

## 单像素成像与超表面成像 (特邀)

郑培霞<sup>1</sup>, 刘亦辰<sup>2</sup>, 刘宏超<sup>1,2\*</sup>

1. 澳门大学 应用物理及材料工程研究院, 澳门特别行政区 999078;
2. 澳门大学 科技学院 物理及化学系, 澳门特别行政区 999078)

**摘要:** 单像素成像作为一种典型的计算成像方式, 利用单像素探测器测量一系列掩模图像照射目标之后的光强值, 进而通过不同重构算法恢复目标图像。相较于多像素探测器 (CCD 或 CMOS), 单像素成像克服了硬件的限制, 在某些特殊波段, 探测效率更高, 响应更快。超表面是由亚波长的金属或介质单元构成的二维人造结构。在可见光波段, 超表面可以调控入射光的多种自由度以实现多通道全息图的显示; 在微波波段, 超表面可以与导波模式进行耦合辐射出多种模式图案。简单介绍了单像素成像的研究背景、成像原理和重构算法、超表面成像的研究背景, 并主要讨论了两种成像方式在可见光波段以及微波波段的结合以及相关研究, 最后提出了未来的发展方向。

**关键词:** 单像素成像; 超表面; 计算成像

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211058

## Single-pixel imaging and metasurface imaging (*Invited*)

Zheng Peixia<sup>1</sup>, Liu Yichen<sup>2</sup>, Liu Hongchao<sup>1,2\*</sup>

1. Institute of Applied Physics and Materials Engineering, University of Macau, Macao 999078, China;
2. Department of Physics and Chemistry, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao 999078, China)

**Abstract:** As a typical computational imaging modality, single-pixel imaging uses a single-pixel detector to measure the light intensities reflected or transmitted from the target after its interaction with a series of patterns. By calculating the correlation of the measured intensities and relevant patterns with different reconstruction algorithms, the target image can be recovered. Compared with multi-pixel detector (i.e. CCD or CMOS), single-pixel imaging overcomes hardware limitations and the detection efficiency is higher, and the response is faster in some special wavebands. Metasurfaces are a kind of artificial two-dimensional materials consisting of an array of subwavelength metallic or dielectric unit cells. In the optical wavelength regime, the metasurface can display various holograms by adjusting different degrees of freedom of incident light. In the microwave regime, the metasurface can couple with the waveguide and emit various radiating modes as patterns. The research background, imaging principle, reconstruction algorithms of single-pixel imaging, and the research background of metasurface imaging were reviewed. The discussion of relevant works was mainly focused on the combination of single-pixel imaging and metasurface imaging in optical and microwave regimes, and finally a perspective on the potential development in future was proposed.

**Key words:** single-pixel imaging; metasurface; computational imaging

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 澳门大学研究启动经费 (SRG2019-00174-IAPME); 澳门科学技术发展基金 (0062/2020/AMJ)

作者简介: 郑培霞, 女, 博士, 主要从事单像素成像、超材料超表面等方面的研究。

通讯作者: 刘宏超, 男, 助理教授, 博士, 主要从事单像素成像、超材料以及超表面、拓扑材料方面的研究。

## 0 引言

如今,基于 CCD 或 CMOS 的多像素相机已经成为了人们生活中必不可少的一部分,像素的不断提高也伴随着相机体积的不断增长和价格的上涨。除了多像素相机,现代的扫描技术通过将照明或者探测光束引导进入单像素探测器,也可以进行成像,这种机制称为光栅化的扫描系统,适用于无法用硅基探测器探测的波段,如远红外或者深紫外。但是光栅化的扫描系统在进行可见光波段的成像时,成像效率与图像的像素成反比,即图像的像素越高,成像效率越低。单像素成像作为一种替代的成像方式,克服了硬件的限制,转而通过提高数据处理能力提高成像效果。

单像素成像已经广泛应用于可见光波段的成像<sup>[1-2]</sup>、多光谱成像<sup>[3-6]</sup>、远红外成像<sup>[7]</sup>、太赫兹成像<sup>[8-10]</sup>、显微成像<sup>[11-13]</sup>、散射介质成像<sup>[14-15]</sup>、三维成像<sup>[16-20]</sup>、远距离成像<sup>[21-22]</sup>等。

## 1 单像素成像

### 1.1 单像素成像研究背景

作为一种新型的间接成像方式,关联成像又称“鬼成像”,在过去的 20 年里一直是光学成像中的一个研究热点。1995 年,史砚华等人利用自发参数下转

换产生的量子纠缠光子对,在实验上观察到了第一个鬼成像<sup>[23-24]</sup>。2002 年,Boyd 等人利用经典光源在实验上实现了鬼成像,证明了鬼成像并非量子光场独有<sup>[25-26]</sup>。传统鬼成像系统需要两束空间相关联光束,一束不经过物体,称为参考光,用来记录光的空间分布;另一束为物光,和目标物体相互作用后,其光强值被一个单像素探测器记录。两束光并不能单独成像,但通过关联运算可以计算得到目标像,即称为鬼像。

随着空间光调制器 (SLM) 的出现,2008 年 Shapiro 提出了计算鬼成像<sup>[27]</sup>。在计算鬼成像中,参考光被一个空间光调制器替代,即实验中只需一路被调制后的光束和一个单像素探测器即可恢复物体的像,光路明显简化,如图 1(a) 所示。同年更早时间, Duarte 等人利用数字微镜器件 (DMD) 配合一个单像素探测器,结合物体信号本身的稀疏特性,通过压缩感知算法计算恢复出了物体的像,这被称为单像素成像,实验光路如图 1(b) 所示<sup>[2]</sup>。通过对比图 1(a) 和图 1(b) 可以看到,计算鬼成像与单像素成像的不同仅在于物体与掩模图案生成器的前后位置上。而两者的其他方面,例如光源、探测器和图像恢复算法等都可以互通。随着研究的不断深入,研究者普遍认为计算鬼成像和单像素成像本质相同,因此以下计算鬼成像和单像素成像将被视为同一个概念。

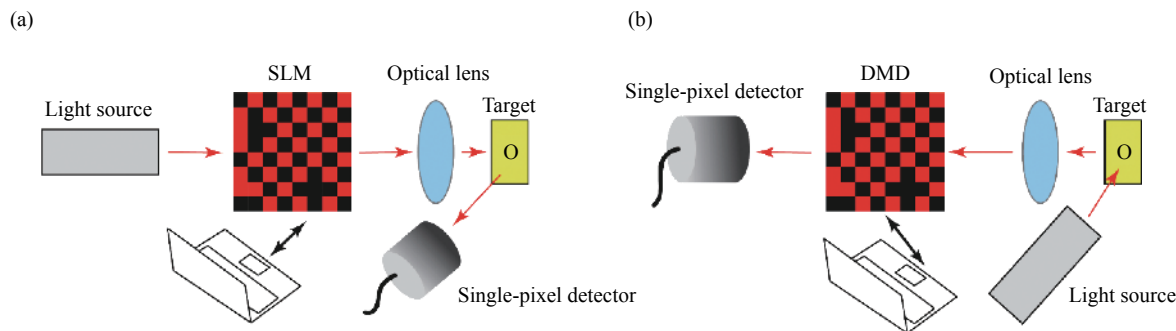


图 1 (a) 计算鬼成像及 (b) 单像素成像光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of (a) computational ghost imaging and (b) single-pixel imaging

### 1.2 单像素成像原理和重构算法

单像素成像通过将一系列空间分布不同的掩模图案与目标物体作用,之后利用没有空间分辨率的单像素探测器探测作用后的光强值,进而可以通过不同的算法计算两者之间的关联,从而恢复出目标图像<sup>[28]</sup>。单像素探测实际上是在进行多态扫描,即用一个像素

来感知同时来自多个位置的强度信息的叠加。相比于扫描成像,单像素成像的成像速度更快,更加适用于商用。

用数学的方法理解单像素成像的过程:假定目标图像是一个灰度图,其可以视为一个二维矩阵  $T$ , 矩阵中的每一个元素都代表着相应图像中的像素值。

同理,用空间光调制器调控入射光得到的  $N$  个掩模图像也可以视为矩阵  $\{M^{m \times n}\}_N$ 。用不具有空间分辨能力的单像素相机来测量  $N$  个掩模图案  $\{M^{m \times n}\}_N$  和目标图像  $T$  相互作用后的光强信息  $\{I_o\}_N$ , 可表示为:

$$I_{o_k} = \sum_{m,n} T^{m \times n} \cdot M_k^{m \times n} \quad (1)$$

式中:  $I_{o_k}$  表示第  $k$  次入射的掩模图像和目标图像相互作用之后单像素探测器测得的光强值。重构图像的过程就是利用  $\{I_o\}_N$  和  $\{M^{m \times n}\}_N$  求解  $T$  中包含的  $N$  个未知数的问题。将掩模  $\{M^{m \times n}\}_N$  和对应的光强值  $\{I_o\}_N$  做关联运算, 最简单的鬼成像 (ghost imaging, GI) 算法由公式 (2) 的二阶关联运算定义给出<sup>[29-30]</sup>:

$$G^{(2)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{o_k} - \langle I_o \rangle) \cdot (M_k^{m \times n} - \langle M^{m \times n} \rangle) \quad (2)$$

式中:  $G^{(2)}$  代表重构的目标图像;  $\langle I_o \rangle$  和  $\langle M^{m \times n} \rangle$  分别表示  $N$  次测量物光和信号光的平均值。进一步为了提高成像质量, 差分鬼成像 (differential GI, DGI) 的算法被提出<sup>[31]</sup>, 与 GI 定义的不同在于其物光  $I_o$  被以下差分形式所替代:

$$I_k^{DGI} = I_{o_k} - \frac{\langle I_o \rangle}{\langle M_k \rangle} M_k \quad (3)$$

式中:  $M_k$  代表的是  $M_k^{m \times n}$  矩阵的总和;  $\langle M_k \rangle$  表示  $N$  个掩模图像的平均值。分析可知, 最简单的  $M_k^{m \times n}$  是只有一个元素为 1、其余均为 0 的矩阵, 与光栅扫描成像完全相同。考虑到许多自然场景都是稀疏或可压缩的, 可以用正交性更好的掩模图像来获取物体信息, 如哈达马 (Hadamard)、傅里叶 (Fourier)、小波分析 (wavelet) 等。考虑到成像物体的稀疏特性, 子采样 (sub-sampling) 的策略被引入到单像素成像中, 即在对包含  $N$  个像素的目标成像时只测量  $M$  次 ( $M < N$ ), 称为压缩鬼成像 (compressive ghost imaging, CGI)。在压缩感知算法中,  $M_k^{m \times n}$  变形为一个行矢量 ( $1 \times K$ ,  $K = m \times n$ ),  $I_{o_k}$  变形为一个列矢量  $I^{CGI} (N \times 1)$ ,  $N$  次测量所使用的掩模图像  $\{M^{m \times n}\}_k$  整形为一个二维矩阵  $A (N \times K)$ 。假定图像是稀疏的, 则目标图像可以通过如下凸优化步骤进行重构<sup>[32-33]</sup>:

$$T^{CGI} = |T|, \min T_1 \text{ 满足 } I^{CGI} = AT \quad (4)$$

式中:  $T^{CGI}$  为重构图像;  $T$  为目标图像;  $T_1$  为求  $T$  的  $L_1$  范数。CGI 算法相较于 GI 和 DGI 的测量次数明显减少, 成像效率明显提高, 因而在实验中被广泛使用。更多的单像素成像重构算法可以参考参考文献 [34]。

## 2 超表面成像的研究背景

上述提到的单像素成像是一种非直接成像方式, 超表面作为二维形式的超材料, 为单像素成像提供了新的应用范例。超材料一般由亚波长的周期性的金属或电介质单元结构组成, 显示出不同于自然界已有材料的一些特殊的电磁特性, 如负折射现象, 光学隐身等<sup>[35-37]</sup>。相比于超材料难加工, 高损耗, 高色散的特性, 超表面作为二维的超材料, 加工所需要的微纳米加工技术已经比较成熟, 同时损耗也明显降低, 可以有效地调控各个波段电磁波的特性。与传统光学材料相比, 超表面具有高转化效率, 超薄超小, 易于加工和集成等优势, 在可见光波段, 太赫兹波段, 微波波段等都具有很好的应用前景<sup>[38-39]</sup>。在微波和太赫兹波段, 常用亚波长的金属谐振器 (如开口环) 进行调控, 该谐振结构利用对称性消除了磁响应, 因而可认为只对入射的电场有响应; 在可见光波段, 一般用光与结构的相互作用来实现调控, 常见的有金属或介质的纳米柱及其互补结构<sup>[40]</sup>。超表面为实现光波的空间不均匀调控提供了可能。超表面可以将波前调控为任意的形状, 实现对光的强度、偏振、相位等信息的多维度的调控, 例如: 光弯 (light bending)<sup>[41-44]</sup>, 超薄平面透镜<sup>[45-48]</sup>, 涡旋光束的产生<sup>[49-52]</sup>, 宽带相位延迟片<sup>[53-57]</sup> 等。目前, 超表面已经可以在亚波长尺度上提供具有空间振幅和相位信息的高质量图像。

近几年, 超表面成像技术迅速发展, 如图 2 所示, 超表面成像已经由低效率 (<10%) 的透射式金属单元结构<sup>[58]</sup> 发展为超高效率 (>90%) 的反射式金属单元结构<sup>[59-60]</sup> 和透射式电介质单元结构<sup>[61]</sup>。同时, 超表面成像已经从单色单通道单图成像向多色多通道多图像发展<sup>[62-63]</sup>, 并正在向快速动态调控的多图像成像方向发展<sup>[64]</sup>。基于超表面以上特点, 下文将详细介绍超表面成像和单像素成像结合构成的新颖成像方式及其相关应用。

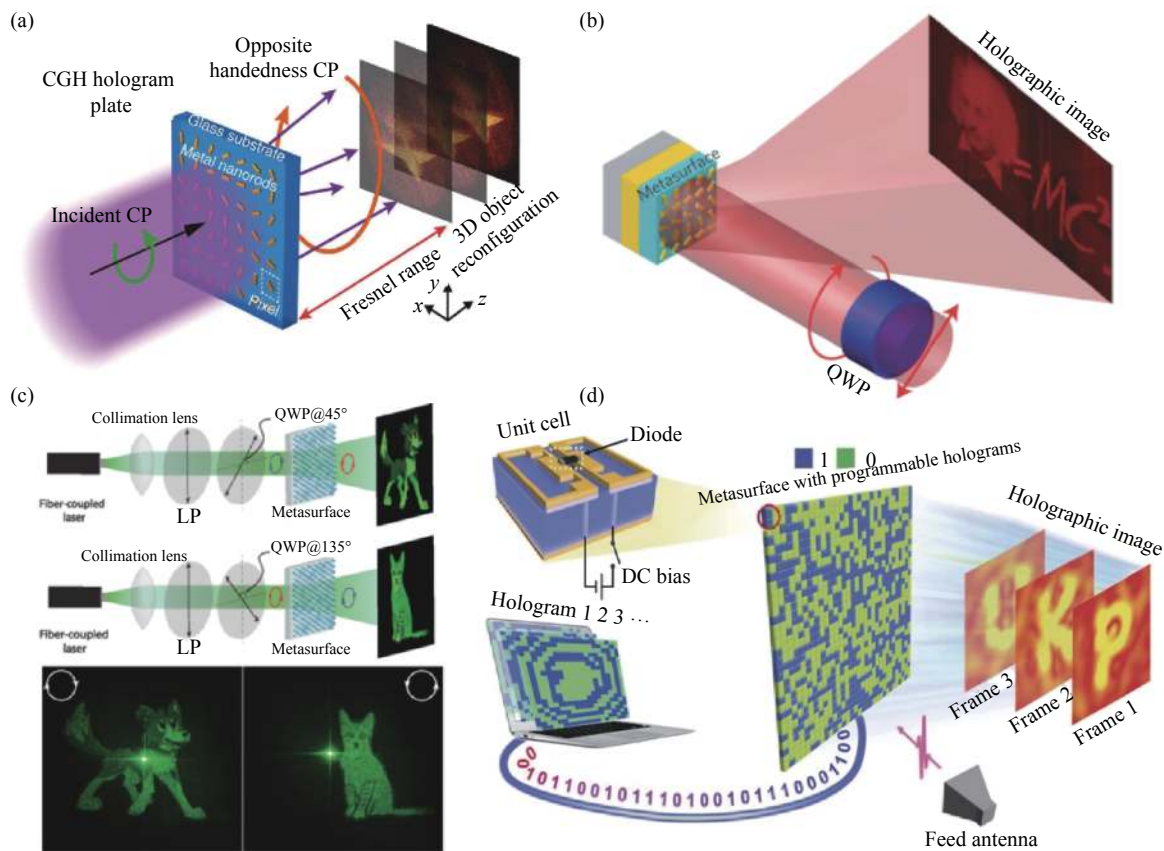


图 2 超表面成像技术在可见光波段与微波波段的相关研究展示<sup>[58-64]</sup>

Fig.2 Several research demonstrations of metasurface imaging technology in optical and microwave regime<sup>[58-64]</sup>

### 3 可见光波段单像素成像和超表面成像的结合

从前文可知,单像素成像系统中有三个关键的要素:目标图像,一系列掩模图像,以及单像素探测器。目前,除单像素探测器尚未被超表面取代之外,超表面成像已实现替代其他两个要素,即超表面成像作为目标图像或掩模图像。

#### 3.1 超表面成像作为目标图像

参考文献 [65] 提出了一种将超表面所成图像作为单像素成像的目标图像,使超表面成像和计算成像结合在一起的机制。已知在反射型的超表面全息中<sup>[59-60]</sup>,每个纳米柱对应一个像素,用  $\varphi$  表示纳米柱的方向,则其相对于入射光的相位改变 (Pancharatnam-Berry phase) 为  $\pm 2\varphi$ ,而当入射光束从左旋圆偏振变为右旋圆偏振时,  $\pm 2\varphi$  的相位改变取不同的符号。这一特性可以用于手性相关的超表面全息,即超表面通过控制不同偏振入射光的相位不连续,可以显示仅与相位和手性相关的全息图像。如图 3(a) 所示,

氦氖激光器发出的波长 632.8 nm 的激光通过一个起偏器和四分之一波片,以入射角度  $10^\circ$  照射在  $333.3 \mu\text{m} \times 333.3 \mu\text{m}$  的三层结构 (Au/MgO/Au) 的超表面上,如图 3(b) 和 (c) 所示,纳米柱的尺寸为  $200 \text{ nm} \times 80 \text{ nm} \times 30 \text{ nm}$ ,单元尺寸为  $300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$ 。由超表面反射的全息图像随后投影到  $51 \times 51 \text{ pixel}$  的任意二值掩模板上,之后用一个单像素探测器测得通过掩模板的光强。如图 3(d) 所示,在这项工作中,由于超表面的手性特征,在左旋和右旋入射光照射下显示出的全息图像是空间反转的,即左旋 (LCP) 入射下显示“M”,而在右旋 (RCP) 入射下显示“W”。

进一步地,在将超表面全息像作为单像素成像中的目标图像进行成像的过程中,为了提高成像的效果,该工作对比了 GI、DGI、CGI 三种不同的关联算法,得到了如图 3(e) 和 3(f) 所示的仿真和实验结果图。显然,CGI 算法恢复的图像质量最高,因而在基于手性超表面的单像素成像实验中,选择用 CGI 来进行数据处理具有优势。其中,基于不同采样方式的图像信噪比分析参见参考文献 [65-66]。



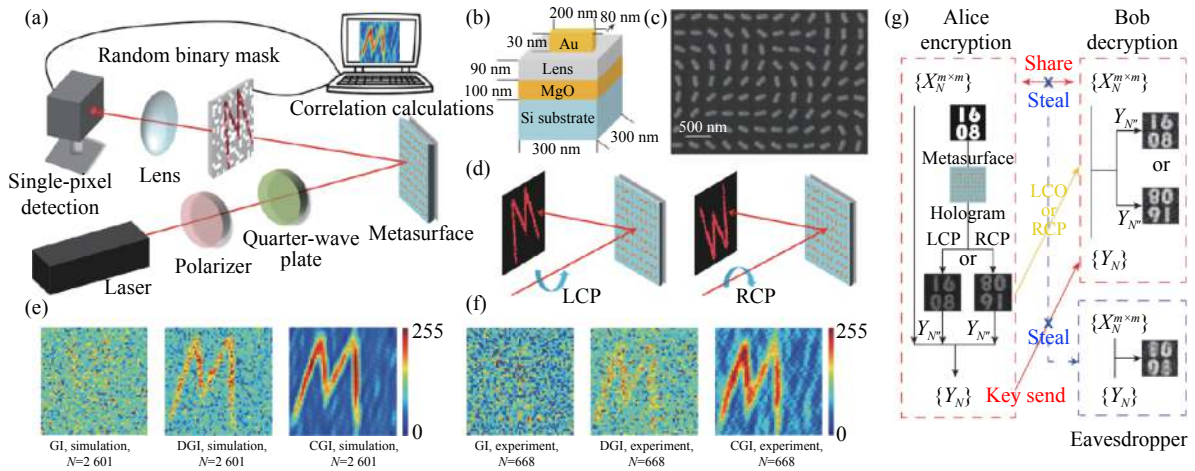


图 3 超表面成像作为目标图像。(a) 实验装置示意图；(b) 超表面单元结构示意图；(c) 扫描电子显微镜下超表面部分区域结构图；(d) 左旋和右旋偏振光入射下超表面全息成像；(e) 不同鬼成像算法仿真结果的图像对比；(f) 不同鬼成像算法实验结果的图像对比；(g) 基于手性超表面全息成像和压缩鬼成像的光学加密<sup>[65]</sup>

Fig.3 Metasurface imaging as target image. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) Schematic diagram of unit cell of the metasurface; (c) Scanning electron microscopy image of the metasurface; (d) Schematic diagram of reflective metasurface hologram with LCP and RCP; (e) Simulated results with different GI algorithms; (f) Experimental results with different GI algorithms; (g) Scheme of the optical encryption based on CGI with helicity-dependent metasurface hologram<sup>[65]</sup>

在该工作中，高效的反射型超表面通过调控不同的偏振光入射，显示出了两幅全息图，并将它们作为单像素成像的目标图像成功与单像素成像结合在一起，并基于此提出了一种光学加密机制，如图 3(g) 所示。Alice 准备给 Bob 发送一张图——“1608”，他们有相同的密码本 $\{X_N^{m \times m}\}$ ，这里密码本本质上为单像素成像中一系列的掩模图像。在编码过程中，Alice 按照“1608”设计了相应的超表面图像，使其在左旋偏振入射下的全息图中显示“1608”，而在右旋偏振入射下显示倒置图，变为“8091”。随后，Alice 用 $\{X_N^{m \times m}\}$ 对超表面全息图进行单像素测量编码，这里 Alice 可以控制每次入射到超表面是左旋光或右旋光，进而得到一系列强度值 $\{Y_N\}$ ，并将它们传给 Bob。Bob 利用收到的 $\{Y_N\}$ 以及对应的每次测量的手性信息，通过相对应的密码本 $\{X_N^{m \times m}\}$ 就可以恢复出目标图像。如果仅有 $\{Y_N\}$ 和密码本而缺少每次测量为左旋或右旋的信息，解密将失败。

### 3.2 超表面成像作为掩模图像

近期，笔者课题组<sup>[67]</sup>提出了一种将超表面成像作为单像素成像中的掩模图像进行信息加密的结合方式，其工作示意图如图 4 所示。根据马吕斯 (Malus) 定律，超表面输出的光强值可以通过调控银纳米柱的

方向进行改变。利用双通道偏振混合理论设计加工一个双通道的 Malus 超表面，通过控制输出光的偏振状态，在两个通道 (Channel 1 和 Channel 2) 分别显示出两个不同图像 (Meta-image 1 和 Meta-image 2)。Meta-image 1 和 Meta-image 2 是提前设计好的超表面图像，其中 Meta-image 1 是一个二维码，链接到刘宏超课题组网站，Meta-image 2 是一只“鹿”的简图。在此工作中，掩模图像并未直接使用 Meta-image 1 或 Meta-image 2，而是选择了在之前的超表面成像中从未利用过的、从混合通道得到的 Meta-image 3。如图 5 所示，Meta-image 3 并不是 Meta-image 1 和 Meta-image 2 的简单叠加，具体的构成方式参见参考文献 [67]，其按照三种颜色的分布可以视为一个由 0、1、2 构成的矩阵 $M^{m \times n}$ 。依据单像素成像原理，实际的掩模图像并非只有一个矩阵。因此为了利用 Meta-image 3 生成一系列掩模图像，笔者提出了 Left-shift 和 Up-shift 两种与矩阵结合的元素操作方式，如图 5 所示，使 Meta-image 3 动态地变为一系列矩阵。在 Left-shift 操作中，矩阵中的每一个元素向左移动到第  $k$  个位置，得到了一个新的矩阵作为第  $k$  个掩模图像。在  $N$  次操作以后，得到的  $N$  个不同的矩阵共同构成了一组掩模图像。同理，在 Up-shift 操作中，矩阵中

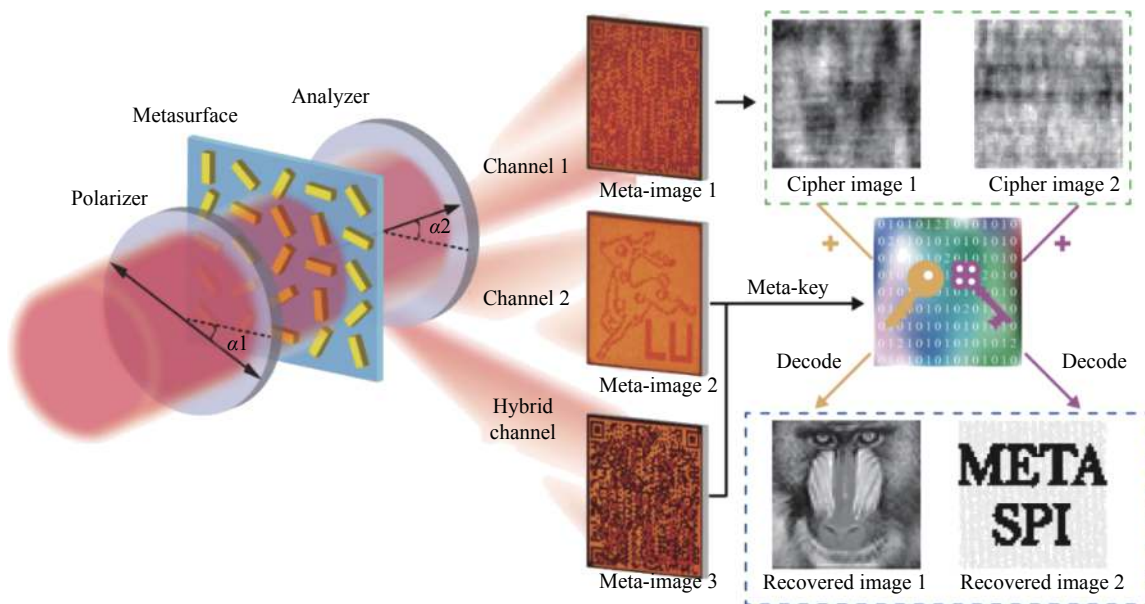


图 4 超表面成像作为掩模图像重构目标图像的工作示意图<sup>[67]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of metasurface imaging as patterns to reconstruct target images<sup>[67]</sup>

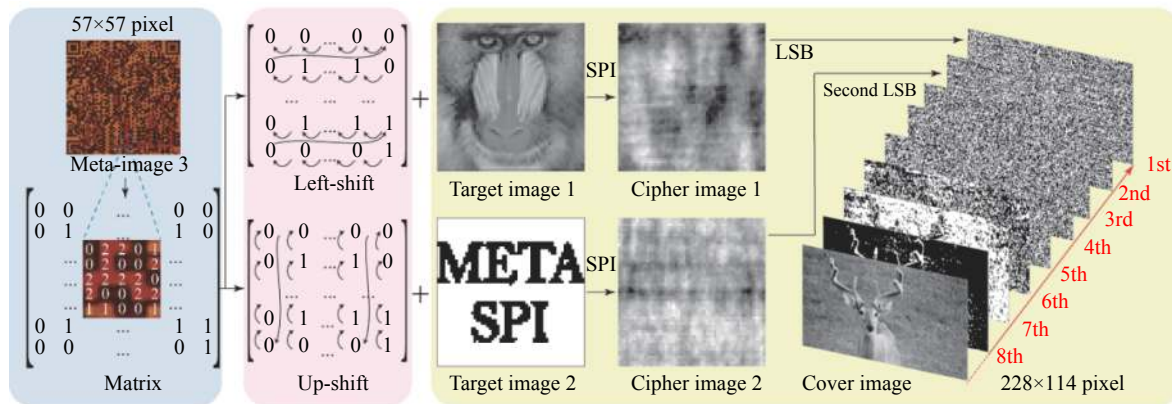


图 5 基于超表面图像 Meta-image 3 的动态掩模图像生成和光学加密示意图<sup>[67]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of dynamic pattern generation based on metasurface imaging Meta-image 3 and corresponding optical encryption<sup>[67]</sup>

的每个元素向上移动到第  $k$  个位置, 得到第  $k$  个掩模图像, 最终经过  $N$  次操作得到  $N$  个掩模图像。

基于单像素成像原理, 这一系列通过超表面图像数字化生成的一系列矩阵可用于光学加密。在加密过程中, 掩模图像和目标图像按照公式 (1) 所示的单像素成像原理可以计算得到对应的  $N$  个物光信号, 随后归一化为 8 位密码图 (Cipher image 1 和 Cipher image 2), 其中, 每一个像素值对应一个物光信号。然后将这 8 位密码图转换为二值形式, 藏于刘宏超课题组网站中一个掩模图像的最低有效位。此加密过程将密码图藏在网站中, 使得密码图可以随时更换, 超表面成像可以重复利用。在解密过程中, 通过扫描

Meta-image 1 显示的二维码进入指定网站, 再通过对比 Meta-image 2 和指定网站中的掩模图像完成一个防伪的过程——都包含有关键元素“鹿”。完成防伪步骤后即可从掩模图中得到隐藏在最低位的物光信息。另外, 通过调节起偏器和检偏器, 超表面显示出 Meta-image 3 作为密钥提供了一系列掩模图像。最后, 将得到的物光信息和一系列掩模图像两者做关联运算, 即可恢复出所需的目标图像。

#### 4 微波波段超表面成像和单像素成像结合

超表面成像和单像素成像的结合不仅在光学波段有许多深入的研究, 而且在微波波段更早地获得了

发展。微波成像利用电磁波照射目标后得到的散射信号进行目标重构,其中,基于雷达方式的微波成像一般由线性模型获取目标的位置和形状,而基于逆散射方式的微波成像需要对非线性的模型分析求得介电常数等信息<sup>[68-71]</sup>。微波成像因为其波长很长,为实现衍射极限的分辨率,要求孔径很大,一般都采用机械扫描或使用大型阵列来合成一个较大的孔径<sup>[72-74]</sup>。但是两种方式都使得系统体积庞大,且伴随着很慢的获取速度、很高的能量消耗以及高昂的价格。微波波段的超表面成像和单像素成像的结合为遇到的这些困难提供了解决方案。

#### 4.1 微波超材料与计算成像结合的研究背景

类似于漏波天线 (leaky-wave antennas, LWAs) 的结构,超表面天线一般设计为和导波模式耦合,以辐射出期望的单像素成像掩模图像<sup>[75]</sup>。周期性的超表面结构虽然简化了设计过程,但同时也带来了因可操作范围受限和变化缓慢而导致的价格昂贵等缺

点<sup>[76]</sup>。因此,为满足微波单像素成像的需要,选择不同的超表面天线相邻排布,以实现产生大量的空间多样化模式的需要。

2013年,John Hunt等利用超表面天线实现了微波波段计算成像的工作<sup>[77]</sup>。在这个工作中,表面由互补电感电容 (complementary electric-inductor-capacitors, cELCs) 图案化的一个标准微带线构成的一维超材料孔径实现了各种二维 (包括角度和范围) 稀疏场景的压缩成像,如图 6(a) 和 6(b) 所示。其中,每个 cELC 作为一个谐振单元将波导模式的能量耦合到自由空间中,其谐振频率和光谱形状控制透射光的振幅和相位,因而远场模式可以通过调控 cELC 的几何形状来进行设计。随后,一维结构扩展到了二维,平行平板波导取代了微带线,并成功重构出了 3D 的图像<sup>[78]</sup>。

利用频域色散特性的超材料计算成像显示出卓越的性能,但是其对孔径的要求——超宽带宽,使得在许多应用中受到限制,因而开始考虑用有源加载的

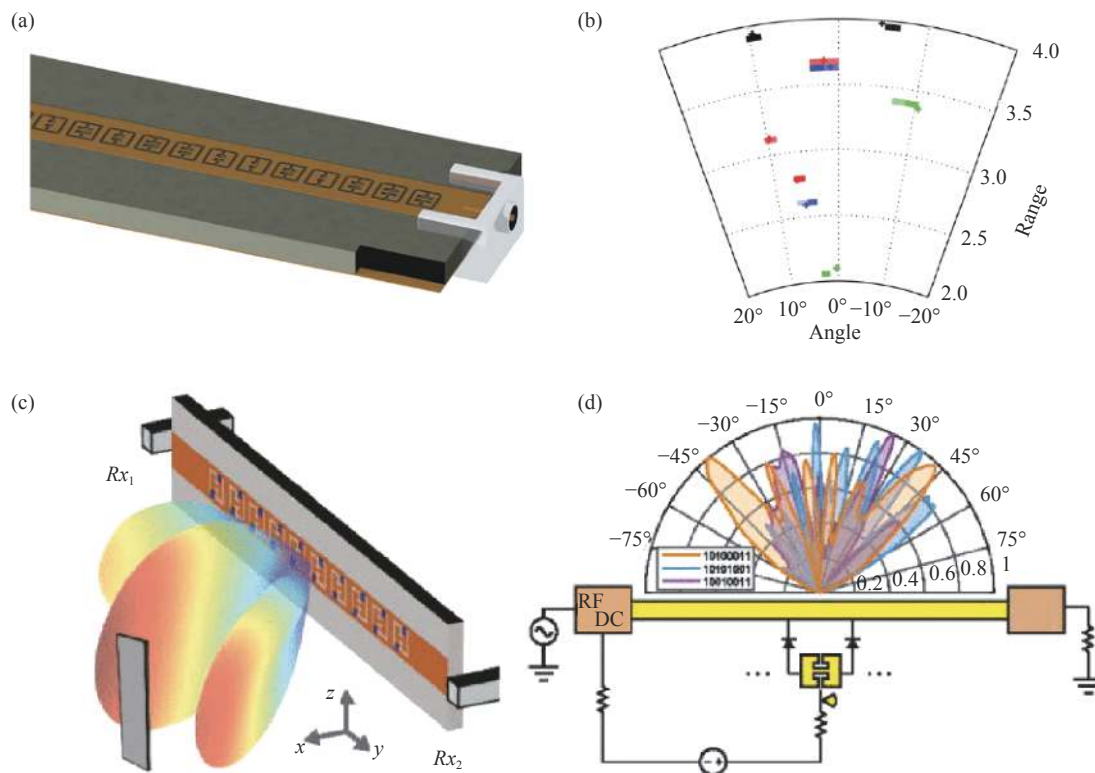


图 6 (a) 一维超材料孔径实现压缩成像的结构示意图; (b) 不同静态目标的重构图像<sup>[77]</sup>; (c) 采用动态超表面天线的成像系统; (d) 动态超表面天线和激励信号示意图<sup>[79]</sup>

Fig.6 (a) Structural diagram of 1D resonant metamaterial apertures for compressed imaging; (b) Reconstructions of different static scenes<sup>[77]</sup>; (c) Imaging system consisting of dynamic metasurface antennas; (d) Schematic diagram of the dynamic metasurface antennas and the exciting signals<sup>[79]</sup>



方式增加测量模式种类,并提出了使用动态超表面天线 (dynamic metasurface antennas, DMAs) 的方式。第一个为计算成像设计的 DMA 如图 6(c) 所示,由嵌入在微带线上的 8 个超表面单元组成<sup>[79]</sup>。每个超表面单元包含两个 PIN 二极管同时与一个外加电路相连接,因而超表面的谐振可以通过外加偏压进行调控。通过施加不同的电压给控制电路,部分单元可以被调控为“开”来投射出不同的掩模图像照明目标。但其只有 8 个单元,同时孔径很小,限制了图像的多样性。之后通过增加微带线上的超表面单元,掩模图像有更多的可能性,成像效果也逐渐变好<sup>[80]</sup>。前面提到的微波计算成像均利用相位和振幅两个维度的信息重构图像,进一步地,可以通过无相位的成像方式简化系统,即在微波波段的超表面鬼成像。

#### 4.2 微波波段超表面鬼成像工作原理

将无相位信息的鬼成像引入到利用动态超表面孔径的微波成像的工作如图 7(a) 和 7(b) 所示<sup>[81]</sup>。该

工作的实验装置与可见光波段的非常相似, DMA 类比可见光波段的 DMD, 通过调制超表面单元的电特性,使得孔径在单频产生大量的散射场。DMA 照亮金属目标物体,随后接收返回的信号,通过将 DMA 强度模式与自由开放式波导 (偶极天线) 测得的仅与振幅相关的散射信号做关联运算,实现了单频一维的鬼成像。图 7(b) 是具体的 DMA 构成图, K 带微波信号沿着 40 cm 长的微带线传输,导波由位于微带线中央和两个末端边缘的源同时发射。微带线上有 112 个 cELCs 超材料单元,彼此间隔 3.33 mm,每个单元都包含两个 PIN 二极管,允许通过控制外加偏压的大小控制谐振状态的开或关。波在沿着波导进行传播时,会与处于“开”状态的超表面单元进行耦合,辐射到空间中,即 DMA 形成的场实质是和超表面单元进行耦合过的振幅由开关状态调控过的导波分布。对于每个给定的强度状态,由超表面单元辐射的场会在天线的近场进行干涉构成掩模图像。金属目标物

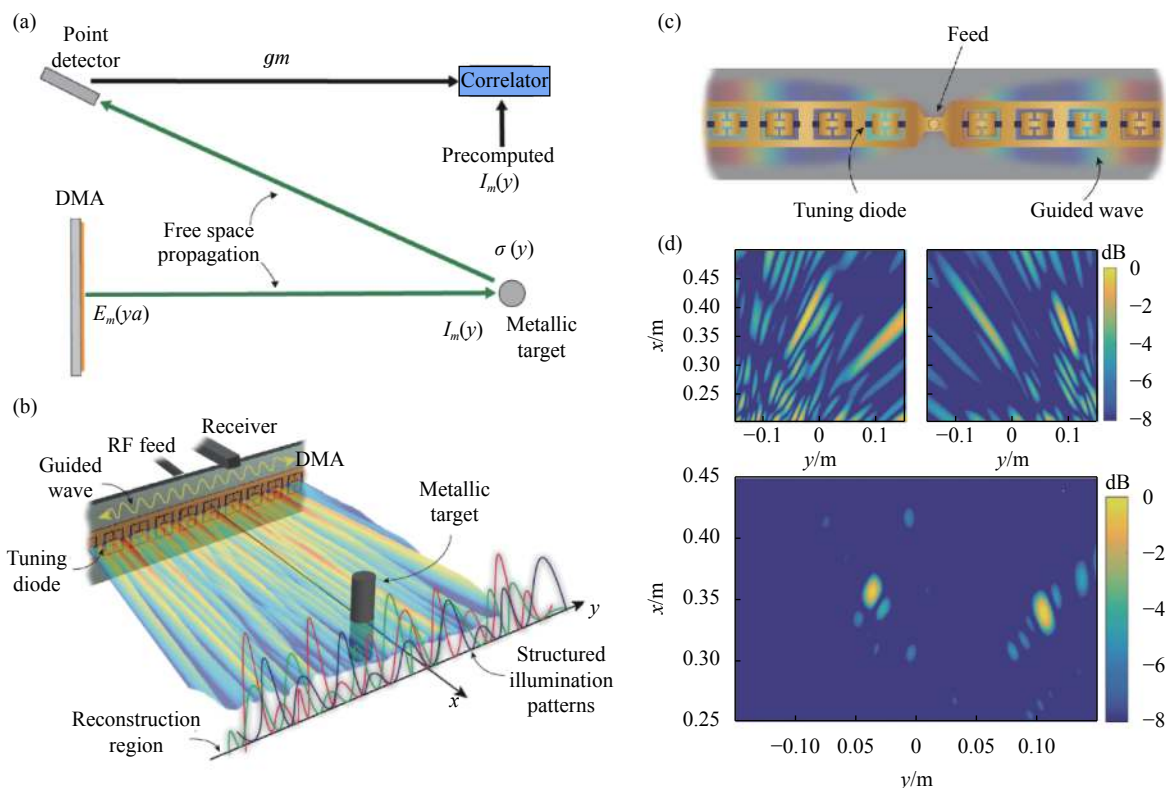


图 7 (a) 利用 DMA 的无相计算微波鬼成像配置图; (b) 由 DMA 产生的结构化照明掩模图像<sup>[81]</sup>; (c) 实现非相干压缩鬼成像的 DMA 示意图; (d) 实验测得的通过平均左边的接收机和右边的发射机的调谐状态恢复的两个目标图像<sup>[82]</sup>

Fig.7 (a) Scheme of phaseless computational ghost imaging at microwave frequencies using DMA; (b) Structured illumination patterns generated by a DMA<sup>[81]</sup>; (c) Schematic illustration of DMA to achieve incoherent CGI; (d) Reciprocal images of two targets obtained by averaging over receiver tuning states on the left, transmitter tuning states on the right, and the product of them<sup>[82]</sup>



体放在近场范围内,离超表面约 0.5~1 m。该工作是在单频状态下进行的,体探测器也不测量相位信息,因而通过时间延迟信息无法分辨目标的距离。该工作中的微带线是一维的,因而每个掩模图像都可以在近场中沿着一条线测量电场值得到。扫描得到的沿水平或  $y$  轴方向的电场  $E_m(0, y_a, z_a)$  与偶极天线测得的信号一一对应,其中  $y_a, z_a$  表示孔径平面上水平和垂直方向,进一步的公式求解可以参见参考文献 [81]。

在参考文献 [81] 的工作中,测得的信号并没有进行空间强度平均,因而成的像是相干的。对于不相干的微波成像,空间强度平均一般可以通过在一组位置上扫描接收探测器测得的强度值,并将其相加后求平均;或用独立的检测硬件作为接收器来测量这样的一组强度值,类似于光学中的焦平面阵列。而如果在微波波段采用这两种方式,会使得硬件构成复杂且昂贵,因而并不适用。在参考文献 [82] 的工作中,提出了一种用单端口的 DMA 作为接收器的方式。如图 7(c) 所示,结构主要由沿着  $y$  方向的微带线及上面的超材料结构单元构成。在一对动态孔径中,一个用作传输,另一个用作接收,可以实现无相位的相干成像,也可以像单像素探测器一样,对收集到的强度值进行空间平均,实现非相干成像。在非相干成像中,这种结构通过扫描不同的调谐态避免了机械扫描,实现了单端口的强度集成。单端口发出的微波信号沿着微带线的长边进行传播,在波导的中心和两个末端位置得到加强。同样,每个超表面单元都会和导波进行耦合辐射,辐射的模式主要与单元结构的几何构成相关。如图 7(d) 所示,利用发射机和接收机提供的信息可以恢复出纵深不同的两个目标图像:左上图是在对发射的 DMA 调谐状态进行平均以后实现的非相干重构;右上图是在对接收的 DMA 调谐状态平均后恢复的图像;下图是由上方两图生成的,两组独立的信息不相干的恢复出了有一定纵向分辨率的图像。该工作证明了可以利用超表面孔径实现鬼成像,为微波波段的非相干成像提供了一种新的方式。

## 5 单像素成像和超表面成像结合的发展趋势

单像素成像技术正朝着更高分辨率、更快速成像和更长工作距离等方向发展,其与超表面成像的结合为多种成像方式之间的结合提供了新的思路,主要讨

论三个未来发展的方向。

### 5.1 多视角的成像

超表面快速成像为多视角的成像提供了基础,例如:相同的目标物在移动过程中即可完成成像,而不再需要静止不动的进行成像,大大降低了成像的时间。为了实现这一目的,硬件和软件部分都有很多需要优化的地方,例如:提高探测器的灵敏度,提高成像分辨率,用算法将所成的单独的像进行拼接等<sup>[83]</sup>。

### 5.2 多通道光学超表面成像的设计

目前在微波波段已有合适的 DMA 来提供大量的掩模图像,而在光学波段,由于超表面设计中通道有限,所成的像也有限。因此,为了利用超表面成像作为掩模图像,需借助必要的操作方式组合超表面成像完成。多通道的光学超表面成像或可重复编程的光学超表面会是一个发展的重点。

### 5.3 提高加密信息安全性

超表面成像作为直接成像方式,利用光的不同自由度进行加解密。而单像素成像作为非直接成像方式,其成像的计算原理即是一种类加密方案。两者的结合为光学信息加密提供了新的重要的途径。引入更多不同的直接与间接成像方式,将其与超表面成像或单像素成像结合,以提高它们在光学加密中的安全性和实用性,这需要进一步深入的研究。

## 6 结束语

单像素成像相较于多像素成像具有很多优势:单像素探测器价格更低;可以实现某些极端条件下的成像,如:散射介质中的成像、存在遮挡物的成像。超表面成像使得成像系统微型化,在图像显示、增强现实、虚拟现实等领域有极大的发展空间。文中主要论述了可见光波段和微波波段单像素成像和超表面成像的结合。在可见光波段,二者的结合为光学加密、防伪提供了重要的途径,为其在光通信、传感方面的应用奠定了基础;在微波波段,二者的结合为雷达、安检等的成像提供了新的思路,为设备的微型化提供了设计方案。

### 参考文献:

- [1] Sen P, Chen B, Garg G, et al. Dual photography [C]//ACM SIGGRAPH, ACM, 2005: 745-755.

- [2] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Process Mag*, 2008, 25(2): 83-91.
- [3] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
- [4] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 24752.
- [5] Rousset F, Ducros N, Peyrin F, et al. Time-resolved multispectral imaging based on an adaptive single-pixel camera [J]. *Opt Express*, 2018, 26(8): 10550-10558.
- [6] Zhang Z, Liu S, Peng J, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315-319.
- [7] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Sci Rep*, 2015, 5(1): 1-8.
- [8] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(12): 121105.
- [9] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. *Nat Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [10] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. *Sci Adv*, 2016, 2(6): e1600190.
- [11] Studer V, Bobin J, Chahid M, et al. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2012, 109(26): E1679-E1687.
- [12] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [13] Wu Y, Ye P, Mirza I O, et al. Experimental demonstration of an optical-sectioning compressive sensing microscope (CSM) [J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 24565-24578.
- [14] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection [J]. *Opt Express*, 2014, 22(14): 16945-16955.
- [15] Durán V, Soldevila F, Irlas E, et al. Compressive imaging in scattering media [J]. *Opt Express*, 2015, 23(11): 14424-14433.
- [16] Zhang Y, Edgar M P, Sun B, et al. 3D single-pixel video [J]. *J Opt*, 2016, 18(3): 035203.
- [17] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [18] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(31): 5917-5920.
- [19] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning [J]. *Opt Express*, 2016, 24(10): 10476-10485.
- [20] Zhang Z, Zhong J. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(11): 2497-2500.
- [21] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Complementary compressive imaging for the telescopic system [J]. *Sci Rep*, 2014, 4(1): 1-6.
- [22] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 26133.
- [23] Pittman T, Shih Y, Strekalov D, et al. Optical imaging by means of two photon quantum entanglement [J]. *Phys Rev A*, 1995, 52(5): R3429.
- [24] Strekalov D, Sergienko A, Klyshko D, et al. Observation of two photon "ghost" interference and diffraction [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(18): 3600.
- [25] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(11): 113601.
- [26] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(6): 063601.
- [27] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 061802.
- [28] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [29] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [30] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing [J]. *JOSA A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [31] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(25): 253603.
- [32] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(14): 141123.
- [33] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(13): 131110.
- [34] Deng Chao, Suo Jinli, Zhang Zhili, et al. Coding and decoding of optical information in single-pixel imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603004. (in Chinese)
- [35] Liu Y, Zhang X. Metamaterials: A new frontier of science and technology [J]. *Chem Soc Rev*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [36] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium

- with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(18): 4184.
- [37] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [38] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: Physics and applications [J]. *Rep Prog Phys*, 2016, 79(7): 076401.
- [39] Quevedo-Teruel O, Chen H, Díaz-Rubio A, et al. Roadmap on metasurfaces [J]. *J Opt*, 2019, 21(7): 073002.
- [40] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: From microwaves to visible [J]. *Phys Rep*, 2016, 634: 1-72.
- [41] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [42] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427-427.
- [43] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [44] Sun S, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [45] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [46] Ni X, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses [J]. *Light Sci Appl*, 2013, 2(4): e72-e72.
- [47] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2013, 13(2): 829-834.
- [48] Chen X, Huang L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. *Nat Commun*, 2012, 3(1): 1-6.
- [49] Zeng J, Li L, Yang X, et al. Generating and separating twisted light by gradient-rotation split-ring antenna metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2016, 16(5): 3101-3108.
- [50] Zeng J, Gao J, Luk T S, et al. Structuring light by concentric-ring patterned magnetic metamaterial cavities [J]. *Nano Lett*, 2015, 15(8): 5363-5368.
- [51] Yang Y, Wang W, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Lett*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [52] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(11): 937-943.
- [53] Yu N, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [54] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Broadband plasmonic half-wave plates in reflection [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 513-515.
- [55] Jiang S C, Xiong X, Hu Y S, et al. Controlling the polarization state of light with a dispersion-free metastructure [J]. *Phys Rev X*, 2014, 4(2): 021026.
- [56] Zhao Y, Alù A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates [J]. *Nano Lett*, 2013, 13(3): 1086-1091.
- [57] Kruk S, Hopkins B, Kravchenko I I, et al. Invited Article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(3): 030801.
- [58] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nat Commun*, 2013, 4(1): 1-8.
- [59] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(4): 308-312.
- [60] Wen D, Yue F, Li G, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nat Commun*, 2015, 6(1): 1-7.
- [61] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization [J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 118(11): 113901.
- [62] Lee G Y, Sung J, Lee B. Recent advances in metasurface hologram technologies (Invited paper) [J]. *ETRI Journal*, 2019, 41(1): 10-22.
- [63] Huang L, Zhang S, Zentgraf T. Metasurface holography: from fundamentals to applications [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1169-1190.
- [64] Li L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 1-7.
- [65] Liu H C, Yang B, Guo Q, et al. Single-pixel computational ghost imaging with helicity-dependent metasurface hologram [J]. *Sci Adv*, 2017, 3(9): e1701477.
- [66] Zhao Haixiao, Guo Yan, Li Peiming, et al. Investigation of single-pixel imaging in signal-to-noise ratio and its development at special wavelength [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,



- 2021, 58(10): 1011010. (in Chinese)
- [67] Zheng P, Dai Q, Li Z, et al. Metasurface-based key for computational imaging encryption investigation of single-pixel imaging in signal-to-noise ratio and its development at special wavelength [J]. *Sci Adv*, 2021, 7(21): eabg0363. (in Chinese)
- [68] Nikolova N K. Introduction to Microwave Imaging[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [69] Chen X. Subspace-based optimization method for solving inverse-scattering problems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 48(1): 42-49.
- [70] Palmeri R, Bevacqua M T, Crocco L, et al. Microwave imaging via distorted iterated virtual experiments [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 65(2): 829-838.
- [71] Ghasr M T, Abou-Khousa M A, Kharkovsky S, et al. Portable real-time microwave camera at 24 GHz [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 60(2): 1114-1125.
- [72] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing[M]. New York: Wiley, 1999.
- [73] Ahmed S S, Schiessl A, Schmidt L P. A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array [J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59(12): 3567-3576.
- [74] Gonzalez-Valdes B, Allan G, Rodriguez-Vaqueiro Y, et al. Sparse array optimization using simulated annealing and compressed sensing for near-field millimeter wave imaging [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 62(4): 1716-1722.
- [75] Jackson D R, Onliner A A. Leaky-wave Antennas [M]/Balanis C A. Modern Antenna Handbook, New York: Wiley, 2008.
- [76] Holloway C L, Dienstfrey A, Kuester E F, et al. A discussion on the interpretation and characterization of metafilms/metamaterials: The two-dimensional equivalent of metamaterials [J]. *Metamaterials*, 2009, 3(2): 100-112.
- [77] Hunt J, Driscoll T, Mrozack A, et al. Metamaterial apertures for computational imaging [J]. *Science*, 2013, 339(6117): 310-313.
- [78] Hunt J, Gollub J, Driscoll T, et al. Metamaterial microwave holographic imaging system [J]. *JOSA A*, 2014, 31(10): 2109-2119.
- [79] Sleasman T, Imani M F, Gollub J N, et al. Dynamic metamaterial aperture for microwave imaging [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 107(20): 204104.
- [80] Sleasman T, Boyarsky M, Imani M F, et al. Design considerations for a dynamic metamaterial aperture for computational imaging at microwave frequencies [J]. *JOSA B*, 2016, 33(6): 1098-1111.
- [81] Diebold A V, Imani M F, Sleasman T, et al. Phaseless computational ghost imaging at microwave frequencies using a dynamic metasurface aperture [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(9): 2142-2149.
- [82] Diebold A V, Imani M F, Sleasman T, et al. Phaseless coherent and incoherent microwave ghost imaging with dynamic metasurface apertures [J]. *Optica*, 2018, 5(12): 1529-1541.
- [83] Liu Weitao, Sun Shuai, Hu Hongkang, et al. Progress and prospect for ghost imaging of moving objects [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011001. (in Chinese)