

特邀文章

超材料宽带低散射技术研究进展\*

冯一军 郑依琳 丁国文 罗歆瑶 陈 克  
(南京大学 电子科学与工程学院,南京 210023)

**摘 要:** 电磁吸波材料和外形设计等低散射技术被广泛应用于隐身、电磁屏蔽及无线通信等领域。相比于传统技术途径,超材料低散射技术具有更加灵活的设计和调控能力,因而在带宽拓展、厚度减低等设计要求上具有更好的发展前景。文章介绍了实现宽频带散射缩减的常用方案,并着重介绍了基于多谐振叠加、损耗调节以及漫反射原理的带宽拓展方法,并简要展望了低散射技术的发展趋势。

**关键词:** 超材料,吸波,低散射,多谐振,漫反射

Recent Progress on Metamaterials for Broadband Reduction  
of Backward Scatterings

FENG Yi-jun, ZHENG Yi-lin, DING Guo-wen, LUO Xin-yao, CHEN Ke  
(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Low-scattering techniques, e. g., microwave absorber, have been widely used in many applications, such as invisibility, electromagnetic shielding and wireless communications. Compared with conventional ways to realize low scatterings, metamaterials can provide more degrees of freedom in controlling the electromagnetic waves. Therefore, they have advantages and promising prospects in achieving broadband absorbers with thin thickness. Here, we introduce several ways to achieve broadband reduction of backward scatterings including metamaterials with multi-resonances, metamaterials loaded with lossy components and diffusive scatterings, and we also give a brief perspective view of the development of the metamaterial low-scattering techniques.

**Key words:** metamaterial, absorber, low scattering, multi-resonances, diffusive scattering

引 言

低散射技术旨在降低目标物体的雷达散射截面,进而降低其被探测的风险,因而在地面设施的隐身、飞机舰船的隐身等国防应用中具有重要的作用。目前,有效的低散射技术途径主要有利用外形设计缩减雷达散射截面,利用电磁吸波材料以及利用相位对消超表面等几种方法。外形结构设计虽然能有效降低目标物体的散射,但是会改变物体原有的几何形状,从而有可能引入空气动力学等设计上的其他问题,并且这种方式对入射电磁波的方向及角度有较大的限制。利用电磁吸波材料降低雷达散射截面则能够有效地避免对目标物体几何外形的改变,且其角度性能较好,因而逐渐成为该应用领域的研

究重点。此外,随着科学技术的飞速发展,电磁波对人体和设备的有害影响也越来越受到人们的重视,如电磁辐射会影响精密的电子医疗仪器,电磁泄漏可能会增加数据信息被窃取的风险等。另外,吸波材料在电磁成像、物质检测等多个应用方面也均有较大作用。传统吸波材料通常整体厚度较大、体积笨重,吸波频带等性能也难以灵活调控,难以完全适用于小型化、集成化系统。因而,如何实现“厚度薄、质量轻、频带宽、吸波强”的吸波材料已经成为该领域的研究热点。

超材料是一类具有亚波长尺寸的谐振结构所构成的人工复合材料。通过对超材料组成单元的尺寸、结构、排布方式的设计,可以灵活调控超材料的等效电磁参数,从而实现传统自然界中材料所不具

\* 收稿日期:2020-01-06

备的电磁参数,如负折射率,零折射等,进而广泛应用于隐身衣、天线设计、透镜等多个领域<sup>[1-2]</sup>。超材料宽频带吸波材料的设计方法多种多样,例如,通过设计双频、多频谐振结构使吸波材料工作在多个频段,从而有效增加工作带宽<sup>[3-4]</sup>;通过加载电阻或电阻膜的方式<sup>[5-8]</sup>,可以降低吸波结构的谐振强度,进而在宽频带内实现较好的吸收电磁波效果;通过加载磁损耗材料的方式,可进一步提升超材料吸波器的工作带宽<sup>[9]</sup>。另外,特定的结构设计也能有效增加吸收带宽与吸收强度<sup>[10-11]</sup>,如使用金属和介质交替排布的金字塔结构能激励起多种谐振模式<sup>[12-13]</sup>,并且通过调整优化金字塔结构的层数与几何参数可使这些谐振模式连续分布在频谱上,形成较宽的连续电磁波吸收频带。

超表面是超材料的二维形式,是由结构尺寸远小于工作波长的单元在二维平面内排列构成<sup>[14]</sup>,它大大缩小了超材料的厚度尺寸,而其具备的奇异电磁特性促使电磁波器件的发展更加趋于小型化、平面化、共形化、多样化,且在波束调控、平面透镜、全息成像等方面具有重要的应用价值<sup>[15-17]</sup>。在这些超表面的应用中,有一类超表面利用相位相消或者漫反射的方式降低目标物体的雷达散射截面<sup>[18-20]</sup>,因而在隐身技术、电磁屏蔽技术等方面具有良好的潜在应用价值。基于相位相消原理的超表面利用两种相位单元以棋盘格排布的方式来实现背向方向的远场相位相消,从而降低目标的散射<sup>[21-23]</sup>。利用漫反射原理的超表面将不同的相位单元随机分布在电磁超表面,从而使反射电磁波的相位在平面内随机分布,达到模拟粗糙表面的目标,最终降低背向雷达散射截面。与超材料吸波结构不同,这类低散射超表面中不涉及能量损耗,它仅通过单元辐射的远场干涉来实现雷达散射截面缩减的效果。

目前,国内外已有很多关于低散射超材料及超表面的研究工作,该方向也成为超材料研究领域内的热点之一。本文将概述性地介绍南京大学微波技术实验室近几年来在低散射超材料及超表面上的研究工作,并结合研究现状对宽带吸波超材料的发展做进一步展望。

## 1 原理简介

宽频带吸波材料的设计方法多种多样,图1为我们实现宽带低散射超材料的三种常用方案。

第一种是通过叠加不同频率的多个谐振模式来实现宽带电磁吸波。对于单谐振模式而言,尽管超

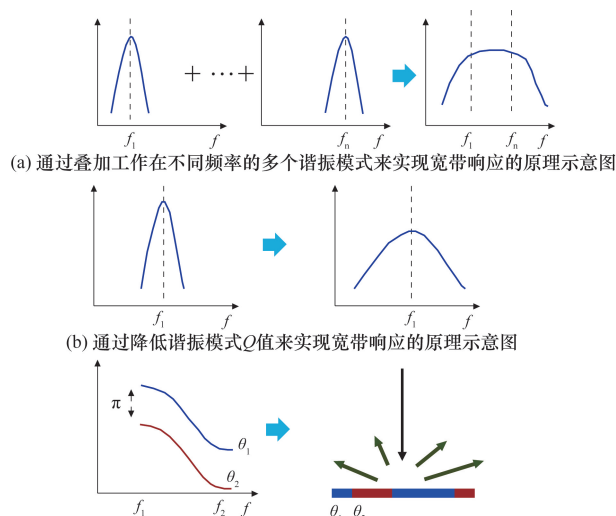


图1 实现宽带低散射超材料的三种常用方法

材料结构会有非常理想的吸波效果,但是它的谐振宽度通常比较窄,无法满足实际低散射超材料应用中带宽需求。如图1(a)所示,当我们将多个工作在不同频率的谐振模式进行叠加,可以实现谐振带宽的有效拓展,但同时超材料吸波结构的吸收强度会有所降低。第二种方法是通过降低谐振模式的 $Q$ 值来实现频带展宽。对于谐振型结构,在设定的谐振频率处的 $Q$ 值与谐振结构的等效电阻( $R$ )、电感( $L$ )和电容( $C$ )满足:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

如图1(b)所示,谐振带宽与谐振系统的 $Q$ 值成反比的关系,通过加载电阻或其他损耗调节的方法,即通过增加谐振结构对应的等效电阻值,可使单元谐振时的 $Q$ 值降低,从而在宽频带内实现较好的吸收电磁波效果。如图1(c)所示,第三种方法是将漫散射的概念应用到低散射超表面设计中,实现物体的背向散射缩减。随机反射表面是将具有不同反射相位的单元随机分布在二维平面上来模拟漫反射效果,从而使入射电磁波被随机的散射至不同方向,最终降低雷达散射截面。目前,随机表面常用的设计方法有两种:一种是利用传播相位型单元,通过设计不同尺寸的单元结构或者不同结构的单元实现多种反射相位;另一种是利用几何相位型单元,只需通过一种单元结构的旋转即可实现不同相位变化。虽然随机反射超表面实现的效果与吸波超表面的效果类似,但是其工作机理中基本不涉及能量的吸收,只是将入射的能量重新进行随机分布,并以此达到降低背向能量的效果。另外,上述的几种方法不仅可以

独立使用,也可将这些方法进行复合使用,从而得到更好的散射缩减效果。

## 2 多谐振叠加实现宽带散射缩减

Salisbury 屏吸波结构以其方便的设计、简单的构造、良好的性能受到研究人员的青睐<sup>[24]</sup>。传统的 Salisbury 屏由电阻膜(方阻为  $377\ \Omega$ )、介质(或空气)、金属三层结构组成,且电阻膜距离金属层  $1/4$  波长,是一种干涉型的电磁波吸波结构,其吸波特性和表现为一系列离散分布的吸收峰,且吸收峰之间反射较大,所以不具备连续宽带吸波能力,该缺点限制了它在诸多场合的应用。随后诸多研究工作相继展开,以进一步提升 Salisbury 屏的工作带宽,如利用有耗磁介质或电介质加载的 Dallenbach 屏可明显提升吸波带宽,但重量和厚度有较大增加<sup>[25]</sup>。因此,我们结合超表面中的相位设计,利用混合多模谐振的方式实现了宽频带低散射 Salisbury 屏,并由此

提出了超表面 Salisbury 屏的概念。

传统 Salisbury 屏以金属作为底板,而金属在微波频段具有恒定的  $180^\circ$  反射相位,这一缺点限制了传统 Salisbury 屏只能工作在特定的离散的频率点,且在各吸波频段之间,表现出高反射特性,难以作为宽带的吸波结构适应复杂的电磁环境,如图 2(a)上排两幅图所示。相比较而言,我们用反射型超表面代替传统 Salisbury 屏的金属底板(图 2(a)下排图),可以灵活设计超表面底板的表面阻抗特性,从而获得所需要的反射相位及相应的谐振频点。该原理中,利用不同反射特性的超表面单元形成超构 Salisbury 屏单元,并使这些单元的谐振模式不同,即频谱特性表现为各单元的吸收带依次在频率轴上连续且错开排布。该结构在入射电磁波照射下,在原有吸收峰附近的若干频点上均能满足相位干涉条件,形成多个吸收峰叠加,从而展宽吸波频带。

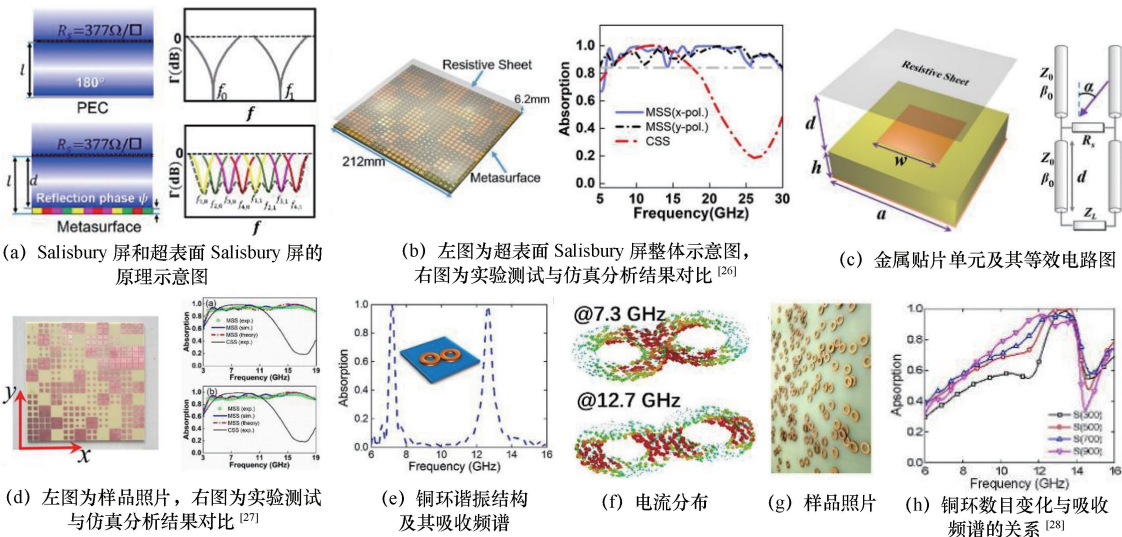


图 2 多谐振叠加实现宽带散射缩减的设计实例

图 2(b)左图为我们设计的超表面 Salisbury 结构示意图,该吸波器底板共有四种不同的超表面单元按特定的空间序列排布而成<sup>[26]</sup>。该超表面的组成单元具有不同的反射相位特性,因而其对应的超表面 Salisbury 屏单元具有不同的谐振特性。当这些单元组合使用时,可以在超表面 Salisbury 屏中激励起多种谐振模式,从而实现带宽的拓展。我们利用以上四种单元的解析表达式建立散射缩减的目标函数,并引入遗传算法和模拟退火算法加速优化了超表面单元的设计过程及其空间分布特性。最终,在同等结构厚度条件下,将传统 Salisbury 屏的吸波带宽由  $7.5 \sim 16\ \text{GHz}$  展宽到  $5 \sim 30\ \text{GHz}$  (如图 2(b)

右图),并且在  $0^\circ \sim 55^\circ$  入射角范围内,均能保持  $6\ \text{dB}$  以上的雷达散射截面缩减效果<sup>[26]</sup>。

由于上述的超表面 Salisbury 单元复杂,模型的设计很大程度上依赖于全波仿真和设计经验,设计周期长,难度较大。因此,我们进一步设计了全解析形式的超表面 Salisbury 屏<sup>[27]</sup>。通过解析的方式,以数值计算为基础,使其研究设计过程不依赖于全波电磁仿真分析,从而更快速、有效地设计超宽带电磁吸波器件。以正方形金属贴片模型作为基本单元,并将该谐振单元的表面阻抗特性与单元的物理尺寸相联系,推导出超表面单元以及超表面 Salisbury 屏反射特性的解析公式。在此基础上,我们可以定制

化地设计工作在某一特定频段内的单元模型,并且通过阵列优化的方法,将单元的反射特性与超表面 Salisbury 屏的远场散射特性相联系,采用遗传算法进行迭代优化,计算出超表面所需要的每种单元的物理尺寸、比例以及空间排布方式。实际制作的样品如图 2(d)所示。实验测试的结果表明(图 2(d)右图),在 3.7 ~ 18.3 GHz 频段内,该超表面 Salisbury 屏可以实现 9.5 dBm 以上的散射缩减效果<sup>[27]</sup>。

混合多模谐振降低雷达散射截面的方式还可以运用于其他形式的超表面设计中。以普通的铜环结构为例,当单个铜环设置在介质基板中心位置时,入射电磁场可激励起单一的谐振模式,并相应地在 12.7 GHz 处形成单一的完美吸收峰<sup>[28]</sup>。在同一介质板上设置两个相同的铜环并使它们相互接触,如图 2(e)所示。此时,入射电磁场可以激励起两个谐振模式,其电流分布如图 2(f)所示。两个频点处的电流分布显示高频点的电流分布与单个铜环谐振模式相近,故吸波频点与单个铜环也较为接近。另一个新增模式工作在低频 7.3 GHz 处,该模式的工作频率由两个相邻铜环形成的整体尺寸决定。当两个铜环结构交叠放置时,可以激励起三种谐振模式<sup>[28]</sup>。随着铜片数目以及铜环分布形态的随机性及多样性的增加,其整体结构的谐振模式也会逐渐增加,吸波带宽也会相应的逐步提升,如图 2(g)与 2(h)所示。

3 加载损耗实现带宽拓展

超材料吸波结构一般在某一频率或某些频率谐振,即当电磁波入射时,在设计的频率处会产生电磁谐振,吸收入射电磁波,进而实现低散射。其中,宽带吸波器可以实现覆盖多频段的低散射,具有更广

阔的应用前景。为了实现宽带吸波,可在吸波器的结构中引入损耗成分,如损耗型介质材料、电阻等集总元件等,用以降低整体结构的  $Q$  值,实现工作带宽的拓展。

图 3(a)左图为基于氧化铟锡(ITO)的光学透明型宽带吸波器<sup>[29]</sup>。ITO 是一种损耗型导电材料,薄膜状态时呈透明、略显茶色,可根据需求设计其方阻。超材料吸波器的基本单元如图 3(a)右下所示,方阻为  $40\ \Omega/\text{m}^2$  的圆环形 ITO 膜附着在聚氯乙烯薄膜上。我们利用传输线模型分析该吸波器的工作原理,即将四层介质等效为不同特性阻抗的四段传输线,将圆环形 ITO 薄膜等效为 R、L、C 串联电路。如图 3(b)所示,吸波器等效电路模型的输入阻抗应与自由空间阻抗相匹配,理论分析的结果与仿真结果基本吻合。经实验测试,该吸波器可以实现 6.21 ~ 19.31 GHz 的宽带吸波,吸收率达到 90% 以上,相对厚度为  $0.075\lambda$ 。同时,该吸波器的斜入射性能良好,可以用于实现共形吸波器。图 3(c)为加载集总电阻的宽带吸波器<sup>[30]</sup>。当电磁波入射时,吸波器表面的金属谐振环上会产生感应电流。感应电流随之通过集总电阻并耗散在其中,从而形成电磁波吸收。四个金属柱通孔用以增强磁谐振,提升单元的斜入射性能。实验测试结果与仿真结果吻合,实现了 9.3 ~ 17 GHz 的吸波带宽,能量吸收率达到 90% 以上,如图 3(d)所示<sup>[31]</sup>。通过激励起电谐振和磁谐振模式,且使这两个模式工作在不同频率,超材料吸波结构可实现宽带吸波功能。如图 3(e)所示,吸波器由加载电阻的十字形金属谐振单元、介质板以及金属背板构成<sup>[32]</sup>。当电磁波正入射时,在频率为 10.2 GHz 时,相邻金属柱上产生反向感应电流,表现为磁谐振模式;在频率为 14.8 GHz 时,上层金属

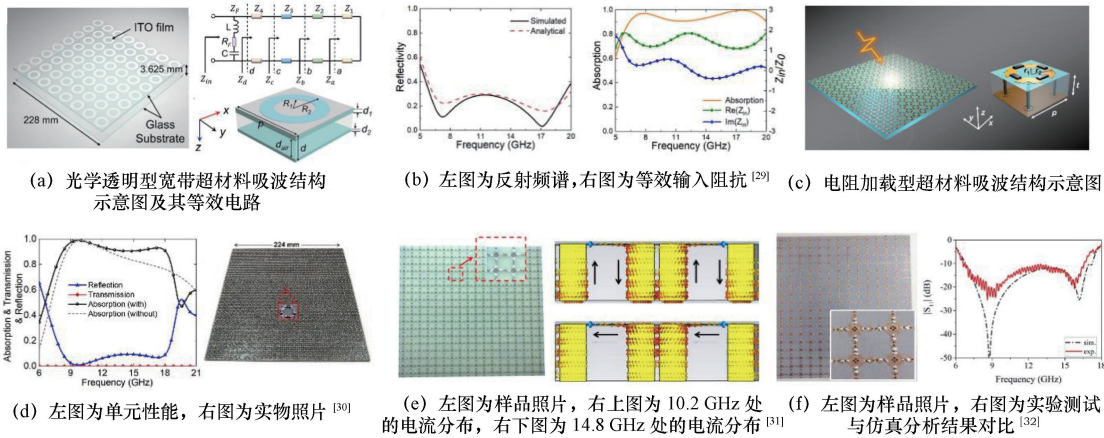


图 3 加载损耗调节实现带宽展宽的设计实例

结构中的感应电流较大,且与底板电流同向,表现为电谐振模式。优化结构参数后,该吸波结构可实现 8.45 ~ 15.57 GHz 宽带吸波,且能量吸收率均高于 90%。在此基础上,我们进一步优化设计了电阻加载型超材料吸波结构,如图 3(f) 所示,顶层为箭头形金属图案,并嵌入了集总电阻;底层为十字形金属图案,与顶层图案通过通孔相连<sup>[32]</sup>。当电磁波入射时,顶层金属箭头形图案与其相对的底层十字形金属臂之间会产生感应电流,低频时为环形电流,形成磁谐振模式,高频时为平行电流,形成电谐振模式。实验测试证明该吸波器在 6.52 ~ 15.51 GHz 具有良好的宽带吸波能力,且吸收率高于 90%。

### 4 漫反射表面实现宽带散射缩减

将光学漫散射的概念和分析方法应用到电磁随机反射超表面设计中可以有效地降低物体的背向散射。根据斯涅耳定律,当入射波照射到粗糙的分界面时,将会发生漫反射现象,反射波将沿各个方向无规律出射。漫反射超表面通过引入随机分布的反射相位,模拟粗糙的分界面,扰乱反射电磁波的波阵面,从而使电磁波向各个方向发生随机散射,最终实现背向散射缩减的功能。

如图 4(a) 所示,设计采用类“井”字型结构作为超单元,并将不同尺寸的超单元进行随机排布,构成了一种可共形的随机反射超表面<sup>[33]</sup>。在平面波的照射下,不同尺寸的超单元将产生不同的反射相位,使得该随机反射超表面能够在宽带内具有低背向散射的特性。加工与测试结果表明,该超表面的

厚度仅为 1/8 工作波长,且无论是覆盖到平板上还是包裹在圆柱外,都能在整个 X 波段实现良好的背向散射缩减。如将共形超表面包裹在半径为 4 cm 的圆柱外,仿真与测试雷达散射截面缩减结果如图 4(b) 所示。图 4(c) 为基于柔性透明介质 ITO 材料的光学透明型超薄编码超表面<sup>[34]</sup>。将预先设计好的超单元按照计算机产生的伪随机编码序列在二维平面内排布,产生随机分布的反射相位,使得远场产生随机相消干涉,最终实现类似漫散射的散射现象。仿真和实验证明,该编码超表面的宽带性能良好,在 8 ~ 15 GHz 范围内均能实现 10 dB 以上的背向散射抑制,如图 4(d) 所示。

在编码超表面中,多个反射相位通常使用不同的结构单元来表征,进而通过对编码单元的序列化设计,实现电磁调控功能。具体来说,1 比特编码采用“0”、“1”两种码元,分别代表 0° 和 180° 反射相位;2 比特编码,包括“00”、“01”、“10”、“11”四种编码单元,分别对应 0°、90°、180°、270° 反射相位。以此类推, $N$  比特编码超表面则需要设计  $2^N$  个单元,即所需单元结构数目是随比特数的变化呈指数关系增长的,这无疑在很大程度上增加了设计的复杂度。因此,我们也将几何相位的概念引入到电磁超表面的编码设计。在几何相位表面中,只需设计一种单元结构,并通过几何旋转就能实现多比特编码超表面<sup>[35]</sup>。基于几何相位概念的编码超表面进一步简化了数字编码表面的设计和优化过程,为编码超表面的设计提供了更多的自由度,进一步丰富了电磁波调控的内容和手段。

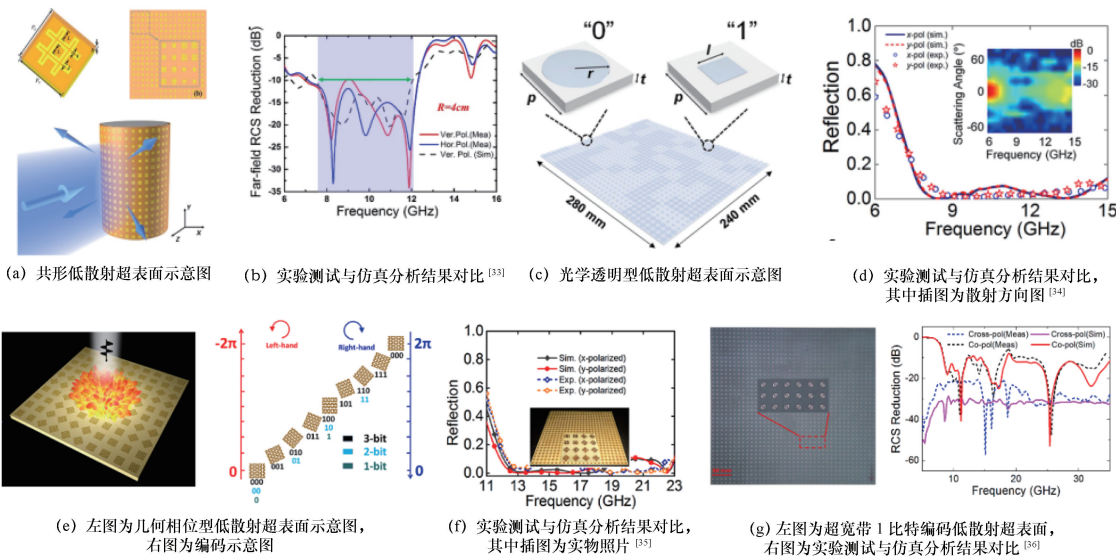


图 4 漫反射表面实现宽带散射缩减的设计实例

在圆极化波激励情况下,几何相位单元附加相位  $\varphi$  与旋转角  $\alpha$  之间满足关系式:  $\varphi = 2\sigma\alpha$ , 其中  $\sigma = \pm 1$  对应于右/左旋圆极化入射电磁波,  $\alpha$  为单元绕自身几何中心的旋转角度。因此,当单元在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间旋转时,就实现了  $\pm 360^\circ$  的相移特性<sup>[35]</sup>。如图 4(e) 右图所示,通过不同的几何旋转角度设计,分别实现了 1 比特、2 比特以及 3 比特编码超表面设计。随机表面原理示意图如图 4(e) 所示,当一束入射电磁波垂直照射到该表面时,原有的能量四处散射,随机分布于各个方向,从而大大降低其背向散射。理论上,通过优化编码序列,编码超表面的散射方向图可以均匀分布于整个上半空间。以 2 比特编码表面为例,对编码超表面的随机散射效果进行了仿真与测试。理论与实验结果均表明,在 12 ~ 23 GHz 频率范围内,编码超表面的能量反射率均在 0.1 以下,具有很好的背向缩减效果,且其对入射极化方向是不敏感的,如图 4(f) 所示。

基于几何相位的概念,我们还设计制备了超宽带的 1 比特编码超表面,样品如图 4(g) 所示<sup>[36]</sup>。“0”、“1”两种编码状态分别通过对单元结构旋转  $0^\circ$  与  $90^\circ$  来实现。测量结果显示,在 8.5 ~ 34 GHz 频率范围内,所设计的编码超表面同极化背向散射缩减达到至少 10 dB,交叉极化分量保持 -20 dB 以下。此外,在工作频带内,当斜入射 (TE/TM 波激励) 角度在  $30^\circ$  内时,该超表面能保持至少 10 dB 的背向散射缩减<sup>[36]</sup>。

## 5 总结与展望

本文概括性地介绍了本课题组近期关于低散射技术方面的一些研究进展,即利用多谐振、加载有耗材料以及漫反射方法实现散射缩减带宽的拓展。这些技术方案并不是只能独立使用,通过合理的方案融合及复合设计,将有可能实现更宽的频带拓展。此外,将低散射技术与其他器件联合设计,可实现多种新颖电磁器件,如低散射平面超表面天线、吸收-透射一体超材料等。总之,超材料的提出与发展为低散射技术的进一步发展提供了良好契机,为实现“薄、轻、宽、强”的终极目标提供了可行的研究思路。然而,作为一个新兴的研究领域,如何与实际的应用场景相结合,并在实际应用领域中发挥重要作用,仍需要研究人员的不断探索与进一步提升。另外,随着雷达技术的发展以及探测手段的增强,未来需面对更多的挑战,因而发展智能可调的低散射技术以实时应对多变的电磁探测环境成为超材料低散

射技术发展的重要趋势之一。

## 参考文献

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79
- [2] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792
- [3] Kim Y J, Yoo Y J, Kim K W, et al. Dual broadband metamaterial absorber [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 3861-3868
- [4] Gu S, Su B, Zhao X. Planar isotropic broadband metamaterial absorber [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(16): 163702
- [5] Yang J, Shen Z. A thin and broadband absorber using double-square loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 388-391
- [6] Cheng Y Z, Gong R Z, Nie Y, et al. A wideband metamaterial absorber based on a magnetic resonator loaded with lumped resistors [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(12): 127801
- [7] Li S, Gao J, Cao X, et al. Wideband, thin, and polarization-insensitive perfect absorber based the double octagonal rings metamaterials and lumped resistances [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(4): 043710
- [8] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, et al. Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(4): 044902
- [9] Cheng Y, Nie Y, Wang X, et al. Adjustable low frequency and broadband metamaterial absorber based on magnetic rubber plate and cross resonator [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(6): 064902
- [10] Pang Y, Cheng H, Zhou Y. Double-corrugated metamaterial surfaces for broadband microwave absorption [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(8): 084907
- [11] Zhu J, Ma Z, Sun W, et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 021102
- [12] Xiong H, Hong J S, Luo C M. An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(6): 064109
- [13] Ding F, Cui Y, Ge X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(10): 103506
- [14] 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
- [15] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426
- [16] Chen K, Feng Y, Monticone F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1606422
- [17] Cui T J, Qi M Q, Wan X. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218
- [18] Li Q, Pang Y, Li Y, et al. Low radar cross section checkerboard metasurface with a transmission window [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(6): 065107
- [19] Yang X M, Zhou X Y, Cheng Q, et al. Diffuse reflections by randomly gradient index metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 808-810
- [20] Gao L H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324
- [21] Su J, Lu Y, Liu J. A novel checkerboard metasurface based on optimized multielement phase cancellation for superwideband RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(12): 7091-7099
- [22] Haji-Ahmadi M J, Nayyeri V, Soleimani M, et al. Pixelated checkerboard metasurface for ultra-wideband radar cross section reduction[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11437
- [23] Chen W, Balanis C A, Birtcher C R. Dual wide-band checkerboard surfaces for radar cross section reduction [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 4133-4138
- [24] Salisbury, Winfield W. Absorbent body for electromagnetic waves[J]. U. S. Patent, 1952, 6(10): 2599944
- [25] Jaggard D L, Engheta N, Liu J. Chiroshield; a Salisbury/Dallenbach shield alternative[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(17): 1332-1334
- [26] Zhou Z, Chen K, Zhao J, et al. Metasurface Salisbury screen: achieving ultra-wideband microwave absorption [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30241-30252
- [27] Zhou Z, Chen K, Zhu B, et al. Ultra-wideband microwave absorption by design and optimization of metasurface Salisbury screen [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 26843-26853
- [28] Chen K, Zhao J, Feng Y. Broadband microwave metamaterial absorber made of randomly distributed metallic loops [A]. 2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP) [C], America: IEEE, 2016. 1-3
- [29] Zheng Y, Chen K, Jiang T, et al. Multi-octave microwave absorption via conformal metamaterial absorber with optical transparency[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(33): 335101
- [30] Chen K, Luo X, Ding G, et al. Broadband microwave metamaterial absorber with lumped resistor loading [J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2019, 6: 1-7
- [31] Zhou D, Sun Z, Chen K, et al. Nearly octave bandwidth microwave absorber with resistance loaded metamaterial [A]. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) [C], America: IEEE, 2015. 189-190
- [32] Wang W, Huang H, Sima B, et al. A Broadband Metamaterial Microwave Absorber Utilizing Both Magnetic and Electric Resonances [A]. 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC) [C], America: IEEE, 2018. 1-3
- [33] Zhao J, Sima B, Jia N, et al. Achieving flexible low-scattering metasurface based on randomly distribution of meta-elements [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27849-27857
- [34] Chen K, Cui L, Feng Y. Coding metasurface for broadband microwave scattering reduction with optical transparency[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5571-5579
- [35] Chen K, Feng Y, Yang Z, et al. Geometric phase coded metasurface: from polarization dependent directive electromagnetic wave scattering to diffusion-like scattering [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35968
- [36] Cui L, Chen K, Feng Y, et al. Geometric phase coded microwave metasurface for ultra-wideband radar cross section reduction [A]. 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) [C], America: IEEE, 2017. 1-3



**冯一军** 男,1964年生,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:人工电磁材料设计及其在光电子器件中的应用,微波射频器件及其在无线通信技术中的应用以及天线与电磁波传播。

E-mail: yjfeng@nju.edu.cn



**陈克(通信作者)** 男,1990年生,博士,特任副研究员。主要研究方向:人工电磁材料及其在电磁吸波、波束形成、成像、天线设计等应用中的研究。

E-mail: ke.chen@nju.edu.cn