

文章编号: 1672-8785(2020)10-0025-07

太赫兹光场成像的实验与处理研究

张佳琪^{1,2,3,4} 何敬锁^{1,2,3,4*} 耿丽华^{1,2,3,4} 苏 波^{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. 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 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: 太赫兹波的频率介于红外线与微波之间, 其独特优势使得太赫兹三维成像已成为国内外的研究热点。为了将光场成像技术拓展到太赫兹波段, 介绍了太赫兹光场成像的实验与处理方法。采用太赫兹相机阵列采集到了一系列特定视角的太赫兹光场数据。针对由成像系统的器件限制导致图像存在较强噪点等问题, 通过离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)滤波达到了较好的去噪效果并有效保留了图像的细节信息。利用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似性(Structural SIMilarity, SSIM)图像质量评价指标对比了多种滤波去噪方法, 证明了 DCT 滤波方法对于太赫兹图像预处理的可行性。通过选取不同深度值得到了不同景深处的图像重构结果, 初步实现了太赫兹光场成像的数字重聚焦。

关键词: 太赫兹; 光场成像; 离散余弦变换; 重聚焦

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.10.004

Research on Experiment and Processing of Terahertz Light Field Imaging

ZHANG Jia-qi^{1,2,3,4}, HE Jing-suo^{1,2,3,4*}, GENG Li-hua^{1,2,3,4}, SU Bo^{1,2,3,4}, ZHANG Cun-lin^{1,2,3,4}

- (1. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China;
2. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China;
3. Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Beijing 100048, China;
4. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The frequency of terahertz wave is between infrared ray and microwave, and its unique advantages make terahertz three-dimensional imaging become a research hotspot at home and abroad. In order to extend the optical field imaging technology to terahertz band, the experiments and processing methods of terahertz optical field imaging are introduced. A series of terahertz optical field data with specific viewing angles are collected using a terahertz camera array. Device limitations of the imaging system cause noise in images. Aiming

收稿日期: 2020-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675138; 61575131)

作者简介: 张佳琪(1996-), 女, 北京人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹光场成像研究。

*通讯作者: E-mail: hejingsuo@263.net

at this problem, discrete cosine transform filtering achieves a good denoising effect and effectively retains the details of the images. Peak signal-to-noise ratio and structural similarity are used to compare various filtering denoising methods, which proves the feasibility of DCT filtering method in terahertz image preprocessing. The digital refocusing of terahertz optical field imaging is realized preliminarily by selecting different depth values to reconstruct images in different depths.

Key words: terahertz; light field imaging; discrete cosine transform; refocusing

0 引言

光场是三维空间中光线集合的完备表示^[1]。三维空间中的光线可用由三维空间坐标 (x, y, z) 、光线传输角度 (θ, φ) 、颜色和亮度 (λ) 以及时间 (t) 等 7 个维度组成的全光函数来描述。假设一条光线与两个不共面的平面 $u-v$ 和 $x-y$ 分别交于 (u, v) 和 (x, y) 两点, 则该光线的分布可以用 $L(u, v, x, y)$ 来表示, 并由此提出了光场的四维模型。光场的获取有微透镜阵列、相机阵列、掩膜等途径。通过采集光场可以获取光线在某一瞬间穿过空间不同点时所包含的信息, 后期可以通过重聚焦、三维重建以及变换视角等算法来加以挖掘。

随着科技的发展和技术手段的提高, 光场成像技术已慢慢从可见光波段拓展到了 X 射线波段^[2]和红外波段^[3]。其中, X 射线光场成像技术以 X 射线传输特性为理论核心, 基于现有的 CT 成像系统, 采集成像目标在特定视角下的投影图像并对其进行处理。在成像过程中, 为了让 X 射线穿透成像目标, 然后直接使用成像探测器采集图像, 通常采用直接投影积分的方式来实现。该方法属于完全透射成像。而红外热成像则通过红外相机等其他探测器来记录目标物体散发的热量, 再将红外线转换为图像信号来处理。在实验过程中, 环境中的红外辐射、目标的轮廓和深度等因素均会影响红外光场的采集效果, 进而影响图像处理和三维重建的效果。由于 X 射线和红外线的波长特点, X 射线和红外光场成像技术在生物学、医药学等领域具有巨大的应用价值。

太赫兹波的频率在 0.1~10 THz 范围内, 介于微波与红外线之间。在透射成像^[4]方面,

它不仅具有 X 射线的优点, 而且穿透力更强, 获取信息更全面。太赫兹波具有无损性, 可用于对材料或系统的评估、检测等, 且不会对它们造成损伤, 因而可得到非破坏性的评估结论。由于相干性强, 还可用于提升成像景深。太赫兹相机一般采用焦平面阵列芯片与高电阻率浮区硅 (High-Resistivity Float-Zone Silicon, HRFZ-Si) 超半球透镜^[5]组装而成。有限的相机光圈尺寸以及太赫兹波的衍射也决定了成像物体模型的理想尺寸。但太赫兹光场成像技术所需的完整系统较为复杂, 且现有系统存在太赫兹激光器功率低、视场小, 传输过程中损耗较大以及太赫兹相机灵敏度低等问题, 因此只能用相机阵列采集近距离小物体的太赫兹光场。

本文设计了一种基于相机阵列的太赫兹光场采集系统。通过 DCT 滤波对图像进行预处理, 并将其与拉普拉斯滤波等几种滤波方法进行对比, 从而证明其可行性。最后根据所得的光场数据, 通过选取不同深度得到数字重聚焦的结果。成熟的太赫兹光场成像技术将在医学、军事研究等方面存在应用价值。

1 太赫兹光场成像理论

1.1 太赫兹光场

假设太赫兹辐射是无数条光线的集合^[6], 而且任意一条光线在传播过程中光强不发生衰减, 波长也不变, 则可利用光线与任意两个参考平面的交点来对其进行参数化表示。例如, 图 1(a)中的 $u-v$ 平面为物平面, $x-y$ 平面为像平面, d 为两个平面之间的距离。与 $u-v$ 平面和 $x-y$ 平面分别在坐标 (p, q) 和 (m, n) 处相交的光线的辐射量可以记为 $L(U_p, V_q, X_m, Y_n)$ 。

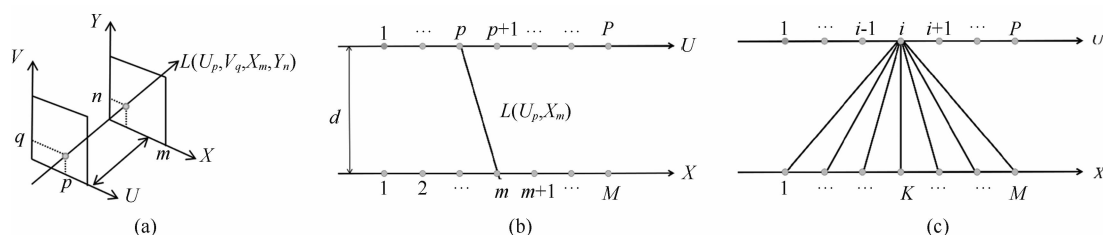


图 1 太赫兹光场的表示: (a)光场的四维参数化表示; (b)图(a)的二维投影; (c)单点物体的完整光场

为了简单分析, 只取两平面中的 U 分量和 X 分量, 并根据两平面参数之间的对应关系将采集到的太赫兹四维光场数据重新投影到两个分量上, 如图 1(b)所示。其中, 最大点数 P 取决于焦平面阵列上探测器像素的数量, M 表示最大采样位置。假设成像物体是一个单点物体, 则可以将太赫兹相机放置在成像平面 X 的各个散点位置上来进行采样, 如图 1(c)所示。其中, k 表示采样的中心位置。将采样相机放置在 k 处。相机光心将在平面 X 上作等步长平移。图 1(c)展示了单点物体的完整光场。如果光场是静态的, 则可以将单个相机按顺序移动到 $1 \sim M$ 的各个位置上。通过用计算机控制载有相机的平移台, 可以采集到包含完整光场数据的 M 个子图像。将来在太赫兹成像的应用中便可实现类似于上述的二维阵列, 并可将其用于实时的光场采集。另外还可以用一系列太赫兹相机组成相机阵列, 并将其用于探测实时动态光场。这在医学细胞研究、军事侦察等方面具有重大的应用前景。

1.2 数字重聚焦

在成像过程中, 聚焦就是将光束会聚于一点, 此时处于合焦位置的物体是清晰的。由于被拍摄的景物具有景深信息, 无法使所有物体全部清晰, 因此可以采用重聚焦算法在任一深度平面上实现聚焦, 使该平面上的物体全部清晰。

聚焦在不同的深度位置等价于改变光学系统主面与探测器平面的距离。重聚焦^[7]的原理如图 2 所示。其中, $x-y$ 表示传感器平面, $x'-y'$ 表示重聚焦平面, $u-v$ 表示主透镜平面。

结合上述太赫兹光场成像的原理, 成像平

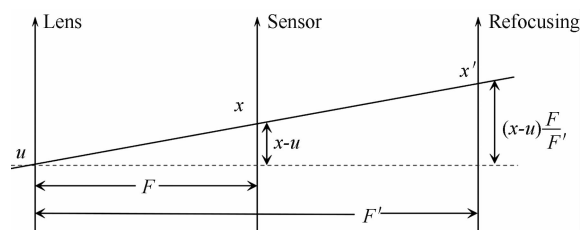


图 2 数字重聚焦的原理图

面上接收到的光辐射量可以表示为^[8-9]

$$E_F(x, y) = \frac{1}{F^2} \iint L_F(u, v, x, y) A(u, v) \cos^4 \theta \, du \, dv \quad (1)$$

式中, θ 为光线 L_F 与平行平面的夹角, $A(u, v)$ 为光瞳的扩散函数。在理想情况下, $u-v$ 与 $x-y$ 平面向无穷大, 透镜孔径和探测元件之外没有光线, 则可以省略光瞳扩散函数, 引入近轴光学。式(1)可简化为

$$E_F(x, y) = \frac{1}{F^2} \iint L_F(u, v, x, y) \, du \, dv \quad (2)$$

由此可以得到一幅数字图像。

当重新聚焦到一个新的深度时, 被聚焦的新图像可以表示为

$$L_{(a, F)}(x, y) = \iint L_F(u, v, u + \frac{x-u}{\alpha}, v + \frac{y-u}{\alpha}) \, du \, dv \quad (3)$$

式中, $\alpha = \frac{F}{F'}$ 为变焦倍率。通过改变 α 可以得到在不同深度处清晰成像的重聚焦图像序列。

2 实验

本文采用由太赫兹光源、成像物体和太赫兹相机组成的成像系统(见图 3(a))进行实验。将输出频率为 2.52 THz 的 SIFIR-50 FPL 激光器作为光源, 并采用 INO 公司的 Microcam-384i 太赫兹相机(见图 3(b))进行拍摄。该相

机由 2 个表面镀有 AR 增透膜的 HRFZ-Si 透镜组成, 其波长响应范围为 0.094~4.25 THz。内部焦平面阵列探测器的分辨率为 384×288 像素, 单个探测器的尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 。焦距为 44 mm, F 数为 0.7。将相机固定在可电控二维平移台上, 并使平移台承载相机沿所需方向移动。

成像物体选用亚克力材质的“五角星”和“三角形”模型, 宽与高均为 30 mm。分别将它们固定在两块可被太赫兹波穿透的白板上(深度差为 60 mm)。其中, “五角星”模型与相机平面之间的距离为 700 mm, “三角形”模型与激光器平面之间的距离为 970 mm(见图 4(a))。利用软件控制平移台带动相机以 10 mm 的步长进行 3×3 网格移动, 并在每个采样节点上拍摄目标场景以获得原始图像, 从而得到一系列太赫兹光场图。然后从光场数据中选取单幅太赫兹图像(见图 4(b))。

从图 4(b)中可以看出, 原始光场图像的中央区域存在一个明显的高频噪声点, 因此需要采用低频滤波对图像进行预处理以提高光场图像的质量。由于无法从单幅图像中分辨出两物体实际上处于两个不同的平面, 因此需要融合多幅光场图像, 并利用数字重聚焦技术在任

一平面聚焦, 使处于焦平面上的物体清晰而另一物体模糊, 从而将前后两个平面区分开来。

2.1 图像预处理

在实验过程中, 多方面因素造成太赫兹透射成像的图像质量不佳。太赫兹波的波长较长, 衍射效应明显, 导致成像目标边缘模糊; 太赫兹激光器的输出功率不稳定且出光口较小, 导致图像亮度不佳、视野较小; 太赫兹相机器件性能受限, 导致输出的图像存在噪点。此外, 周围环境等因素产生的噪声也会影响成像质量。

本文采用 DCT 滤波^[10]对光场图像进行预处理, 即把图像转换到频域。根据噪声的特性以及不同的处理方法, 选取适当频率来滤掉高频噪声部分, 从而达到图像去噪的效果。二维图像的 DCT 过程可以表示为

$$F(x, y) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos \frac{u(2x+1)\pi}{2M} \times \cos \frac{v(2y+1)\pi}{2N} \quad (4)$$

式中, $f(x, y)$ 为空域中的二维向量; $u, x=0, 1, 2, \dots, M-1$; $v, y=0, 1, 2, \dots, N-1$; M 和 N 分别表示图像的高和宽。经过 DCT 滤波去噪后的太赫兹光场图像如图 5(b)所示。

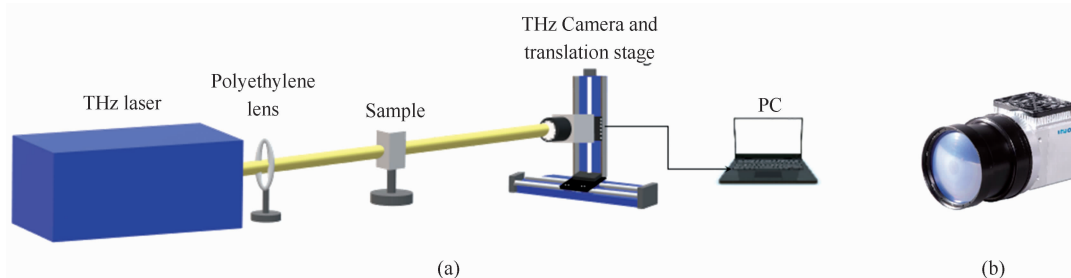


图 3 (a)太赫兹光场成像系统的示意图; (b)Microxcam-384i 太赫兹相机

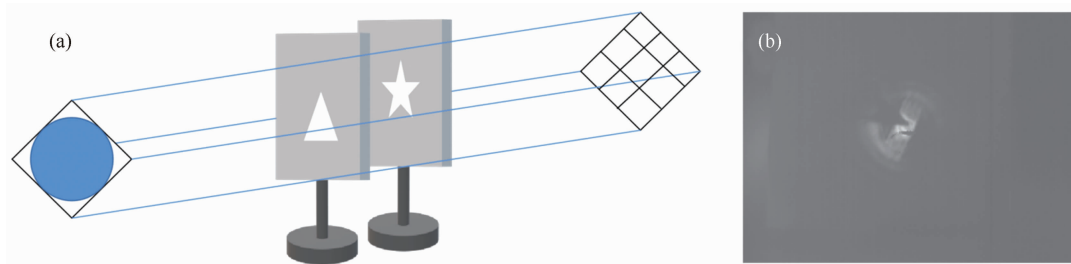


图 4 (a)成像物体示意图; (b)单幅太赫兹图像

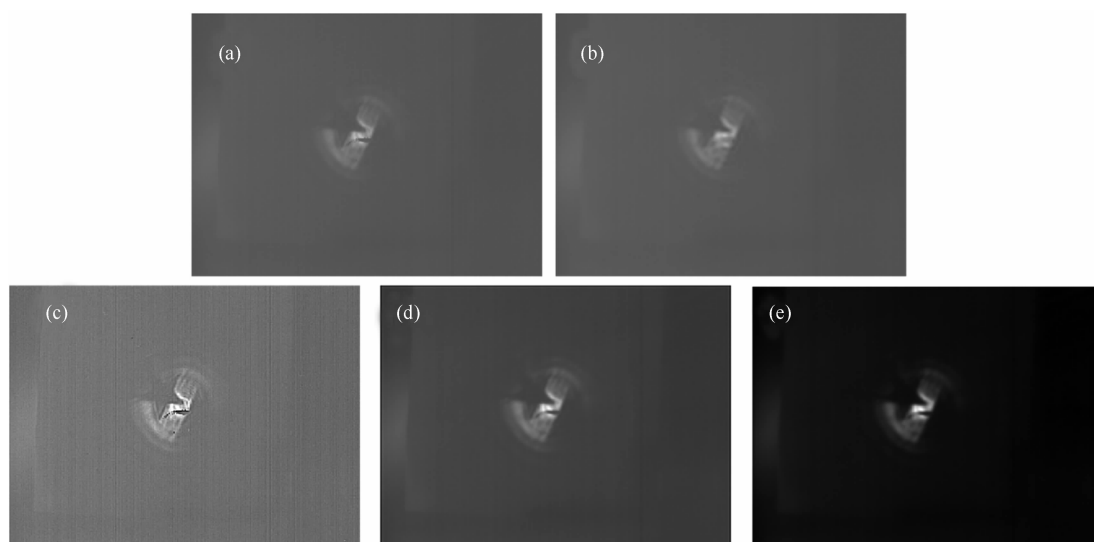


图 5 几种滤波方法的去噪效果对比: (a)原始光场图像; (b)DCT 滤波方法; (c)文献[9]中的方法; (d)文献[1]中的方法; (e)高斯低通滤波方法

为了进一步说明采用 DCT 滤波方法处理太赫兹光场图像的可行性, 分别将其与文献[9]提出的八邻域拉普拉斯算子去噪法、文献[1]提出的巴特沃斯低通滤波去噪法以及高斯低通去噪法进行了比较(结果见图 5)。此外, 采用 PSNR 和 SSIM^[11]来表示以上几种方法的准确性及优势(结果见表 1)。

表 1 几种方法的 PSNR 和 SSIM 评估指标对比

滤波方法	PSNR	SSIM
DCT	51.4868	0.9902
八邻域拉普拉斯算子	19.9772	0.6886
巴特沃斯低通	24.1526	0.9535
高斯低通	37.2924	0.9716

PSNR 是一种评价图像质量的指标, 其表达式为

$$P_{SNR} = 10 \log \frac{Q^2 MN}{\sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N [f'(x, y) - f(x, y)]^2} \quad (5)$$

式中, Q 表示图像量化的灰度级数, $f'(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 分别表示待评价图像和原始图像。 P_{SNR} 的单位是 dB, 数值越大代表失真越小。

SSIM 也是一种全参考的图像质量评价指标, 其表达式为

$$S(u, v) = f[l(x, y), c(x, y), s(x, y)] \quad (6)$$

式中, $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别为从亮度、

对比度和结构三个层面测试图像相似性的函数。SSIM 的值处于 $[0, 1]$ 范围内, 数值越大代表与原始图像的相似度越高, 失真越小。

从图 5 和表 1 中可以看出, 经 DCT 滤波后太赫兹图像的去噪效果最佳, 即在有效除去噪声点的同时, 更好地保留了成像物体轮廓等细节信息。DCT 滤波方法一般通过固定或自适应选择掩膜的形状和大小来进行滤波, 灵活性较高, 计算速度快, 算法简洁。与其他复杂且时间成本更高的算法相比, DCT 滤波方法的通用性更佳, 适用于太赫兹图像的去噪处理。

2.2 数字重聚焦

太赫兹波具有穿透性强、光子能量低等优势。光场成像技术的特点是只需一次曝光, 仅通过后期处理就可得到任意深度平面所需的图像。太赫兹光场成像技术结合了太赫兹波的独特优势和光场的特点, 更加适用于对小物体的探测(如半导体材料表征、生物组织诊断等)^[12]。该技术可以获得亚微米甚至是纳米量级的高分辨率图像, 且无需进行多次成像, 从而大幅提高了效率。

本文分别对前景“五角星”及后景“三角形”目标进行重建^[13-17], 同时还处理细节部分, 以达到前后景分割^[18]的效果。采用上述投影积分重聚焦算法对经过 DCT 处理后的光

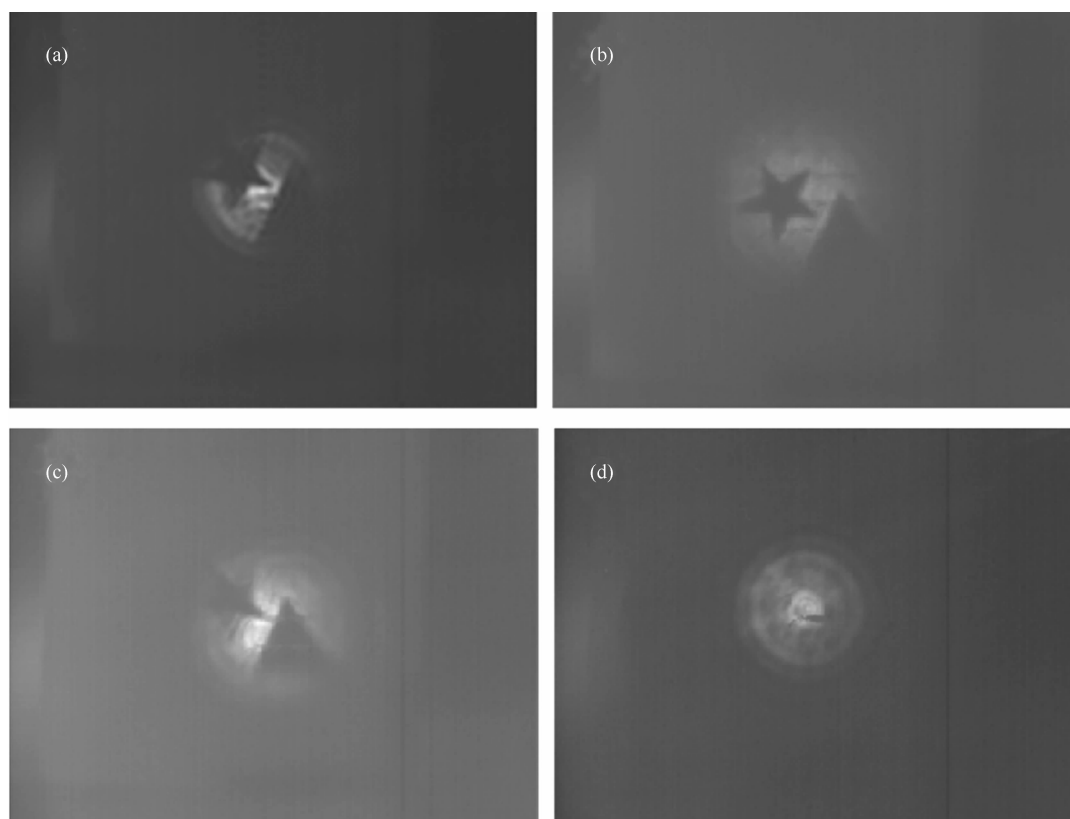


图 6 太赫兹光场成像的数字重聚焦：(a)重聚焦前；(b)聚焦于“五角星”平面；(c)聚焦于“三角形”平面；(d)聚焦于激光器平面

场数据进行了处理，并通过改变变焦倍率来选取不同深度，分别得到了聚焦在“五角星”、“三角形”和太赫兹激光器光圈处等几个不同平面上的结果(见图 6)。

由于目标物体相对较大且激光器的光圈范围有限，选取的相机移动步长过大会导致两个物体无法同时并完整地出现在有效范围内。如图 6(a)所示，“五角星”和“三角形”的两个角与两条边均不在有效范围内。由于激光的输出功率随时间逐渐降低，太赫兹波的衰减导致光源不足。图像中目标物体细节的丢失和图像质量对重聚焦处理有一定的影响，但处于不同深度的不同物体依然都实现了聚焦效果，并达到了前后景分割的目的。由此可见，这套方案可以用于太赫兹光场成像研究，投影积分重聚焦法也适用于对太赫兹光场成像的处理。通过优化实验操作可以达到更加明显、精确的效果，并可进一步实现太赫兹光场成像的深度估计^[19-20]和三维重构^[21]，从而为实现太赫兹光

场成像技术在生物医学检测及军事学等方面的应用奠定研究基础。

3 结束语

本文利用基于相机阵列的太赫兹光场成像技术采集了一系列具有视觉差异的光场图像，然后采用 DCT 滤波方法达到了太赫兹图像预处理的效果，去除了明显噪声点并保留了图像细节信息，从而提高了图像质量。通过融合多幅光场图像并选取不同深度值，得到了聚焦在不同平面处的重采样结果，实现了对处于不同深度位置物体的重聚焦，为今后太赫兹光场的深度估计和三维重构奠定了基础。由于太赫兹波光子具有能量低、穿透性强等优势，太赫兹光场成像技术将会在医药学、军事学等领域具有更大的应用前景。

参考文献

- [1] 耿丽华, 何敬锁, 张宏飞, 等. 基于相机扫描的

- 太赫兹光场成像预处理方法 [J]. 光学技术, 2019, **45**(5): 612–616.
- [2] 王小龙, 罗守华, 李光, 等. X 射线成像闪烁体的光场渲染 [J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1528–1533.
- [3] 夏朝阳, 田勇志, 梁二军, 等. 基于相机阵列的红外光场成像 [J]. 光学学报, 2017, **37**(9): 109–113.
- [4] Lorenzo V, Zhao Y C, Rong L, et al. THz coherent lensless imaging [J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(34): 256–275.
- [5] 闫森, 王军, 杨明, 等. 基于 Tracepro 的太赫兹探测阵列光学镜头设计 [J]. 激光与红外, 2014, **44**(4): 438–442.
- [6] Jain R, Grzyb J, Pfeiffer U R. Terahertz light-field imaging [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, **6**(5): 1–9.
- [7] 王奇, 傅雨田. 利用光场合成与弥散圆渲染的单幅图像重聚焦 [J]. 光学学报, 2020, **40**(1): 281–289.
- [8] Stantchev R I, Hornett S M, Hobson P A, et al. Enhanced THz transmission and imaging of a sub-wavelength slit via light-induced diffraction [J]. *Physical Review A*, 2015, **92**(4): 043820.
- [9] 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): 190670.
- [10] Ayub N, Selwal A. An improved image steganography technique using edge based data hiding in DCT domain [J]. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 2020, **23**(2): 357–366.
- [11] Dhanushree M, Priyadharsini R, Sree S T. Acoustic image denoising using various spatial filtering techniques [J]. *International Journal of Information Technology*, 2019, **11**(4): 659–665.
- [12] Blanche P A, Neifeld M, Tuo M, et al. A 300 THz tabletop radar range system with sub-micron distance accuracy [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 14443.
- [13] 解培月, 杨建峰, 薛彬, 等. 基于矩阵变换的光场成像及重聚焦模型仿真 [J]. 光子学报, 2017, **46**(5): 165–174.
- [14] Zhang Q, Zhang C P, Ling J B, et al. A generic multi-projection-center model and calibration method for light field cameras [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, **41**(11): 2539–2552.
- [15] Chen Y Q, Jin X, Dai Q H. Distance measurement based on light field geometry and ray tracing [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(1): 59.
- [16] 张薇, 郭鑫, 尤素萍, 等. 混合式光场相机在聚焦与非聚焦模式下的超分辨重聚焦仿真(英文) [J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(11): 3384–3392.
- [17] 尤素萍, 卢昱丞, 张薇, 等. 基于光场成像数字重聚焦过程的性能分析 [J]. 系统仿真学报, 2017, **29**(11): 2875–2880.
- [18] 孙建忠, 章乐, 高飞, 等. 太赫兹连续波成像的质量改进与降噪 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(11): 3343–3346.
- [19] 丁江华, 韩燮, 孙福盛. 基于微透镜阵列的光场图像深度估计 [J]. 科学技术与工程, 2016, **16**(17): 71–75.
- [20] Wang Y Q, Yang J G, Mo Y, et al. Disparity estimation for camera arrays using reliability guided disparity propagation [J]. *IEEE Access*, 2018, **6**(1): 21840–21849.
- [21] 尹晓良, 张晓芳, 张伟超, 等. 基于光场数字重聚焦的三维重建方法研究 [J]. 光电子·激光, 2015, **26**(5): 986–991.