

光学学报

基于多视角合成孔径的太赫兹光场成像 去遮挡算法研究

杨墨轩^{1,2,3,4}, 赵源萌^{1,2,3,4*}, 朱凤霞^{1,2,3,4}, 张宏飞^{1,2,3,4}, 李志龙^{1,2,3,4}, 张存林^{1,2,3,4}

¹太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;

²太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 北京 100048;

³北京成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048;

⁴首都师范大学物理系, 北京 100048

摘要 针对太赫兹光场成像中由前景遮挡物影响感兴趣信息采集的问题, 提出基于多视角合成孔径的太赫兹光场成像去遮挡算法。在分析太赫兹光场成像数字重聚焦原理的基础上, 首先使用太赫兹焦平面阵列相机来采集太赫兹光场的原始数据, 然后通过确定最小泛化误差来定位数字重聚焦深度, 最后应用经验模式分解(EMD)法对重构图像进行增强处理, 得到目标物轮廓分明、抑制遮挡物干扰的太赫兹图像。实验结果表明, 太赫兹光场技术与合成孔径技术的结合可有效降低遮挡物的影响, 另外证实了 EMD 法具有改善太赫兹图像质量的能力。

关键词 成像系统; 太赫兹成像; 光场; 合成孔径; 去遮挡

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0911001

Terahertz Light Field Imaging Occlusion Removing Algorithm Based on Multi-Perspective Synthetic Aperture

Yang Moxuan^{1,2,3,4}, Zhao Yuanmeng^{1,2,3,4*}, Zhu Fengxia^{1,2,3,4}, Zhang Hongfei^{1,2,3,4},
Li Zhilong^{1,2,3,4}, Zhang Cunlin^{1,2,3,4}

¹Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China;

²Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China;

³Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Beijing 100048, China;

⁴Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract In order to solve the problem that the acquisition of interesting information is affected by foreground occlusion in terahertz field imaging, a terahertz light field imaging occlusion culling algorithm based on multi-perspective synthetic aperture is proposed. Based on the analysis of digital refocusing principle of terahertz light field imaging, the original data of the terahertz light field is collected by using a terahertz focal plane array camera, and the depth of digital refocusing is located by determining the minimum generalization error. Finally, the reconstructed image is enhanced by using empirical mode decomposition (EMD) method. The terahertz image of the object with clear contour and interference suppression is obtained. The experimental results show that the combination of terahertz light field technology and synthetic aperture technology can effectively reduce the influence of occlusion, and it is proved that EMD method has the ability to improve the quality of terahertz image.

Key words imaging systems; terahertz imaging; light field; synthetic aperture; occlusion removing

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-11-03; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875140)、首都师范大学分类发展-学位点建设与研究生教育立项及研究生高水平学术创新项目(008-2155089)、科技创新服务能力建设-基本科研业务(20530290044)

通信作者: *zhao.yuanmeng@cnu.edu.cn

1 引言

太赫兹波对很多非金属、非极性物质具有良好的穿透性,而且其光谱能量很低,不会电离损伤生物组织。太赫兹成像技术在国防军事、公共安全、航天遥感、无损检测等领域有较广泛的应用^[1-4],然而受太赫兹辐射强度、太赫兹波波长以及复杂成像环境的限制,其在成像质量与目标分辨能力等方面仍有待提高。

太赫兹光场是在空间中同时包含位置信息和方向信息的四维太赫兹辐射场。太赫兹成像方式是记录太赫兹波在传播过程中的位置信息和方向信息,相比只记录二维的传统成像方式多出两个自由度,因此在图像重建过程中能够获得更加丰富的图像信息^[5]。虽然太赫兹成像方式的穿透性好,但当光路中有金属或极性物质遮挡时,有用信息的获取则会受到很大的影响,而计算机视觉领域中的很多热门任务都受到感兴趣区域被遮挡、物体重叠的困扰。当感兴趣区域被遮挡时,大量特征信息无法被正确采集,这使目标识别与目标分类面临巨大挑战。因此,如何有效去除前景遮挡、重建清晰的背景图像是一个极为重要并且富有意义的研究内容^[6]。当目标物被遮挡时,单视角成像技术不能有效采集所需的信息,而多视角的合成孔径成像技术可以利用光场成像所包含的视角信息来克服单视角成像技术的局限性,因此合成孔径成像技术在去除前景遮挡任务时有着巨大的优势。其中,光场照相机是在主透镜和图像传感器之间放置微透镜阵列来捕获场景的角度信息^[7-8]。然而,受到传感器分辨率的限制,人们只能选择密集的采样角度或者密集的空间采样间隔。相比之下,相机阵列是将几个独立的相机放在一个规则的网格中,故具有更高的图像分辨率^[9-13]。尽管早期的相机阵列体积大且硬件密集,但随着硬件小型化和小型阵列的开发,相比全光相机阵列具有更宽的基线和更稀疏的采样角度,这为后期计算奠定了基础^[14-15]。

Vaish 等^[16]基于重聚焦的方法来完成移除遮挡物的任务,在不同深度位置进行数字重聚焦以实现前景移除,但由于不加选择地使用来自背景和遮挡物的光线,所以重构图像的分辨率较差。Pei 等^[17]提出了一种基于影像去背景光线的光场图像去遮挡物算法,该算法将全部子孔径图像重聚焦至背景区域以估计离焦区域,然后用像素标记法移除遮挡物,这解决了如何分离遮挡物与目标物的问题,但成像

质量受到能否准确分割遮挡物与目标物的影响。Xiao 等^[18]提出了一种基于 K 聚类算法的光场图像去遮挡物方法,该方法使用 K 聚类算法对遮挡物像素与背景像素进行标记,但由于受到传统人工提取特征的局限性,在复杂场景中遮挡物的移除结果表现不佳。刘严羊硕等^[19]提出了一种基于极平面图 (EPI) 边缘特征估计场景深度范围的遮挡物移除方法,通过待重建物面的参数来提取前景边缘特征并进行扩散,从而确定前景遮挡所对应的射线,但重建目标不在同一深度会出现部分失焦的现象。

本文提出一种基于太赫兹光场与多视角合成孔径的去遮挡成像算法。首先采集太赫兹光场图像,通过数字重聚焦技术来合成重构图像,并利用数字图像处理方法来分割目标物与遮挡物,最后利用希尔伯特曲线填充的方法进行图像滤波,可以得到深度、角度及目标物轮廓分辨力强的太赫兹图像。本文将从光场成像基本原理、太赫兹图像采集与数字重聚焦、基于经验模式分解 (EMD) 的太赫兹图像处理等方面进行阐述。

2 光场成像与数字重聚焦基本原理

相比只通过探测器记录主光瞳的光线强度,光场成像不光记录了探测器平面的位置信息,也记录了光线强度信息和方向信息。本文采用双平面参数法来表征光场,该方法依据 Levoy 等^[20]提出的光场渲染理论来反映光辐射强度分布与传播方向的映射关系。根据光场渲染理论,携带位置信息和方向信息的光线都可以用两个相互平行的平面来表征,光线与主透镜平面和传感器平面相交的两坐标点构成了光场的四维函数 $L(u, v, s, t)$,其中 L 为光线的辐射通量^[21], (u, v) 和 (s, t) 分别为光线的二维位置信息与二维方向信息。探测器像面上的每个位置都会记录穿过透镜平面的光线在此位置的投影积分,在像面 s 处的光辐射强度可以表示为

$$I(s, t) = \iint L(u, v, s, t) du dv. \quad (1)$$

两个焦平面会构成相似三角形, α 为两个相似三角形的比例系数,调整比例系数的大小可以控制重聚焦的深度^[22],此时像面所成的像等于主镜头与焦平面之间光场的积分,表达式为

$$I(s) = \int L \left[u, \frac{s}{\alpha} + u \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) \right] du. \quad (2)$$

根据相机阵列的成像方式,将阵列中每一个相机作为一个子视角进行图像采集,多个相机按规律

整齐排布后可以等效合成为一个大孔径的相机^[19], 如图 1 所示。由于大孔径相机的弥散圆半径小于单相机的弥散圆半径, 同时大孔径相机的焦深小于单相机的焦深, 所以大孔径相机的景深比单相机的景

深更小。利用大孔径相机景深较小的这一特性进行遮挡物的移除, 利用合成孔径技术将焦点定在目标物处, 由于景深较小的遮挡物将会出现模糊的情况, 这在一定程度上减少了遮挡物的影响^[23-24]。

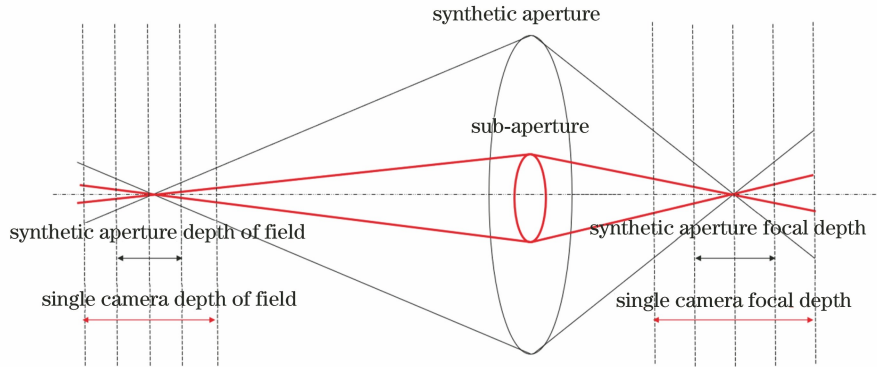


图 1 大孔径相机与单相机的对比图

Fig. 1 Comparison between large aperture camera and single camera

3 基于太赫兹光场的前景移除研究

3.1 太赫兹成像系统与数字重聚焦

基于太赫兹光场与多视角合成孔径的去遮挡成像算法的处理流程如图 2 所示。根据第 2 节的基本原理, 使用 INO 公司的 MICROXCAM-384I-THz 型太赫兹焦平面阵列相机, 通过二维扫描来采集一系列特定视角的子图像阵列, 这些子图像拥有不同方向、角度上的太赫兹辐射通量信息。在包含原始

太赫兹光场数据的子图像阵列上进行光场表征、数字重聚焦和后续图像处理, 实验中将成像目标物在深度方向上以 5 cm 为间隔放置, 利用平移台来固定 INO 相机, 每次在水平方向与竖直方向上间隔 2 cm 进行采集, 总共采集 11 行 11 列, 121 个视角, 图像分辨率为 384 pixel × 288 pixel。在此系统中, 遮挡物为聚四氟乙烯字母“THZ”样品, 目标物为聚四氟乙烯字母“CNU”样品, 每个视角下目标物都被遮挡物部分遮挡。

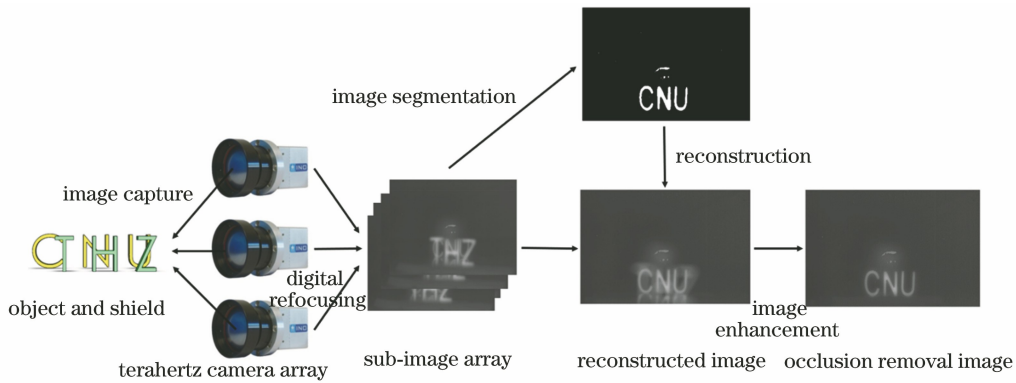


图 2 所提算法的处理流程图

Fig. 2 Processing flowchart of proposed algorithm

图 3 为通过相机阵列采集的子图像阵列数据。根据每个子相机位置不同所导致的视差差异来选择一条倾斜的直线以穿过子图像阵列, 在选择直线的倾斜角度和重聚焦深度时, 为了选择最好的重构效果, 引入由偏差、方差与噪声求和构成的泛化误差, 此时认为输出的期望、方差、噪声分别为

$$\bar{f}(x') = E_D[f(x'; D)], \quad (3)$$

$$V_{\text{var}}(x') = E_D\{[f(x'; D) - \bar{f}(x')]^2\}, \quad (4)$$

$$\epsilon^2 = E_D[(y_D - y')^2], \quad (5)$$

式中: D 为基于太赫兹图像的数字重聚焦数据集; E_D 为基于数据集 D 的误差期望; $f(x'; D)$ 为基于数据集 D 对输入图像的深度预测值; x' 为输入图像; y_D 为输出值; y' 为真实值。

将期望输出值与实际值的差记为偏差, 即

$$B_{\text{bias}}^2(x') = [\bar{f}(x') - y']^2. \quad (6)$$

通过多项式的展开合并,期望泛化误差可以分解为

$$E(f;D) = E_D\{[f(x';D) - y_D]^2\}, \quad (7)$$

$$E(f;D) = B_{\text{bias}}^2(x') + V_{\text{var}}(x') + \epsilon^2. \quad (8)$$

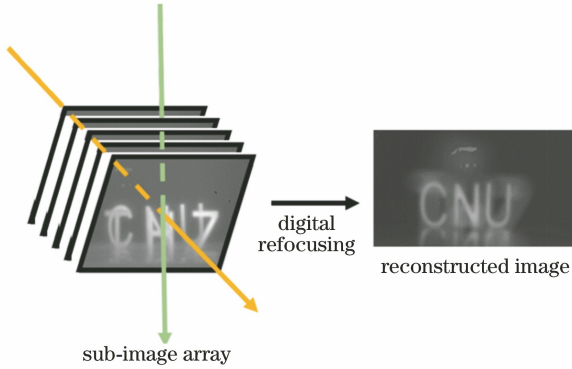


图 3 子图像阵列的重构过程

Fig. 3 Reconstruction process of sub-image array

泛化误差可分解为偏差、方差与噪声,数字重聚焦深度与泛化误差的对应关系如图 4 所示,通过寻找泛化误差的最小值可以确定还原目标物的最佳聚焦深度。与文献[19]中根据 EPI 的边缘特征来估计场景深度范围的方法不同,基于先验知识的最小泛化误差估计方法不需要目标物具有明显的边缘特征,为此该方法更实用于目标物的实时检测与跟踪。

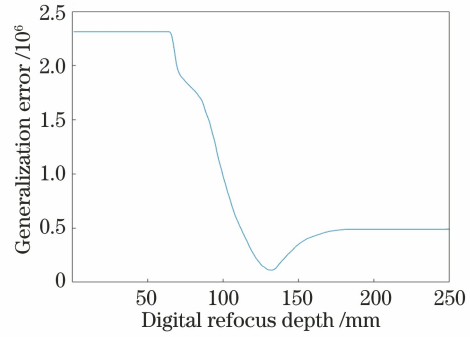


图 4 最小泛化误差的估计结果

Fig. 4 Estimation result of minimum generalization error

通过数字重聚焦技术将焦点定位到不同深度,不同深度的数字重聚焦图像如图 5 所示。由于大孔径相机具有小景深,当聚焦位置更接近目标物时,遮挡物所带来的影响逐渐减少,但是遮挡物的影响依然存在,而且对目标物的特征也带来了影响。一般来说,在处理太赫兹图像时会采用传统的图像去噪算法,但经典算法在处理太赫兹图像时会存在噪声去除不完全、边缘感知不明显、目标物特征点损失等问题,这些问题通常在移除部分噪声的同时会降低图像的视觉质量,为此本文基于希尔伯特的曲线填充技术来减少遮挡物与系统本身对目标物检测与识别带来的影响。

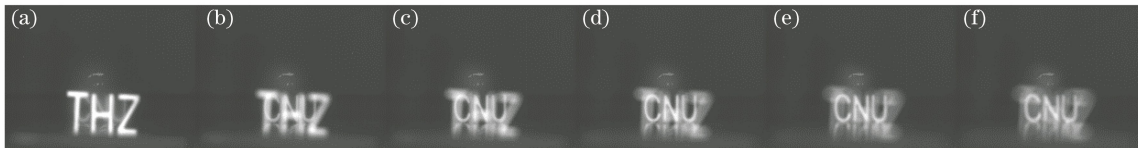


图 5 不同深度的数字重聚焦图像。(a) $n=100$ mm;(b) $n=110$ mm;(c) $n=120$ mm;
(d) $n=130$ mm;(e) $n=140$ mm;(f) $n=150$ mm

Fig. 5 Digital refocus images with different depths. (a) $n=100$ mm; (b) $n=110$ mm; (c) $n=120$ mm;
(d) $n=130$ mm; (e) $n=140$ mm; (f) $n=150$ mm

3.2 基于希尔伯特曲线填充的太赫兹图像处理

EMD 是一种经典的信号分析工具,可将数据分解成一系列低频信号,适用于滤波频率和幅度变化的非线性信号,其又称为“经验模式”^[25]。Subr 等^[26]使用经验模态分解法对图像进行平滑处理,其中高对比度和低对比度的边缘都被保留并用于结构提取,将给定的图像分解为两层,即

$$I'(p) = h(p) + r(p), \quad (9)$$

式中: p 为太赫兹图像中每一个像素点坐标; h 为分解后曲线固有的振荡模式; r 为通过平均局部最大值的包络而获得的曲线。将式(9)进行多尺度分解,表达式为

$$I'(p) = \sum_{k=1}^n h_k(p) + r_n(p), \quad (10)$$

式中: k 为第 k 个像素点。经验模态分解法的优点在于其能够在极值包络之间辨别精细尺度的边缘和细节,而且不受限于它们的对比度幅度,这是该方法适用于边缘保持图像处理的原因。然而,局部极值的确定和滤波方案的选择会极大地影响计算速度。

平滑过程中的一个关键思想是使用一维空间填充曲线作为 EMD 中局部极值及其包络计算的区域。直观地说,空间填充曲线是一条覆盖整个图像网格的曲线,其可以使所有像素都是线性排列的,并且可以沿着曲线进行遍历^[27]。

在图像从二维转化到一维的过程中,将图像中的每一个像素块看作一个单独的单元。首先生成一个幂次为 2 的最小平方格来完全覆盖两条边重叠的图像,并确定希尔伯特曲线的阶数为指数;然后生成填充曲线,随着曲线的增长,图像每个像素都按照顺序进行索引。希尔伯特曲线的生成是将图像分成 16 个集合,每个集合中的像素点可以继续划分区

域,直到每个单独的像素块就是一个区域。如上所述,希尔伯特曲线的独特优势在于其保持了局部邻域的邻接性。图 6 为原始曲线信号与滤波后的曲线信号。从图 6 可以看到,基于经验模态分解的滤波方案和基于联合对比度的滤波方案在图像边缘锐化和图像质量上均有显著提高^[28]。

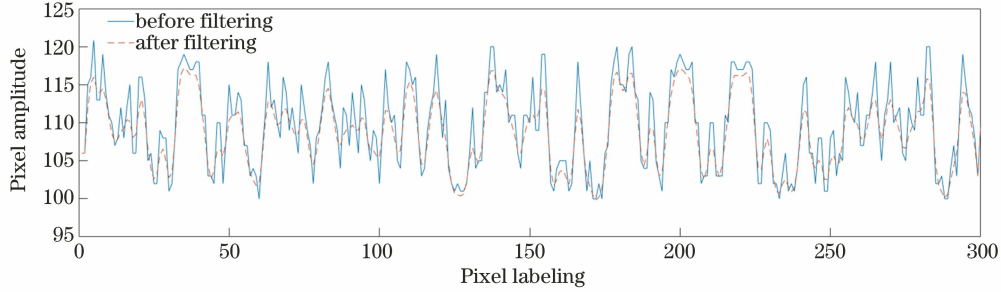


图 6 滤波前后的曲线信号

Fig. 6 Curve signals before and after filtering

3.3 太赫兹图像遮挡物移除实验

为了验证本文算法的可靠性与改善重构图像质量的能力,引入均方误差(MSE)、平均绝对误差(MAE)、信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)进行评价,表达式为

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_x \sum_y [\mathbf{K}(x, y) - \mathbf{I}(x, y)]^2, \quad (11)$$

$$E_{\text{MAE}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_x \sum_y |\mathbf{K}(x, y) - \mathbf{I}(x, y)|, \quad (12)$$

$$R_{\text{SNR}} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_x \sum_y \mathbf{K}(x, y)^2}{\sum_x \sum_y [\mathbf{K}(x, y) - \mathbf{I}(x, y)]^2} \right\}, \quad (13)$$

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left\{ \frac{N_x N_y 255^2}{\sum_x \sum_y [\mathbf{K}(x, y) - \mathbf{I}(x, y)]^2} \right\}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{K}(x, y)$ 为真实图像; $\mathbf{I}(x, y)$ 为重构图像; N_x 为图像 \mathbf{I} 的长度; N_y 为图像 \mathbf{I} 的宽度。MSE与MAE用来检测重构图像与无遮挡物图像之间的偏差,重构图像与无遮挡物图像越接近,误差越小,此时表明两张图像在细节上更加接近。SNR与PSNR是基于误差敏感的图像质量评价指标,重构图像与无遮挡物图像的失真越少,信噪比越高。

上述 4 种评价指标在面对已知目标物的情况下有着良好的表现,有参考的图像客观评价指标在实际场景应用(实时目标追踪、目标识别等)中具有局限性,为此本文引入 4 种无参考的评价指标,即 Brenner 梯度函数、Roberts 函数、灰度差分绝对值和函数(SMD)以及梯度能力函数(EOG)以应对更加复杂的应该场景,表达式为

$$f_{\text{Brenner}} = \sum_x \sum_y [\mathbf{I}(x+2, y) - \mathbf{I}(x, y)]^2, \quad (15)$$

$$f_{\text{Roberts}} = \sum_x \sum_y [|\mathbf{I}(x, y) - \mathbf{I}(x+1, y+1)| + |\mathbf{I}(x+1, y) - \mathbf{I}(x, y+1)|], \quad (16)$$

$$f_{\text{SMD}} = \sum_x \sum_y [|\mathbf{I}(x+1, y) - \mathbf{I}(x, y)| + |\mathbf{I}(x, y+1) - \mathbf{I}(x, y)|], \quad (17)$$

$$f_{\text{EOG}} = \sum_x \sum_y \{[\mathbf{I}(x+1, y) - \mathbf{I}(x, y)]^2 + [\mathbf{I}(x, y+1) - \mathbf{I}(x, y)]^2\}. \quad (18)$$

无参考的图像质量评价指标是对图像清晰度的一个数学描述,重构图像的离焦量越小,重构图像像素的灰度梯度越大,评价指标数值也就越大,在一定的评价指标下算法具有比较好的调焦效果和实时性,可应用在复杂场景中。

图 7(a)~7(e)分别为不同算法处理后的图像。对比 5 幅图像可知,基于数字重聚焦算法的遮挡物移除方法由于受到系统景深的限制,图像

中残留很多残影,这会造成重构图像的模糊,无法很好地区别图像的轮廓,影响目标物的识别与检测。由于重聚焦深度需要手动设置,所以无法快速定位目标物的深度,为此基于数字重聚焦算法的遮挡物移除方法不能适用于实时的应用场景。本文引入基于经验模态分解的滤波方法和基于联合对比度的滤波方法,它们很好地解决了由景深

带来的残影与模糊,并对目标物的边缘十分敏感,而且保留了图像原本的细节信息。更高的信噪比与图像质量为后续计算带来可能,最小泛化误差的深度估计方法解决了重聚焦深度的设置问题,为此更加适用于目标的实时检测与追踪,其可以根据目标物的位置变化自适应地调节参数以保证重构图像的质量。

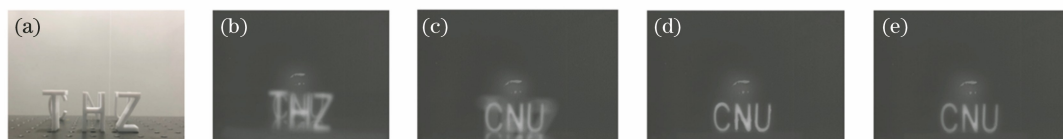


图 7 不同算法处理后的重构图像。(a)可见光图像;(b)原始图像;(c)数字重聚焦算法;(d)本文算法;(e)无遮挡情况

Fig. 7 Reconstructed images processed by different algorithms. (a) Visible image; (b) original image; (c) digital refocusing algorithm; (d) proposed algorithm; (e) unocclusion

如表 1 所示,本文对比了 MSE、MAE、SNR、PSNR 4 种图像质量客观评价指标,结果表明本文算法在遮挡物移除和太赫兹图像重构质量方面优于已有算法。如表 2 所示,本文对比了 Brenner 梯度函数、Roberts 函数、SMD、EOG 4 种无参考的图像质量客观评价指标。根据图像的清晰度,在轻微离

焦的情况下上述评价指标可以以较低的运算量进行判断,多种评价指标的加权相较于单一指标更有助于实时调整图像的清晰度。在无参考的图像质量客观评价指标中,本文算法处理后的图像具有清晰的轮廓边缘,而且消除了残影,这在梯度函数上有较高的表现。

表 1 有参考的图像质量客观评价

Table 1 Objective evaluation of image quality with reference

Index	Original image	Ref. [16]	Proposed algorithm
MSE	1720.875764	35.411535	3.320661
MAE	11.694088	1.604126	0.161418
SNR	70.761419	87.627467	97.906668
PSNR	15.773308	32.639356	42.918558

表 2 无参考的图像质量客观评价

Table 2 Objective evaluation of image quality without reference

Index	Original image	Ref. [16]	Proposed algorithm	No shielding image
Brenner gradient function	1483.1001	1492.1906	1563.6797	1575.1642
Roberts function	20.594340	20.766180	21.215800	21.982600
SMD	12.2614	12.1249	12.5359	13.0081
EOG	1294.6932	1331.1284	1338.5196	1349.5099

遮挡物的尺寸是影响重构图像质量的主要因素之一,本文实验对比了不同尺寸的遮挡物对重构图

像的影响,结果如图 8 所示。实验中目标物的厚度为 1 cm,遮挡物与目标物的间隔为 15 cm,尺寸均为

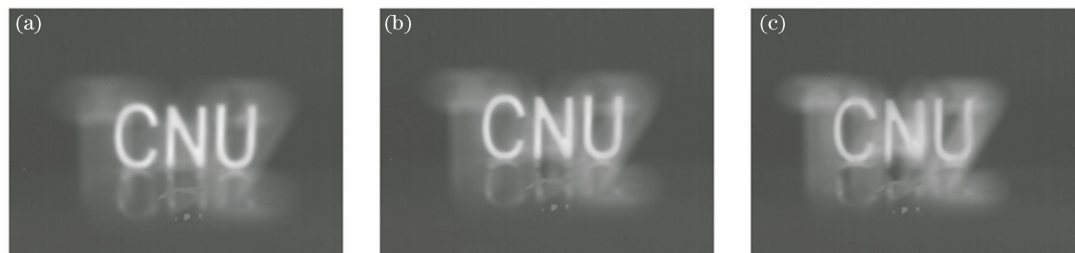


图 8 不同厚度的遮挡物对重构图像的影响。(a) $n=5$ cm;(b) $n=6$ cm;(c) $n=7$ cm

Fig. 8 Influence of occlusion with different thickness on reconstructed image. (a) $n=5$ cm; (b) $n=6$ cm; (c) $n=7$ cm

50 mm×30 mm。当遮挡物的厚度 n 在 0.5~4.0 cm 之间时,重构图像的质量较好,通过本文算法可以有效地消除残影和模糊,最终得到图 7 的重构图像。目标物的厚度大于 5 cm 会对目标物的还原造成影响,使本文算法无法很好地消除残影和模糊。当遮挡物的厚度 $n=7$ cm 时,重构图像的混叠情况加重,目标物边界出现模糊,为此本文算法无法完整分割目标物。基于合成孔径的太赫兹成像算法中,遮挡物的尺寸会受到相机阵列大小与合成孔径的限制。当遮挡物尺寸和厚度直到相机阵列中任意一子视角都无法采集目标物的信息时,说明系统达到计算极限。为了改善此问题,可以增加相机阵列的子相机数量和增大阵列范围,从而获得更大的孔径以改善系统的去遮挡能力。

4 结 论

本文提出一种基于多视角合成孔径的太赫兹光场成像去遮挡算法,将太赫兹焦平面阵列相机组成相机阵列以采集太赫兹光场数据并进行遮挡物移除实验,利用大孔径相机独特的景深特性与四维光场信息进行数字重聚焦实验,并基于经验模态分解的滤波方案和基于联合对比度的滤波方案对太赫兹图像进行增强,得到了分辨识别效果好、客观评价指标改善的太赫兹图像,实验结果证实了太赫兹光场技术与合成孔径技术在遮挡物移除领域的可行性与本文算法的优越性。太赫兹成像技术与遮挡物移除技术的结合有望解决在太赫兹安检与目标追踪时金属与极性物质所带来的不利影响,为合成分辨率更高、质量更好的太赫兹图像提供了新的方案。

参 考 文 献

- [1] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 1-6, 20.
Zhao G Z. Progress on terahertz science and technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2): 1-6, 20.
- [2] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [3] Xu J M, Chen L, Zang X F, et al. Triple-channel terahertz filter based on mode coupling of cavities resonance system [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(16): 161116.
- [4] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(6): 703-707.
Yao J Q. Introduction of THz-wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(6): 703-707.
- [5] 聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.
Nie Y F, Xiangli B, Zhou Z L. Advances in light field photography technique [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(5): 563-572.
- [6] 李英杰. 基于光场图像的前景遮挡去除方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
Li Y J. Research on foreground occlusion removal based on light field[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [7] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[D]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [8] Georgiev T G, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering [J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 021106.
- [9] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765-776.
- [10] Vaish V, Levoy M, Szeliski R, et al. Reconstructing occluded surfaces using synthetic apertures: stereo, focus and robust measures[C]//2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), June 17-22, 2006, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2006: 2331-2338.
- [11] Yang J G, Xiao C, Wang Y Q, et al. High-precision refocusing method with one interpolation for camera array images [J]. IET Image Processing, 2020, 14(15): 3899-3908.
- [12] Venkataraman K, Lelescu D, Duparré J, et al. PiCam[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 1-13.
- [13] Lin X, Wu J M, Zheng G A, et al. Camera array based light field microscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(9): 3179-3189.
- [14] Wu G C, Masia B, Jarabo A, et al. Light field image processing: an overview[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(7): 926-954.
- [15] Wang Y Q, Yang J G, Guo Y L, et al. Selective light field refocusing for camera arrays using bokeh rendering and superresolution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(1): 204-208.
- [16] Vaish V, Wilburn B, Joshi N, et al. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays [C]// Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern

- Recognition, 2004. CVPR 2004, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2004: 8161383.
- [17] Pei Z, Zhang Y N, Chen X D, et al. Synthetic aperture imaging using pixel labeling via energy minimization[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(1): 174-187.
- [18] Xiao Z L, Si L P, Zhou G Q. Seeing beyond foreground occlusion: a joint framework for SAP-based scene depth and appearance reconstruction[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(7): 979-991.
- [19] 刘严羊硕, 刘宾, 潘晋孝. 基于前景移除的合成孔径成像算法[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0611002.
Liu Y Y S, Liu B, Pan J X. Synthetic aperture imaging algorithm via foreground removing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0611002.
- [20] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering [C]// Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '96, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM Press, 1996: 31-42.
- [21] 杨墨轩, 赵源萌, 左剑, 等. 太赫兹光场数据采集与数字重聚焦实验研究[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 121-126.
Yang M X, Zhao Y M, Zuo J, et al. An experimental study on terahertz light field data acquisition and digital refocusing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(5): 121-126.
- [22] 钱文彤, 李晖, 吴云韬. 基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111027.
- Qian W T, Li H, Wu Y T. Synthetic-aperture occlusion removal algorithm using microlens array [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111027.
- [23] 项祎祎, 刘宾, 李艳艳. 基于共焦照明的合成孔径成像方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0811003.
Xiang Y Y, Liu B, Li Y Y. Synthetic aperture imaging method based on confocal illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0811003.
- [24] 唐睢, 王凯强, 张维, 等. 一种基于深度学习的光学合成孔径成像系统图像复原方法[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2111001.
Tang J, Wang K Q, Zhang W, et al. Deep learning based image restoration method of optical synthetic aperture imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2111001.
- [25] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [26] Subr K, Soler C, Durand F. Edge-preserving multiscale image decomposition based on local extrema[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-9.
- [27] Böhm C. Space-filling curves for high-performance data mining [EB/OL]. (2020-08-04) [2021-05-04]. <https://arxiv.org/abs/2008.01684>.
- [28] Zang Y, Huang H, Zhang L. Efficient structure-aware image smoothing by local extrema on space-filling curve[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(9): 1253-1265.