)~(d) 所示。这 4 个区域分别包含 3 个 0.2 mm 亮竖条纹、2 个 0.3 mm 亮竖条纹、2 个 0.3 mm 亮

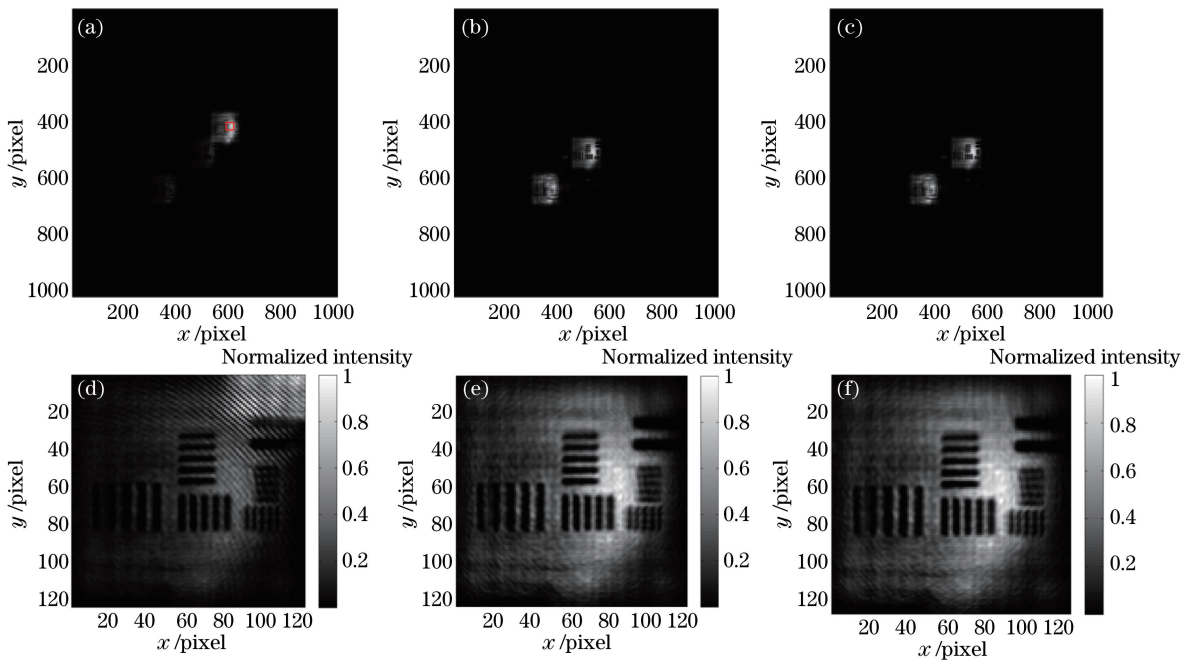


图2 仿真再现结果。(a)直接再现结果;(b) LO法;(c) CWR法;(d)图(a)的再现像;(e)图(b)的再现像;(f)图(c)的再现像
Fig. 2 Reconstructed results in simulation. (a) Directly reconstructed result; (b) LO method; (c) CWR method;
(d) reconstructed image of Fig. (a); (e) reconstructed image of Fig. (b); (f) reconstructed image of Fig. (c)

横条纹和1个0.6 mm亮横条纹,因此均包含6条竖(横)线。从图3可以看出,这4个区域中CWR法和LO法SNR高的竖(横)线数目分别为(4,2)、(4,2)、(3,3)、(5,1);在0.2 mm和0.3 mm亮竖条纹区域,CWR法得到的再现像效果更好;在0.3 mm亮横条纹区域,两种方法得到的再现像SNR差异不大;在0.6 mm亮横条纹区域,两种方法的SNR差异不明显,但CWR法效果略好一些。

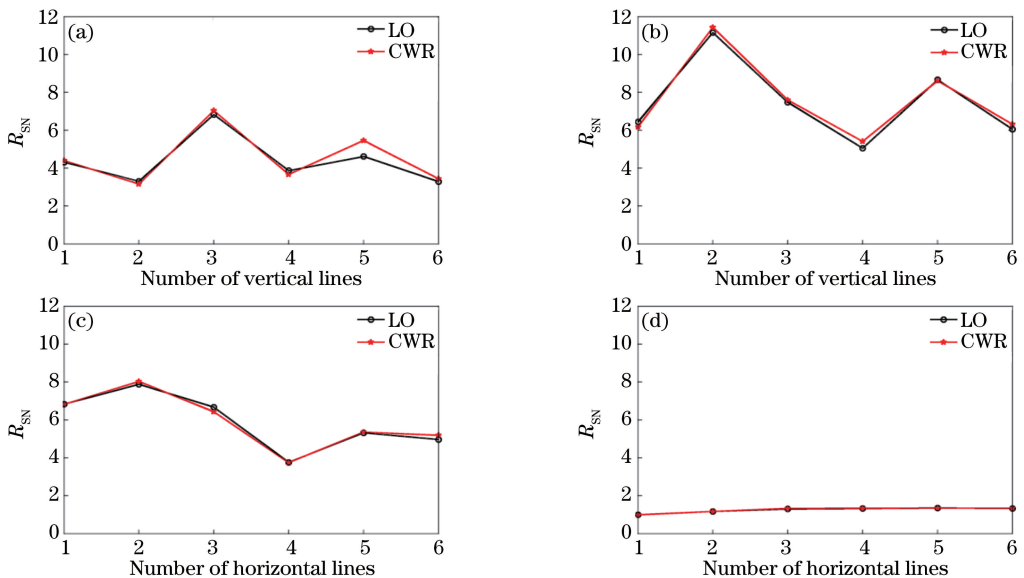


图3 亮条纹 SNR。(a) 0.2 mm 竖条纹;(b) 0.3 mm 竖条纹;(c) 0.3 mm 横条纹

Fig. 3 SNR of bright stripes. (a) 0.2 mm vertical stripes; (b) 0.3 mm vertical stripes; (c) 0.3 mm horizontal stripes;
(d) 0.6 mm horizontal stripes

为简便起见,此处仅给出仿真再现像中0.2 mm亮竖条纹处的SNR、均值和标准差数据,如表1~3所示(表中数据均由Matlab软件计算得出,四舍五入取到小数点后4位,下同)。95、96列,99、100列和103、104列表示构成3条0.2 mm亮条纹的6条竖线在再现像中的位置。

表 1 0.2 mm 亮竖条纹 SNR
Table 1 SNR of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	4.3134	3.3041	6.8299	3.8712	4.6138	3.2918
CWR	4.3944	3.1652	7.0360	3.6695	5.4577	3.4349

表 2 0.2 mm 亮竖条纹均值
Table 2 Mean value of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	0.2696	0.2785	0.2262	0.2044	0.1262	0.1445
CWR	0.2869	0.2973	0.2400	0.2198	0.1398	0.1640

表 3 0.2 mm 亮竖条纹标准差
Table 3 Standard deviation of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	0.0625	0.0843	0.0331	0.0528	0.0274	0.0439
CWR	0.0653	0.0939	0.0341	0.0599	0.0256	0.0477

以第 99 列为例, CWR 法的均值比 LO 法的均值大 6.10%, 标准差比 LO 法的标准差大 3.02%, 由于均值的相对差距更大, 从而导致 CWR 法的 SNR 更高。

从图 2 可以看出, 两种消零级方法均能很好地抑制零级衍射。在图 2(a) 所示的 +1 级像和零级像区域, 对零级像与 +1 级像不发生重叠的部分区域[图 2(a) 400~420 行、600~620 列, 图 2(a) 方框标示处]计算两种方法消零后零级衍射的衰减率; 算出 LO 法和 CWR 法的衰减率分别为 0.9973 和 0.9999, 可知对于仿真全息图, 两者均能很好地抑制零级衍射, CWR 法的零级衰减率略高于 LO 法。

将再现像与图 1(a) 所示理想分辨率板进行对比来计算 PSNR。表 4 列出了整幅再现像和不同分辨率亮条纹区域的 PSNR。从表 4 可以看出, LO 法的 PSNR 只在 0.3 mm 亮竖条纹区域更高; 在整幅再现像和其他几个亮条纹区域, CWR 法的 PSNR 更高, 由 PSNR 可以看出, CWR 法得到的再现像图像质量更好。

表 4 整幅再现像及不同亮条纹区域的 PSNR
Table 4 PSNR of total reconstructed image and different bright stripe zones

Method	Total image	0.2 mm vertical strip	0.3 mm vertical strip	0.3 mm horizontal strip	0.6 mm horizontal strip
LO	3.1957	3.5997	4.3007	4.1928	2.3905
CWR	3.2262	3.8097	4.2486	4.2656	2.4235

根据零级衍射亮度衰减率、PSNR 和 SNR 的计算结果可知, CWR 法和 LO 法均能很好地抑制零级衍射; 相比 LO 法, CWR 法在高分辨率的 0.2 mm 亮竖条纹区域的 SNR 更高, 且整体上 PSNR 更高, 图像质量更好。这是因为 CWR 法是从物理光学的角度提出的一种针对抑制全息中零级像的算法, 而 LO 法仅采用高通滤波, 方法具有稳健性。并且本文仿真采用的光束强度分布与实验一致, 均是非均匀的, 而 LO 为二阶微分算子, 会使不均匀性更明显, 因此 CWR 法得到的再现像质量更好一些。

4 真实全息实验结果及分析

本课题组对一块具有不同空间频率成分的聚四氟乙烯分辨率板进行太赫兹离轴数字全息成像实验, 结果如图 4 所示, 实验所用到的成像探测器为 Ophir-Spiricon 公司的热释电面阵探测器 Pyrocam III, 具有 124×124 个像元, 像元大小为 $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$, 像元间隔为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 面阵探测器的有效感光面积为 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$ 。实验中全息图记录距离约为 21 mm, 成像目标下部从左到右依次为 0.4, 0.3, 0.2 mm 条纹, 如图 4(a) 所示。对实验中获得 80 帧平均全息图的光强进行归一化, 所得结果如图 4(b) 所示。当再现距离为 21 mm 时, 将图 4(b) 补零至大小为 1024×1024 , 通过(6)式计算出实验参考光的波矢方向, 然后直

接采用与其方向相同的平面波对补零后的全息图结合角谱法进行再现, 所得结果如图 4(c) 所示。图 4(c) 中心即为 +1 级再现像, 而零级像和 -1 级像分别位于 +1 级像的右上角和左下角。采用两种消零级方法得到的再现结果分别如图 4(d) 和 (e) 所示。为了方便比较分析, 截取图 4(c)~(e) 中心 124×124 大小的再现像进行光强归一化, 所得结果如图 4(f)~(h) 所示。由图 4(f) 可以看出, 零级像与 +1 级像存在部分重叠。

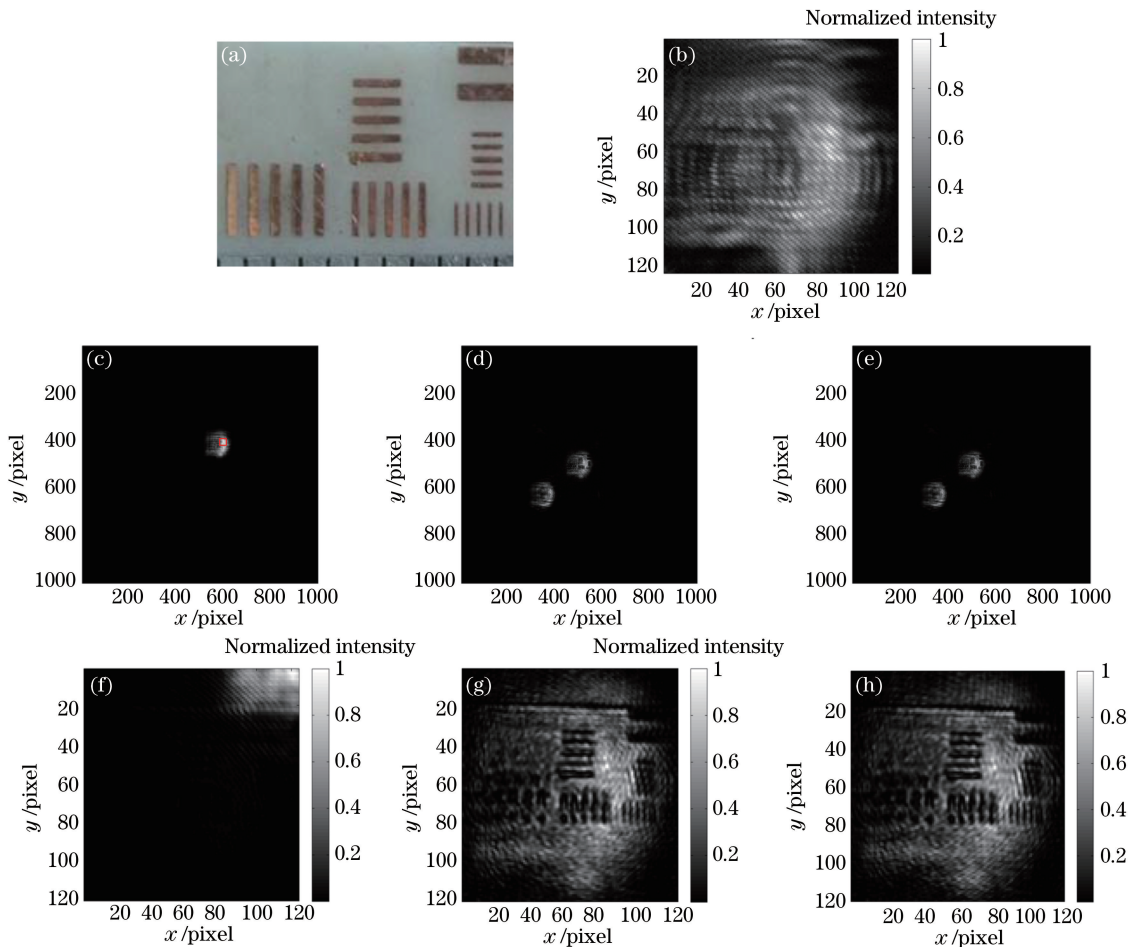


图 4 (a) 实验成像目标; (b) 全息图; (c) 直接再现结果; (d) LO 法;

(e) CWR 法; (f) 图 (c) 中的再现像; (g) 图 (d) 中的再现像; (h) 图 (e) 中的再现像

Fig. 4 (a) Experimental imaging target; (b) hologram; (c) directly reconstructed result; (d) LO method; (e) CWR method;

(f) reconstructed image of Fig. (c); (g) reconstructed image of Fig. (d); (h) reconstructed image of Fig. (e)

比较图 4(g)、(h) 可以发现, 在 0.2 mm 亮竖条纹处, LO 法再现像出现了明显的黑色斜条纹。为证明这一点, 对该区域进行强度扫描, 计算所得 SNR 结果如图 5(a) 所示。对实验再现像另外 3 个亮条纹较清晰区域的 SNR 计算结果如图 5(b)~(d) 所示, 这 4 个亮条纹区域均在图 1(a) 中用方框标示出来。从图 5 可以看出, 这 4 个区域中 CWR 法和 LO 法 SNR 高的竖(横)线数目分别为 (4, 2)、(4, 2)、(2, 4)、(1, 5); 在 0.2 mm 和 0.3 mm 亮竖条纹区域, CWR 法得到的再现像效果更好; 在 0.3 mm 和 0.6 mm 亮横条纹区域, 两种方法得到的再现像 SNR 差异不大, LO 法效果略好一些。

为简便起见, 仅给出实验再现像中 0.2 mm 亮竖条纹的 SNR、均值和标准差数据, 如表 5~7 所示。

表 5 0.2 mm 亮竖条纹 SNR

Table 5 SNR of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	7.6806	5.2803	3.0552	4.0712	8.5064	3.1873
CWR	7.4594	5.5348	3.3403	4.2485	5.7337	3.9435

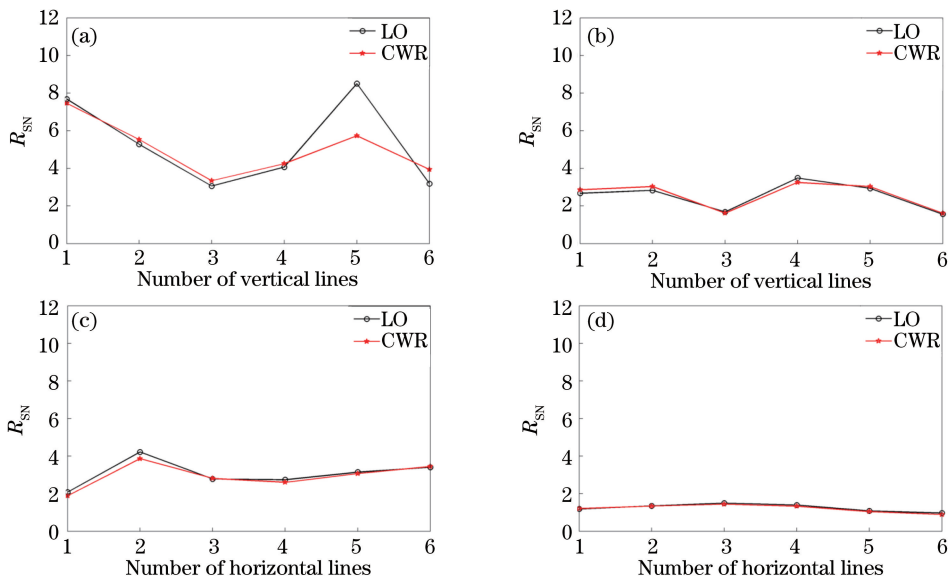


图 5 实验再现像不同分辨率亮条纹的 SNR。(a) 0.2 mm 竖条纹;(b) 0.3 mm 竖条纹;(c) 0.3 mm 横条纹;(d) 0.6 mm 横条纹
Fig. 5 SNR of different resolution bright stripes in experimental reconstructed images. (a) 0.2 mm vertical stripes;
(b) 0.3 mm vertical stripes; (c) 0.3 mm horizontal stripes; (d) 0.6 mm horizontal stripes

表 6 0.2 mm 亮竖条纹均值

Table 6 Mean value of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	0.3991	0.3312	0.4241	0.2776	0.3163	0.2036
CWR	0.3960	0.3263	0.4311	0.2723	0.3229	0.1990

表 7 0.2 mm 亮竖条纹标准差

Table 7 Standard deviation of 0.2 mm bright vertical stripes

Method	Column					
	95	96	99	100	103	104
LO	0.0520	0.0627	0.1388	0.0682	0.0372	0.0639
CWR	0.0531	0.0590	0.1291	0.0641	0.0563	0.0505

以第 99 列为例,CWR 法的均值比 LO 法的均值大 1.65%,而标准差比 LO 法的标准差小 6.99%,从而导致 CWR 法的 SNR 更高。

从图 4 可以看出,两种消零级方法均很好地抑制了零级衍射。根据图 4(f)所示的+1 级像和零级像区域,对零级像与+1 级像不发生重叠的部分区域[图 4(f) 400~420 行、600~620 列,图 4(f)方框标示处]计算两种方法消零后零级衍射的衰减率;算出 LO 法和 CWR 法的衰减率分别为 0.9977 和 0.9999,可知对于实验全息图,两者均能很好地抑制零级衍射,CWR 法的零级衰减率略高于 LO 法。

5 结 论

为了对太赫兹离轴数字全息中采用的空域 LO 法和 CWR 法的消零级效果进行客观评价,对仿真的全息图和实验全息图进行了消零再现。研究表明,CWR 法和 LO 法均能很好地抑制零级衍射;相比于 LO 法,CWR 法的零级衍射亮度衰减率更高,再现像整体上 PSNR 更高,在高分辨率的 0.2 mm 亮竖条纹区域 SNR 更高,图像质量更好。下一步可将图像增强技术应用于再现像中,并比较消零级的作用。

参 考 文 献

- [1] Hu Jiaqi, Li Qi, Yang Yongfa. Simulation research on continuous terahertz inline digital holography imaging based on

- phase retrieval algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011103.
- 胡佳琦, 李琦, 杨永发. 基于相位恢复法的连续太赫兹同轴数字全息成像仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011103.
- [2] Gao P, Yao B, Min J, *et al.* Parallel two-step phase-shifting point-diffraction interferometry for microscopy based on a pair of cube beamsplitters[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1930-1935.
- [3] Sun Jie, Wang Gang, Guo Jun, *et al.* Comparison and improvement of eliminating zero-order methods in digital holography[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(1): 149-152.
- 孙杰, 王刚, 郭俊, 等. 数字全息中几种消零级方法的比较及改进[J]. *半导体光电*, 2012, 33(1): 149-152.
- [4] Qiu Peizhen, Pang Tao. Spectrum characteristics of digital holograms illuminated with reference wave and its application[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(4): 349-352.
- 邱培镇, 庞涛. 参考光照射下的数字全息图频谱特点及应用[J]. *光学技术*, 2014, 40(4): 349-352.
- [5] Chen G L, Lin C Y, Kuo M K, *et al.* Numerical reconstruction and twin-image suppression using an off-axis Fresnel digital hologram[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 527-532.
- [6] 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.
- 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): 1229-1232.
- [7] Zhu Yuliang, Zhou Hao, Gu Jihua. A pre-process method based on spatial filter for zero-order image elimination in digital off-axis holography[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 795-798.
- 朱余良, 周皓, 顾济华. 离轴数字全息零级像的空域滤波预处理消除法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 795-798.
- [8] Liu C, Li Y, Cheng X, *et al.* Elimination of zero-order diffraction in digital holography[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2434-2437.
- [9] Liebling M, Blu T, Unser M. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2004, 21(3): 367-377.
- [10] Li Q, Ding S H, Li Y D, *et al.* Experimental research on resolution improvement in CW THz digital holography[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(1): 103-110.
- [11] Ma Jianshe, Ren Zhenbo, Su Ping, *et al.* Comparison and improvement of image quality evaluation of zero-order elimination methods in holographic reproduction[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(4): 713-718.
- 马建设, 任振波, 苏萍, 等. 全息再现中几种消零级方法的像质评价及其改进[J]. *半导体光电*, 2013, 34(4): 713-718.
- [12] Doval A F, Trillo C. Dimensionless formulation of the convolution and angular spectrum reconstruction methods in digital holography[C]. *SPIE*, 2010, 7387: 73870U.