

## 超材料隐身技术研究进展

罗歆瑶，王身云

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044)

**摘要：**目的 探究超材料隐身技术的应用背景，回顾超材料隐身技术的最新研究进展，并对超材料隐身技术的发展趋势进行展望。**方法** 从基本工作原理出发，介绍几种主流的超材料隐身技术的实现方法，包括变换光学隐身技术、等离激元隐身技术、覆罩式隐身技术、基于微波网络理论的隐身技术以及相位调制型超构表面隐身技术等。**结果** 超材料技术的发展为隐身衣的设计提供了新的思路，并加速了隐身器件的小型化、集成化、数字化和智能化发展。**结论** 概述了超材料隐身技术的研究进展，并对其发展趋势进行了简要展望。

**关键词：**超材料；超表面；隐身技术

**中图分类号：**TN015    **文献标识码：**A    **文章编号：**1001-3563(2023)09-0120-09

**DOI：**10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.015

## Recent Progress on Metamaterial Cloaking

LUO Xin-yao, WANG Shen-yun

(School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of  
Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the application background of metamaterial cloaking, review its state-of-the-art progress, and prospect its development trend. Based on the basic principles of operation, the realization methods of several popular metamaterial cloaking methods were discussed, including transformation-based optics, plasmonic and mantle cloaking, cloaking based on microwave network, and phase-tailoring metasurface cloaking. The results demonstrated that the development of metamaterial provided brand-new idea for design of cloaks and promoted the development of miniaturization, integration, digitization, and intelligence of the cloaks. At last, the research progress of metamaterial cloaking is overviewed and a brief perspective on its development trend is given.

**KEY WORDS:** metamaterial; metasurface; cloaking

在现代复杂的战场环境下，隐身技术的发展加剧了各国武器装备竞争，发展隐身技术，提高武器系统生存、空防和纵深打击能力，已经成为集陆、海、空、天、电磁为一体的立体化现代战争的迫切需要。实践证明，隐身技术能有效提高武器装备的作战性能和电子战能力。为了降低作战系统的雷达散射截面积（Radar Cross Section, RCS）从而降低目标被探测到的风险，

必须对目标进行特殊的电磁隐身设计。目前，电磁隐身技术主要采取 2 种技术途径，外形隐身设计<sup>[1-2]</sup>和使用电磁隐身材料。在工程实践中，这 2 类隐身技术通常同时应用。但是外形隐身技术的设计自由度较差，受限于目标的气动性能、结构以及尺寸等；而传统电磁隐身材料使用的吸波材料通常厚度厚、质量小，工作频率也相对固定，不利于系统进行小型化、集成化、

收稿日期：2023-03-31

基金项目：国家自然科学基金面上项目（61971231）

作者简介：罗歆瑶（1992—），女，博士。

通信作者：王身云（1981—），男，博士。

轻量化设计。因此, 如何实现厚度薄、质量小、性能好的隐身材料已成为该领域的研究热点和难点。

人工电磁超构材料的出现, 使电磁隐身技术实现了重大突破。人工电磁超构材料 (Metamaterial) 简称为“超材料”, 是一种由亚波长量级的人工“类原子”进行周期性或者非周期性排布而成的新型人工复合材料<sup>[3]</sup>。通过设计单元的几何结构、尺寸及排布方式, 可以任意、灵活地调控这类材料的电磁参数, 使设计出的超构材料能够展现出天然材料所不具备的特异电磁性质, 如负磁导率、负介电常数、负折射率等, 从而极大地丰富了调控电磁波的手段和方法<sup>[4-10]</sup>。人工电磁超构表面 (Metasurface)<sup>[11-16]</sup>可以看作是超材料的二维平面形式, 简称为“超表面”。电磁超构表面具有剖面超薄、损耗较低且易于设计、加工与集成等优势。在电磁隐身、电磁隔离与雷达探测等微波频段的热门领域展现出了广阔的应用前景。它的发展推动了微波器件的小型化、集成化、共形化、数字化和智能化<sup>[17-23]</sup>。

目前, 国内外已有很多关于超材料隐身技术的研究工作。本文将概述性地介绍几种主流的超材料隐身技术的研究现状, 包括变换光学隐身技术、等离激元隐身技术、覆罩式隐身技术、基于微波网络理论的隐身技术以及相位调制型超构表面隐身技术等。

## 1 超材料/超表面隐身技术概述

当电磁波照射到目标时, 会发生反射、折射、散射等物理现象。这些现象的强弱通常与目标的物理尺寸和结构有关。通常情况下, 可以使用雷达散射截面积 (Radar Cross Section,  $S_{\text{RCS}}$ ) 来衡量微波波段内目标产生的回波强度<sup>[24, 25]</sup>:

$$S_{\text{RCS}} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 4\pi\rho^2 \frac{|\vec{E}^{\text{sca}}|^2}{|\vec{E}^{\text{inc}}|^2} \quad (1)$$

其中,  $\vec{E}^{\text{sca}}$  为散射电场;  $\vec{E}^{\text{inc}}$  为入射电场。

电磁隐身技术旨在降低目标物体的 RCS, 从而降低目标被探测到的风险, 在电磁兼容、伪装技术、低可侦测技术、阵列天线技术等技术领域中具有重要价值。在后文中, 将对几种主流的电磁超材料/超表面隐身技术进行总结和概述。

## 2 基于变换光学的超材料隐身技术

2006 年初, Pendry 等<sup>[26]</sup>在《Science》上发文, 首次提出了基于超材料的变换光学 (Transformation Optics) 理论以及利用该理论实现隐身衣设计的构想。由于麦克斯韦方程在坐标变换后可以保持形式不变, Pendry 教授提出了通过合理构建变换媒质的本构参数来有效调控电磁波传播路径的方法。该方法可以构造出一个与电磁波完全隔离的实际物理空间, 使入射

电磁波能够如流水流过石头一般, 平滑地绕过这个构造出的物理空间, 如图 1 所示。由于电磁波不能够进入这个物理空间, 因此这个物理空间内放置的任意目标物体都将处于电磁屏蔽的状态, 外部电磁探测器无法对该区域内的物体进行识别, 从而实现完美隐身。超构材料对本构参数的强大调控能力, 为这种变换光学隐身衣实验的实现提供了可能性。

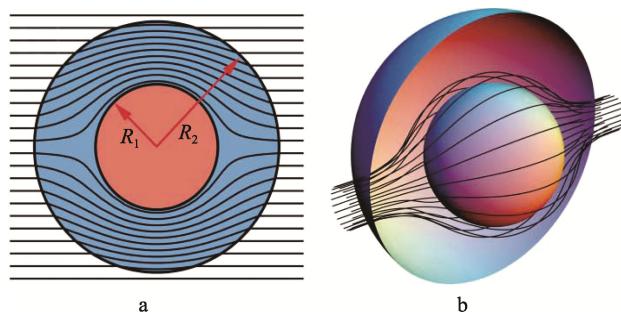


图 1 变换光学隐身衣的工作原理<sup>[26]</sup>

Fig.1 Principle of operation of transformation-based optics cloak<sup>[26]</sup>

2006 年底, 美国杜克大学的 Smith 教授课题组首次在微波波段设计出了基于变换光学的柱状隐身衣, 并对其进行实验验证<sup>[27]</sup>。该隐身衣的照片如图 2 所示, 它所使用的超材料是由开口环谐振器结构周期排布而成。通过调节开口环谐振器的几何结构与尺寸, 可以自由调控超材料的等效电磁参数, 从而实现这类超材料隐身衣。

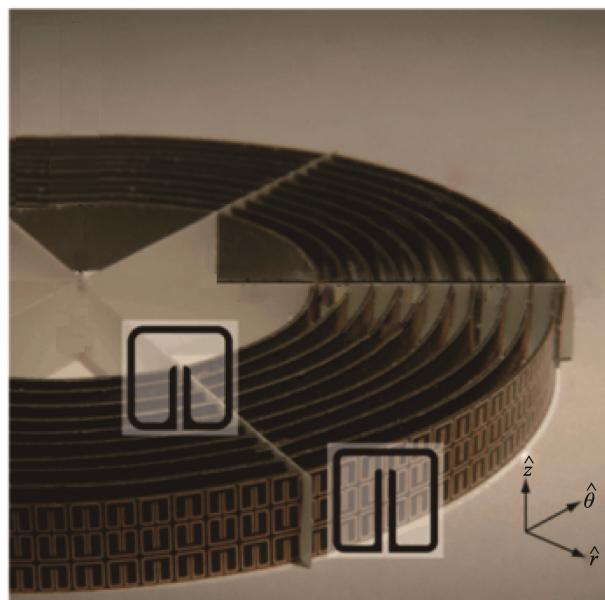


图 2 微波频段首次实验实现的变换光学隐身衣实物照片<sup>[27]</sup>

Fig.2 First experimental verification of transformation-based optics cloaking at microwave frequencies<sup>[27]</sup>

为了简化变换光学隐身衣的设计及其实现方式, Pendry 教授课题组于 2008 年提出了毯式隐身衣 (Carpet Cloak) 的概念<sup>[28]</sup>。他们对传统的变换光学加以改进, 引入准共形映射的方法, 通过选取合适的坐标变换, 使隐身衣所需的电磁本构参数的各向异性达到最小化。研究发现, 仅需使用纯介质材料以及合理的介电常数值就可以实现一些特定的变换媒质, 且这种变换在光频段内可以具有较宽的工作带宽。如图 3 所示, 将准共形映射法设计出的毯式隐身衣覆盖在反射面上形状不规则的凸起物上, 可以使这块被覆盖的凸起区域在电磁波的照射下呈现出完全平坦的效果, 以此对“地毯”下方的任何物体实现完美隐藏。2009 年, 美国杜克大学 Smith 课题组利用非谐振的工字型构成的超构材料, 首次在微波波段实验证证了这基于准共形映射方法的宽频带地毯式隐身衣的可行性<sup>[29]</sup>, 如图 4 所示。2010 年, 东南大学的崔铁军院士团队首次在微波波段实验实现了三维地毯式隐身衣<sup>[30]</sup>。此后, 从微波频段到光频段, 此类宽带毯式隐身方法的可行性均得到了实验证<sup>[31-33]</sup>。

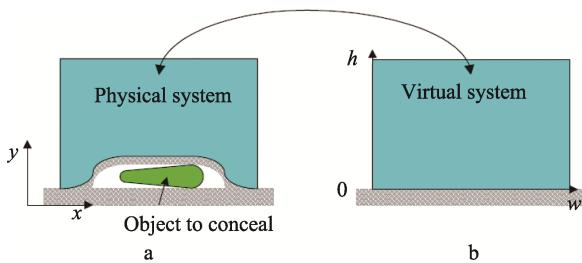


图 3 毯式隐身衣的工作原理<sup>[28]</sup>  
Fig.3 Principle of operation of carpet cloak<sup>[28]</sup>

随着变换光学隐身技术的不断进步, 科研人员已将该设计方法推广至声学<sup>[34]</sup>、热力学<sup>[35]</sup>、静电场<sup>[36-37]</sup>、流体力学<sup>[38-39]</sup>等领域, 并提出了一系列重要的应用。但即使是工作带宽得到了有效提升的毯式隐身衣, 也面临着一些应用瓶颈。例如, 由于毯式隐身技术是以牺牲空间光程为代价来实现对电磁波方向的调控, 因此, 设计出的隐身衣仍然不可避免地有着体积和质量

大等特点。

为了解决这些问题, 科研工作者们陆续提出了一些其他的超薄隐身衣的设计方法。例如, 基于散射相消原理的隐身技术的提出有效降低了超材料隐身衣的厚度; 基于微波网络理论的隐身衣可以在保持器件厚度超薄的情况下, 在较宽带宽内实现对目标散射的有效缩减; 基于相位调制超构表面的隐身技术为更加灵活地调控电磁散射提供了可能性, 进一步增加了电磁波探测器对目标进行识别的难度。

### 3 等离激元隐身衣及覆罩式隐身衣

如上文所述, 变换光学是一种能够实现完美隐身的理想方法。然而, 在实际设计的过程中, 只能使用近似的参数对这类隐身衣进行构建。例如, 根据变换光学理论, 完美隐身衣内径处的介电常数和磁导率应为无穷, 而实际上实验无法制备出符合该要求的材料。因此, 变换光学隐身衣的样件性能将受限于现实实验条件。

基于散射相消原理实现的隐身技术不会面临实验难以实现的难题。散射相消 (Scattering Cancellation) 的方法最初由美国宾夕法尼亚大学的 Engheta 教授课题组于 2005 年提出<sup>[40]</sup>。其中心思想是: 电磁波入射到任意目标物体时会发生散射, 如果能够在目标物体的散射场内引入另一个与之反相的散射场, 2 个散射场叠加后将会相互抵消, 整个系统的总散射从而得到抑制。如图 5 所示, Engheta 教授课题组用一个较小介电常数 (介电常数小于周围介质) 的等离子体球形外壳包裹一个较大介电常数 (介电常数大于周围介质) 的球状介质目标。在 TM 极化平面波入射的条件下, 通过调控等离子球形外壳的直径, 可以使等离子体球形外壳感应出与球状介质目标相反的偶极矩, 二者的散射相互抵消, 球状介质目标的总散射截面积因而可以接近于 0。由于这种隐身技术是利用隐身器件本身固有的非谐振特性来实现散射的抑制, 因此, 设计出的隐身衣性能通常鲁棒性较好, 工作带宽也比变

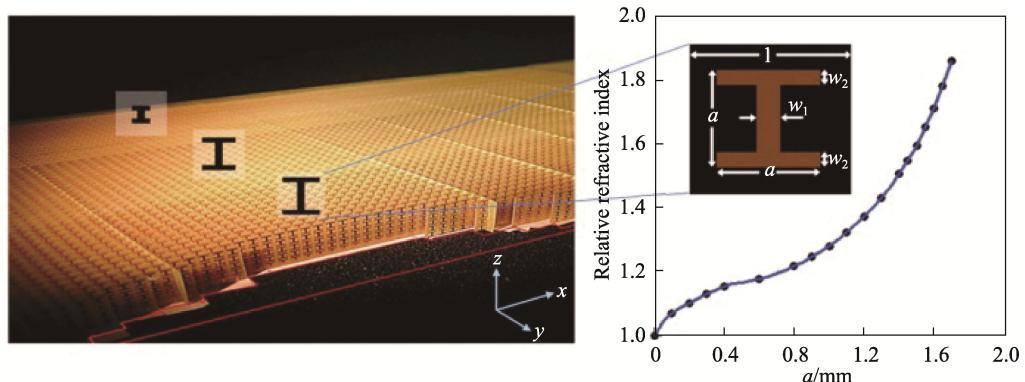


图 4 微波频段毯式隐身衣的实物照片<sup>[29]</sup>  
Fig.4 Experimental verification of carpet cloak at microwave frequencies<sup>[29]</sup>

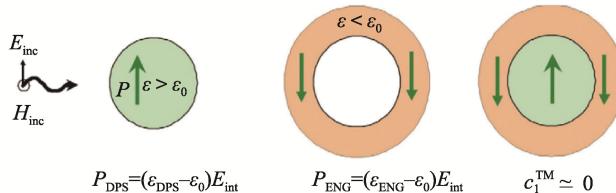


图 5 等离激元隐身衣的工作原理<sup>[40]</sup>  
Fig.5 Principle of operation of plasmonic cloak<sup>[40]</sup>

换光学隐身衣更宽。此外, 构建这类隐身衣采用的是均匀且各向同性的材料, 这与变换光学隐身衣对材料性能和加工工艺的严苛要求形成了鲜明对比。因此, 这类隐身衣的物理实现和实验验证难度大幅度降低。在实验上, 这类隐身衣可以通过设计等离激元超构材料或超薄共形超构表面进行实现。下面分别对这 2 类隐身衣进行介绍。

2009 年, Engheta 教授课题组首次在微波段用等离激元超构材料实验证了这种基于散射相消原理的隐身技术在微波波段的可行性<sup>[41]</sup>。他们在柱状目标的外部沿径向放置 12 个金属平板, 且保持相邻金属平板之间的距离相等。将这 12 个金属平板浸泡在相对介电常数  $\epsilon=21$  的丙酮中, 就可以在工作频点 1.93 GHz 处构造出一个等效介电常数  $\epsilon_r=-22$  的等离激元隐身衣 (Plasmonic Cloak), 如图 6 所示。实验结果表明, 加载了该隐身衣的柱状介质目标 (介电常数为  $\epsilon=6$ ) 的总散射截面积缩减了约 75%。此后, 科研人员们基于散射相消原理进一步开展了许多关于这类隐身技术的研究工作<sup>[42-45]</sup>。

与等离激元隐身衣相似, 覆罩式隐身衣 (Mantle Cloak) 也是通过抵消目标散射场的主要散射项来抑制总散射场。不同之处在于, 覆罩式隐身衣采用的不是能够感应出反相偶极矩的等离子体球体外壳, 而是一层超薄的阻抗表面, 如图 7 所示<sup>[46]</sup>。通过合理设计这层阻抗表面的平均表面阻抗, 该阻抗表面被激励起的表面感应电流能够产生与目标相反的散射场, 从而实现散射相消。这种隐身技术的优势在于: 质量小、厚度超薄、易于共形且方便加工制备等。此外, 由于入射电磁波能够穿透这类隐身衣, 因此, 位于其内部

的目标/传感器可以在不被探测器发现的情况下, 保持与外部信号的正常通信。这些特性使这类覆罩式隐身衣在抗干扰通信、传感和非侵入探测等许多领域中展现了良好的实际应用潜力和价值。此后, 科研工作者们在此基础上, 陆续提出了宽带和双频双层覆罩式隐身衣<sup>[47]</sup>、各向异性覆罩式隐身衣<sup>[48]</sup>、双频单层覆罩式隐身衣<sup>[49]</sup>、宽带椭圆柱体覆罩式隐身衣<sup>[50]</sup>、适用于大尺寸目标<sup>[51-52]</sup>的覆罩式隐身衣以及加载有非福斯特器件的宽带覆罩式隐身衣<sup>[53]</sup>等设计。近年来, 随着可重构、可调控技术的逐步成熟, 可调超薄覆罩式隐身衣的研究与设计吸引了大批科研人员的目光<sup>[54-58]</sup>。2014 年, 美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Alù 教授课题组提出了在传统覆罩式隐身衣上加载变容二极管的方案。数值仿真结果证明, 该设计可以实现对隐身衣的有效表面阻抗的实时调控, 从而实现对散射抑制频段的灵活调控<sup>[54]</sup>。同年, 东南大学崔铁军院士课题组进一步通过实验证明了加载有变容二极管的可调覆罩式隐身衣可以在更宽的可调工作带宽上抑制目标的散射<sup>[55]</sup>。2021 年, 南京大学冯一军教授课题组将空间可重构的概念引入隐身衣的设计中, 提出了一种崭新的表面阻抗调控方法, 仅需调控 PIN 二极管的“通”和“断”, 即可在连续且较宽的频带内实现对工作频段的灵活调控<sup>[58]</sup>。

#### 4 基于微波网络理论的隐身技术

为了降低低散射器的整体厚度, 空军工程大学屈绍波教授课题组进一步提出了一种基于微波网络理论的超薄电磁隐身衣的实现方案<sup>[59]</sup>, 如图 8a 所示。该隐身衣的谐振单元可以等效为一个三端口微波网络, 如图 8b 所示。在电磁波正入射的情况下, 单元可以通过端口 3 有效地将入射电磁波耦合至两侧微带线上的端口 1 和 2, 而端口 1 和 2 能够将接收到的电磁能量沿着微带线传输至相邻的单元中, 直至最终重新将电磁波耦合至前向空间。通过该方法, 屈绍波教授课题组设计并仿真验证了一款超薄柱状低散射器 (厚度仅为  $0.025\lambda$ )<sup>[59]</sup>。该方案虽然不能够实现完美的隐身效果, 但可以有效地降低目标的总散射。

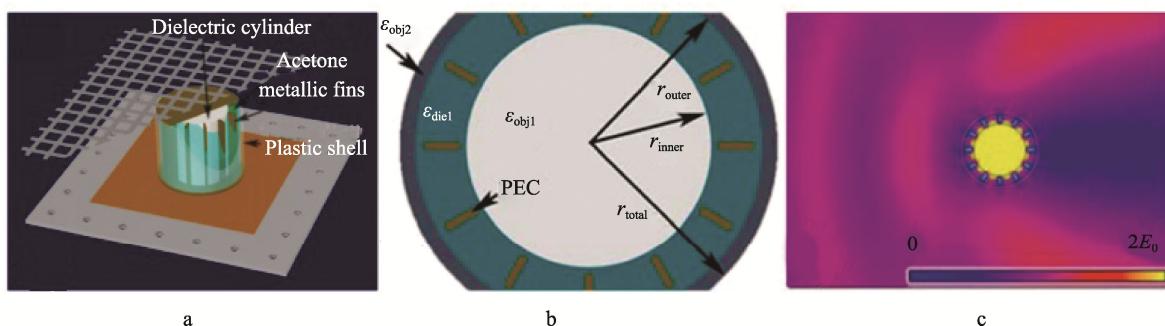


图 6 等离激元隐身衣在微波段的首次实验证<sup>[41]</sup>  
Fig.6 First experimental validation of plasmonic cloak at microwave frequencies<sup>[41]</sup>

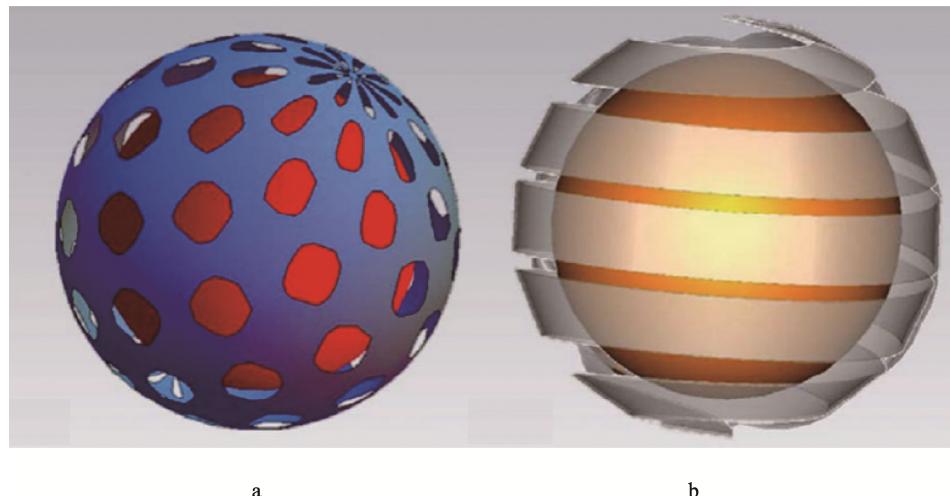


图 7 覆罩式隐身衣的实现形式举例<sup>[46]</sup>  
Fig.7 Examples of possible cloak designs that  
may realize mantle cloaking<sup>[46]</sup>

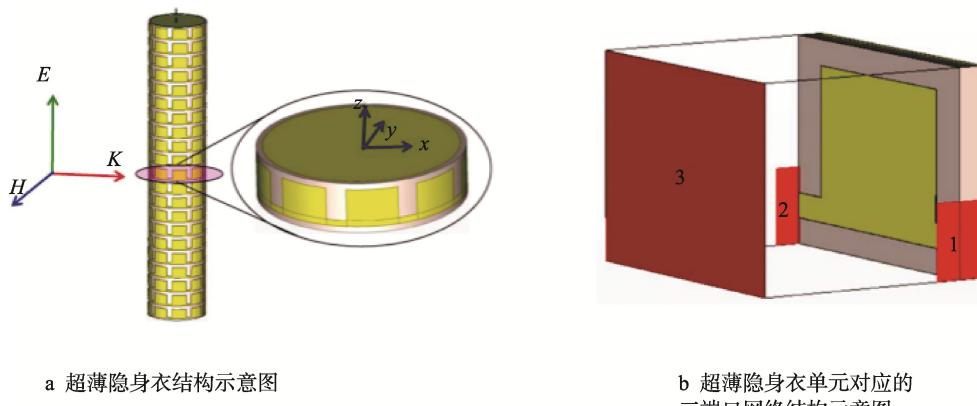


图 8 首个基于微波传输网络理论实现的超薄隐身衣<sup>[59]</sup>  
Fig.8 The first super-thin cloak based on theory of  
microwave transmission network<sup>[59]</sup>

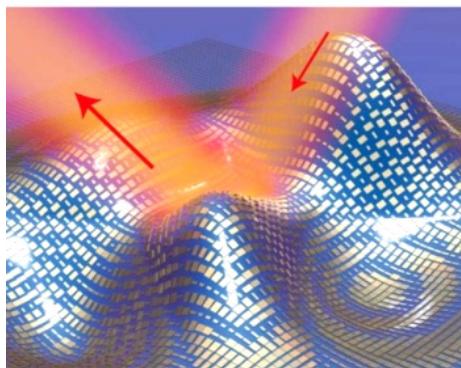
此后，一些科研工作者基于这种设计机理先后提出了超薄双频柱状低散射器<sup>[60-61]</sup>以及任意形状的超薄低散射器<sup>[62]</sup>等设计方案。这种基于微波等效传输网络的设计思路为实现超薄低散射器提供了一种崭新的方案。然而，在这类技术方案中，为了实现低散射器的超薄厚度，通常需要采用高介电常数的介质基板，这对加工制备任意形状的这类低散射器提出了新的挑战。到目前为止，这类低散射器的研究工作尚停留在理论设计和数值仿真验证阶段。实验制备与验证这类隐身衣仍然是一个非常棘手的问题。

## 5 基于相位调制超表面的隐身技术

超表面的出现为调控电磁波提供了一条新的途径。它具有深亚波长的厚度、灵活调控电磁波的能力、较低的损耗、易于共形、易于制备、易于集成等特点，促进了超表面隐身衣的发展<sup>[63-65]</sup>。通过合理设计超表

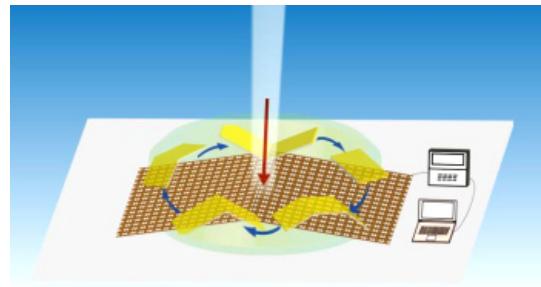
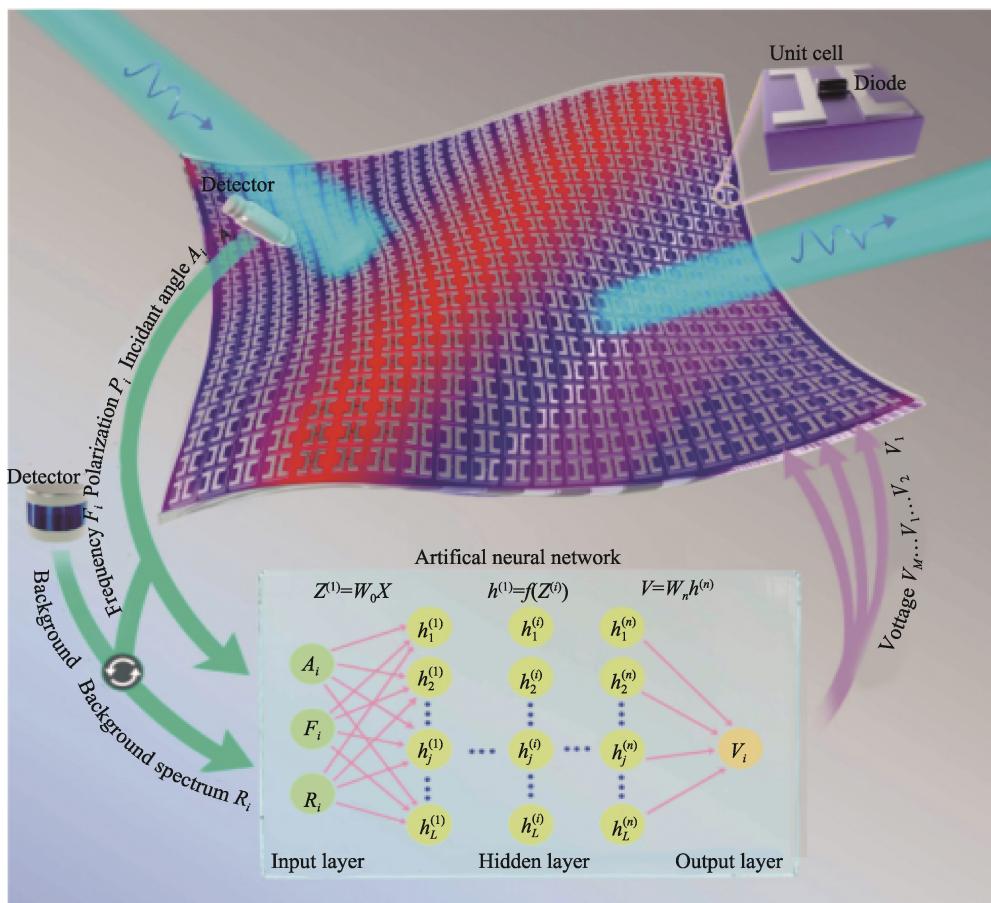
面的单元结构以及相位分布，可以实现对相位型超表面散射的有效调控，达到“隐身”的目的<sup>[66]</sup>。

2013 年，东南大学的崔铁军院士课题组首次提出了超构表面毯式隐身衣的想法，并在微波段对基于二维超表面的毯式隐身衣进行了仿真验证<sup>[67]</sup>。2015 年，美国加州大学伯克利分校的张翔教授课题组实验验证了一种基于相位调制超构表面的超薄毯式隐身衣<sup>[68]</sup>。该超构表面隐身衣由亚波长的金纳米天线构成，它可以在  $2\pi$  范围内调控反射光波的相位，如图 9 所示。通过精心设计纳米天线的结构和排布，覆盖在凸起目标上的超薄超表面（厚度仅为 80 nm，即  $0.11\lambda$ ）能够成功模拟出金属平板反射光波的相位分布，从而实现“地毯式隐身”。这种设计方法迅速吸引了大量科研工作者的研究兴趣，如：Yang 等<sup>[69]</sup>通过独立调控 2 层超构表面的相位分布，实现了双频双层超构表面地毯式隐身衣的设计；Jiang 等<sup>[70]</sup>利用 3D 打印技术设计了一款极化不敏感的可共形地毯式隐身衣。

图 9 超薄超表面毯式隐身衣结构<sup>[68]</sup>Fig.9 Schematic of ultra-thin metasurface carpet cloak<sup>[68]</sup>

随着隐身技术的迅猛发展,多变的入射波模式和外部环境对隐身装置的性能提出了更高的要求。人们希望隐身装置的工作不再局限于固定的来波模式或背景环境。有源超构表面的不断发展为实现这一期待提供了可能。2018 年,中国科学院光电技术研究所的罗先刚院士课题组首次实验证明了可实现动态幻觉调控的毯式超构表面隐身衣<sup>[71]</sup>,如图 10 所示。通过调节加载在超构表面单元的变容二极管的电压,

可以动态且连续地调控该超构表面的反射相位,从而使散射波前被重构为多个预期状态,生成不同物体的电磁图像,达到电磁欺骗的目的。2020 年,浙江大学陈红胜教授课题组设计出了一款能够迅速根据背景环境和来波模式进行自适应响应的新一代智能毯式超表面隐身衣<sup>[72]</sup>,如图 11 所示。该超表面与人工智能算法进行结合,在没有任何人为干预的情况下,能够根据动态变化的入射波和背景环境自适应地调整相位分布,实时重构出与背景一致的散射场。

图 10 幻觉可重构的毯式超表面隐身衣<sup>[71]</sup>Fig.10 Schematic of reconfigurable metasurface cloak for dynamicsl electromagnetic illusions<sup>[71]</sup>图 11 基于深度学习的微波段自适应超表面毯式隐身衣<sup>[72]</sup>Fig.11 Schematic of deep-learning-enabled self-adaptive microwave metasurface carpet cloak without human intervention<sup>[72]</sup>

除了毯式隐身衣之外,相位型超表面还可用于独立式隐身衣的设计。例如,南京大学冯一军教授课题组利用透明金属铜锡氧化物(ITO)和柔性介质基板实现了光学透明的柔性编码超构表面。实验结果表明,该柔性编码超构表面适用于抑制各种不规则外形目标的散射,且可在宽频带内有效缩减目标的背向散射<sup>[73]</sup>。

## 6 结语

本文概述了基于人工电磁超材料/超表面的隐身技术的研究进展。从基本概念、工作原理以及性能优势等方面对包括变换光学隐身技术、等离激元隐身技术、覆盖式隐身技术、基于微波网络理论的隐身技术以及相位调制型超构表面隐身技术在内的几种主流的超材料隐身技术进行了介绍。研究结果表明,超材料的提出与发展为提升隐身器件的性能提供了切实可行的新研究思路。理想的隐身器件应具有超薄、宽带、全极化、全向、易于制造、低损耗、低成本等特点,但显然任何超材料隐身技术都难以同时满足这些要求。因此,应根据需求合理地选择隐身技术。在器件集成化、环境复杂化以及需求多样化的趋势下,现有的隐身技术仍然存在着许多关键技术问题和应用难点。例如:针对微波低频段,实现超薄、宽带、可共形的隐身器件设计,对科研工作者而言仍然是一个不小的挑战。此外,新兴作战平台上的雷达等射频传感器将以智能蒙皮的形态出现,复杂多变的电磁隐身环境对智能化的电磁隐身材料产生了强烈的需求。因而发展智能可调控的隐身技术以应对复杂多变的来波模式、背景环境和应用需求已然成为隐身技术发展的重要趋势之一。

## 参考文献:

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.  
SANG Jian-hua. Low-observable Technologies of Aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [2] RUCKENSTEIN E, PARK J S. The Electromagnetic Interference Shielding of Polypyrrole Impregnated Conducting Polymer Composites[J]. Polymer Composites, 1991, 12(4): 289-292.
- [3] ENGHETA N, ZIOLKOWSKI R W. Metamaterials: physics and engineering explorations[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006
- [4] WAIT J R. Electromagnetic wave theory[M]. New York: Harper & Row, 1985.
- [5] VESELAGO V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Epsilon and M[J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [6] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostuctures[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [7] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [8] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [9] PENDRY J B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [10] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [11] YU Nan-fang, 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.
- [12] AIETA F, GENEVET P, YU Nan-fang, et al. Out-of-Plane Reflection and Refraction of Light by Anisotropic Optical Antenna Metasurfaces with Phase Discontinuities[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1702-1706.
- [13] CHEN Ke, FENG Yi-jun, MONTICONE F, et al. A Reconfigurable Active Huygens' Metalens[J]. Advanced Materials, 2017, 29(17): 1606422.
- [14] LIU Shuo, TIE Jun cui, NOOR A, et al. Negative Reflection and Negative Surface Wave Conversion from Obliquely Incident Electromagnetic Waves[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(5): 18008.
- [15] LUO Xian-gang. Subwavelength Optical Engineering with MetasurfaceWaves[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(7): 1701201.
- [16] QIU Cheng-wei, ZHANG Shuang, CAPASSO F, et al. Special Issue on "Ultra-Capacity Metasurfaces with Low Dimension and High Efficiency"[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1640-1642.
- [17] SIMA Bo-yu, CHEN Ke, LUO Xin-yao, et al. Combining Frequency-Selective Scattering and Specular Reflection through Phase-Dispersion Tailoring of a Metasurface[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(6): 064043.
- [18] XU He-xiu, CAI Tong, ZHUANG Ya-qiang, et al. Dual-Mode Transmissive Metasurface and Its Applications in Multibeam Transmitarray[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1797-1806.
- [19] ZHANG Xiao-hu, PU Ming-bo, GUO Ying-hui, et al. Colorful Metahologram with Independently Controlled Images in Transmission and Reflection Spaces[J]. Ad-

- vanced Functional Materials, 2019, 29(22): 1809145.
- [20] CUI tie jun, LIU Shuo, BAI guo dong, et al. Direct Transmission of Digital Message via Programmable Coding Metasurface[J]. Research, 2019, 2019: 1-12.
- [21] DING Guo-wen, CHEN Ke, QIAN Guang-xu, et al. Independent Energy Allocation of Dual-Helical Multi-Beams with Spin-Selective Transmissive Metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(16): 2000342.
- [22] GUO Wen-long, CHEN Ke, WANG Guang-ming, et al. Airy Beam Generation: Approaching Ideal Efficiency and Ultra Wideband with Reflective and Transmissive Metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(21): 2000860.
- [23] CHEN ming zheng, CHENG Qiang, XIA Fen, et al. Metasurface-Based Spatial Phasers for Analogue Signal Processing[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(18): 2000128.
- [24] BALANIS C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2016.
- [25] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. Radar Cross Section[M]. Raleigh, NC: SciTech Pub, 2004.
- [26] PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling Electromagnetic Fields[J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [27] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [28] LI J, PENDRY J B. Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 203901.
- [29] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband Ground-Plane Cloak[J]. Science, 2009, 323(5912): 366-369.
- [30] MA Hui-feng, CUI Tie-jun. Three-Dimensional Broadband Ground-Plane Cloak Made of Metamaterials[J]. Nature Communications, 2010, 1(1): 1-6.
- [31] VALENTINE J, LI J, ZENTGRAF T, et al. An Optical Cloak Made of Dielectrics[J]. Nature Materials, 2009, 8(7): 568-571.
- [32] ERGIN T, STENGER N, BRENNER P, et al. Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths[J]. Science, 2010, 328(5976): 337-339.
- [33] CHEN Xian-zhong, LUO Yu, ZHANG Jing-jing, et al. Macroscopic Invisibility Cloaking of Visible Light[J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 1-6.
- [34] CHEN Yi, ZHENG Ming-ye, LIU Xiao-ning, et al. Broadband Solid Cloak for Underwater Acoustics[J]. Physical Review B, 2017, 95(18): 180104.
- [35] XU Hong-yi, SHI Xi-hang, GAO Fei, et al. Ultrathin Three-Dimensional Thermal Cloak[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(5): 054301.
- [36] JIANG Wei-xiang, LUO Chen-yang, GE Shuo, et al. An Optically Controllable Transformation-Dc Illusion Device[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2015, 27(31): 4628-4633.
- [37] CHEN Tian-hang, ZHENG Bin, YANG Yi-hao, et al. Direct Current Remote Cloak for Arbitrary Objects[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-6.
- [38] PARK J, YOUN J R, SONG Y S. Hydrodynamic Metamaterial Cloak for Drag-Free Flow[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(7): 074502.
- [39] ZOU Si-yuan, XU Ya-dong, ZATIANINA R, et al. Broadband Waveguide Cloak for Water Waves[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(7): 074501.
- [40] ALÙ A, ENGHETA N. Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coatings[J]. Physical Review E, 2005, 72: 016623.
- [41] EDWARDS B, ALÙ A, SILVEIRINHA M G, et al. Experimental Verification of Plasmonic Cloaking at Microwave Frequencies with Metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(15): 153901.
- [42] CHEN P Y, SORIC J, ALÙ A. Invisibility and Cloaking Based on Scattering Cancellation[J]. Advanced Materials, 2012, 24(44): 281-304.
- [43] ALÙ A, ENGHETA N. Multifrequency Optical Invisibility Cloak with Layered Plasmonic Shells[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(11): 113901.
- [44] ALÙ A, ENGHETA N. Theory and Potentials of Multi-Layered Plasmonic Covers for Multi-Frequency Cloaking[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(11): 115036.
- [45] RAINWATER D, KERKHOFF A, MELIN K, et al. Experimental Verification of Three-Dimensional Plasmonic Cloaking in Free-Space[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(1): 013054.
- [46] ALÙ A. Mantle Cloak: Invisibility Induced by a Surface[J]. Physical Review B, 2009, 80(24): 245115.
- [47] SORIC J C, MONTI A, TOSCANO A, et al. Multiband and Wideband Bilayer Mantle Cloaks[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(7): 3235-3240.
- [48] MONTI A, SORIC J C, ALÙ A, et al. Anisotropic Mantle Cloaks for TM and TE Scattering Reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1775-1788.
- [49] TAY C Y, CHEN Zhi-ning, HEE D. Single-Layer Dual-Band Microwave Metasurface Cloak of Conducting Cylinder[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4286-4290.
- [50] MORENO G, YAKOVLEV A B, BERNETY H M, et al. Wideband Elliptical Metasurface Cloaks in Printed Antenna Technology[J]. IEEE Transactions on Antennas

- and Propagation, 2018, 66(7): 3512-3525.
- [51] LIU Shuo, ZHANG Hao chi, XU He-xiu, et al. Nonideal Ultrathin Mantle Cloak for Electrically Large Conducting Cylinders[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2014, 31(9): 2075-2082.
- [52] LUO Xin-yao, GUO Wen-long, DING Guo-wen, et al. Composite Strategy for Backward-Scattering Reduction of a Wavelength-Scale Cylindrical Object by an Ultra-thin Metasurface[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(6): 064027.
- [53] CHEN P Y, ARGYROPOULOS C, ALÙ A. Broadening the Cloaking Bandwidth with Non-Foster Metasurfaces[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(23): 233001.
- [54] SCHOFIELD R S, SORIC J C, RAINWATER D, et al. Scattering Suppression and Wideband Tunability of a Flexible Mantle Cloak for Finite-Length Conducting Rods[J]. New Journal of Physics, 2014, 16(6): 063063.
- [55] LIU Shuo, XU He-xiu, ZHANG Hao chi, et al. Tunable Ultrathin Mantle Cloak via Varactor-Diode-Loaded Metasurface[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13403-13417.
- [56] HAMZAVI-ZARGHANI Z, YAHAGHI A, MATEKOVITS L, et al. Tunable Mantle Cloaking Utilizing Graphene Metasurface for Terahertz Sensing Applications[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 34824-34837.
- [57] HAMZAVI-ZARGHANI Z, YAHAGHI A, MATEKOVITS L. Electrically Tunable Mantle Cloaking Utilizing Graphene Metasurface for Oblique Incidence[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2020, 116: 153080.
- [58] LUO Xin-yao, GUO Wen-long, CHEN Ke, et al. Active Cylindrical Metasurface with Spatial Reconfigurability for Tunable Backward Scattering Reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3332-3340.
- [59] WANG Jia-fu, QU Shao-bo, XU Zhuo, et al. Super-Thin Cloaks Based on Microwave Networks[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(2): 748-754.
- [60] WANG Jia-fu, QU Shao-bo, XU Zhuo, et al. Multifrequency Super-Thin Cloaks[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2014, 12(2): 130-137.
- [61] RAJPUT A, SRIVASTAVA K V. Dual-Band Cloak Using Microstrip Patch with Embedded U-Shaped Slot[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2848-2851.
- [62] WANG Jia-fu, QU Shao-bo, ZHANG Jie-qiu, et al. Design of Super-Thin Cloaks with Arbitrary Shapes Using Interconnected Patches[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(1): 384-389.
- [63] DELLA GIOVAMPAOLA C, ENGHETA N. Digital Metamaterials[J]. Nature Materials, 2014, 13(12): 1115-1121.
- [64] CUI Tie-jun, QI Mei-qing, WAN Xiang, et al. Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): 218.
- [65] ZHANG Cheng, CAO wen kang, YANG Jin, et al. Multiphysical Digital Coding Metamaterials for Independent Control of Broadband Electromagnetic and Acoustic Waves with a Large Variety of Functions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(18): 17050-17055.
- [66] ZHUANG Ya-qiang, WANG Guang-ming, LIANG Jian-gang, et al. Flexible and Polarization-Controllable Diffusion Metasurface with Optical Transparency[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(46): 465102.
- [67] ZHANG Jing, MEI Zhong-lei, ZHANG Wan-ru, et al. An Ultrathin Directional Carpet Cloak Based on Generalized Snell's Law[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(15): 151115.
- [68] NI Xing-jie, WONG Z J, MREJEN M, et al. An Ultrathin Invisibility Skin Cloak for Visible Light[J]. Science, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [69] YANG Jia-ning, HUANG Cheng, WU Xiao-yu, et al. Dual-Wavelength Carpet Cloak Using Ultrathin Metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(14): 1800073.
- [70] JIANG Zi-jie, LIANG Qing-xuan, LI Zhao-hui, et al. Experimental Demonstration of a 3D-Printed Arched Metasurface Carpet Cloak[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(15): 1900475.
- [71] HUANG Cheng, YANG Jia-ning, WU Xiao-yu, et al. Reconfigurable Metasurface Cloak for Dynamical Electromagnetic Illusions[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1718-1725.
- [72] QIAN Chao, ZHENG Bin, SHEN Yi-chen, et al. Deep-Learning-Enabled Self-Adaptive Microwave Cloak without Human Intervention[J]. Nature Photonics, 2020, 14(6): 383-390.
- [73] CHEN Ke, CUI Li, FENG Yi-jun, et al. Coding Metasurface for Broadband Microwave Scattering Reduction with Optical Transparency[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5571-5579.