

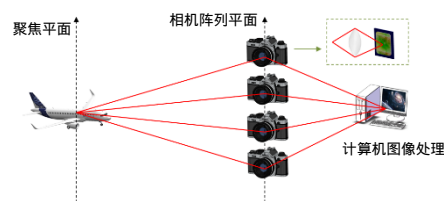


DOI: 10.12086/oe.2020.190670

太赫兹光场数据采集与数字重聚焦实验研究

杨墨轩, 赵源萌*, 左剑, 吕南方, 张存林

首都师范大学物理系; 太赫兹光电子学教育部重点实验室; 太赫兹波谱与成像北京市重点实验室; 北京成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048



摘要: 本文对太赫兹光场数据采集与数字重聚焦成像进行实验研究。太赫兹成像因其穿透性、无损性等优点, 近年来备受国内外研究者关注。太赫兹波段的光场成像技术有望增强图像质量、改善应用效果。本文在分析光场成像基本原理、系统结构、重建方法的基础上, 应用太赫兹焦平面阵列相机进行太赫兹光场数据采集和数字重聚焦实验。首先采集太赫兹光场原始数据, 然后通过数字重聚焦进行计算成像, 最后对重构图像做增强处理, 得到了深度、角度及目标物轮廓分辨力强的太赫兹图像。实验证明了太赫兹光场成像技术的可行性及其改善图像质量、丰富复现效果的能力。

关键词: 太赫兹; 光场采集; 数字重聚焦; 图像重构

中图分类号: TN391.4; TN29

文献标志码: A

引用格式: 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

An experimental study on terahertz light field data acquisition and digital refocusing

Yang Moxuan, Zhao Yuanmeng*, Zuo Jian, Lv Nanfang, Zhang Cunlin

Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education; Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging; Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology; Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: In recent years, terahertz imaging has attracted great attention due to its advantages including penetrability and nondestructive property. The field imaging technology within the terahertz range is expected to enhance the terahertz image quality and improve its application effect. In this paper, an experiment on the data acquisition and digital refocusing of the terahertz light field was conducted. Firstly, the basic principle, system structure, and the method of reconstructing light field imaging were analyzed. Secondly, the terahertz focal plane array camera was used to collect the data about light field and digital refocusing was used to get the computed imaging. Finally, the reconstructed image was enhanced to obtain higher depth resolution, angle resolution, and object contour resolution. Experimental results showed the feasibility and ability of terahertz light field imaging to improve image quality and enrich retrieval effects.

收稿日期: 2019-11-02; 收到修改稿日期: 2020-04-14

基金项目: 首都师范大学研究生院“2020年内涵发展跨学科学术建设基金”资助

作者简介: 杨墨轩(1999-), 男, 主要从事图像处理, 光场成像方向的研究。E-mail: yang.ymx@qq.com

通信作者: 赵源萌(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电成像、太赫兹成像、图像处理的研究。

E-mail: zhao.yuanmeng@cnu.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

Keywords: terahertz; light field acquisition; digital refocusing; image reconstruction

Citation: 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): 190670

1 引言

多数传统相机设备仅复现场景的二维信息，常规的成像技术在拍摄多目标物体时无法做到多点聚焦，会造成部分物体模糊等现象。与传统成像技术不同，光场成像技术在采集数据时会记录空间中光辐射强度、位置与方向等信息，其原始数据中增加的维度用于后续图像重构与数字重聚焦等处理，可获取更好的成像质量与复现效果^[1-2]。1936年 Gershun 提出光场的概念并用光场描述光在三维空间中的辐射传输特性，他认为光辐射是一种连续且不断变化的能量，为之后对光场的研究打下了基础^[3]。1948年，Gabor 利用两束相干光干涉，记录下物体衍射未聚焦的波前，获得第一张全息图^[4]，可称为光场图像的前身。1996年 Levoy 提出了用双平面参数法来表示光场，并给出光场成像计算公式，为第一台光场相机奠定基础^[5]。随着可见光光场成像技术的完善和光场相机技术的成熟，其在军事、航天、医疗等领域应用越来越多，正不断向多元化、实用化发展。

太赫兹波通常指波长在 $30\ \mu\text{m}\sim 3000\ \mu\text{m}$ 的电磁波，它对很多介电材料和非极性物质有良好的穿透性，而金属表面对太赫兹波有强反射特性。太赫兹波光谱能量很低，不会电离损伤生物组织。太赫兹成像技术利用太赫兹探测器采集太赫兹波进行成像，由于具有穿透性、安全性等优势，在国防军事、公共安全、航天遥感、无损检测等领域都有着很好的发展前景^[6-9]。近年来，太赫兹成像技术与光场成像技术不断发展，太赫兹辐射的光场采集与数字重聚焦作为太赫兹光场成像的关键技术，已引起国内外研究者的关注。2016年，德国大学的 Jain 等研发了一种太赫兹光场成像系统^[10]，该系统采用硅超半球透镜集成 32×32 个相机作

为太赫兹光场采集器，通过图像平面扫描记录完整的太赫兹静态光场，经过后续数据处理与重构获得了太赫兹光场成像结果，目前太赫兹光场成像中的一些关键技术还有待进一步研究。本文首先阐述光场成像的基本原理，分析光场表征方法及数字重聚焦算法；基于太赫兹焦平面阵列相机进行太赫兹光场数据采集实验，并用数字重聚焦技术得到不同深度上的重构图像；最后对图像做锐化和轮廓增强处理，以获取可辨识性强的结果图像。

2 光场成像基本原理

如图 1(a)所示，常规成像技术从几何光学看是将目标物发出的光线透过主透镜汇聚到传感器上，将记录的光学信号转化为电学信号再转换为数字图像，而图 1(b)中的阵列型相机每一个相机都记录了不同角度的信息，再通过光场计算成像^[11]。光场成像在采集数据过程中获取了更多的信息，在重聚焦过程中能够选择聚焦面，当多个目标物不在同一平面时，可做到不同深度的重聚焦。

2.1 光场的表征与光场数据采集

在光场表征方面，目前最常用的方法是双平面参数化法，该方法依据 Levoy 提出的光场渲染理论，分别在主透镜与传感器处建立两个二维平面，设一条同时穿过两个平面的光线，分别交两个平面于 (u, v) 和 (x, y) 两点，由 (u, v) 和 (x, y) 描述这条光线的二维位置信息与二维方向信息，光线与主透镜平面和传感器平面相交的两坐标点共同构成了光场的四维函数 $L(u, v, x, y)$ ，函数值 L 是光线的辐射通量，图 2 是双平面参数化法表征光场的示意图^[2]。本文采用这种方法表征太赫兹光场。

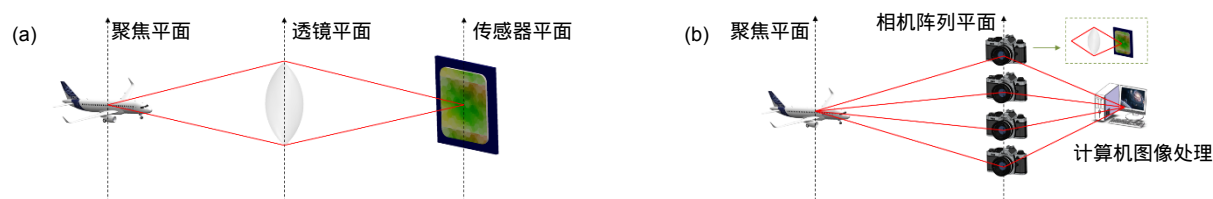


图 1 常规成像与光场成像的对比

Fig. 1 Comparison of conventional imaging and light field imaging

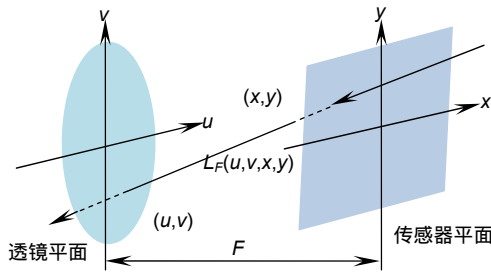


图2 基于 Levoy 光场渲染理论
四维光场函数表征光场

Fig. 2 Light field representation using 4D light field function based on Levoy's light field rendering theory

在光场数据采集方面，目前有三种主流方法，它们采用的装置分别是相机阵列、微透镜阵列和非折射掩膜。1) 相机阵列法以斯坦福大学提出的 128 台相机阵列为代表，相机采用不同的排列方式，获得多种不同角度的子图像阵列，同时利用相机阵列景深较小的特点，通过数字重聚焦技术与合成孔径技术可实现类似“透视”的效果^[12]。2) 微透镜阵列法在常规成像的像面处增加由 $M \times M$ 个微透镜组成的阵列，而且在每个微透镜后面用 $N \times N$ 个传感器采集信息。光线从场景目标物发出，通过主透镜后形成聚焦的像点，再由微透镜阵列散焦到每一个传感器上，形成一个模糊的图像作为采集到的原始光场数据^[13-14]。3) 非折射掩膜法在结构上主要是在常规相机光路中增加一个掩膜，这种方法的优点是易于搭建硬件和进行实验操作^[15]。在三种主流方法之外还有诸如环形孔径相机等方法^[16]，但因其结构复杂等缺点应用不多。

2.2 光场图像数字重聚焦

光场图像的数字重聚焦实现不同场景不同位置对焦，可做到先拍摄后对焦，有利于降低成像的运动模糊、减少由光源强度等问题带来的失焦，在多目标物快速标定、对不同目标物进行深度估计等方面有较为明显的效果^[17]。光场的数字重聚焦在光电测量、遥感、航天等领域有着重要的应用价值。如 2.1 节所述，这里将光场成像系统中的光线用四维光场函数 $L(u, v, x, y)$ 表征，其中 $u-v$ 面是光学系统主平面， $x-y$ 面是探测器所在平面， $L_F(u, v, x, y)$ 代表给定光线的光辐射量，下标 F 代表上述两平面间的距离，像面上接受到的辐射量可表示为

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

其中： θ 为光线 $L(u, v, x, y)$ 与 $u-v$ 面法线的夹角， $A(u,$

$v)$ 为光瞳函数。在此假设 $u-v$ 和 $x-y$ 是无穷大的平面，光瞳之外的光线 $L(u, v, x, y) = 0$ ，引入近轴近似后可将公式简化为

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

在此基础上通过积分求解得到一幅数字图像。

如图 3 所示，光瞳距离传感器的距离为 F ，光瞳距离实际像面的距离为 F' ，假设二者成比例 $\alpha = F'/F$ ，光辐射量函数可以表示为

$$L_{\alpha F}(u, v, x, y) = L_F\left(u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x}{\alpha}, v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y}{\alpha}, u, v\right) = L_F\left\{B_a \cdot [u, v, x, y]^T\right\} \quad (3)$$

其中： B_a 为过渡矩阵，用于光辐射量函数在传感器平面和重聚焦平面之间的转化。将式(3)代入式(2)中，定义切片算子 $\beta[f](x) = f(\beta x)$ ，重聚焦后图像的表达式为

$$E_{F'}(x, y) = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint B_a [L_F] \, du \, dv \quad (4)$$

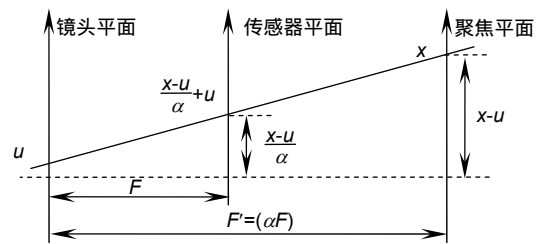


图3 光场重聚焦算法与参数示意图

Fig. 3 The algorithm and its parameterizations of light field refocusing

3 太赫兹光场采集与数字重聚焦实验研究

3.1 太赫兹光场成像系统及数据采集

本文基于第 2 节所述的基本原理，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。在子图像阵列所含原始太赫兹光场数据的基础上进行光场表征、数字重聚焦和后续图像处理。实验中我们将成像目标物分别前后放置，在深度方向上成一定距离间隔。

图 4(a) 为太赫兹光场相机采集的单张子图像，图 4(b) 为利用太赫兹相机分别采集不同位置不同角度的 10×10 子图像进行排列形成子图像阵列。图 5(a) 为任

意取光场子图像阵列中的某一行或某一列的图像叠加在一起，使用不同颜色的直线竖直穿过各图像中深度不同但位置相同的点，而其它深度的图像一一对应的直线应保持倾斜状态^[18]。若直线倾斜程度越大，其对应物体的失焦现象则越严重。如图 5(b)所示，当子图像经过联合位移后，各条直线的状态会有所不同，导致不同深度的聚焦图像发生变化。针对图像因为混叠而出现的模糊、马赛克等，可借助石梦迪等^[19]提出的基于双引导滤波的光场去马赛克算法进行图像增强。

3.2 太赫兹图像数字重聚焦

光瞳与传感器间的距离为 F ，光瞳与实际像面的距离为 F' ，根据式(3)调整 α 的大小可以实现不同深度的数字重聚焦。如图 6(a)~6(c)所示，分别从前到后进

行不同深度的重聚焦，根据重聚焦后的图像可以分辨出目标物排列的前后顺序以及目标物之间的间隔大小。对比图 6(a)与图 6(c)，通过不同深度的重聚焦，可以有效消除干扰点带来的影响。

为了降低重构图像的的噪声，锐化图中目标物的轮廓，本文采用八邻域拉普拉斯算子进行图像增强。拉普拉斯算子是 n 维欧式空间的一个二阶微分算子。它定义为两个梯度向量算子的内积：

$$\begin{aligned} \Delta \triangleq \nabla^2 \triangleq \nabla \cdot \nabla &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} \right) \\ &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

处理后，像素值快速变化的区域突出，增强了轮廓线的可辨识度，如图 7 所示。



图 4 太赫兹光场图像。(a) 单张子图像；(b) 不同位置与不同角度的子图像阵列
Fig. 4 Terahertz light field images. (a) A subimage; (b) Subimages with different positions and angles

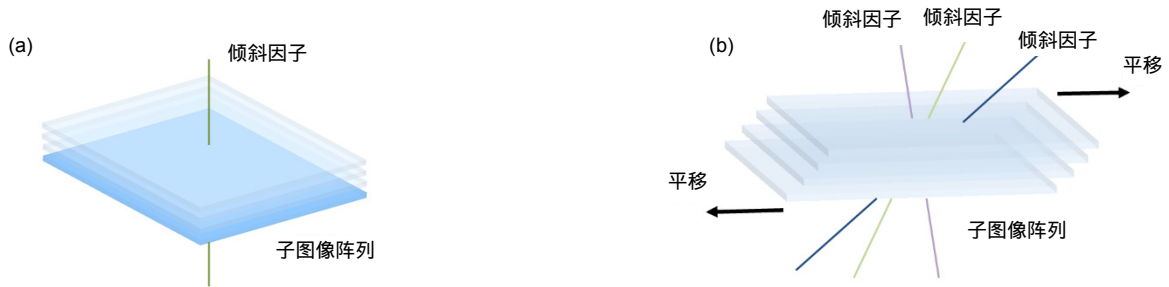


图 5 子图像阵列处理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of subimage array processing

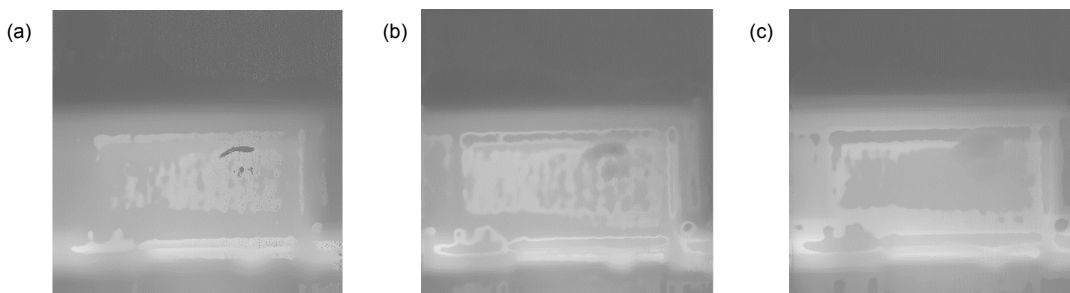


图 6 重聚焦后的光场图像
Fig. 6 Refocused light field images

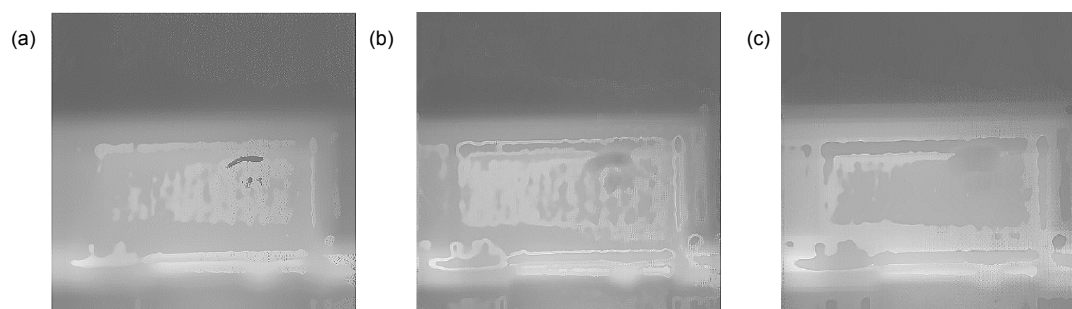


图7 经过增强后的光场图像

Fig. 7 Enhanced light field images

4 结 语

光场成像独特的数字重聚焦、深度分辨及角度分辨能力提高了图像的复现效果。太赫兹成像因其具有的穿透性和安全无损等优势而备受重视。太赫兹光场成像近年来引起了国内外研究者的关注，这项技术将有望实现更高质量的太赫兹图像复现和辨识效果。本文分析了太赫兹光场的表征方法和数字重聚焦算法，通过实验研究了应用焦平面阵列相机的太赫兹光场成像技术，并做了图像重聚焦和轮廓增强处理，得到了分辨识别效果好的太赫兹图像。

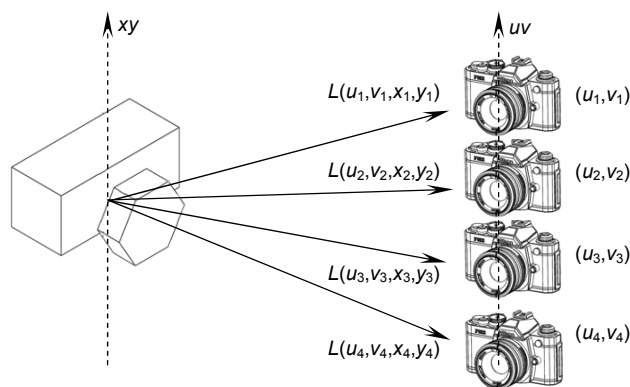
参考文献

- [1] Su J H, Jin Y T, Lu Y D, et al. Simulation of the algorithms for the light field image rendering[J]. *Optical Instruments*, 2017, **39**(1): 31–40.
速晋辉, 金易强, 陆艺丹, 等. 光场图像重构算法仿真[J]. *光学仪器*, 2017, **39**(1): 31–40.
- [2] Nie Y F, Xiang L 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.
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.
- [3] Gershun A. The light field[J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1939, **18**(1–4): 51–151.
- [4] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777–778.
- [5] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]//*Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996: 31–42.
- [6] Zhao G Z. Progress on terahertz science and technology[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, **33**(2): 1–6, 20.
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.
- [7] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(16): 1716–1718.
- [8] 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.
- [9] 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.
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.
- [10] Jain R, Grzyb J, Pfeiffer U R. Terahertz light-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **6**(5): 649–657.
- [11] Xiao Z L. Camera array based light field imaging and depth estimation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
肖照林. 基于相机阵列的光场成像与深度估计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [12] 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.
- [13] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera[C]//*Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computational Photography*, 2009: 1–8.
- [14] Wang L J, Zhang J, Zhang X D, et al. Micro-lens array center calibration via local searching using Lytro cameras[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(11): 19–25.
王丽娟, 张骏, 张旭东, 等. 局部搜索式的 Lytro 相机微透镜阵列中心标定[J]. *光电工程*, 2016, **43**(11): 19–25.
- [15] Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, et al. Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): 69.
- [16] Green P, Sun W Y, Matusik W, et al. Multi-aperture photography[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): 68.
- [17] Zhang C P, Wang Q. Survey on imaging model and calibration of light field camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(6): 0609004.
张春萍, 王庆. 光场相机成像模型及参数标定方法综述[J]. *中国激光*, 2016, **43**(6): 0609004.
- [18] Wang Y Q, Yang J G, Guo Y L, et al. Selective light field refocusing for camera arrays using bokeh rendering and super-resolution[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, **26**(1): 204–208.
- [19] Shi M D, Zhang X D, Dong Y L, et al. A light field demosaicing method with double guided filtering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(12): 180539.
石梦迪, 张旭东, 董运流, 等. 一种双引导滤波的光场去马赛克方法[J]. *光电工程*, 2019, **46**(12): 180539.

An experimental study on terahertz light field data acquisition and digital refocusing

Yang Moxuan, Zhao Yuanmeng*, Zuo Jian, Lv Nanfang, Zhang Cunlin

Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education; Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging; Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology; Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China



Terahertz camera array imaging model

Overview: As a highly versatile computational imaging method, light field imaging has attracted great attention and has rapidly developed in the past 20 years. Light field imaging with visible light has been widely applied. Terahertz radiation has many advantages such as good penetrability and effective bandwidth. The combination of light field imaging and terahertz radiation will enrich the concept of light field imaging.

Firstly, this article introduced the characteristics of terahertz waves, summarized the historical development of light field photography, and analyzed the basic principle of terahertz light field imaging. Based on the method of capturing 4D light field, the typical light field photography devices are categorized into single scanning imaging camera, camera array imaging, integral imaging, aperture coded, optical mask, etc. The terahertz light field imaging technology, a kind of computational imaging method within the terahertz band, takes advantage of terahertz focal plane array camera to collect a series of target sub-image arrays from different directions and angles, then, uses the digital refocusing to get the computed imaging and image reconstruction technology to obtain image. However, the reconstructed image appears blurry with unclear boundary. In order to reduce adverse effects, the image edge feature was combined with Laplace operator to enhance images, thus obtaining the refocusing images of light field with higher depth resolution, angle resolution, and object contour resolution at different depths.

Experimental results showed the feasibility and ability of terahertz light field imaging to improve image quality and enrich retrieval effects. The successful combination of terahertz radiation and light field imaging technology provides unique characteristics for future research. For example, it overcomes the limitation of traditional visible light imaging by optical lens and sensor or the size of the aperture. Terahertz light field imaging technology can take advantage of the characteristics of the wave to achieve image in the dark environment. In a word, the light field imaging quality is effectively improved by the above method. It lays a foundation for establish a three-dimensional reconstruction and synthetic aperture imaging algorithm by removing the foreground of terahertz light field imaging.

Citation: 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): 190670

Supported by “the 2020 Connotation Development Funds for Interdisciplinary Academic Construction” of Graduate School of Capital Normal University

* E-mail: zhao.yuanmeng@cnu.edu.cn