

基于3D打印技术的任意曲面共形超表面隐身衣

王朝辉, 许河秀*, 逢智超, 王明照, 王少杰

(空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘要:超表面因其具有强大的电磁操控能力以及损耗小、剖面低和易加工等优势,在电磁工程领域受到了研究人员的广泛关注。然而,由于受加工技术的限制,目前所报道的超表面地毯隐身衣大多由二维平面结构拼接而成,研制能与任意目标曲面共形的地毯隐身衣仍然是一个挑战。为此,本文基于超表面和3D打印技术设计并验证了一款具有任意曲面的共形超表面隐身衣,打破了二维平面结构的限制,实现了对地面目标的雷达隐身。仿真和测试结果均表明该隐身衣可以在13 GHz处表现出良好的隐身性能,并且在一定的角度入射下保持性能的稳定。本文所提出的三维共形超表面隐身衣设计方法不仅在电磁隐身领域有广阔的应用前景,也为设计其他共形电磁器件开启了新途径。

关键词:超表面; 隐身衣; 3D打印; 雷达隐身; 共形

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A

3D-printed conformal metasurface invisibility cloak with arbitrary boundary

WANG Chao-Hui, XU He-Xiu*, PANG Zhi-Chao, WANG Ming-Zhao, WANG Shao-Jie
(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Metasurfaces have intrigued great interest among researchers in electromagnetic (EM) engineering field due to the powerful ability of EM manipulation and advantages of low loss, low profile and ease-fabrication. Nevertheless, due to the limitation of the fabrication technology, currently, most of the reported metasurface carpet invisibility cloaks are composed of two-dimensional planar structures. It is still a challenge to achieve conformal metasurface carpet invisibility cloak for an object with arbitrary boundary. Therefore, we designed and demonstrated a conformal metasurface carpet invisibility cloak with arbitrary boundary based on metasurfaces and 3D-printed technology, which breaks the limitation of two-dimensional planar structures and achieves radar stealth for ground object. Both simulated and measured results show that such conformal metasurface invisibility cloak exhibits an excellent stealth performance and sustains performance stability at certain incident angles. Notably, the proposed 3D conformal metasurface invisibility cloak not only promises a wide application prospect in the EM stealth field, but also opens a new way to design EM devices.

Key words: metasurfaces, invisibility cloak, 3D printing, radar stealth, conformal

引言

电磁超材料作为新型的人工复合材料,由亚波长尺寸单元经过周期或非周期排列组成^[1],具有自然材料所不具备的电磁属性,能够实现自然材料所

不能实现的电磁功能,如可调节的介电常数和磁导率^[2]。因此,一系列具有新颖功能的超材料电磁器件被设计和验证,如超材料透镜^[3]和隐身斗篷^[4]。然而,随着信息化技术的快速发展,人们对器件的

收稿日期:2021-08-31,修回日期:2021-11-02

Received date:2021-08-31, Revised date:2021-11-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62171459),国防科技项目基金(2019-JCJQ-JJ-081),陕西省自然科学基金重点项目(2020JZ-33),中国科协军事领域青年人才托举工程计划(17-JCJQ-QT-003)

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China (62171459), The National Defense Program of China (2019-JCJQ-JJ-081), The Key Program of Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JZ-33), The Youth Talent Lifting Project of the China Association for Science and Technology (17-JCJQ-QT-003).

作者简介(Biography):王朝辉(1994-),男,河南浚县人,博士,从事超材料电磁调控方向研究 E-mail: wangchaohui941216@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: hxxuellen@gmail.com

小型化和集成度提出了更高的要求。因此,作为超材料二维形式的超表面因其剖面低、损耗小以及强大的电磁操控能力,得到了研究人员的广泛关注。2011年,广义斯涅耳定律提出以后^[5],基于梯度超表面的波束赋形技术在电磁工程领域发挥着巨大作用,一系列新型电磁器件陆续被设计和报道,如贝塞尔波束透镜^[6]、偏折器^[7]和涡旋波束产生器^[8]等。2014年,Cui等将数字编码技术引入到超表面设计中,提出了数字编码超表面,扩大了超表面的信息容量^[9]。最近,与智能算法相结合的智能可重构超表面也被提出,这不仅为超表面设计提供了新方法,而且进一步扩大了超表面的应用范围^[10]。为满足电磁器件集成化和小型化发展需求,Xu等提出并验证了多款基于多元信息(极化、幅度和相位等)的多功能集成超表面^[11-13],极大地提高了超表面的功能集成度。

近年来,超表面的应用范围不断扩大,已经渗透到通信、国防和信息等领域。其中,基于超表面的雷达隐身技术更是受到了各国科学家的青睐。目前,基于超表面的雷达隐身技术主要是通过降低目标雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)实现^[14-15]。具体实现方式有:1. 吸收入射电磁波,减小目标对电磁波的反射^[16-18];2. 散射入射电磁波,降低雷达探测方向上目标的回波能量^[19-20]。然而,以上两种方案只能对以空气为背景的目标进行隐身,对以地面为背景的目标仍然无法实现雷达隐身。为解决以上问题,研究人员提出了基于超表面的地毯隐身衣方案^[21]。该方法一经提出,一系列隐身衣被设计和验证^[22-26],如基于3D打印技术的全极化隐身衣^[22]、基于智能算法的有源可重构隐身衣^{[24][25]}和基于各向同性结构的多线极化隐身衣^[26]等。尽管以上工作可以实现地面目标的雷达隐身,但是受加工技术的限制,大部分超表面隐身衣由多个二维平面结构拼接而成,很难与任意形状目标进行共形,尤其是曲面目标,这严重限制了特定外形目标的雷达隐身。

为解决以上难题,迫切需要一种新的设计方法和加工技术。最近,新型3D打印技术为精确制造任意复杂外形结构提供了解决方案。为解决任意外形目标的雷达隐身问题,本文将3D打印技术与超表面设计相结合,提出了一种基于3D打印技术的曲面共形超表面隐身衣。该隐身衣在垂直入射和一定入射角度下均表现出优异的电磁隐身性能,并且具

备极化不敏感性。更重要的是,本文所采取的设计方法具有普适性,可以根据目标外形打印出相应的隐身衣架构,然后计算出表面相位分布,即可完成隐身衣的设计,实现其地外形目标的隐身。

1 共形超表面隐身衣设计原理

当电磁波入射在没有目标的金属平面时,反射波将以一致的平行波前发生反射。而电磁波入射在不规则外形目标表面时,由于电磁波经历了不同的路径,反射波前相位的一致性被破坏,导致波前发生扭曲。所提出的共形超表面隐身衣功能如图1所示,共形超表面隐身衣主要作用是模拟地平面反射波前,将目标反射波前恢复到与地平面反射波前相类似的水平,实现与地面没有放置任何物体时相同的效果,从而对覆盖在内部的目标实现隐身。

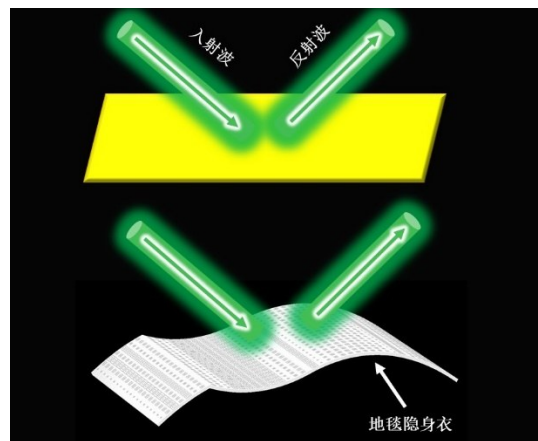


图1 共形超表面隐身衣功能示意图

Fig. 1 Function scheme of the conformal metasurface invisibility cloak

其工作原理如图2(a)所示,当电磁波以角度 θ_i 入射在金属平面上时,根据反射定律,入射波将会以相同的角度 θ_r 沿着与地平面法线对称方向反射。然而,当电磁波入射到具有凹凸凸形金属目标表面时,由于目标不规则的外形会将电磁波反射到空间中其他方向,使地面目标表现出与周围平面环境不一样的反射波前。敌方探测雷达可以对比目标和周围地面的反射波前变化来识别目标的位置信息。因此,为实现对地面目标的隐身,必须消除目标外形对反射波的影响,使经过目标反射的电磁波具有与平面一致的镜像反射波前,如此才能使地面目标躲避雷达的探测和侦察。如图2(b)所示,通过在物体表面覆盖超表面隐身衣,入射在目标表面上的电磁波就会表现出与周围平面一致的镜像反射波前,

这时放置在超表面隐身衣内部的任何目标均可被完美隐身。实现隐身衣的基本依据是相位补偿法,首先需要确定参考面,并以参考面的相位为零相位,然后计算三维隐身衣中各超表面单元中心到参考面的距离,最终根据公式(1)计算各超表面单元在特定极化下需要补偿的相位,即空间相位分布 φ 。

$$\varphi = \pi - 2k_0 h \cos \theta \quad (1)$$

式(1)中, h 表示隐身衣中超表面单元中心到地面的距离, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 是自由空间波矢, λ_0 是工作频率所对应的波长, θ 是电磁波相对于地平面的入射角度, π 代表电磁波入射到地平面反射后所引起的相位突变。

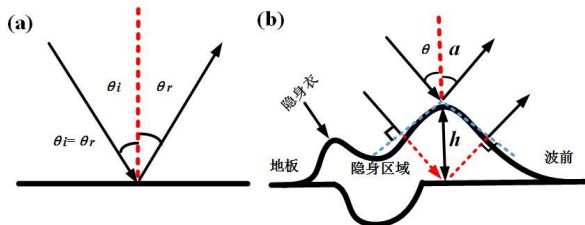


图2 共形超表面隐身衣概念(a)金属平面的反射波,(b)共形超表面隐身衣的反射波

Fig. 2 The concept of the conformal metasurface invisibility cloak. (a) the reflective wave of a metallic ground, (b) the reflective wave of a conformal metasurface invisibility cloak

2 超表面单元设计和仿真

因为共形超表面隐身衣是非平面的三维曲面结构,所以构成共形超表面隐身衣的超表面单元必须保证在一定的入射角度内表现出稳定的电磁响应。为此,如图3(a)所示,选择双环金属谐振器作为基础单元来设计三维共形超表面隐身衣。该单元由三层结构组成,如图3(a)所示,顶层是打印在F4B超薄柔性介质上的双环金属谐振器,F4B厚度为 $h_1=0.1$ mm,介电常数为2.65,电正切损耗为0.001。中间层是介电常数为2.7、电正切损耗为0.005、厚度 $h_2=3$ mm的3D打印工程树脂材料。底层为连续的金属背板,用来阻挡电磁波的传输。单元周期 $p=9$ mm,金属线宽度 $w=0.6$ mm。顶层单元外环的边长为 a ,而内环边长为 $a/2$ 。在共形超表面隐身衣的设计中,可以通过改变参数 a 的值来获得具有不同反射相位的单元。为表征所设计单元的电磁响应,运用商业全波仿真软件CST(2018)对单元进行了一系列仿真。在仿真过程中, x 和 y 方向采

用unit cell边界条件, z 方向采用open边界条件。通过CST自带的参数扫描功能,计算出了单元在13 GHz处,不同角度入射下单元反射相位和幅度随参数 a 变化的反射频谱。从图3(b)的仿真结果可以看出,单元在不同入射角度下的反射相位几乎相同,而且反射幅度近乎为1,这不仅是设计三维共形超表面隐身衣的关键,而且保证了隐身衣在一定的入射角度下正常工作。

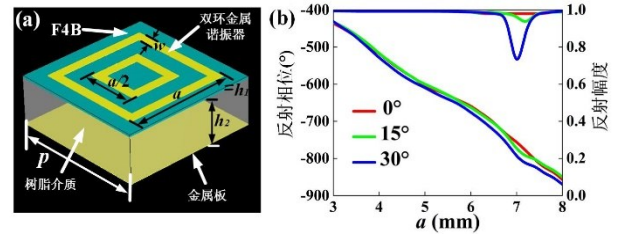


图3 超表面单元及其电磁响应(a)超表面单元结构示意图,(b)超表面单元在13 GHz处不同入射角度下的反射相位和幅度

Fig. 3 Meta-atom and electromagnetic (EM) response, (a) schematic of Meta-atom, (b) the reflection phase and amplitude of the meta-atom at 13 GHz for different incident angles

3 共形超表面隐身衣设计和仿真

3.1 共形超表面隐身衣设计方法

图2详细地阐述了隐身衣的概念,即隐身衣能恢复镜像反射波前的幅度和相位,使目标反射波与地平面反射波有类似的反射行为。根据式(1),选择 $\theta = 0^\circ$ 来设计隐身衣。共形超表面隐身衣的横截面轮廓可以由以下分段函数表示:

$$\begin{cases} z = -\frac{1}{360}(x+60)^2 + 40 & (-180 \leq x \leq -120) \\ z = 60 + \frac{1}{360}(x+60)^2 - 40 & (-120 \leq x \leq 0) \\ z = -\frac{1}{360}(x-60)^2 + 40 & (0 \leq x \leq 180) \end{cases} \quad (2)$$

在隐身衣的设计过程中,首先结合式(2)利用曲线积分计算出隐身衣的表面长度是370 mm。因此,如图4(a)所示,选择在 xoz 平面内排布40个单元作为一个周期。如图4(b)所示,通过单元的水平投影位置,结合式(1)和(2),计算出了沿 x 轴负方向到正方向40个单元在设计频率13 GHz处所对应的相位值。将以上排布有40个单元的二维平面按照每个单元的投影坐标放在与隐身衣介质轮廓相切位置,通过CST中共形布尔操作将二维平面共形在介质板轮廓表面形成图4(a)所示的单个周期。最后

在 y 方向周期延拓20个图4(a)所示的周期结构,组成如图4(c)所示的共形超表面隐身衣。最终所设计的隐身衣的整体维度长 $L=360$ mm,宽 $W=180$ mm。

图4(d)表明,最终的共形超表面隐身衣分为以下三个主要部分,最顶层是打印有双环金属谐振器的超薄柔性介质板,中间层是树脂材料介质板,底层是连续的柔性金属背板。在顶层结构中,所设计的金属单元被共形在中间层介质板的表面;中间层介质板是厚度为3 mm的任意起伏曲型结构,所采用的材料是介电常数为2.7、电正切损耗为0.005的ABS-M30树脂介质;共形超表面隐身衣的底层是连续金属铜箔。

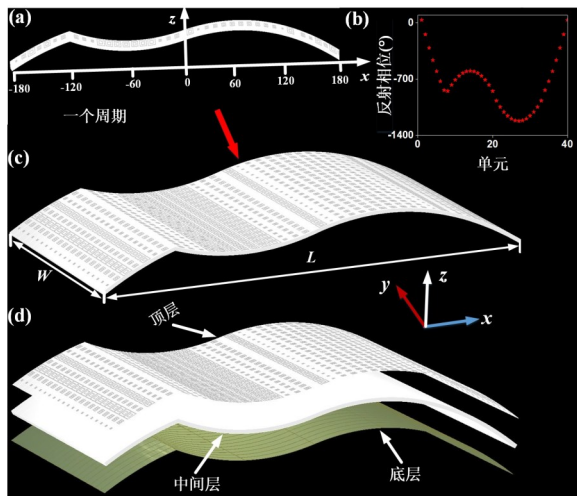


图4 共形超表面隐身衣结构(a)一个周期内的40个不同单元,(b)不同位置单元所对应的相位值,(c)隐身衣的整体结构图,(d)三层不同结构

Fig. 4 The structure of conformal metasurface invisibility cloak, (a) forty different unit cells in one period, (b) the phase of meta-atoms for different locations, (c) the total structure of invisibility cloak, (d) three-layer different structures

3.2 x 极化波垂直入射下不同目标近远场仿真结果

为研究共形超表面隐身衣,利用商业全波仿真软件CST对所设计的隐身衣进行了仿真计算。在仿真中, x 、 y 和 z 方向采用open边界条件,同时采用垂直入射的 x 极化平面波激励超表面。为体现隐身衣的功能,将相同尺寸和外形的裸金属、平面金属地板和隐身衣的仿真结果进行了对比。当电磁波入射在裸金属目标表面时,图5(a、b、c)给出了以上三种情形下目标在13 GHz处的二维远场方向图。目

标不规则的外形将电磁波反射到了空间中各个方向。然而,当共形超表面隐身衣被引入以后,由于超表面单元产生的突变相位补偿了不同光程所积累的相位差,重新恢复了等相位波前,电磁波沿垂直入射方向发生了镜像反射,而其它方向的电场强度被极大抑制。将隐身衣和金属地板的远场方向图对比可以发现,入射在超表面隐身衣的电磁波产生了与平面金属板相同的镜像反射。

为进一步研究共形超表面隐身衣的雷达隐身性能,对隐身衣的近场电场分布进行了仿真计算和讨论。从图5(d、e、f)的二维近场仿真结果可以看出,与平面金属地板相比,裸金属目标镜像反射波前的一致性均遭到了破坏,反射波前发生了严重的扭曲。然而,当隐身衣被引入以后,不同光程差所积累的相位差被超表面单元所补偿。所以,镜像反射波前的相位和幅度得到了恢复,电磁波以等相位波前反射,反射波前恢复到了与金属地板反射波前相同的水平。以上近远场仿真结果都证明了所设计的共形超表面隐身衣能消除任意曲面目标对反射波的影响,恢复等相位反射波前,达到隐身地面目标的目的。

3.3 x 极化波 15° 斜入射下三种不同目标近远场仿真结果

虽然隐身衣在垂直入射下的隐身效果已经被上述的仿真结果所证实。但是,在实际应用中,入射的电磁波往往以一定的角度照射在目标表面。因此,除了垂直入射情况外,还研究了在 15° 斜入射角下的隐身性能。不同目标在工作频率处的二维远场方向图仿真结果如图6(a、b、c)所示。当电磁波以 -15° 的入射角照射在裸金属目标表面时,电磁波反射到了空间中的多个方向上,其反射行为表现出无规律性特征。然而,当电磁波入射在隐身衣表面时,反射波以相同的角度反射到了 15° 方向上,其反射效果与电磁波入射在平面金属地板相同。

如图6(d、e、f)所示,通过将裸金属目标和隐身衣的近场电场分别与平面金属地板的近场电场对比可以发现,金属目标具有扭曲的反射波前,而引入共形超表面隐身衣以后,反射的电磁波波前得到了修正,并且反射波以一致的等相位波前沿 15° 方向反射。这种电磁波反射行为与金属地板反射行为相同,达到了预期的设计效果。以上仿真结果充分证明,所设计的隐身衣在 15° 的入射角

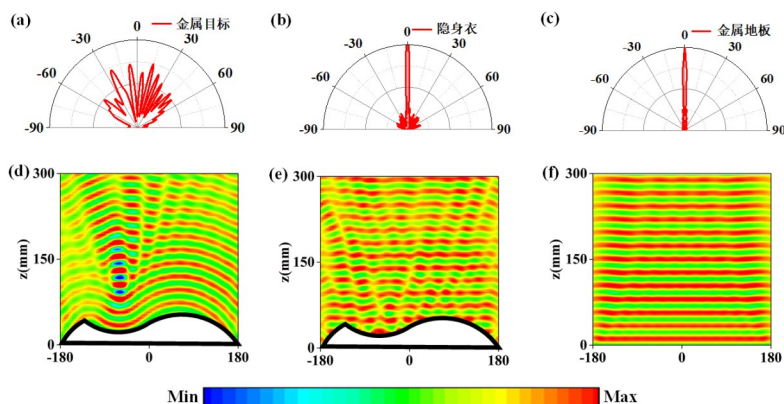


图5 三种不同目标在 x 极化波垂直入射下的远场和近场电场分布(a,b,c)远场电场分布,(d,e,f)近场电场分布

Fig. 5 Far field and near field E -field distributions of three different objectives under normal incidence for x -polarized wave, (a, b, c) far field E -field distributions, (d, e, f) near field E -field distributions

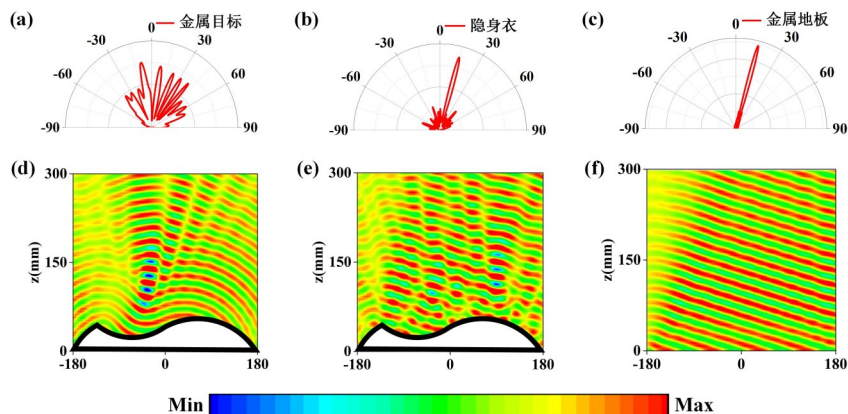


图6 三种不同目标在 x 极化波斜 15° 入射下的远场和近场电场分布(a,b,c)远场方向图,(d,e,f)近场电场分布

Fig. 6 Far field and near field E -field distributions of three different objectives under oblique incidence of 15° for x -polarized wave, (a, b, c) far field E -field distributions, (d, e, f) near field E -field distributions

度下仍然能够在工作频率处达到理想的隐身效果。

3.4 y 极化波垂直和 15° 斜入射下隐身衣近远场仿真结果

由于构成共形超表面隐身衣的单元是具有四重旋转对称性的各向同性结构,超表面应该表现出极化不敏感特性。为验证隐身衣的极化不敏感特性,采用同样的表征方法仿真了 y 极化波激励下隐身衣的远场方向图和近场电场分布。在仿真设置中,除了入射电磁波的极化不同之外,其它设置条件均保持不变。在图7中,分别给出了 y 极化波垂直和 15° 斜入射下隐身衣的二维远场方向图和近场电场仿真结果。结果表明,在 y 极化波入射下,隐身衣具有与 x 极化波入射相同的波前反射行为,即反射波以一致的等相位波前沿着预定方向散射,证明了隐身衣的极化不敏感特性。

4 共形超表面隐身衣研制和实验

4.1 隐身衣样品研制

为进行实验验证,加工了一款共形超表面隐身衣样品进行实验测试。加工流程主要包含两部分,如图8所示:首先采用PCB技术将位于顶层的金属单元结构打印在厚度为 0.1 mm 的F4B超薄柔性介质板上。然后,采用3D打印技术加工了中间厚度为 3 mm 的ABS-M30树脂介质板。最后,将以上各部分胶装起来。

4.2 隐身衣样品测试与结果

接下来对组装后的样品进行实验验证,实验包括远场测试和近场测试两部分,远场测试环境如图9(a)所示。远场测试用于测试远场电场分布,在测试时,工作在 $2\sim 18\text{ GHz}$ 的发射天线和隐身衣固定在一起并被置于可以绕中心轴旋转的圆柱泡沫中心,而工作在 $8\sim 18\text{ GHz}$ 的标准增益接收天线被放置在

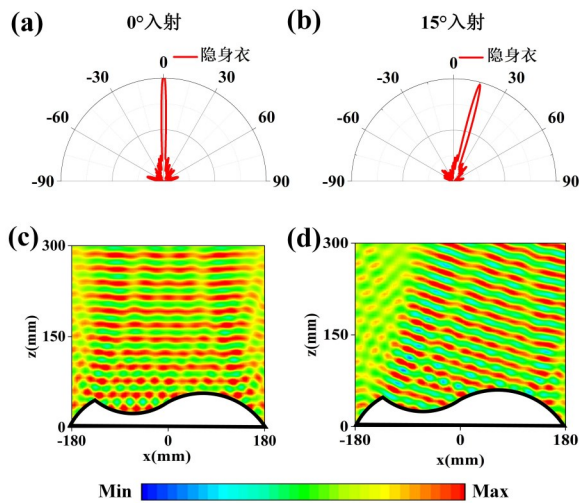


图7 共形超表面隐身衣在 y 极化波 0° 和 15° 斜入射下的远场电场和近场电场分布(a,b)远场电场分布,(c,d)近场电场分布

Fig. 7 Far field and near field E -field distributions of conformal metasurface invisibility cloak under oblique incidence of 0° and 15° for y -polarized wave, (a, b) far field E -field distributions, (c, d) near field E -field distributions

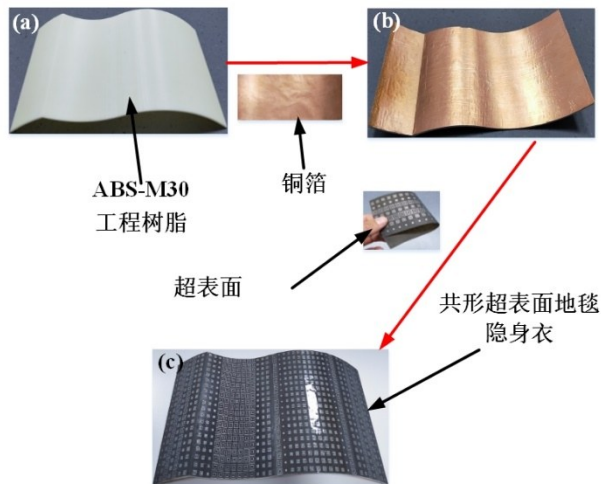


图8 共形超表面隐身衣样品研制流程

Fig. 8 Fabrication process of the conformal metasurface invisibility cloak

距样品 10 m 的圆柱泡沫上,用来接收反射场。在测试过程中所有电磁波信号均由一台 AV3672B 矢量网络分析仪发射和接收。近场实验环境如图 9(b) 所示,在这里,仅仅测试了垂直入射下样品的近场电场分布。在实验中,样品被安置在具有一定高度的泡沫圆柱上面。为避免周围环境干扰实验结果,样品的后方放置了一块吸波材料。为保证入射在样品表面的电磁波为平面波,将一个工作在 2~18

GHz 的线极化天线安置在距离样品表面 0.8 m 的位置处,以 6 mm 长的单极子天线作为接收天线接收样品在 xoz 面内的电磁场。单极子天线被固定在二维平面自动扫描系统上,扫描的最大面积为 $0.36 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,步长为 5 mm。发射喇叭和接收天线通过微波电缆连接到矢量网络分析仪的两个端口,用来接收和发射信号。

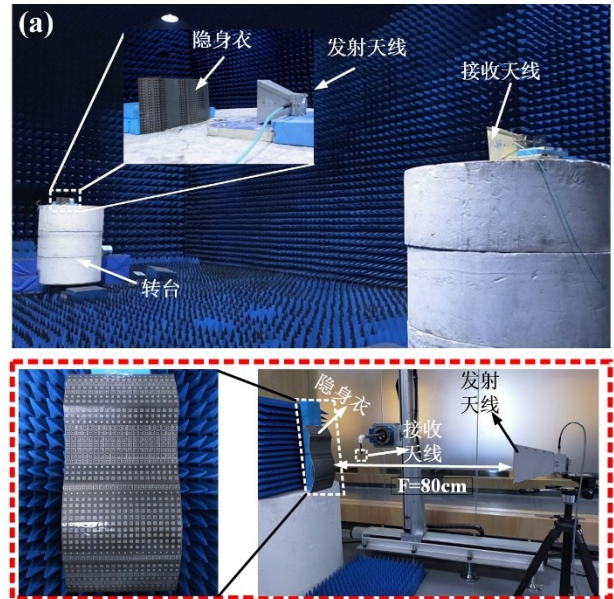


图9 (a)远场测试平台,(b)近场测试平台

Fig. 9 (a) Far field experiment platform, (b) near field experiment platform

远场测试结果如图 10 所示,在 x 和 y 极化波入射下,无论是垂直入射还是 15° 斜入射,隐身衣均表现出了与地平面反射相同的反射行为。如图 11(a) 和 (b) 所示,无论是 x 极化波还是 y 极化波垂直入射到隐身衣表面时,隐身衣均能恢复镜像反射波前,并使电磁波沿着镜像方向发生反射。以上测试结果与仿真结果均证明了本文所设计共形超表面隐身衣的功能。其中,仿真与测试结果之间的误差主要来源于加工误差和测试环境的影响。

5 结论

本文提出了一种基于 3D 打印技术的任意共形超表面隐身衣设计方法。为实现理想的雷达隐身性能,根据隐身衣的概念和工作原理,设计了一款可在一定入射角度下维持稳定相位和幅度的各向同性单元。基于所设计的单元,实现了可以工作在 13 GHz 的共形超表面隐身衣。通过采用 PCB 和 3D 打印技术,加工了隐身衣的样品并进行了实验

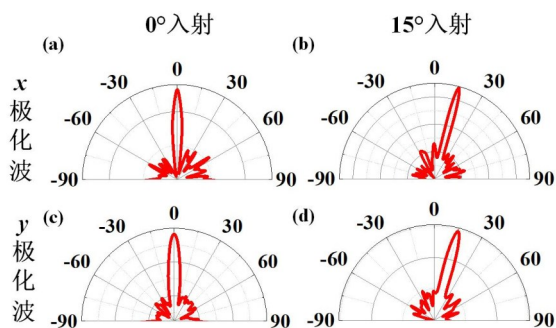


图 10 x 极化波(a,b)和 y 极化波(a,b)在 0° 和 15° 斜入射下隐身衣的远场电场测试结果

Fig. 10 The measured far field E -field results of cloak under oblique incidence of 0° and 15° for x -polarized (a, b) and y -polarized (c, d) wave

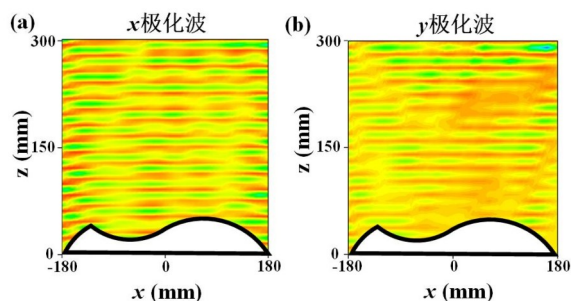


图 11 在 x 极化波(a)和 y 极化波(b)垂直入射下隐身衣的近场电场测试结果

Fig. 11 The measured near field E -field results of invisibility cloak under normal incidence for x -polarized (a) and y -polarized (c) wave

证。最后,仿真和实验结果均表明本文所设计共形超表面隐身衣在 0° 和 15° 入射角度下,电磁波始终被精确地反射到预期方向,其反射特征与地平面镜像散射类似,并且该隐身衣表现出良好的极化不敏感特性。与先前报道的设计方法相比,该方案打破了以往仅仅用平面结构来实现隐身衣的限制,可以与具有复杂曲面外形的目标共形,为实现共形电磁器件设计提供了新思路。

References

[1] CUI T. J. Microwave metamaterials [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2018, **5**(2): 134–136.
 [2] VESELAGO V. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Physica-Uspeski*, 1968, **10**(4): 509–514.
 [3] PENDRY J. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966–3969.
 [4] SCHURIG D, MOCK J, JUSTICE B, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.

[5] YU N. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333–337.
 [6] 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.
 [7] AIETA F, GENEVET P, YU N, *et al.* Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities [J]. *Nano Lett.*, 2012, **12**(3): 1702–1706.
 [8] ZHANG L, LIU S, LI L, *et al.* Spin-Controlled Multiple Pencil Beams and Vortex Beam with Different Polarizations Generated by Pancharatnam–Berry Coding Metasurfaces [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, **9**(41): 36447–36455.
 [9] CUI T, QI M, WAN X, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2014, **3**: e218.
 [10] MA Q, BAI G, JING H, *et al.* Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2019, **8**: 98.
 [11] XU H, HU G, LI Y, *et al.* Interference-assisted kaleidoscopic meta-plexer for arbitrary spin-wavefront manipulation [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**: 3.
 [12] XU H, HU G, JIANG M, *et al.* Wavevector and frequency multiplexing performed by a spin-decoupled multichannel metasurface [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, **5**, 1900710.
 [13] XU He-Xiu, WANG Yan-Zhao, WANG Chao-Hui, *et al.* Research Progress of Multifunctional Metasurfaces Based on the Multiplexing Concept [J]. *Journal of Radars.*, 2021, **10**(2): 191–205. (许河秀,王彦朝,王朝辉,等,基于多元信息的多功能电磁集成超表面研究进展. *雷达学报*), 2021, **10**(2): 191–205.
 [14] LIU Tao, CAO Xiang-Yu, GAO Jun. Design of Wideband Metasurface Antenna Array with Low Scattering Characteristics [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, **41**(9): 2095–2102. (刘涛,曹祥玉,高军,等,宽带低RCS超表面天线阵设计. *电子与信息学报*), 2019, **41**(9): 2095–2102.
 [15] ZHOU Yu-Long, CAO Xiang-Yu, GAO Jun. Dualband Frequency Selective Surface and Its Application to Wideband RCS Reduction of The Microstrip Antenna [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(6): 1146–1451. (周禹龙,曹祥玉,高军,等,双频频率选择表面及其在微带天线宽带RCS减缩中的应用. *电子与信息学报*), 2017, **39**(6): 1146–1451.
 [16] LI Y, LIN J, GUO, H, *et al.* A Tunable Metasurface with Switchable Functionalities: From Perfect Transparency to Perfect Absorption [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2020, 1901548.
 [17] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, *et al.* Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, **110**(14): 1435111–1435115.
 [18] SHEN Y, ZHANG J, WANG W, *et al.* Overcoming the Pixel-Density Limit in Plasmonic Absorbing Structure for Broadband Absorption Enhancement [J]. *IEEE Antennas*

- Wireless Propag. Lett.*, 2019, **18**(4): 674–678.
- [19] WANG C, XU H, WANG Y, *et al.* Hybrid-phase approach to achieve broadband monostatic/bistatic RCS reduction based on metasurfaces [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2020, **53**(36): 365001.
- [20] XU H, MA S, LING X, *et al.* Deterministic approach to achieve broadband polarization-independent diffusive scatterings based on metasurfaces [J]. *ACS Photon.*, 2018, **5**(5): 1691–1702.
- [21] NI X, WONG Z, MREJEN M, *et al.* An ultrathin invisibility skin cloak for visible light [J]. *Science*, 2015, **349** (6254): 1310.
- [22] XU H, Hu G, Wang Y, *et al.* Polarization-insensitive 3D conformal-skin metasurface cloak [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, **10**(1): 75.
- [23] XU H, Wang Y, Wang C, *et al.* Deterministic Approach to Achieve Full-Polarization Cloak [J]. *Research*, 2021, **2021**:1–13.
- [24] QIAN C, ZHENG B, SHEN Y, *et al.* Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention [J]. *Nature Photonics*, 2020, **14**(6): 383–390.
- [25] HUANG C, YANG J, WU X, *et al.* Reconfigurable Metasurface Cloak for Dynamical Electromagnetic Illusions [J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(5): 1718–1725.
- [26] YANG Y, JING L, ZHENG B, *et al.* Full-Polarization 3D Metasurface Cloak with Preserved Amplitude and Phase [J]. *Adv. Mater.*, 2016, **28**(32): 6866 – 6871.