

太赫兹单像素计算成像原理及其应用 (特邀)

余荣斌^{1,2}, 祝永乐¹, 刘文权^{1,2}, 鲁远甫¹, 李光元¹

- (1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518000;
2. 深圳大学物理与光电工程学院 光电子器件与系统教育部/
广东省重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 太赫兹成像技术具有透视性、安全性以及光谱分辨能力等独特优点, 有着广泛的应用前景。由于太赫兹面阵探测器的技术成熟度低、价格昂贵, 太赫兹成像技术在较长时间内以单点扫描方案为主, 存在系统复杂、成像耗时长等问题。近年来, 基于计算成像算法的太赫兹单像素成像技术发展迅速, 成为了获取太赫兹图像的重要途径之一。文章综述了太赫兹单像素计算成像技术的基本原理、技术实现手段和应用前景, 总结了现存的一些关键问题, 并展望了一些今后可能的发展方向。

关键词: 太赫兹成像; 单像素计算成像; 空间编码; 幅度调制

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210717

Terahertz single-pixel computational imaging: Principles and applications(*Invited*)

She Rongbin^{1,2}, Zhu Yongle¹, Liu Wenquan^{1,2}, Lu Yuanfu¹, Li Guangyuan¹

- (1. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and System of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Terahertz imaging technology has the advantages of perspective, safety and high spectral resolution, and has a broad applications prospect. Since terahertz detector arrays have low technological maturity and are of high cost, terahertz imaging techniques based on single-point scanning have been prevailing for many years, and have problems such as complex systems and long imaging time. Recently, computational imaging techniques have emerged as exciting approaches for achieving efficient terahertz single-pixel imaging. The basic principles, the experimental realizations, and application prospects of terahertz single-pixel computational imaging techniques were described. Some key challenges and potential solutions were discussed.

Key words: terahertz imaging; single-pixel computational imaging; spatial coding; amplitude modulation

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金 (62105354); 深圳市基础研究学科布局项目 (JCYJ20180507182444250); 深圳大学光电子器件与系统教育部/
广东省重点实验室开放基金

作者简介: 余荣斌, 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事太赫兹调制器及太赫兹成像技术等方面的研究。

导师简介: 鲁远甫, 男, 正高级工程师, 博士生导师, 博士, 主要从事太赫兹光谱及成像等方面的研究。

李光元, 男, 副研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光学器件及太赫兹技术等方面的研究。

0 引言

太赫兹波指的是频率为 0.1~10 THz (波长 30 μm~3 mm) 之间的电磁辐射^[1]。由于其位于微波与红外波段之间,具备许多独特的优势。例如,太赫兹波能够穿透许多可见红外光穿透不了的材料,如半导体、纸张、塑料等,但无法穿透金属,因此可用于高对比度的隐藏金属检测和物质内部材料检测等^[2]。太赫兹波的光子能量低,照射活体生物时不存在电离危害,可用于人体的安防检测^[3]。此外,许多大分子蛋白、水分等极性物质在太赫兹波段具备特有的吸收峰,因此太赫兹波对组织器官的病理诊断^[4]和传感测量^[5]等具有先天优势。太赫兹成像技术利用太赫兹波对观测目标进行成像,具有优越的空间分辨率、透视性和光谱指纹特性等独特的性质,被广泛应用于安防、工业检查和材料成分识别等领域^[6-10]。

传统的成像技术离不开图像传感器的发展。在可见光波段,广泛采用基于硅为光敏材料的图像传感器,如感光元件阵列电耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 和互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS)。然而,由于太赫兹波段的面阵探测器技术发展缓慢,现有的面阵探测器造价昂贵,且对太赫兹光源有一定的要求,不利于太赫兹面阵成像技术的推广应用。由于单点探测器、扫描装置的相对易获取,现有的大多数太赫兹成像系统主要依赖单点探测器和逐点扫描方法^[11]。由此人们发展了一系列太赫兹成像技术,包括人体安防扫描技术、太赫兹层析成像技术、太赫兹近场扫描成像技术等^[12-14]。然而,这些单点探测器扫描成像具有成像时间长、硬件成本高和系统复杂等缺点,其推广应用受到限制。

在过去 20 年中,人们发展了一种基于单点探测器的计算成像技术^[15-17]。该技术采用一系列的空间编码掩膜编码目标图像的信号,并通过没有空间分辨能力的单点探测器 (即单个像素) 来记录每一个掩膜编码后的全部透射光或反射光^[18-19]。根据掩膜的空间分布,探测器执行相应的相关性操作,可以有效重构出目标的二维图像^[20]。单像素计算成像技术能有效降低系统的复杂度,非常适合面阵探测器难以获取的特殊波段,比如 X 射线^[21-23]、红外^[24-25]及太赫兹波段^[26-28]。随着研究的深入,该技术发展了许多新的应

用,包括显微成像^[29-30]、光声成像^[31-33]、多光谱成像^[34-35]、单像素视频^[36-37]、三维成像^[38-40]、全息成像^[41]、图像安全^[42-43]、气体泄漏检测^[44]等。

文中综述了近年来单像素计算成像技术在太赫兹成像系统中的研究进展及其应用,总结了其原理、性能和面临的主要实验挑战。概述了太赫兹单像素计算成像的原理;总结了太赫兹单像素计算成像涉及的两个关键技术:太赫兹波空间编码技术以及图像重构算法;列举了太赫兹单像素计算成像的部分实际应用。

1 太赫兹单像素计算成像原理

太赫兹单像素计算成像首先利用调制技术对太赫兹波的空间信息进行编码,并采用单点探测器来收集对空间编码太赫兹波照射目标信息后的反射光或透射光,最后通过解码算法重构出目标的二维图像。其光路设计和数学表达如图 1 所示,太赫兹发射源产生的太赫兹波经过离轴抛物面镜 (off-axis parabolic mirror, OAP) 准直后照射空间调制器和目标物体,再由单点探测器收集透射或反射的信号。每一次测量值都是空间编码掩膜与目标图像的点积,调制技术产生的第 i 次的编码图案 $p_i(x,y)$,对 $N \times N$ 像素的目标图像 $O(x,y)$ 进行编码,探测到光强信号可以表示为:

$$v_i = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N p_i(x,y) \cdot O(x,y) \quad (1)$$

式中: x, y 分别表示图像的行和列索引。若将编码掩膜和目标图像按照行 (或列) 重新排列为 $L = N \times N$ 的向量 p_i 和 O , 那么

$$v_i = \sum_{j=1}^L p_i(j) \cdot O(j) = \langle p_i, O \rangle \quad (2)$$

式中: j 表示目标图像的第 j 个像素。整个测量值可以用矩阵方程表示为:

$$V = PO \quad (3)$$

式中: 观测矩阵 P 的每一行对应一个调制掩膜; V 是测量值构成的向量,长度为 $L=N \times N$ 。假设 P 是可逆矩阵,那么根据测量向量 V 和观测矩阵 P ,可以利用 $O = P^{-1}V$ 获取目标的太赫兹图像。

太赫兹波光源包括连续光源和脉冲光源^[45]。太赫兹时域光谱 (terahertz time-domain spectroscopy, TDS) 系统是测量脉冲太赫兹波的重要系统。图 2 是一个经典的 THz-TDS 系统^[46],飞秒激光经过棱镜

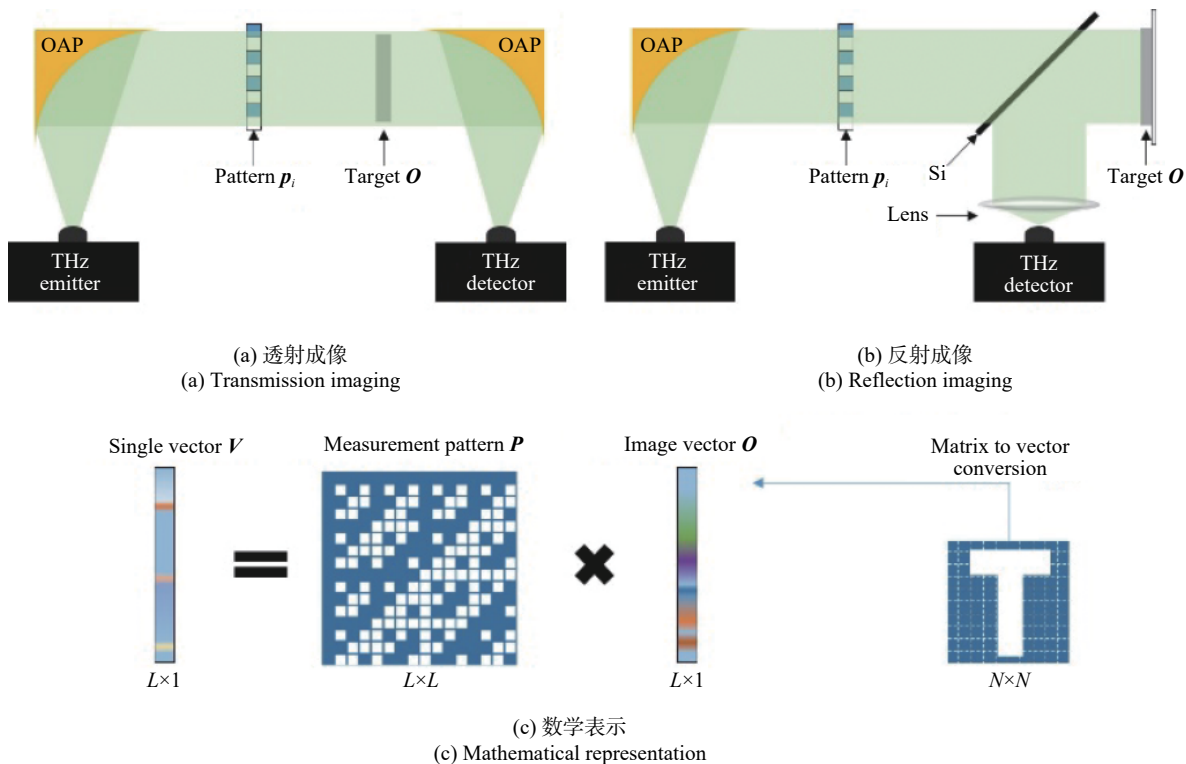


图 1 基于调制器的太赫兹单像素成像的 (a) 透射和 (b) 反射光路设计, 及 (c) 太赫兹单像素成像的数学描述

Fig.1 Light path design of transmission(a) and reflection(b) and mathematical description (c) of terahertz single-pixel imaging based on modulator

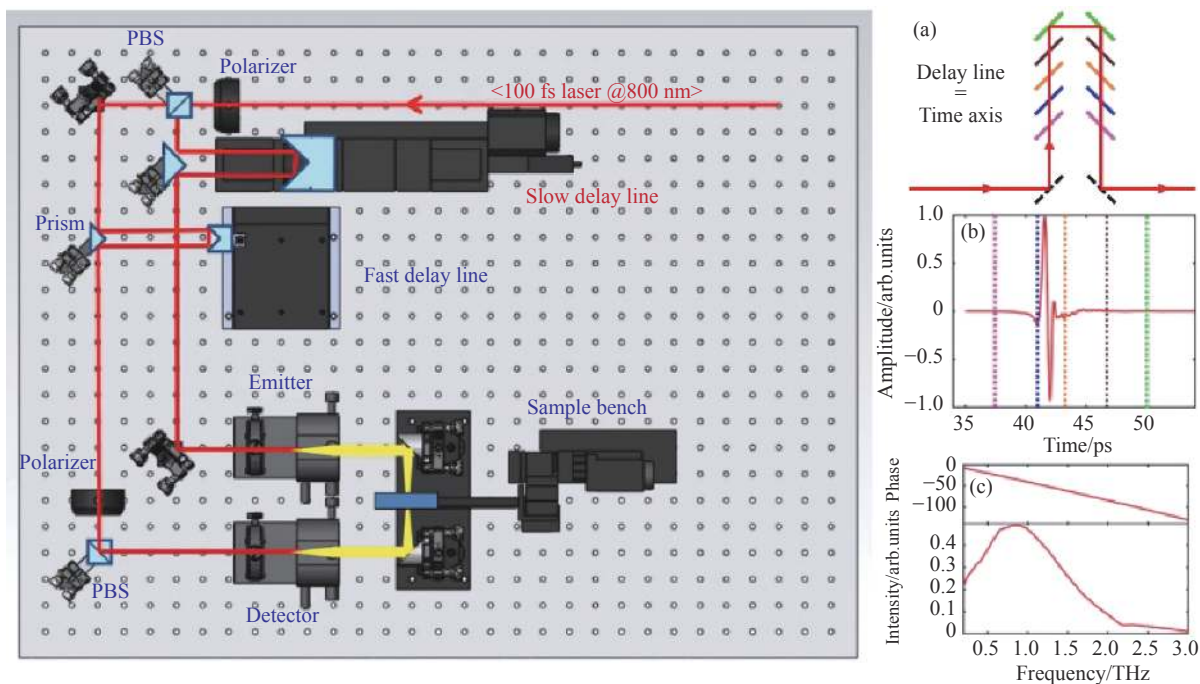


图 2 太赫兹时域光谱系统的实验装置示意图^[46]。(a) 不同的颜色对应不同的延迟线位置, 这些位置对应于 (b) 中不同的时间点; (b) 被测 THz 时域信号; (c) 信号在频域的幅度和相位

Fig.2 Schematic of the experimental setup for terahertz time-domain spectroscopy system^[46]. (a) The different colors correspond to different delay-line positions, these positions correspond to different time points in Fig.(b); (b) Measured THz time-domain signal; (c) The amplitude and phase of a signal in the frequency domain

分束器 PBS 分成泵浦光和探测光, 泵浦光照射太赫兹发射器产生太赫兹脉冲, 经过离轴抛物镜准直照明成像目标, 两路光的相位差由延迟线调整, 见图 2(a)。通过扫描延迟线以获得太赫兹脉冲的时域信号, 见图 2(b), 利用傅里叶变换可以获得太赫兹脉冲的频域响应, 见图 2(c)。目前, 商用的产生太赫兹脉冲的主要方法有光电导天线和光整流。脉冲太赫兹光源是宽带的, 频率范围可以覆盖 0.1~10 THz。

而对于连续太赫兹光源, 光源具有特定的频率和窄带带宽, 由于太赫兹波位于微波与光波之间, 因此连续太赫兹光源的产生与探测主要有两类方法: 第一类是基于微波管的分布作用原理而产生的太赫兹波真空电子器件^[47], 主要包括行波管、回旋管和速调管等; 第二类是基于光学半导体器件制备的太赫兹光源^[48-49], 包括 THz 量子级联激光器、CO₂ 太赫兹激光器等。相较于可见光波段, 基于连续太赫兹光源的单像素成像系统的系统配置与功能类似, 都是调制光源的强度继而重构目标图像的场强分布。而基于脉冲太赫兹光源的单像素成像系统则有些许不同, 由于系统可以探测目标的幅值、频率和相位, 太赫兹单像素计算成像技术可以进一步扩展成太赫兹光谱成像技术和太赫兹三维成像技术等。

2 太赫兹单像素计算成像的关键技术

太赫兹单像素计算成像系统主要由三方面构成: 太赫兹发射源/探测器、太赫兹编码掩膜、以及重构算法。文中将重点围绕系统中太赫兹编码掩膜的实现技术及图像重构算法展开, 阐明影响成像效率的关键因素。

2.1 太赫兹波空间编码技术

太赫兹单像素计算成像的关键技术之一是如何实现太赫兹波空间编码。在光学波段有比较成熟商用的空间光调制器 (spatial light modulator, SLM), 比如 HOLOEYE 的液晶空间光调制器 (透射型、反射型) 可以调节光的幅度和相位, TI 的数字微镜阵列 (反射型) 可以实现光束的空间偏转, 从而实现光学编码, 但这些调制器在太赫兹波段不可使用。为了解决太赫兹图形化编码问题, 人们提出了多种解决方案, 可以归为以下四类: (1) 利用太赫兹波对金属不可透的特点, 制备金属掩膜用于编码太赫兹波光场; (2) 利

用动态可调的超表面器件, 制备太赫兹调制器件; (3) 利用半导体的光敏现象, 通过注入/耗尽载流子来改变材料的电导率来调制太赫兹波的透射率 (或者反射率); (4) 基于新材料的太赫兹发射源或探测器调制阵列技术, 使得输出或探测的太赫兹光源自带编码效果。

太赫兹的编码调制效率可以通过调制深度 (Modulation Depth, MP) 和调制速度 (Modulation Speed, MS) 来量化。其中调制深度的定义如下:

$$MP = \frac{(R)T_o - (R)T_M}{(R)T_o} \quad (4)$$

式中: $(R)T_o$ 表示调制前太赫兹波的反射率或者透过率; $(R)T_M$ 表示调制后的太赫兹波反射率或者透过率, 而调制速度的定义为动态调节调制手段使得太赫兹波的强度下降 50% 时对应的调节速度。

利用金属掩膜来调制太赫兹波具有明显的优势, 是最容易在非常宽的频率范围内实现调制深度达 99% 以上的方案。这是由于大多数半导体和塑料对太赫兹波是透明的, 而导电金属对太赫兹波有很强的吸收和反射。2008 年, Chan 等人^[50] 在标准印刷电路板上 (Printed-Circuit Boards, PCB) 印制的随机图案编码太赫兹波强度信号如图 3(a) 所示, 并基于此重构出 32×32 pixel 的太赫兹透射图像, 相关结果见图 3(a)。Shen 等人^[51] 将掩码掩膜制备在金属圆盘上, 通过高速旋转圆盘实现对太赫兹的快速调制和编码, 由此测量一幅 32×32 pixel 的太赫兹图像大约需要 80 s, 相关结果如图 3(b) 所示。

金属掩膜虽然具有很好的调制深度, 但是需要结合运动控制装置, 而且不同掩膜图案的配准和切换都有一定难度。在过去的 10 年中, 超表面器件的研究迅速发展, 其功能和工作频率范围均得到了拓展, 特别是在太赫兹领域^[52-53]。超表面和半导体的结合为动态太赫兹功能器件的发展提供了新的机遇, 并在太赫兹调制器方面取得了重要进展^[54]。2006 年, Chen 等人^[55] 首次报道了基于超表面和掺杂半导体的太赫兹波幅度调制方法, 通过在 GaAs 衬底上构建金属开口谐振环 (Split Ring Resonator, SRR) 超表面, 进一步连接成肖特基二极管结构, 因此, 通过在肖特基和欧姆接触之间施加电压, 可以实时控制衬底载流子密度, 从而操纵太赫兹波。在门偏置电压设置为 16 V

时,该器件实现了在 0.72 THz 下的 50% 幅度调制。2014 年, Watts 等人^[56] 制造了一种基于超表面的太赫兹波空间光调制器并用于太赫兹单像素计算成像,其典型系统如图 4 所示。每个单独的像素由 FPGA 阵列寻址,作者研究了栅格、随机和 Hadamard 编码等不同成像模式。图 4(a) 显示了太赫兹波空间光调制器的调制原理,通过增加独立单元的电电压,实现对太赫兹波反射率的控制,每个掩膜的采集时间为 22.4 ms,重构 8×8 pixel 的太赫兹图像需要 1.43 s,重构结果如图 4(b) 所示,目标图像是一个十字金属板,如图 4(c) 所示,此外,结合重构算法可以压缩编码掩膜数量实现快速成像,图 4(d) 给出了目标在视场中移动的 5 帧图像。

上述两种方法的图案掩膜分辨率一旦确定,图像的分辨率将不可调节,要获取更大分辨率图像则必须更换更高分辨率的图案掩膜。半导体材料的介电属性受到光照影响,照明光子能量超过半导体禁带宽度就能在半导体产生电子/空穴对,继而改变半导体材料的介电性质。而照明光源的图案化可以借助现有成熟的商用调制器,对太赫兹波段实现分辨率可调谐的功能。这种太赫兹调制技术的主要原理是基于 Drude 模型实现的。

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau_s} \quad (5)$$

式中: τ_s 为载流子散射时间; ε_{∞} 是频率处于无穷时的

介电常数; $\omega_p = \sqrt{ne^2/m_e\varepsilon_0}$ 是等离子体频率,取决于半导体材料载的流子浓度 n , ε_0 为真空介电常数。当入射波频率高于等离子体频率 $\omega > \omega_p$ 时,半导体材料对入射波的吸收较弱;而当入射波频率低于等离子体频率 $\omega < \omega_p$ 时,半导体材料对入射波强吸收。因此,通过控制载流子浓度 n 可以改变材料的等离子体频率,使太赫兹波的透过率或者反射率得到调制。硅、锗、砷化镓等常规半导体材料在外界激光照射下,介电函数都会发生变化,从而影响太赫兹波的透过率或反射率,为了控制太赫兹波的空间信息,人们采用商用的调制器,如数字微镜器件 (Digital Mirror Device, DMD)、液晶调制器 (Liquid Crystal Display, LCD),将可见光的空间分布投影至半导体,利用光生载流子效应将太赫兹波空间编码问题转变为可见光空间编码问题,从而实现对太赫兹波的空间编码。Chen 等人^[57] 将菲涅耳透镜结构投影在高阻硅上,实现了对太赫兹波的调焦和调色差。张岩等人^[58] 利用传统的空间光调制器将计算机生成的太赫兹全息图投影到硅片上,产生相应的光产生载流子空间分布,形成幅值全息图来调制太赫兹光束的波前。Padilla 课题组^[59] 最早将光致半导体应用于太赫兹单像素计算成像,将太赫兹与准直光激光束共线照明高阻硅片,实现了对太赫兹波透过率的实时调控。利用 DMD 在光束上进一步编码空间图案,结合成像算法可以实现从 63~1023 pixel 不等的太赫兹图像,成像速度高达 0.5 Hz。

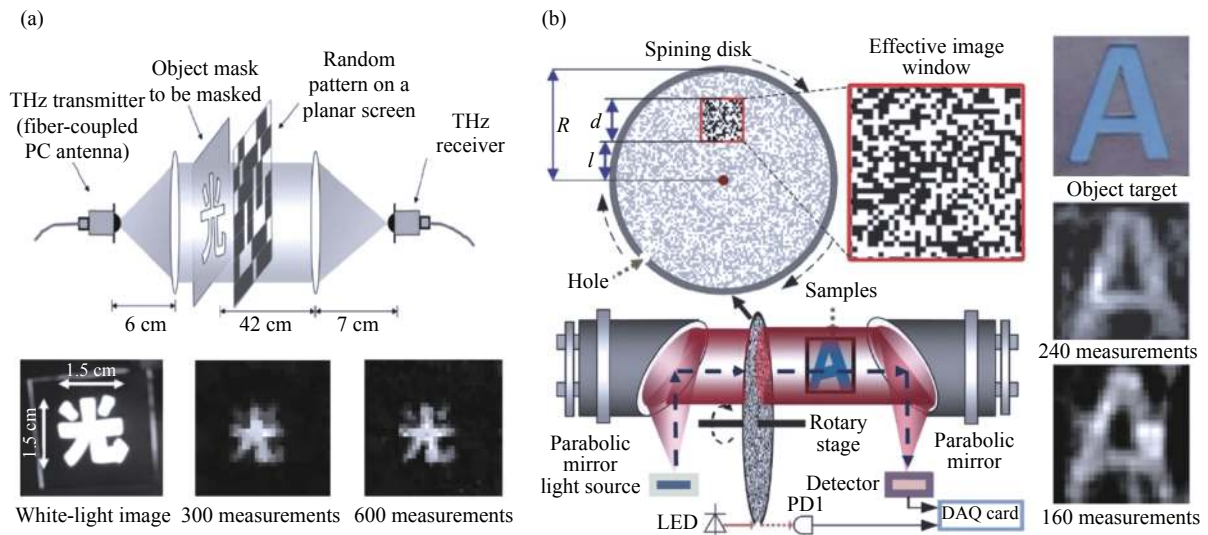


图 3 基于金属掩膜调制器的太赫兹单像素计算成像。(a) PCB 调制器^[50]; (b) 旋转金属圆盘调制器^[51]

Fig.3 Terahertz single-pixel computational imaging based on metal pattern modulator. (a) PCB modulator^[50]; (b) Spinning metal disk modulator^[51]

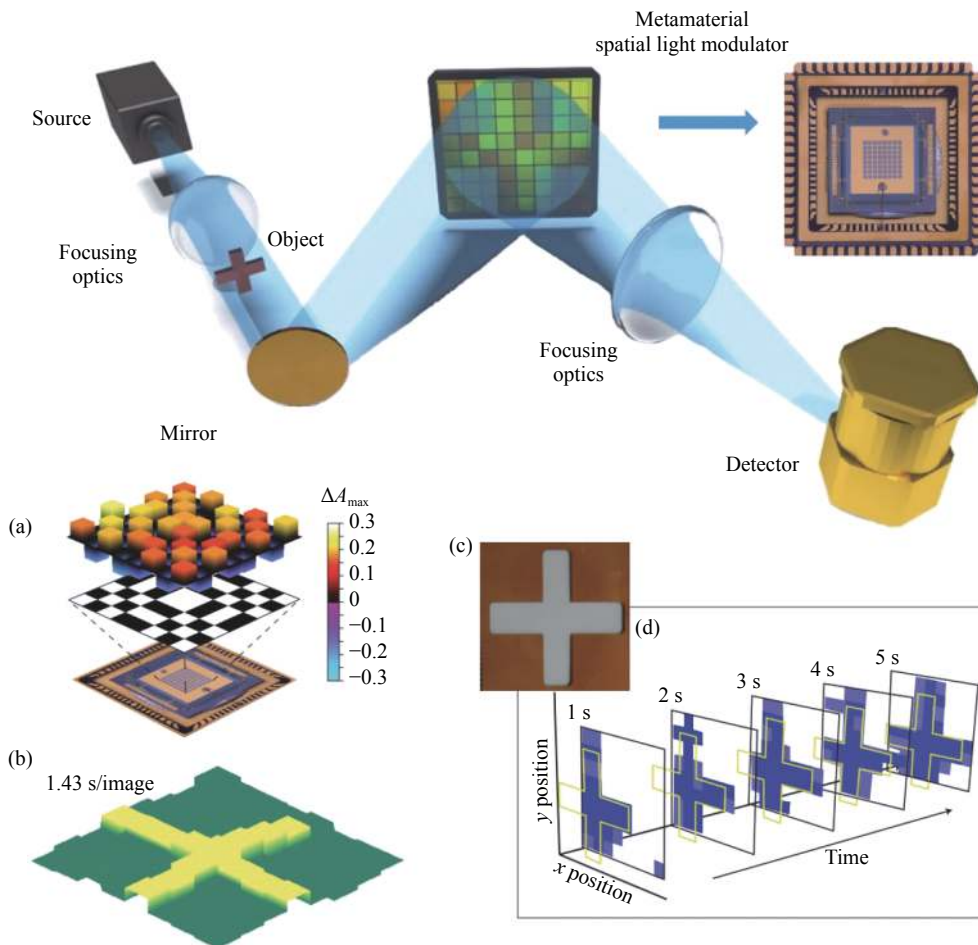


图 4 基于超表面调制器的太赫兹单像素成像结构示意图^[56]。(a)Hadamard 掩膜的最大差分吸收空间分布; (b)使用 64 个掩膜进行图像重建, 每个掩膜显示 22.4 ms, 总图像采集时间为 1.43 s; (c) 目标图像光学照片; (d) 使用了 45 个 Hadamard 掩膜连续的显示重建效果

Fig.4 Schematic diagram of terahertz single-pixel imaging structure based on metasurface modulator^[56]. (a) Spatial distributon of maximum differential absorption for Hadamard pattern; (b) Image reconstruction using 64 masks with each mask displayed for 22.4 ms, giving a total image acquisition time of 1.43 s; (c) Photograph of the object studied. (d) Consecutive tiles show reconstruction using 45 Hadamard masks

同理, Shams 等人^[60]使用 WR-1.5 矢量网络分析仪作为太赫兹发射源和探测器。在 500~750 GHz 频带内, 利用现有的数字光投影系统 (包含照明光源和 DMD) 照射高阻硅片, 太赫兹波调制深度达到~20 dB, 调制速度为~1.3 kHz, 生成 8×8 pixel 图像的时间为 6 s, 16×16 pixel 图像的时间为 24 s。Augustin 等人^[61]利用 LCD 照明锗片实现对 350 GHz 太赫兹波的空间调制, 采用 300 个投影掩膜即可重构出 32×32 pixel 的太赫兹图像。随着研究的深入, 太赫兹成像的质量与调制器的调制深度息息相关。编码过程中, 调制器编码“1”或“0”(实验中表现为透过/反射太赫兹波强度) 的调制效果主要受限于载流子浓度 n :

$$n = \frac{I_0(1-R)\tau}{2Ad\hbar\omega} \quad (6)$$

式中: I_0 为入射光功率; R 为入射光的反射率; τ 为载流子寿命; A 和 d 分别对应光照半导体的面积和穿透深度; $\hbar\omega$ 为入射光的光子能量。研究发现^[62] 半导体衬底载流子寿命 τ 是决定太赫兹调制性能重要的物理参数。由于传统的本征硅、锗、砷化镓的载流子寿命短, 为了实现对太赫兹波的高效调制往往需要高功率的激光器。为了解决这一问题, 笔者所在课题组^[63] 将本征硅钝化以提升载流子的寿命, 从而降低了对照明激光功率的要求。相应的太赫兹调控及单像素计算成像系统如图 5(a) 所示。

该系统基于太赫兹时域光谱系统搭建, 利用 300 mW 的连续半导体激光器作为照明光源, 经 DMD 照射在钝化硅片上, 成像目标是利用微纳加工工艺制备的车轮图案, 太赫兹波透过成像目标和投影

区域被单点探测器接收,通过加载 DMD 的掩膜实时调整太赫兹波的透过率,并结合成像算法实现图像重构。图 5(b) 给出了在相同光照条件下,利用钝化硅片的太赫兹单像素计算成像质量要优于本征硅片的成像质量,钝化硅片作为调制器重构的图像更加清晰,而本征硅片重构的图像模糊不清。半导体复合结构提升载流子寿命,Weis 等人^[64]提出一种硅/石墨烯(Graphene on Silicon, GOS)复合结构的高效太赫兹调制器,与本征硅相比,在入射光功率为 40 mW 时,GOS 中振幅透射率的最大差异为 $\Delta t = 0.18$ 。除了载流子寿命,反射率也是影响成像质量的关键。传统本征半导体材料垂直入射光的反射率基本在 30% 以上,入射光子的利用率不高。杨玉平等^[65]提出使用黑硅代替传统硅片作为太赫兹光控调制器。通过制绒工艺制作表面粗糙的硅片,达到减小反射的效果,增加对照明光源的利用率,幅度调制提升 50%。电子科技大学文歧业等人^[66]提出一种硅纳米针尖阵列结构,通过刻蚀工艺在硅表面刻蚀出不同高度的硅针尖,由于该结构能有效束缚入射的光子从而实现高效的太赫兹光控幅度调制,调制深度高达 90%。此外,有机半导体^[67]、氧化钒^[68]、二维材料^[69] 等均被证实能有效提高太赫兹调制的效率,从而降低对照明光源功率的要求。

最后一种产生太赫兹波掩膜的创新做法是将太赫兹波的产生或探测与投影技术结合,直接控制太赫兹波的空间产生或探测,而不再需要借助其他半导体

材料或器件调制太赫兹波空间信息。其中的典型案例是利用激光泵浦的非线性电光(Electro-optic, EO)晶体产生或探测太赫兹波,将激发 EO 晶体非线性效应的飞秒激光进行空间调制从而编码太赫兹波。Zhao 等人^[70]用空间光调制器将 800 nm 飞秒脉冲图形化编码后投影到 ZnTe 晶体的探测端,从而测量编码后的太赫兹波强度信号,如图 6(a) 所示。

利用重构算法获得了 128×128 pixel 的太赫兹图像,并通过设计不同的投影策略,比较了基于传统随机掩膜和 Hadamard 掩膜的图像重构质量,结果发现后者的重构结果优于前者。ZnTe 晶体也可以作为太赫兹发射源用于构建成像系统^[71]。此外,最近的一种基于自旋电子材料的太赫兹发射源引起科研工作者的广泛关注。不同于电光晶体,该材料利用逆自旋霍尔效应产生超快瞬态电流,从而产生太赫兹辐射。Chen 等人^[72]基于自旋材料搭建了太赫兹单像素计算成像系统,通过编码飞秒激光器间接编码太赫兹波的空间分布,利用单点探测器接收编码后的太赫兹强度信号,并重构太赫兹图像,如图 6(b) 所示。对于自旋电子材料,太赫兹波偏振态容易被外加磁场控制,如图 6(b) 右下角,垂直磁场方向产生水平偏振太赫兹波成像,而水平磁场方向产生垂直偏振太赫兹波成像。需要注意的是,图 6(b) 中使用第二个 DMD 只是为了纠正第一个 DMD 引起的相位差。电光晶体方法和自旋电子材料的相似之处在于,它们都需要具有 mJ/cm^2

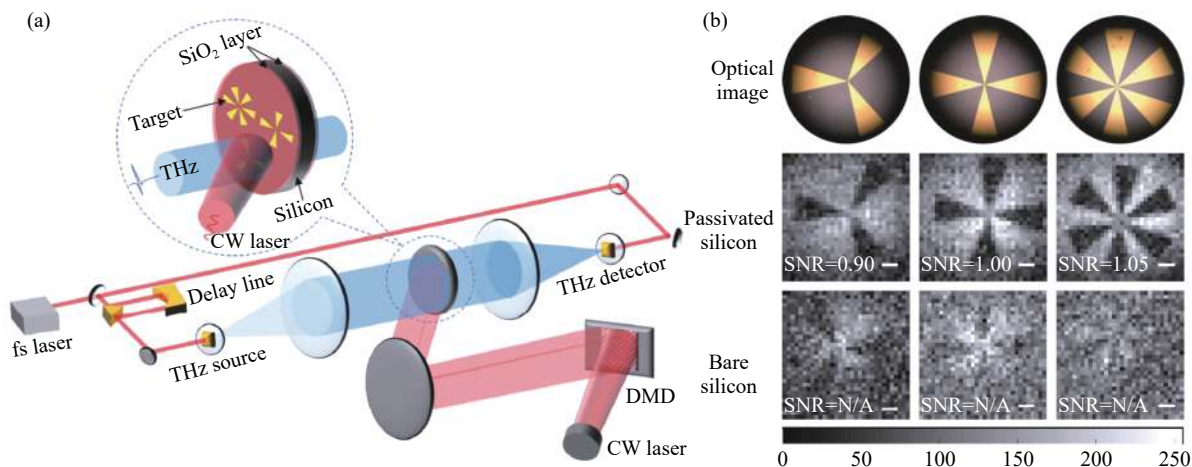


图 5 (a) 基于钝化硅片的太赫兹单像素成像系统示意图^[63]; (b) 普通高阻硅和钝化硅片重建结果比较

Fig.5 (a) Schematic of terahertz single-pixel imaging system based on the passivated silicon wafer^[63]; (b) Comparison of reconstruction results between conventional high-resistive silicon and passivated silicon

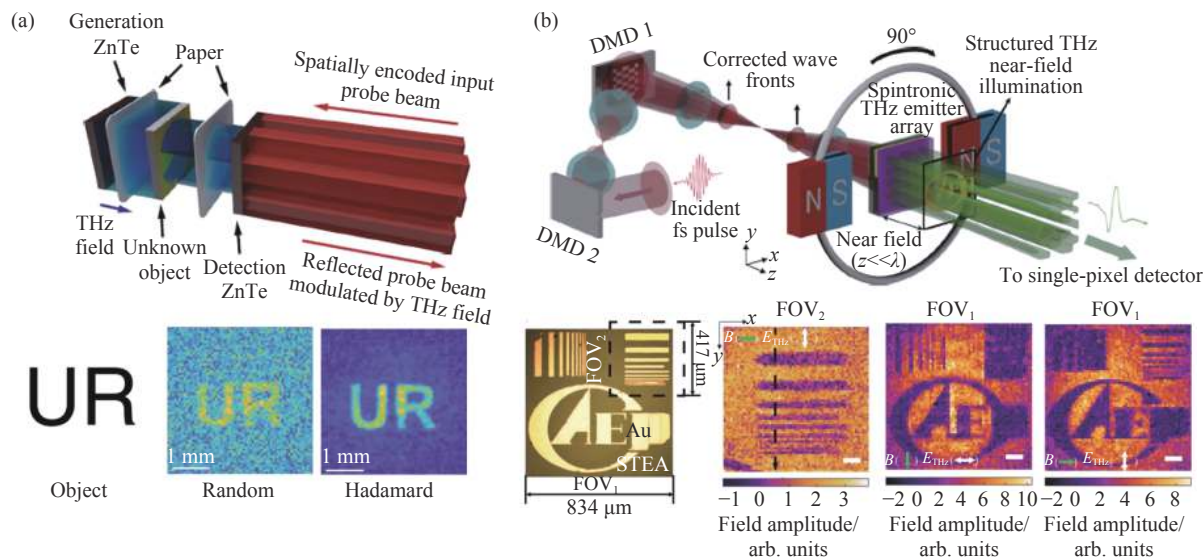


图 6 (a) 基于非线性电光晶体太赫兹单像素成像系统及其成像结果^[70]; (b) 基于自旋电子材料的太赫兹单像素成像系统及其成像结果^[72]

Fig.6 (a) Terahertz single-pixel imaging system and its imaging results based on nonlinear electro-optic crystals^[70]; (b) Terahertz single-pixel imaging system and its imaging results based on spintronic materials^[72]

功率的飞秒脉冲, 并且都用亚皮秒时间分辨率测量太赫兹场强。不同之处在于自旋电子材料产生的太赫兹波频率范围为 1~30 THz, 而电光晶体往往只产生 0.3~16 THz。此外, 自旋电子材料太赫兹产生效率高, 材料只需纳米级厚度即可有效地产生太赫兹波辐射, 而电光晶体方法往往需要较厚的非线性晶体材料。

表 1 列出了太赫兹单像素计算成像的太赫兹波掩膜化技术的主要方案和技术指标。总的说来, 金属掩膜板技术能够实现直接的太赫兹调制, 但是对于运动控制系统要求严格, 掩膜与太赫兹光斑的配准困难。基于超表面调制器的成像采取的电控方式因其灵活性、易集成等优点是未来太赫兹波空间调制器的一种有效解决方案, 但是其带宽有限, 不利于发挥太赫兹波光谱指纹特性, 研发宽带的太赫兹超表面调制器是一个重要的发展方向。上述两种方案还有一点不足就是掩膜的分辨率一旦确定就不可更改, 若要更改图像分辨率, 必须更换一批分辨率掩膜板。不同于上述方案, 光控半导体方案是目前太赫兹单像素计算成像主要的空间编码方案, 具有成像分辨率可调谐、材料选择种类多和易实现等优点, 但是需要额外使用空间光调制器和搭建主动照明光路, 系统较为复杂。基于太赫兹发射源或探测器的太赫兹单像素计算成像技术直接对太赫兹波进行控制, 无需额外调制器, 系统集成度高, 但是目前器件效率不高, 需要高功率

表 1 太赫兹波掩膜化技术汇总

Tab.1 Summary of terahertz wave mask technology

| Type | Material | Modulation depth | Modulation rate | Reference |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|
| Metal* | PCB | 100% | - | [50] |
| | Spinning disk | 100% | 0.5 s | [51] |
| Metasurface* | MMAs | -70 dB | 12 MHz | [56] |
| | Si | 20 dB | ~1.3 kHz | [59] |
| | GOS | 99% | - | [64] |
| | MEHPPV | 99% | 1.26 MHz | [67] |
| | VO ₂ | >75% | - | [68] |
| Source and detector | Si-MOS | 15.3 dB | 1 GHz | [69] |
| | ZnTe | 100% | 1 kHz | [70] |
| | ZnTe | 100% | 1 kHz | [71] |
| | FM/NM | 100% | 22.4 ms | [72] |

注: *表示分辨率不可调谐的方法

的激光器来激发太赫兹波。

2.2 重构算法

太赫兹单像素计算成像另一个重要的要素是图像重构算法, 即通过单点计算成像系统获取编码的太赫兹波强度 V 和已知的投影掩膜分布 P 以求解目标的太赫兹图像 O 的算法。传统的太赫兹单像素计算成像算法是引用了鬼成像算法, 如公式 (1), 理想情况下, 只要观测矩阵 P 是可逆的, 便可以通过简单的关

联计算获取图像。随机矩阵、高斯矩阵、伯努利矩阵等均满足该矩阵设计的要求。但是关联计算所需的编码掩膜的数量与图像总像素相等,而且在实际情况中,掩膜易受到噪声影响,从而导致重构图像的时间和质量不够理想。因此,研究快速、高质量的重构算法是提高单像素计算成像的关键。太赫兹单像素计算成像重构算法可以分为以下三类:(1)压缩感知成像算法;(2)基扫描成像的算法;(3)深度学习图像重构算法。这些算法的测量掩膜设计、重构策略同样适用于红外^[73]、可见光^[74]和 X 光波段^[75]。

太赫兹单像素计算成像中的观测矩阵 $\mathbf{P}_{L \times L}$ 的每一行对应一个调制掩膜, $\mathbf{O}_{L \times 1}$ 是成像目标, $\mathbf{V}_{L \times 1}$ 是测量值构成的向量,矩阵方程表示 $\mathbf{V}_{L \times 1} = \mathbf{P}_{L \times L} \mathbf{O}_{L \times 1}$ 。其中 $L=N \times N$, 观测矩阵 $\mathbf{P}_{L \times L}$ 是可逆矩阵,那么矩阵方程具有唯一解。2006 年,压缩感知^[76](Compressed Sensing, CS)的提出为单像素欠采样重构提供了理论指导。该方法指出:以较少编码数量 M 的掩膜即可重构出像素总数为 $L(M \ll L)$ 的图像,从而缩短了采样时间,而且最优化的算法还对噪声的容忍度高。投影 M 次掩膜编码目标图像并用单点探测器获得对应强度 $\mathbf{V}_{M \times 1}$, M 次的测量矩阵为 $\mathbf{P}_{M \times L}$, 那么, $\mathbf{V}_{M \times 1} = \mathbf{P}_{M \times L} \mathbf{O}_{L \times 1}$, 此时矩阵需要使用贪婪算法进行求解,即: $\mathbf{O}' = \operatorname{argmin} \|\mathbf{O}\|_0$ s.t. $\mathbf{V}_{M \times 1} = \mathbf{P}_{M \times L} \mathbf{O}_{L \times 1}$, 其中, $\|\mathbf{O}\|_0$ 表示 \mathbf{O} 非零元素个数。最小 l_0 范数问题是 Non-deterministic Polynomial(NP) 问题,通常需要对该问题加以转换,如转换为 l_1 范数问题,即: $\mathbf{O}' = \operatorname{argmin} \|\mathbf{O}\|_1$ s.t. $\mathbf{V}_{M \times 1} = \mathbf{P}_{M \times L} \mathbf{O}_{L \times 1}$, 二者虽然具有相同的解但是 l_1 范数优化问题最终解更加的精确和稳定,使 NP 问题转化成凸优化问题。Chan 等人^[50]最早采用压缩感知算法用于太赫兹单像素计算成像,只需 300 个 PCB 掩模板结合全变分最小化算法 (min-TV) 即可重构 32×32 pixel 的太赫兹图像。Zhao 等人^[77]使用贪婪算法的正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 使用 300 个 PCB 掩膜重构 32×32 pixel 的太赫兹图像。笔者课题组^[78]使用 l_1 范数算法可以将投影掩膜数压缩至 25%, 即可重构出图像分辨率为 64×64 太赫兹图像。Lu 等人^[79]开发了一种基于光诱导动态掩膜的反射式单像素太赫兹成像系统,通过 l_1 范数优化和逆菲涅尔衍射算法,以 25% 采样率重构出像素为 32×32 的

反射太赫兹光谱图像。

尽管压缩感知算法通过利用场景属性的先验知识来实现比像素数更少的测量,从而减少了采集时间,然而,其代价是需要通过优化解决未确定的问题,这极大地增加了重构所需的时间。因此,在许多情况下,重构所需的时间甚至超过了采集所需的时间,导致了成像时间的增加,从而阻碍了实时的成像应用。近年来,基于基扫描的成像算法以其完美的理论揭示了快速压缩采样重构的机理,缩短了单像素成像的重构时间。掩膜形式从数学概率分布拓展至信号处理领域,比如: Fourier 掩膜、Wavelet 掩膜、Hadamard 掩膜等。以傅里叶单像素为例,自然图像 \mathbf{O} 在傅里叶频域对应的频谱分布为 \mathbf{V} , 且互为傅里叶变换对: $\mathbf{V} = \text{FFT}(\mathbf{O})$ 。调制掩膜可以使用三角函数 $p(x, y; f_x, f_y; \varphi) = a + b \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)$ 生成,其中 a 是平均强度, b 是对比度, x, y 是直角坐标, f_x 和 f_y 分别对应频谱中的空间频率, φ 是初相位。探测器获取的掩膜强度 $v_\phi(f_x, f_y)$ 可以表示为 $v_\phi(f_x, f_y) = D + \iint_S \mathbf{O}(x, y) p(x, y; f_x, f_y; \phi) dx dy$, 其中 D 为探测器对背景光的光响应值。当掩膜的初始相位取 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时 (四步相移法), 图像的频域系数可以表示为:

$$\mathbf{V} = [v_0 - v_\pi] + j \cdot [v_{\pi/2} - v_{3\pi/2}] \quad (7)$$

该方法是一种典型的差分测量方法,能够有效地抑制因背景光照引入的噪声或电路自身的噪声,从而有利于提高重构图像的质量。只需傅里叶逆变换即可获得图像重构 $\mathbf{O}' = \text{FFT}^{-1}(\mathbf{V})$ 。同理,基于 Hadamard、Wavelet 方案都是将机构化的掩膜图案投影至目标获取变换域的关键系数,并利用逆变换得到图像重构。由于图像在变换域具有稀疏的特点,采集低频部分重构目标图像能够压缩极大地采样时间。Zhang 等人^[80]首次在光学波段提出基于傅里叶的单像素成像 (Fourier single-pixel imaging, FSI) 方案,利用投影仪投影正弦条纹照明目标,并采集调制后的光强,获得目标图像的重构,该方法还被应用于单像素三维成像、单像素彩色成像等。笔者所在课题组^[81]利用光致半导体作为太赫兹调制器,投影正弦条纹编码太赫兹波,通过逆傅里叶变换获得太赫兹图像重构。相关结果如图 7 所示,由于图像的稀疏特点,通过获取傅里叶低频系数,可以实现欠采样 (约 10%) 下的太赫兹单

像素计算图像重构,缩短了成像时间。

基扫描成像算法虽然能够减少掩膜的数量,缩短成像时间,但是欠采样时舍弃了高频信息,导致欠采样下图像质量较差^[82-83]。在单像素计算成像研究中,如何兼顾成像速度和成像质量一直是学者们关注的重点。近年来,深度学习领域在计算机视觉问题方面取得了很大的进展,被广泛应用于图像分类、图像去噪、图像超分辨等领域^[84-85]。深度学习利用大型数据集来学习成像中反问题的未知解。在单像素计算成像系统中,目前使用的随机照明图案和正交变换照明图案如哈达玛、傅里叶、余弦图像都需要大量次数的照射才能恢复出清晰的目标图案。如何优化照明图案,使得在尽量少的照明次数下恢复出高质量的物体图像成为了学者们研究的一个方向。Catherine 等人^[86]设计了一种深度学习卷积自编码网络 (deep convolutional auto-encoder network, DCAN),优化了投影掩膜,以 30 帧/s 的速度从单像素相机采样中实时恢复 128×128 pixel 视频,压缩比为 2%,网络结构见图 8(a)所示。DCAN 是一种计算模型,包括编码(测量)和解码(重构)层,其目的是将输入图像或场景再现为输出图像。输入图片由 M 个二进制滤波器测量或编码,并使用一个完全连接的层和一系列的三个卷积块进行重构或解码。完全连通层之后

是归一化层,卷积层之间是非线性激活层。DCAN 使用一个大型映像库进行训练。在训练过程中,使用随机梯度下降法优化参数值(滤波器权值),使测量预测输出和期望输出之间的欧氏距离的标准代价函数最小化。训练 DCAN 有两种输出。首先,一种全参数化的多层映射算法提供了一种新的反方法来从一系列空间编码测量数据中重构图像。其次,可以优化编码层,即二进制采样基,以获得最佳的重构性能,如图 8(b)所示。为了获得实验结果,将单个大面积光电倍增管放置在 DMD 的输出端口,使用深度学习二值采样基 ($M = 666$, 像素数的 4%) 进行采样,并使用深度学习重构算法进行重构 128×128 pixel 视频,如图 8(c)所示。

除了优化编码掩膜,缩短成像时间,深度学习方法还可以提高重构图像的质量。Saad 等人^[87]针对傅里叶单像素计算成像中低采样率下重构图像存在的模糊问题,提出了一种深度卷积自编码网络与傅里叶单像素计算成像相结合的快速图像重构框架。该网络通过对傅里叶单像素计算成像中伪影的上下文学习,能够对 256×256 pixel 的图像进行去噪和细节恢复。网络首先在 $E1$ 和 $F1$ 处提取特征信息,提取的特征信息在 $F3$ 和 $D1$ 的最后被恢复,并被组合起来重构最终的合成图像。高频信息由上层捕获,下层的信息

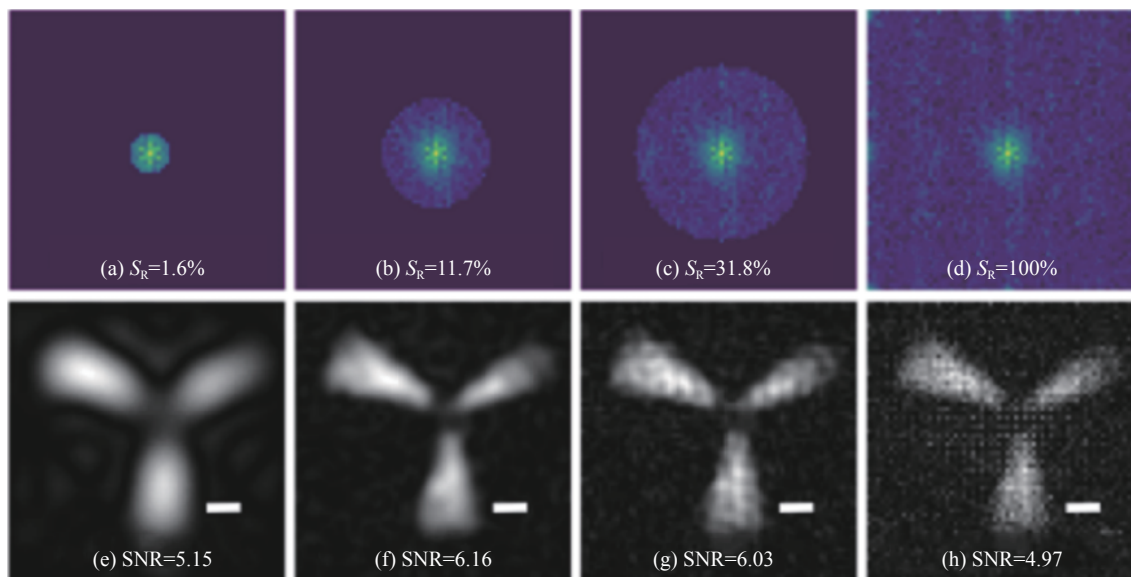


图 7 傅里叶单像素计算成像应用于太赫兹领域^[81]。(a)~(d) 不同采样率对应的傅里叶频谱; (e)~(h) 逆傅里叶变换太赫兹图像

Fig.7 Fourier single-pixel computational imaging for the terahertz regime ^[81]. (a)-(d) Fourier spectrums at different sampling rates; (e)-(h) Inverse Fourier transform terahertz image

首先被编码, 然后解码以消除噪声, 如图 9 所示。总的来说, 滤波器在训练过程中学习纠正由欠采样造成的振铃问题, 提升重构图像的质量。结果表明, 即使在很低的采样率 (1%~4%) 下, 基于深度学习的傅里叶单像素计算成像在图像质量方面也优于传统的方法。表 2 比较了单像素计算成像算法在太赫兹波段和光学波段的主要技术指标: 重构时间 (reconstruction time, Rt)、采样率 (sampling ratio, Sr) 和重构质量 (reconstruction quality, Rq)。

从表 2 中可以看出, 太赫兹波段的单像素计算成像的研究方向目前主要集中于压缩感知算法和基扫描算法。而得益于波长优势, 单像素计算成像在光学

波段的成像视场、成像分辨率都优于太赫兹波段。由于采用高性能调制器和探测器, 光学波段的单像素成像的采样率远低于太赫兹波段的采样率, 而且成像质量更高。此外, 深度学习方法也先被应用于光学波段单像素计算成像的图像重构, 除了器件优势外, 离不开光学波段直观的优势; 而对于深度学习在太赫兹波段单像素计算成像的应用, 相关报道只停留在用深度学习算法提升太赫兹扫描成像的成像质量^[88-89]。针对太赫兹单像素计算成像中目前存在图像质量和图像速度问题, 深度学习方法至少在两方面可以借鉴: (1) 训练适合太赫兹计算成像系统的编码掩膜, 以降低采样率实现太赫兹快速成像, 解决太赫兹单像素计

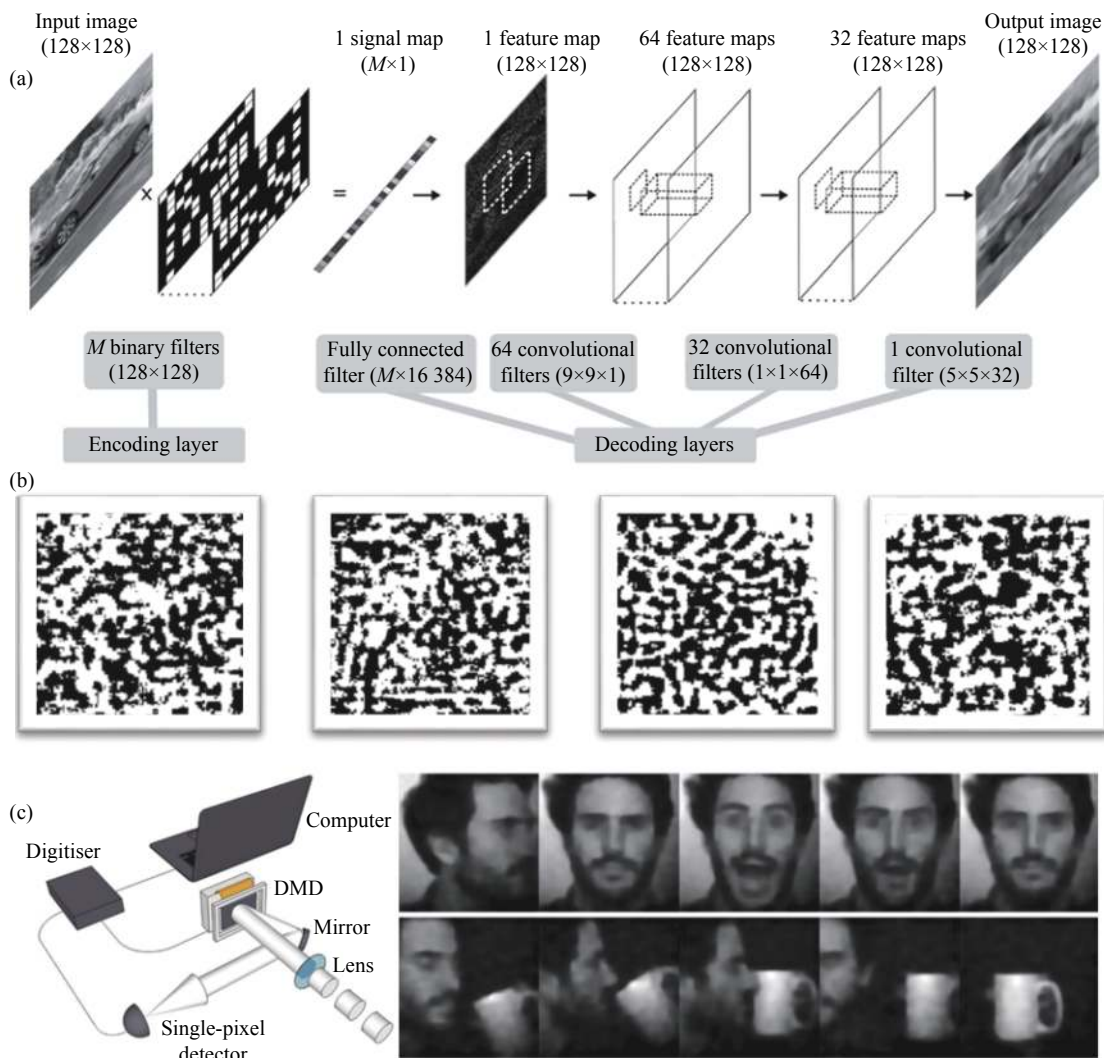


图 8 (a) 深度卷积自动编码器网络构架^[86]; (b) 部分优化掩膜设计; (c) 单像素成像实验结构及视频

Fig. 8 (a) Network architecture of deep convolutional auto-encoder^[86]; (b) Design of part of optimized patterns; (c) Experimental structure and video of single-pixel imaging

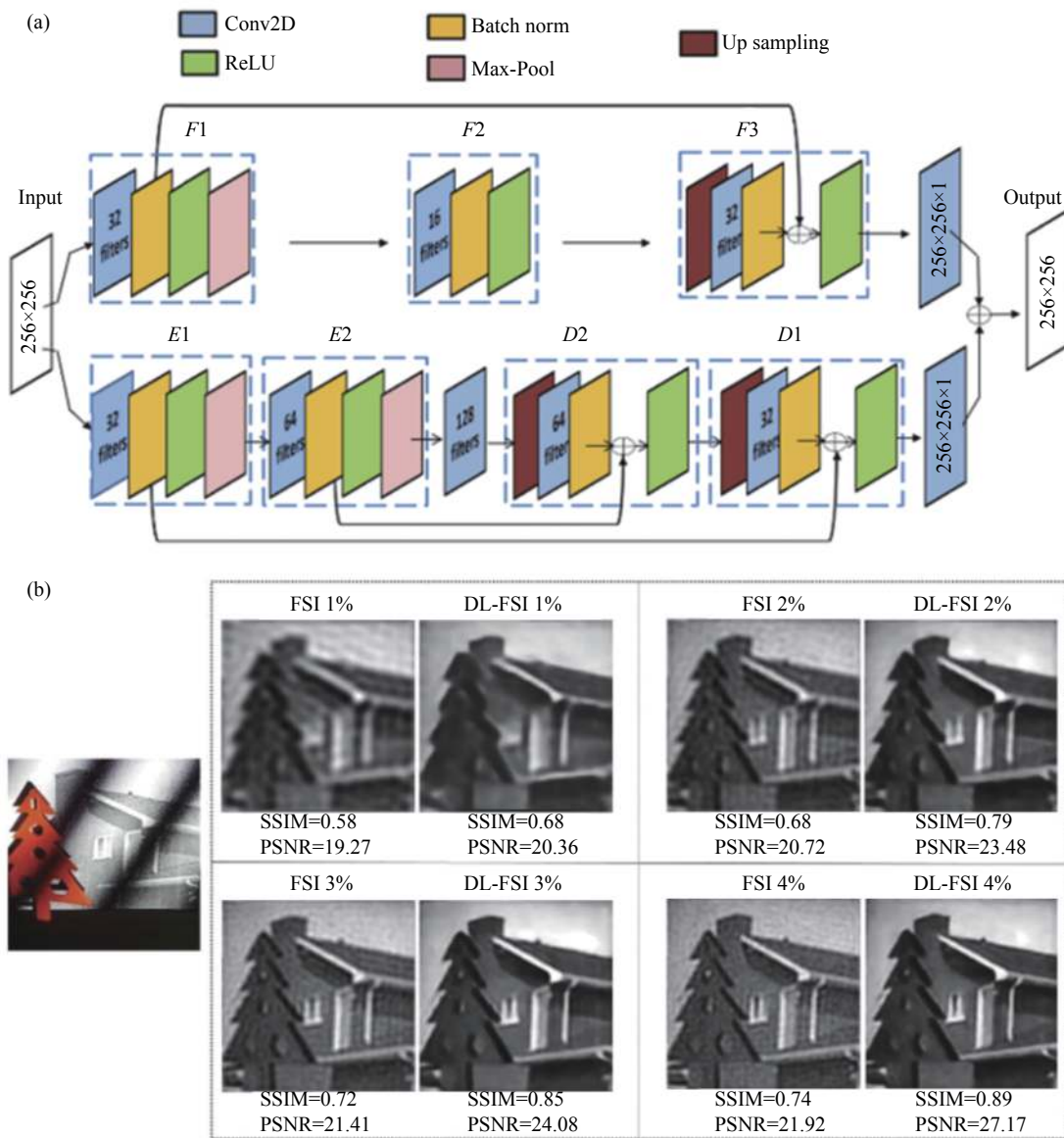


图 9 (a) 深度自编码网络架构^[87]; (b) 传统的和基于深度学习的傅里叶单像素计算成像的定性和定量评价
Fig.9 (a) DCAN architecture^[87]; (b) Qualitative and quantitative evaluation of conventional FSI and based on deep learning FSI

表 2 单像素成像算法技术指标对比

Tab.2 Comparison of technical indexes of single-pixel imaging algorithms

| | Frequency range | Compressed sensing | Base scanning | Deep learning |
|----|-----------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Rt | Optical | - | <1 ms | <1 ms |
| | THz | ~100 s@ 64×64 | <1 ms | - |
| Sr | Optical | 2%@ 256×256 | 1%@ 256×256 | 4%@ 128×128 |
| | THz | 30%@ 32×32 | 10%@ 64×64 | - |
| Rq | Optical | MSE=0.04@10% | SNR=64.2 | PSNR=24 dB |
| | THz | MSE=0.48@30% | SNR=6.2 | - |

算成像的速度问题; (2) 太赫兹图像增强技术, 以训练模型解算高质量太赫兹图像, 解决因器件效率低而导致的图像质量差问题。

3 太赫兹单像素计算成像的应用

太赫兹单像素计算成像作为一种先进的成像技术是推动太赫兹技术发展的重要助力。在此节中, 笔者将结合实际应用场景, 展示太赫兹单像素计算成像的功能, 主要从远场成像、近场成像、高光谱成像以及目标检测与识别四方面展开, 阐述该技术在实际应用中的潜力。

3.1 站开式计算成像

安防检测是太赫兹成像的重要应用场景。站开式成像能够以一定距离检测人员是否携带违禁品, 实现无接触检测^[90]。传统站开式扫描成像需要设计准

光扫描系统, 系统较为复杂, 成像时间较长^[91]。虽然基于面阵探测器的太赫兹成像系统具有集成度高、成像速度快等优点, 但是由于面阵探测器十分昂贵, 且对光源的要求较高, 因此发展基于单点探测器的太赫兹单像素计算成像尤为重要。Augustin 等人^[92]首次提出一种基于太赫兹单像素计算成像技术的太赫兹站开式成像方案, 系统结构原理如图 10 所示。使用了一种光学调制半导体电导率的方法, 实现了太赫兹波的空间编码, 并结合压缩感知成像算法获得了 0.35 THz 站开式太赫兹成像, 成像距离约为 1 m, 成像视场达到 8 cm×8 cm。研究结果突出了这种调制技术的多功能性, 并表明这种成像模式即使在大的远场距离也是适用的。

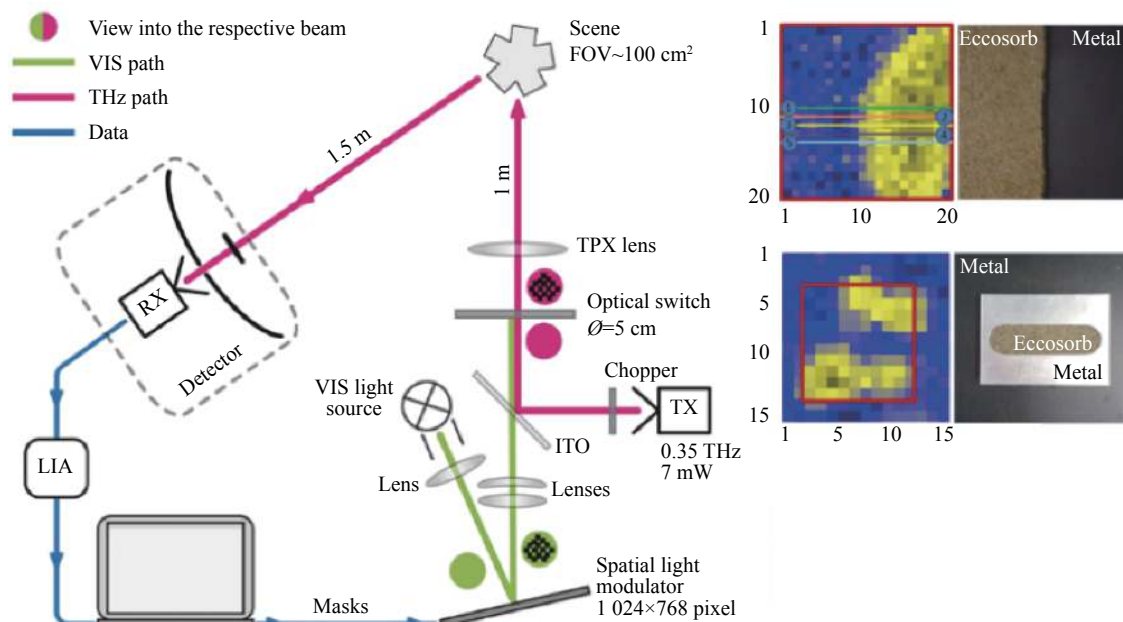


图 10 站开式太赫兹单像素计算成像系统原理图以及远场成像结果^[92]

Fig.10 Principle schematic of terahertz single-pixel computational imaging system at standoff distances and far-field imaging results^[92]

3.2 近场超分辨计算成像

成像系统的分辨率往往受到衍射的影响, 由于太赫兹波段的波长比光波段更长, 太赫兹成像的分辨率不高^[93]。近场探针扫描成像是突破衍射极限的有效方法, 但是近场探针的逐点扫描往往带来样品损伤和采集时间长的问题。Rayko 等人^[94-95]利用飞秒激光

照射微米级厚度半导体实现太赫兹近场调制, 将成像目标放置在半导体后表面, 利用算法计算太赫兹近场图像。如图 11 所示, 随着硅片厚度的由 400 μm 降至 6 μm, 太赫兹图像的分辨率由 154 μm 逐渐提高到了 9 μm, 约为中心波长 (400 μm) 的 1/45。

调制器厚度与成像分辨率直接相关, Chan 等人^[96]

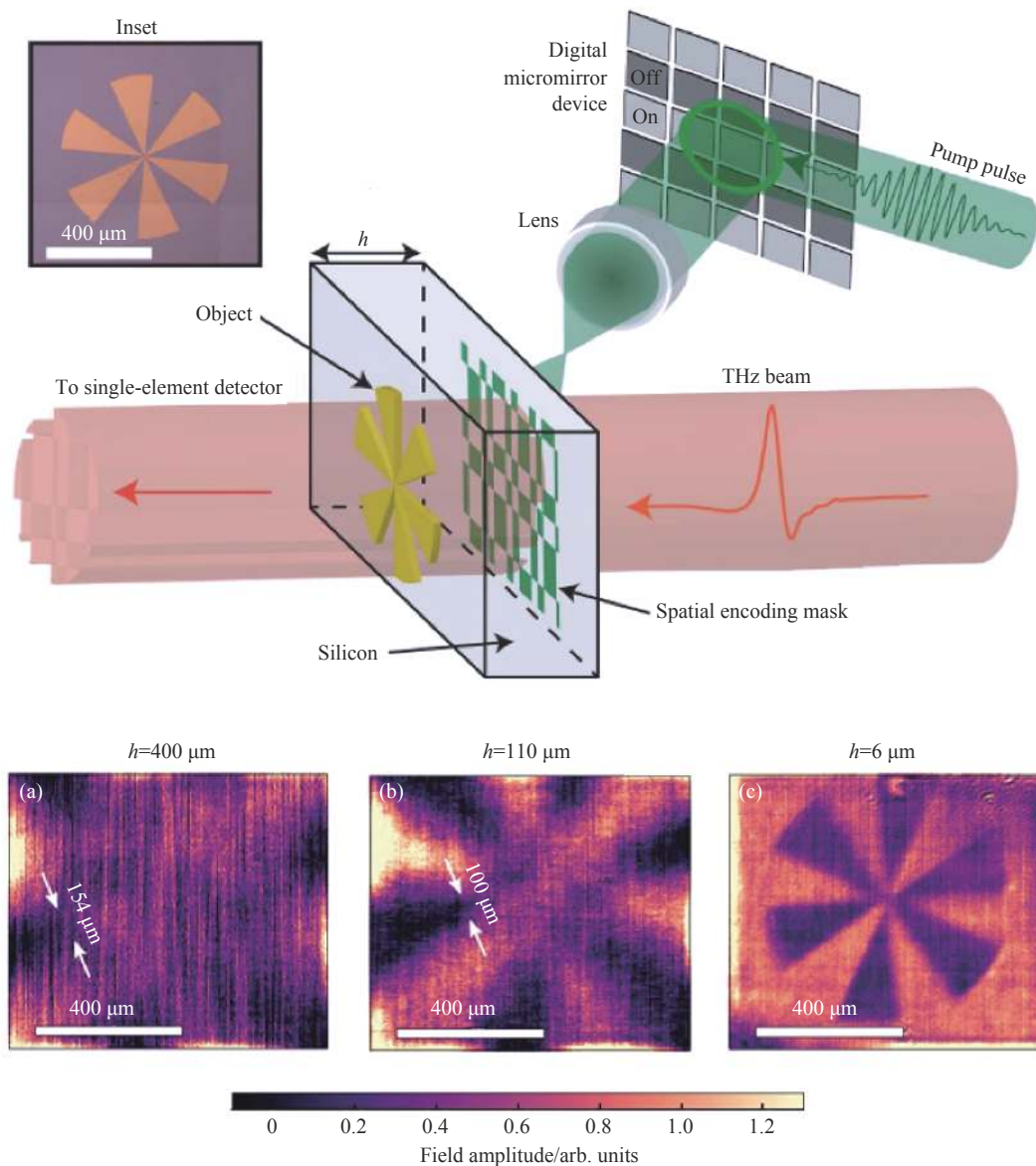


图 11 太赫兹单像素近场计算成像结构示意图及图像重构结果^[94-95]。成像分辨率在本征硅片厚度为 (a) 400 μm、(b) 110 μm 和 (c) 6 μm 分别为 154 μm、100 μm 和 9 μm

Fig.11 Schematic of terahertz single-pixel computational imaging construction and image reconstructed results^[94-95]. The imaging resolution is 154 μm, 100 μm and 9 μm when the intrinsic silicon thickness is (a) 400 μm, (b) 110 μm and (c) 6 μm, respectively

使用 180 nm VO₂ 薄膜作为太赫兹调制器，利用 DMD 将飞秒激光图形化后投射在 VO₂ 薄膜，由于 VO₂ 薄膜具有相变特性，照明激光的 VO₂ 薄膜表现金属特性阻止太赫兹波透过，而没有照明的 VO₂ 薄膜表现为半导体特性可以透过太赫兹波，经过编码和重构算法可以实现分辨率 λ/100 图像。

3.3 高光谱计算成像

传统太赫兹高光谱成像需要 THz-TDS 二维扫描成像目标获取目标图像的空间信息，通过移动延迟

线获得太赫兹脉冲的时域信号，再利用傅里叶变换获得目标图像的光谱维信息，如图 2(b)~(c) 所示。太赫兹单像素计算成像无需对目标进行空间扫描，而是投影掩膜调制目标图像，再通过算法重构目标图像的空间信息，扫描延迟线可以获取目标图像的光谱维信息。Luana 等人^[97]通过开发一种新型的非线性鬼成像方法来获取目标在太赫兹的高光谱信息。如图 12 所示。该方法结合了非线性太赫兹生成和时间分辨测量，并利用重构算法实现了目标的成分

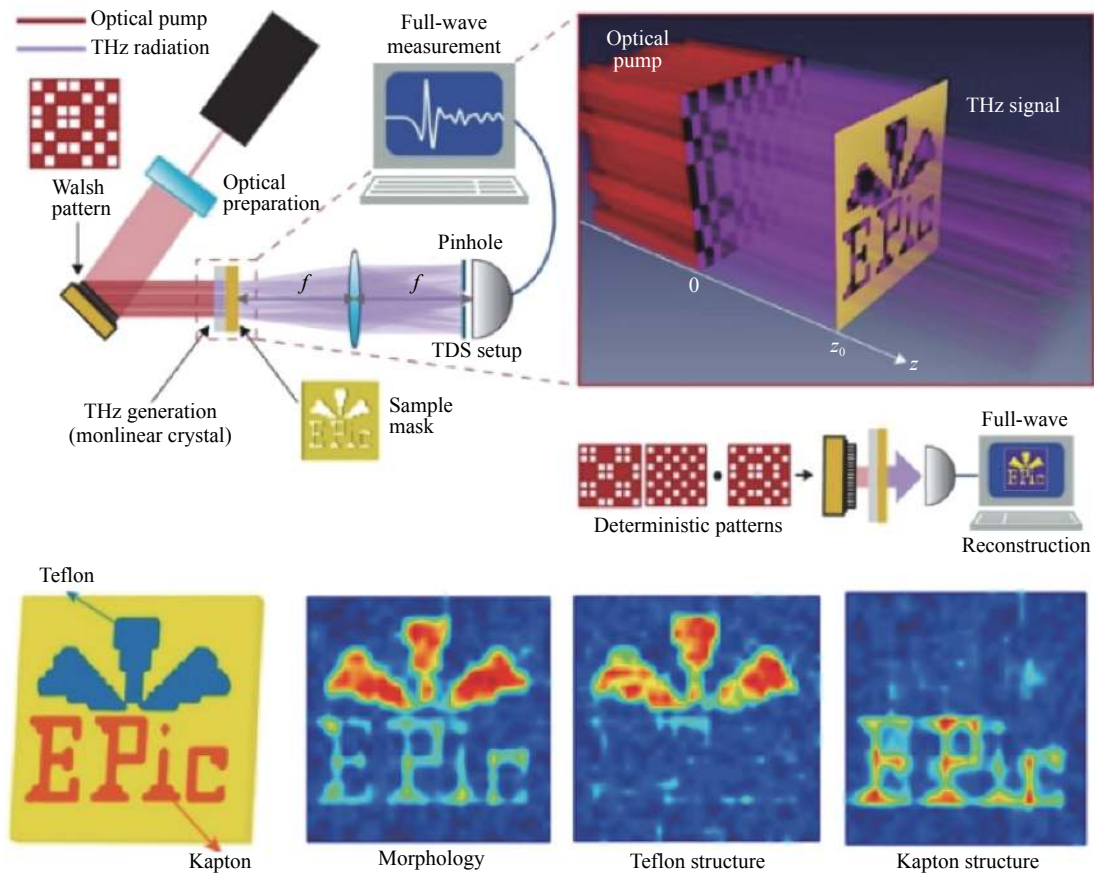


图 12 时间分辨非线性鬼成像结构原理图及高光谱重构结果^[97]

Fig.12 Structural schematic of time-resolved nonlinear ghost imaging and hyperspectral reconstructed results^[97]

分析。成像目标由三种不同的材料组成:金、聚酰亚胺、聚四氟乙烯,通过选择材料的谐振频率可以获得不同的光谱图像,从而直观展现出该方法的光谱成像能力。

3.4 目标检测与识别

基于图像的目标检测与识别在军事、工业和科学研究中有着重要的应用前景。利用图像传感器捕获目标物体的图像,进一步采用图像后处理算法检测和识别图像中的目标对象。但在这个过程中,用于图像中目标检测所需要的图像特征往往较少,基于图像的方法获取大量的用于目标检测和识别的图像数据是一种资源浪费。Zhang 等人^[98]提出一种单像素图像检测与跟踪方法,使用傅里叶基模式照亮目标运动物体,并用单像素检测器收集产生的光信号。该方法无需进行图像重建,直接利用单像素测量来检测和跟踪目标。实验证明,该方法可以达到 1666 帧/s 的时间

分辨率,极大降低目标检测的硬件成本。此外, Jiao 等人^[99]提出光学衍射神经网络单像素系统,通过学习照明掩膜,无需图像重建即可实现线性模式识别任务。Limbacher 等人^[100]实现太赫兹波段单像素目标识别,如图 13 所示。

量子级联激光器出发散的太赫兹光束,通过抛物面镜将其转换为平行光束。两个待识别物体被插入到光束中,在物体的形状中创建了一个阴影,改变了太赫兹的空间强度分布。空间调制的近红外光束改变了硅晶片的太赫兹吸光度,使得太赫兹光束强度得到空间调制,调制后的太赫兹光束经反射镜聚焦于单像素热释电探测器上,如图 13(a) 所示。输入目标图像和输出太赫兹强度之间的权重对应于空间调制的近红外光束的像素亮度,该光束被定向投影到硅晶片上,利用浅层神经网络进行训练,采用混淆矩阵评价分类结果,如图 13(b) 所示。实验结果表明该

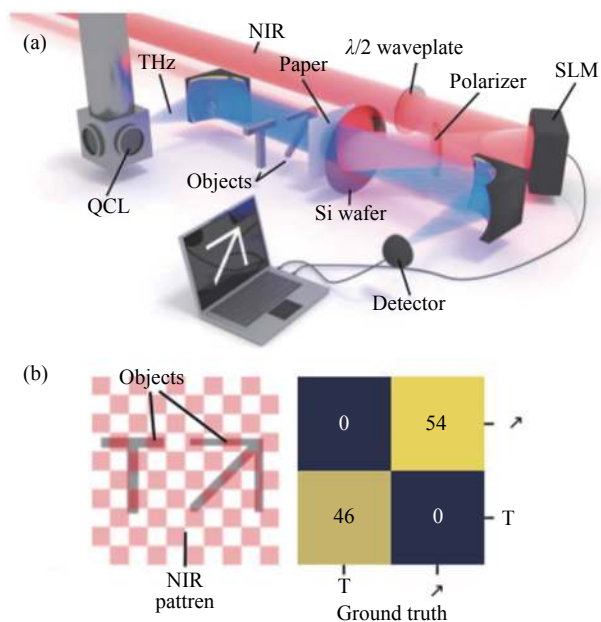


图 13 (a) 太赫兹目标识别实验框架; (b) 目标识别方法的性能评价 (混淆矩阵)^[100]

Fig.13 (a) Terahertz recognition experimental setup of target; (b) Performance evaluation (confusion matrices) of the object recognition method^[100]

系统针对训练目标的有效识别精度高达 100%。

4 结论

文中从太赫兹单像素计算成像的原理出发,从结构和数学这两个角度对其进行分析和介绍。从相关的关键技术入手,概述了太赫兹单像素计算成像的研究现状和现存问题,最后总结了其潜在应用。针对太赫兹掩膜化的关键技术,文中总结了实现太赫兹波空间调制编码的技术手段及各个方法的优缺点。长远来看,电控超表面器件是太赫兹单像素成像空间调制发展的重要方向,其高灵敏度、便捷性、和可集成等优点有利于推动太赫兹单像素成像系统的实际使用。关于成像算法方面,文中总结了目前应用于太赫兹单像素成像的主要成像算法:压缩感知算法和基扫描算法,并给出了深度学习算法用于提升成像效率的具体案例。开发适合太赫兹系统的深度学习算法有望有效解决目前太赫兹单像素成像的技术瓶颈,更好地适用于实际情况。最后,描述了单像素计算成像在太赫兹波段的具体应用,场景包含远场探测成像、近场显微成像、太赫兹高光谱成像以及太赫兹目标检测

与识别。总之,太赫兹单像素计算成像是目前解决太赫兹成像的成本高和系统复杂等问题的有效手段,但是目前其成像时间和成像质量都有待提高。系统性能提升的关键在于:(1)提高太赫兹波空间掩膜技术的调制深度和调制速度,为实时太赫兹单像素成像提供硬件基础。超表面调制器是具有前景的硬件,开发高分辨率、高效的超表面调制器是确保太赫兹单像素成像的关键;(2)研究高效率的重构算法,解决单像素计算成像中成像速度和成像质量之间的矛盾问题。基于深度学习算法的太赫兹单像素计算成像是一种有效途径,有助于克服传统系统存在的低分辨率、低质量、和慢速等瓶颈问题,为实时高质量的太赫兹单像素计算成像提供保障。

参考文献:

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Di Girolamo F V, Pagano M, Tredicucci A, et al. Detection of fungal infections in chestnuts: a terahertz imaging-based approach [J]. *Food Control*, 2021, 123: 107700.
- [3] Liu Y, Liu H, Tang M, et al. The medical application of terahertz technology in non-invasive detection of cells and tissues: opportunities and challenges [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(17): 9354-9363.
- [4] Zaytsev K I, Dolganova I N, Chernomyrdin N V, et al. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: a review [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(1): 013001.
- [5] Son J H, Oh S J, Cheon H. Potential clinical applications of terahertz radiation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(19): 190901.
- [6] Alves-Lima D, Song J, Li X R, et al. Review of terahertz pulsed imaging for pharmaceutical film coating analysis [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1441.
- [7] Shchepetilnikov A V, Gusikhin P A, Muravev V M, et al. New ultra-fast sub-terahertz linear scanner for postal security screening [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 655-664.
- [8] Tzydynzhapov G, Gusikhin P, Muravev V, et al. New real-time sub-terahertz security body scanner [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 632-641.
- [9] Wan M, Healy J J, Sheridan J T. Terahertz phase imaging and biomedical applications [J]. *Optics and Laser Technology*,

- 2020, 122: 105859.
- [10] Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 1-8. (in Chinese)
- [11] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716-1719. (in Chinese)
- [12] Li M Q, Tan Z Y, Qiu F C, et al. Fast reflective scanning imaging based on terahertz quantum-cascade laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0611004. (in Chinese)
- [13] Liu J, An J F, Zhou R, et al. Terahertz near-field MIMO-SAR technology for human security inspection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190682. (in Chinese)
- [14] Yang Z B, Tang D Y, Hu J, et al. Near-field nanoscopic terahertz imaging of single proteins [J]. *Small*, 2021, 17(3): 2005814.
- [15] Zhang Z B, Lu T A, Peng J Z, et al. Fourier single-pixel imaging techniques and applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603002. (in Chinese)
- [16] Sun B Q, Jiang S, Ma Y Y, et al. Application and development of single pixel imaging in the special wavebands and 3 D imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303016. (in Chinese)
- [17] Huang W, Jiao S Y, Xiao C Y. Image processing algorithms related to single-pixel imaging: A review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011021. (in Chinese)
- [18] Peng J Y, Jin H Q, Shi J H, et al. Data acquisition system for high speed single-pixel camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 837-843. (in Chinese)
- [19] Chen T, Li Z W, W J L, et al. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530. (in Chinese)
- [20] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [21] Schori A, Shwartz S. X-ray ghost imaging with a laboratory source [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14822-14828.
- [22] Yu H, Lu R H, Han S S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X Rays [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [23] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot X-ray diffraction imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 111-114.
- [24] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [25] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [26] Zanutto L, Piccoli R, Dong J L, et al. Single-pixel terahertz imaging: a review [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(9): 200012.
- [27] Chen S C, Du L H, Zhu L G. THz wave computational ghost imaging: principles and outlooks [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 200024.
- [28] Stantchev R I, Pickwell-MacPherson E. Spatial Terahertz-Light Modulators for Single-Pixel Cameras [M/OL]//Terahertz Technology [Working Title]. (2021-03-22). <https://www.intechopen.com/online-first/75638>.
- [29] Bai Y F, Gao H Y, Liu T G, et al. Visibility of ghost imaging in a two-arm microscope imaging system [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(4): 360-364.
- [30] Shen Q, Bai Y F, Shi X H, et al. Ghost microscope imaging system from the perspective of coherent-mode representation [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(3): 035207.
- [31] Zhang L H, Tang B, Wang F Q, et al. On the characteristics of photoacoustic imaging based on the algorithm of computational ghost imaging [J]. *Lasers in Engineering*, 2013, 25(1-2): 1-11.
- [32] Huynh N, Zhang E, Betcke M, et al. Single-pixel optical camera for video rate ultrasonic imaging [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 26-29.
- [33] Yang J M, Gong L, Xu X, et al. Motionless volumetric photoacoustic microscopy with spatially invariant resolution [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 780.
- [34] Rousset F, Ducros N, Peyrin F, et al. Time-resolved multispectral imaging based on an adaptive single-pixel camera [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10550-10558.
- [35] Bian L H, Suo J L, Situ G H, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24752.
- [36] Czajkowski K M, Pastuszczak A, Kotynski R. Real-time single-pixel video imaging with Fourier domain regularization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20009-20022.
- [37] Bi S, Zeng X, Tang X, et al. Compressive video recovery using block match multi-frame motion estimation based on single pixel cameras [J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 318.
- [38] Teng J J, Guo Q, Chen M H, et al. Time-encoded single-pixel 3D imaging [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(2): 020801.
- [39] Zhang Y W, Edgar M P, Sun B Q, et al. 3D single-pixel video [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035203.
- [40] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [41] Clemente P, Duran V, Tajahuerce E, et al. Compressive

- holography with a single-pixel detector [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2524-2527.
- [42] Jiao S M, Feng J, Gao Y, et al. Visual cryptography in single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7301-7313.
- [43] Zheng P X, Dai Q, Li Z L, et al. Metasurface-based key for computational imaging encryption [J]. *Science Advances*, 2021, 7(21): eabg0363.
- [44] Gibson G M, Sun B Q, Edgar M P, et al. Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 2998-3005.
- [45] Lewis R A. A review of terahertz sources [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(37): 374001.
- [46] Neu J, Schmuttenmaer C A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(23): 231101.
- [47] Gong Y, Zhou Q, Tian H, et al. Terahertz radiation sources based on electronics [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2019, 36(2): 111-127.
- [48] Liang G Z, Liu T, Wang Q J. Recent developments of terahertz quantum cascade lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1200118.
- [49] Zhong K, Shi W, Xu D G, et al. Optically pumped terahertz sources [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2017, 60(12): 1801-1818.
- [50] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [51] Shen H, Gan L, Newman N, et al. Spinning disk for compressive imaging [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(1): 46-48.
- [52] Cai H L, Huang Q P, Hu X, et al. All-optical and ultrafast tuning of terahertz plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(14): 1800143.
- [53] Daniel G, Egor S, Sebastián R, et al. Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 47-59.
- [54] Wang L, Zhang Y X, Guo X Q, et al. A review of THz modulators with dynamic tunable metasurfaces [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(7): 965.
- [55] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [56] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [57] Chen I C A, Park S-W, Karaalioglu C, et al. Semiconductor based optically controlled THz optics [C]//Proceedings of the Terahertz for Military and Security Applications V, 2007.
- [58] Xie Z W, Wang X K, Ye J S, et al. Spatial terahertz modulator [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3347.
- [59] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [60] Bin Shams M I, Jiang Z, Rahman S, et al. Approaching real-time terahertz imaging using photo-induced reconfigurable aperture arrays [C]//Proceedings of the Terahertz Physics, Devices, and Systems VIII: Advanced Applications in Industry and Defense, 2014.
- [61] Augustin S, Hieronymus J, Jung P, et al. Compressed sensing in a fully non-mechanical 350 GHz imaging setting [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2015, 36(5): 496-512.
- [62] Kannegulla A, Bin Shams M I, Liu L, et al. Photo-induced spatial modulation of THz waves: Opportunities and limitations [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32098-32112.
- [63] She R B, Liu W Q, Wei G L, et al. Terahertz single-pixel imaging improved by using silicon wafer with SiO₂ passivation [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(7): 2427.
- [64] Weis P, Garcia-Pomar J L, Hoeh M, et al. Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(10): 9118-9124.
- [65] Zhai D W, Liu H L, Sedao X, et al. Optically induced abnormal terahertz absorption in black silicon [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 027802.
- [66] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, et al. Terahertz modulators based on silicon nanotip array [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(2): 1700620.
- [67] Zhang B, He T, Zhong L, et al. Recent process of terahertz wave modulator based on organic photoelectric materials [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2019, 46(6): 0614012. (in Chinese)
- [68] Ren Z, Cheng L, Hu L, et al. Photoinduced broad-band tunable terahertz absorber based on a VO₂ thin film [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(43): 48811-48819.
- [69] Gopalan P, Sensale-Rodriguez B. 2 D Materials for terahertz modulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900550.
- [70] Zhao J P, Yiwen E, Williams K, et al. Spatial sampling of terahertz fields with sub-wavelength accuracy via probe-beam encoding [J]. *Light-Science & Applications*, 2019, 8: 55.
- [71] Olivieri L, Gongora J S T, Peters L, et al. Hyperspectral terahertz microscopy via nonlinear ghost imaging [J]. *Optica*, 2020, 7(2): 186-191.
- [72] Chen S C, Feng Z, Li J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-

- array microscope [J]. *Light-Science & Applications*, 2020, 9(1): 99.
- [73] Zhang Z J, Liu L, Sajak A A, et al. Spinning disk as a spatial light modulator for rapid infrared imaging [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2017, 11(3): 317-323.
- [74] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: A review [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [75] He Y H, Zhang A X, Li M F, et al. High-resolution sub-sampling incoherent X-ray imaging with a single-pixel detector [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(5): 056102.
- [76] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [77] Zhao Y Q, Zhang L L, Duan G T, et al. Single-pixel terahertz imaging via compressed sensing [C]//Proceedings of the International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011 - Terahertz Wave Technologies and Applications, 2011.
- [78] She R B, Lu Y F, Liu W Q, et al. A low-cost single-pixel terahertz imaging method using near-field photomodulation and compressed sensing [C]//Proceedings of the Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies VI, 2019.
- [79] Lu Y, Wang X K, Sun W F, et al. Reflective single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(5): 495-501.
- [80] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7225.
- [81] She R B, Liu W Q, Lu Y F, et al. Fourier single-pixel imaging in the terahertz regime [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(2): 021101.
- [82] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.
- [83] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 12029.
- [84] Sinha A, Lee J, Li S, et al. Lensless computational imaging through deep learning [J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1117-1125.
- [85] Tian C W, Fei L K, Zheng W X, et al. Deep learning on image denoising: An overview [J]. *Neural Networks*, 2020, 131: 251-275.
- [86] Higham C F, Murray-Smith R, Padgett M J, et al. Deep learning for real-time single-pixel video [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2369.
- [87] Rizvi S, Cao J, Zhang K Y, et al. Deringing and denoising in extremely under-sampled Fourier single pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7360-7374.
- [88] Long Z Y, Wang T Y, You C W, et al. Terahertz image super-resolution based on a deep convolutional neural network [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2731-2735.
- [89] Wang Y, Qi F, Wang J. Terahertz image super-resolution based on a complex convolutional neural network [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3123-3126.
- [90] Li H, Li B, Ma L P, et al. Terahertz spectrum imaging technology and its application in security inspection [J]. *Journal of Yunnan Police College*, 2020(3): 122-128. (in Chinese)
- [91] Cheng B B, Li H P, An J F, et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(6): 843-848.
- [92] Augustin S, Jung P, Frohmann S, et al. Terahertz dynamic aperture imaging at standoff distances using a compressed sensing protocol [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(4): 364-372.
- [93] Liu H X, Yao J Q, Wang Y Y, et al. Review of THz near-field imaging [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(3): 300-309.
- [94] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [95] Stantchev R I, Phillips D B, Hobson P, et al. Compressed sensing with near-field THz radiation [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 989-992.
- [96] Chen S-C, Du L-H, Meng K, et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 21-24.
- [97] Olivieri L, Gongora J S T, Pasquazi A, et al. Time-resolved nonlinear ghost imaging [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3379-3388.
- [98] Zhang Z B, Ye J Q, Deng Q W, et al. Image-free real-time detection and tracking of fast moving object using a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35394-35401.
- [99] Jiao S M, Feng J, Gao Y, et al. Optical machine learning with incoherent light and a single-pixel detector [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5186-5189.
- [100] Limbacher B, Schoenhuber S, Wenclawiak M, et al. Terahertz optical machine learning for object recognition [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(12): 126103.