

光学窗口微波虚拟赋形方法研究

钟慧 朱蓓蓓 秦琳 刘楠 林杰 金鹏

Investigation on microwave virtual beam-forming method of optical window

ZHONG Hui, ZHU Beibei, QIN Lin, LIU Nan, LIN Jie, JIN Peng

引用本文:

钟慧, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 光学窗口微波虚拟赋形方法研究[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1369–1375. DOI: 10.5768/JAO202546.0601003

ZHONG Hui, ZHU Beibei, QIN Lin, et al. Investigation on microwave virtual beam-forming method of optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1369–1375. DOI: 10.5768/JAO202546.0601003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学窗口电磁屏蔽性能分析与验证

Analysis and test of electromagnetic shielding effectiveness of optical window

应用光学. 2020, 41(1): 55–59 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101008>

航空光电大口径平面光学窗口厚度尺寸设计分析

Design and analysis of thickness dimension for large aperture plane optical window of aerial electro-optics

应用光学. 2025, 46(3): 580–588 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301005>

组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究

Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window

应用光学. 2021, 42(6): 1122–1126, 1132 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605003>

热压载荷作用下气体检测光学窗口对激光传输影响

Influence of optical window for gas detection on laser transmission under thermal pressing loads

应用光学. 2023, 44(1): 195–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107001>

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

应用光学. 2023, 44(3): 661–667, 683 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

像质检测用光学窗口的温度适应性设计与实验

Temperature adaptability design and experiment of optical windows for image quality detection

应用光学. 2022, 43(1): 30–35 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1369-07

引用格式: 钟慧, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 光学窗口微波虚拟赋形方法研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1369-1375.

ZHONG Hui, ZHU Beibei, QIN Lin, et al. Investigation on microwave virtual beam-forming method of optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1369-1375.



在线阅读

光学窗口微波虚拟赋形方法研究

钟 慧¹, 朱蓓蓓², 秦 琳², 刘 楠³, 林 杰⁴, 金 鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 3. 苏州麦田光电技术有限公司, 江苏 苏州 215123; 4. 哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 透明光学窗口的光学与电磁分离 (又称作光学透明电磁屏蔽) 在无线通信、国防建设和航天工程等领域具有重要意义, 为了在不改变光学窗口基底面型的前提下, 实现雷达波散射截面优化或隐身功能, 亟待发展新型的光学/电磁功能材料。提出一种基于金属栅格的电磁超构材料 (electromagnetic metamaterial based on metal mesh, EMMM) 图案化方法, 设计了微波波段散射特性可调谐的光学透明谐振基元, 在此基础上, 利用广义形式的斯涅耳定律, 对球冠型曲面光学窗口展开设计, 使其具备双金属倾斜板的微波散射性能。数值计算结果显示, 通过在球冠状曲面光学窗口上共形施加图案化光学透明谐振基元, 实现了频率 19 GHz 处的虚拟赋形, 具体为垂直入射电磁波被反射至 (54.4°, 0.0°) 和 (54.4°, 180.0°) 方向, 与赋形目标双金属倾斜板的 2 个预设方向 (50.0°, 0.0°) 和 (50.0°, 180.0°) 基本一致。由此可见, 图案化 EMMM 的策略能够灵活调控光学/电磁窗口的微波散射特性, 该研究成果在雷达散射截面缩减、电磁防护、智能通信与可穿戴设备等领域具有重要应用价值。

关键词: 电磁超材料; 微波散射; 曲面光学窗口; 虚拟赋形; 多频段光电探测

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0601003

Investigation on microwave virtual beam-forming method of optical window

ZHONG Hui¹, ZHU Beibei², QIN Lin², LIU Nan³, LIN Jie⁴, JIN Peng¹

(1. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China; 3. Suzhou Meshteam Opto-Electronics Co., Ltd., Shouzhou 215123, China; 4. School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The separation technology of optical and electromagnetic signal of optical window, known as transparent electromagnetic shielding technology, is important in fields such as communication, defense and aerospace. Particularly, in the fields of aerospace and defense, the instruments for optical detection are widely equipped by aircraft and weapon, which require that the optical windows must shield harmful electromagnetic wave, have highly optical transmission and has excellent imaging performance. To realize radar cross section optimization or stealth function without changing the base of optical windows, it is urgent to develop new optical/electromagnetic functional materials. We proposed a patterning method for electromagnetic metamaterial based on metal mesh (EMMM) and designed optically transparent resonant units with tunable scattering characteristics in microwave band. The optical window with spherical cap surface was designed by

收稿日期: 2024-09-05; 修回日期: 2024-12-26

第一作者: 钟慧, E-mail: huizhong17hit@163.com

通信作者: 金鹏, E-mail: P.Jin@hit.edu.cn

using generalized Snell's law to mimic microwave scattering characteristics of double-metal inclined plate. Numerical results validate the achievement of virtual beam shaping for the optical window with spherical cap surface at 19 GHz. And the vertically incident electromagnetic waves are modulated to the directions (54.4° , 0.0°) and (54.4° , 180.0°), which match that of the target metal inclined plate with (50.0° , 0.0°) and (50.0° , 180.0°). The patterned EMMM strategy can flexibly regulate the microwave scattering characteristics of the optical/electromagnetic window, and the research results have important application prospects in the fields of radar cross section reduction, electromagnetic protection, intelligent communication and wearable devices.

Key words: electromagnetic metamaterials; microwave scattering; curved optical window; virtual beam-forming method; multi-spectral photoelectric detection

引言

随着现代电子技术和微波通信技术的不断发展与技术突破,电磁波技术已经广泛应用到通信、信息和安防等领域,然而,电子技术和电磁波技术也给设备研制和设备防护带来一定的挑战。随着电磁通信需求的不断增加,电子设备的发射功率显著提升,使得空间中电磁波的强度显著增大。与此同时,为了满足多用户多任务的需求,不得不扩大电磁波的频率范围。上述因素共同导致了空间环境中的电磁干扰变得异常复杂^[1-2],复杂多样的电磁辐射既威胁人员健康,又影响信息安全,还妨碍相关设备的使用,因此,发展电子设备电磁防护技术势在必行。面对本领域的挑战与需求,人们提出了电磁屏蔽技术,经过多年研究,该技术迅速发展成为保护电子设备抵抗电磁波干扰的重要技术手段之一^[3-7]。

值得注意的是,航空航天和军事国防等领域中的飞行器与武器装备,通常要满足特定的观测、探测需求。例如民航飞机、战斗机等飞行器需要配备高光学透明窗口(如飞机的座舱窗口、武器装备的整流罩),这类窗口是驾驶员或内部光电设备获取外界目标光学信息的关键通道,需要具备良好的光学透过率和不影响成像的特性^[8-10]。然而,常规高光学透明器件,例如玻璃和塑料,使得装备外部和内部的电磁波极易透过光学窗口,导致出现飞行器与装备的电子设备性能劣化、内部电磁信号泄漏、飞行器雷达散射截面(radar cross section, RCS)显著增大等严重后果,极大地影响设备和人员安全,严重影响装备的生命周期。为了解决高光学透明窗口中存在的电磁波透射导致的电磁信号泄露或 RCS 增大等风险,人们提出了光学透明电磁屏蔽技术,用于实现光学窗口的光学透过/电磁波反射分离,这是实现光学透明和抑制电磁波穿

透的重要技术途径^[11-15]。目前,主流的光学/电磁分离技术包括:基于金属膜或金属氧化物膜的透明导电膜^[6,11]、金属栅格电磁超材料(electromagnetic metamaterial based on metal mesh, EMMM)^[13-15]、金属丝网光学透明电磁屏蔽膜^[12]。其中,EMMM 采用了由金属栅线构成的网状结构,能够实现光学透明和电磁波屏蔽^[16-18],在金属栅线网状结构中,金属栅线的宽度通常在亚微米至微米量级,金属栅线的间隔从几十微米到几百微米不等。大量相关研究结果表明,EMMM 薄膜的低占空比特性,有效解决了连续薄膜无法兼顾高透光性和高导电性的问题。该结构通过镂空设计和金属栅线连续性等技术途径,提升了透光性能、维护成像性能以及导电性能,实现了透光路径和导电路径相互独立。

在微波频段,电磁波的波长大于金属栅线的间距,电磁波的后向衍射在 EMMM 中起主导作用^[19],因此,基于 EMMM 的光学窗口将具备与同面型金属基底一致的微波散射特性。这意味着可以利用 EMMM 和外形整形技术,有效地控制光学窗口的雷达散射截面。值得注意的是,在飞行器中,光学窗口基底面型还与系统的光学性能、整体气动性能等相互影响。EMMM 微波散射性能与基底面型的解耦,可实现在不影响整体气动性能的情况下,灵活调控光学窗口微波散射特性,这是当前电磁屏蔽、飞行器设计等领域的一个重要目标。

针对前述问题,本文提出了基于图案化 EMMM 的曲面光学窗口的微波虚拟赋形方法。通过构建基于顶部图案化 EMMM 层、光学窗口基底和底部完整 EMMM 层的三明治型复合超表面,实现反射相位调整,在不改变基底面型的前提下,实现光学窗口微波散射特性的有效调控。提出的图案化 EMMM 曲面光窗虚拟赋形策略,为飞行器和武器装备中精密光电探测仪器的电磁屏蔽与防护,提

供了一种新颖的微波散射特性调控技术, 具有重要的应用价值和现实意义。

1 理论推导

为了确保飞行器具备良好的气动性能, 通常将其光学窗口设计为曲面, 曲面光学窗口相位分布如图 1 所示。针对图 1(a) 所示的球冠型曲面光学窗口(即本文的待赋形对象)的微波散射特性进行优化, 目的是使球冠型曲面光学窗口的微波散射特性与双金属斜板(即赋形目标, 如图 1(b) 所示)的微波散射特性匹配, 并提出在光学窗口上引入图案化 EMM 三明治型复合超表面方案, 确保光学窗口同时具备良好光学性能、优异的气动性能和预定的微波散射特性。

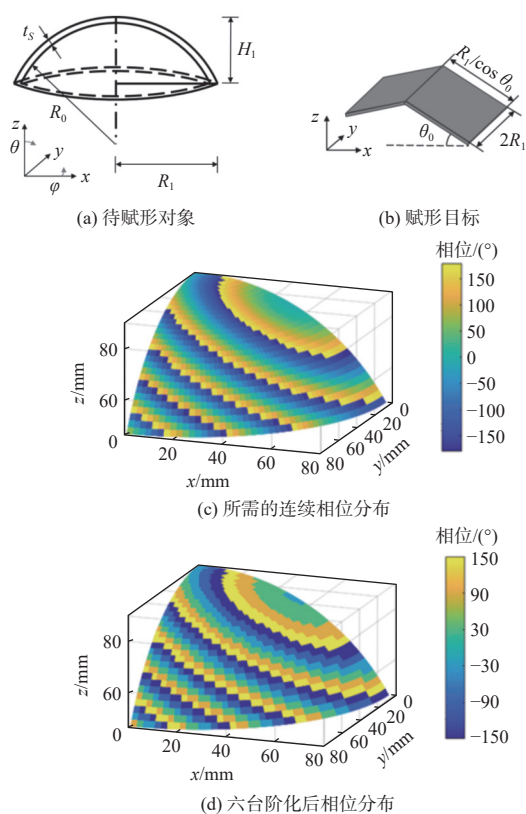


图 1 曲面光学窗口相位分布

Fig. 1 Phase distribution of optical window with curved surface

1.1 球冠型曲面光学窗口相位分布和区域划分

如图 1(a) 所示, 作为待赋形对象的玻璃球冠, 半径 $R_0=90$ mm、球冠高度 $H_1=46.5$ mm、厚度 $t_s=5$ mm、底部圆半径 $R_1=78.79$ mm。假设球冠的球心为坐标系的坐标原点, 则球冠的外表面满足以下函数关系:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_0^2 \quad (z \geq 43.5 \text{ mm}) \quad (1)$$

待赋形目标是如图 1(b) 所示的脊形金属板, 金属板与 x 轴夹角为 $\theta_0=\pm 25^\circ$ 。当电磁波垂直入射时, 双金属斜板将电磁波反射至 $(50.0^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(50.0^\circ, 180.0^\circ)$ 2 个方向。为了简化分析, 仅讨论沿 $-z$ 方向入射的电场沿 y 轴振动的线极化平面电磁波。

根据广义斯涅耳定律, 如果球冠上各处反射电磁波的相位满足以下关系^[20]:

$$\Delta\Phi = \pi - k_0\Delta h(1 + \cos 2\theta_0) \quad (2)$$

式中: k_0 为自由空间波数; Δh 为 z 方向上金属斜板与球冠的高度差。在理论上, 球冠的微波散射特性与金属斜板的微波散射特性相同^[21-22], 即入射电磁波被后向散射至 $(50.0^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(50.0^\circ, 180.0^\circ)$ 2 个方向。根据球冠和双金属斜板的对称性, 只需要对一个象限内散射特性进行分析即可。图 1(c) 给出了根据式 (1) 和式 (2) 及双金属斜板几何位置, 求得的球冠上的相位分布。步长 60° 台阶化后的相位分布如图 1(d) 所示, 其中相位取值分别为 $-150^\circ, -90^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 和 150° 。由此可见, 球冠上所需的相位遍历 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 且多次出现相同的相位值。

由于曲面球冠具有不可展开的特殊性, 针对同一入射电磁波, 球冠面上不同位置的电磁波具有不同的入射角和不同的极化方向。如图 2(a) 所示, 在点 $P(x, y, z)$ 处电磁波入射角为

$$\theta_i = \cos^{-1} \frac{z}{R_0} \quad (3)$$

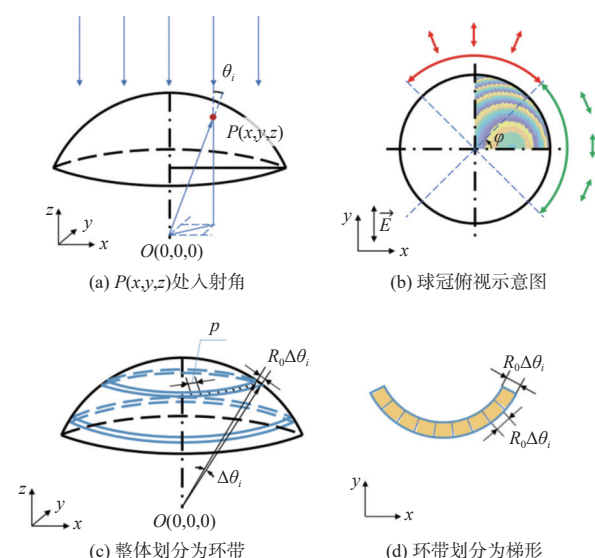


图 2 曲面光学窗口区域划分示意图

Fig. 2 Scheme of curved surface segmentation of optical window

式中,入射角度 θ_i 由球的半径 R_0 和 P 点所处高度 z 共同决定。因此在进行单元结构排布时,将 z 轴作为旋转轴,在设计单元结构时,将结构所处高度 z 作为分类依据。待设计球冠的俯视图如图 2(b) 所示,位于 xoz 面和 $yo z$ 面上的单元感受到 TE 或 TM 极化电磁波,在其余位置的单元结构感受到的电磁波由两种极化组合而成。为了进一步简化设计模型,假定在 $0^\circ \leq \varphi < 45^\circ$ 范围内,结构单元处的电磁波的极化方式为 TE 极化,在 $45^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ 范围内的电磁波为 TM 极化,图 2(b) 中绿色及红色箭头表示电场方向。综合考虑曲面球冠的结构特性、电磁波的入射角及极化方向,按照图 2(c) 和 2(d) 两种方式对整个球冠进行划分,首先将球冠切割为环带宽度为 $R_0 \Delta \theta_i = p$ 的多个环带,再以步长 p 将分割的环带进一步分割为可近似为正方形的扇形带,那么 p 可看成是单元结构的周期。

1.2 单元结构设计

为了实现球冠型曲面光学窗口微波散射特性的精确控制,拟设计一种 EMMM 三明治结构的超材料,超材料单元与球冠型曲面光学窗口如图 3 所示。在图 3(a) 中给出了其结构示意图,该 3 层结构由底部的金属膜、顶部的图案化金属结构层以及中间的玻璃基底组成。顶部的图案化金属层结构采用闵可夫斯基 (Minkowski) 闭环单元^[23],其中, $g_M = 0.471$ mm, $W = 0.157$ mm, $L_{in} = 1.037$ mm, 单元周期 $p_M = 2.827$ mm, 在设计过程中,这些参数保持不变。根据电路理论,调整顶部金属图案层的图案结构参数,可以改变微波频段中金属结构的等效阻抗,进而调控反射电磁波的相位^[24]。利用全波数值算法,对几何尺寸参数 L 和电磁波的入射角 θ_i 进行参数扫描,进而确定在不同入射角度下,达到特定反射相位所需的 L 值。图 3(c) 和 3(d) 分别为 14 GHz ~ 23 GHz 范围内,当电场沿 y 轴振动的电磁波垂直入射时, L 分别取 2.070 mm, 1.860 mm, 1.728 mm, 1.540 mm, 1.100 mm 和 2.630 mm 时,各个单元的反射电磁波相位及反射率曲线。在频率为 19 GHz 时,设计的 6 种单元结构的反射电磁波的相位依次为 -150° , -91° , -31° , 30° , 77° 和 151° , 电磁波的反射率分别高达 0.927, 0.780, 0.684, 0.717, 0.823 和 0.964, 电磁波的反射率均大于 0.68。在 $0^\circ \sim 57.6^\circ$ 入射角范围内,以 1.8° 的间隔进行参数扫描,得到两种极化下反射电磁波的相位为 -150° 、 -90° 、 -30° 、 30° 、 90° 和 150° 时的单元结构参数,将这些

单元以图 1(d) 的分布方式依次布置在球冠上,得到图 3(b) 所示的施加有设计单元结构的最终曲面球冠模型。

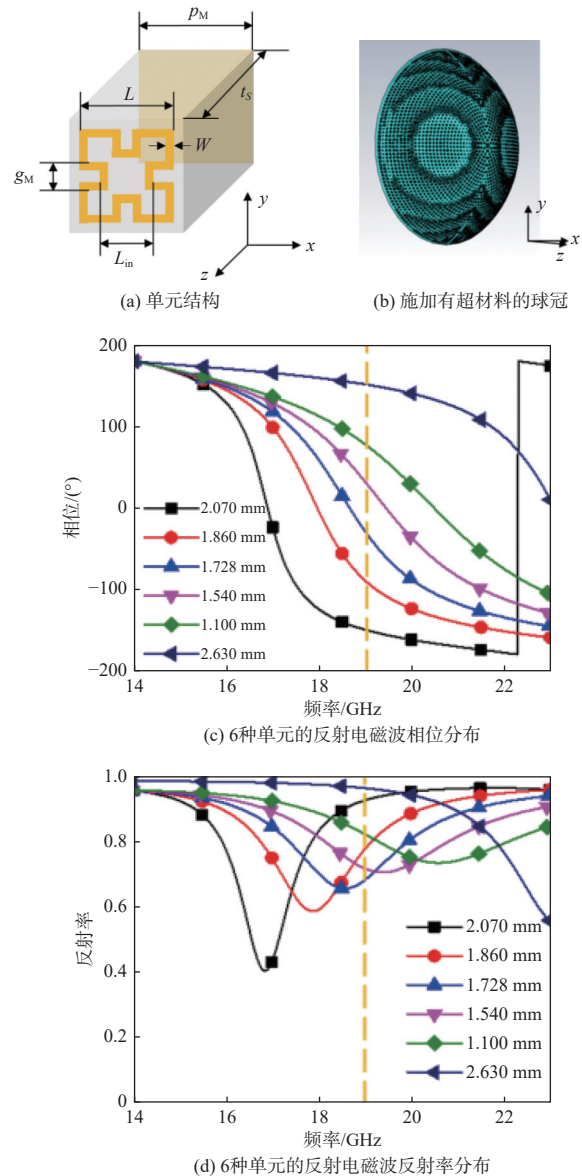


图 3 超材料单元与球冠型曲面光学窗口

Fig. 3 Unit of metamaterial and spherical crown optical window with curved surface

为了实现具有可见光-红外波段的光学透明电磁屏蔽光学窗口,分别用如图 4(a) 所示图案化 EMMM 和完整 EMMM 来替换图 3(a) 单元结构中顶部的图案化金属膜层和底部的完整金属膜,并通过对比替换操作前后单元结构的反射特性,验证替换的合理性。选取电磁波入射角为 0° 、 14.4° 、 28.8° 、 43.2° 和 57.6° 这 5 个特定角度,以及 -30° 、 -150° 、 30° 、 90° 和 150° 这 5 个相位梯度进行分析。其中,几何

结构参数 L 分别是 1.728 mm、2.080 mm、1.680 mm、1.300 mm 和 2.500 mm, 表 1 给出这几种情况下对应的电磁波反射率和反射电磁波的相位。由于采用的 EMMM 具有高占空比特征, 其图案化有可能导致在边缘处产生非连续金属栅线, 进而导致单元结构的反射电磁波相位改变。分析结果表明, 在所有考察参数中, 反射电磁波相位的最大变化量可达到 46.0° 。为了解决上述问题, 在图案化 EMMM 的边缘引入导电环, 通过导电环的连续性, 确保其导电区域不变, 如图 4 所示。对比表 1 中第 4 列与第 8 列的数据可知, 反射电磁波的相位差异优于 7.3° 。由此可见, 由顶部带导电环的图案化

EMMM、基底与底部完整 EMMM 所构成的复合型超材料表面结构, 能够在微波波段同时实现有效的虚拟赋形和可见光-红外波段的高光学透过率^[25]。

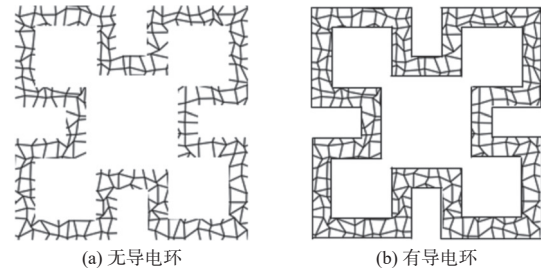


图 4 基于图案化 EMMM 的单元结构

Fig. 4 Structural unit based on patterned EMMM

表 1 三类单元结构在 5 组参数下反射电磁波的反射率和相位

Table 1 Optical reflectance and phase of reflected electromagnetic wave of 3 structural units with different parameters

结构参数	入射波	金属膜		网栅型无导电环		网栅型有导电环	
入射角	极化方向	反射率	反射相位	反射率	反射相位	反射率	反射相位
$L=1.728\text{ mm}$ $\theta=0^\circ$	TE	0.682	-31.0°	0.726	-77.0°	0.679	-30.6°
$L=2.080\text{ mm}$ $\theta=14.4^\circ$	TE	0.929	-151.8°	0.960	165.9°	0.935	-158.3°
$L=1.680\text{ mm}$ $\theta=28.8^\circ$	TE	0.637	29.4°	0.575	-14.4°	0.629	26.1°
$L=1.300\text{ mm}$ $\theta=43.2^\circ$	TM	0.843	90.3°	0.843	90.3°	0.845	90.7°
$L=2.500\text{ mm}$ $\theta=57.6^\circ$	TM	0.956	149.4°	0.927	127.6°	0.949	142.1°

2 结果与分析

为验证虚拟赋形效果, 对 3 种不同结构进行了全波数值仿真与分析。3 种结构简要描述如下: 结构一具有完整 EMMM 的曲面球冠, 对应仅具有电磁波屏蔽能力的传统光学窗口; 结构二具有复合超表面的曲面球冠, 对应所提出的具有微波散射特性与基底面型解耦特性的光学窗口; 结构三双金属斜板, 即赋形目标。根据前文中对图案化 EMMM 的微波散射特性的研究结果可知, 金属薄膜与带导电环的图案化 EMMM 可互相替换。同时, 根据前期对 EMMM 结构的微波散射特性的研究结果可知, 在选定的参数条件下, 可以利用金属薄膜近似代替 EMMM^[26]。因此, 为了减小仿真中的计算量, 利用金属薄膜替代“结构一”和“结构二”中的完整 EMMM, 利用图案化金属薄膜代替“结构二”中的图案化 EMMM, 这两种方案对应的样件分别为 PEC 球冠和 MS 球冠, 具体结构如图 5(a) 和 5(b) 所示。

利用 Farfield / RCS(远场/雷达散射截面)监视器, 得到前述 3 种结构的三维远场分布, 如图 5(a)~

5(c) 所示。图 5(d)~图 5(f) 为相应的随方位角 φ 和仰角 θ 变化的二维远场分布图。其中, 仰角 θ 是球极坐标系下某个方向 (r, θ, φ) 与 z 轴的夹角, 当该方向与 z 轴重合时, $\theta=0^\circ$ 。图 5 中场强度均以强度最大值为基准进行归一化处理, 显示 $-40\text{ dB} \sim 0\text{ dB}$ 。

从图 5(a) 和图 5(d) 可以看出, 入射到 PEC 球冠的电磁波呈现均匀散射特性, 即散射电磁波沿着各个方向传播; 图 5(b) 和图 5(e) 结果显示, MS 球冠调控了入射电磁波, 使得散射电磁波主要集中在方向 $(54.4^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(54.4^\circ, 180.0^\circ)$ 上; 图 5(c) 和图 5(f) 中双金属斜板则将入射电磁波反射至方向 $(50.0^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(50.0^\circ, 180.0^\circ)$ 上。因此, MS 曲面球冠和倾斜金属板具有基本相似的电磁波调控特性。数值仿真结果表明, 设计的图案化 EMMM 复合超表面能够有效调控曲面球冠光学窗口的微波散射方向, 实现与双金属斜板类似的散射特性, 证明所提出的虚拟赋形方法的有效性。

根据上述曲面球冠结构区域划分规则以及利用金属薄膜替代 EMMM 的设计思路, 数值计算仿真表明两者的结果仅存在较小的误差。因此, 文

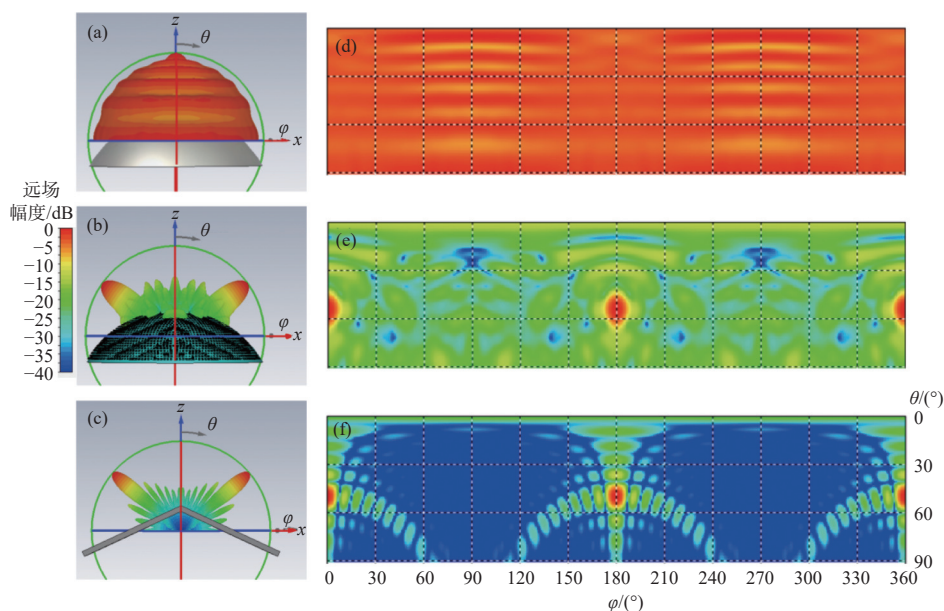


图 5 频率为 19 GHz 时 3 种不同结构的仿真结果

Fig. 5 Simulated results of the proposed 3 units for 19 GHz

中提出的曲面球冠虚拟赋形方法和相应的数值计算仿真结果,为调控曲面光学窗口的微波散射特性提供了重要的理论依据。如果进一步引入优化算法,则可以实现改进设计,不仅能够提高数值计算模拟的准确性,还可以更精确地调控微波散射特性。

3 结论

在航空航天和军事国防等领域中,随着电子技术和电磁波技术的发展,设施、设备和装备的光学窗口面临着电磁干扰强、雷达散射截面有待缩减及窗口基底面型复杂等挑战。本文提出了一种面向曲面光学窗口的虚拟赋形方法,核心是将 EMMM 图案化,拟构建微波段散射特性可调的光学透明谐振单元。针对球冠型曲面光学窗口的特点,利用复合超表面实现了赋形对象微波散射特性的精确调控。数值计算结果表明,施加在球冠型曲面光学窗口上的复合超表面,能够将 19 GHz 入射微波有效调控到方向 $(54.4^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(54.4^\circ, 180.0^\circ)$ 上,与赋形目标双金属斜板的预定散射方向 $(50.0^\circ, 0.0^\circ)$ 和 $(50.0^\circ, 180.0^\circ)$ 基本一致。由此可见,结合 EMMM 的可见光-红外波段高光学透过率和均匀分布金属栅线的低成像干扰性能,提出的虚拟赋形方法,对于含光学窗口设施、设备和装备的设计具有重要意义。此外,该设计方法还可用于智能通信和可穿戴设备等需要透明导电膜的领域。

参考文献:

- [1] HAN M, YIN X, HANTANASIRISAKUL K, et al. Anisotropic MXene aerogels with a mechanically tunable ratio of electromagnetic wave reflection to absorption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1900267.
- [2] TIAN K, HU D, WEI Q, et al. Recent progress on multifunctional electromagnetic interference shielding polymer composites[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 134: 106-131.
- [3] HUANG Z, CHEN H, HUANG Y, et al. Ultra-broadband wide-angle terahertz absorption properties of 3D graphene foam[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(2): 1704363.
- [4] LIU P, WANG L, CAO B, et al. Designing high-performance electromagnetic wave absorption materials based on polymeric graphene-based dielectric composites: from fabrication technology to periodic pattern design[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 27(5): 6745-6754.
- [5] XU G, ZHANG J, ZANG X, et al. 0.1~20 THz ultra-broadband perfect absorber via a flat multi-layer structure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23177.
- [6] WANG H, JI C, ZHANG C, et al. Highly transparent and broadband electromagnetic interference shielding based on ultrathin doped Ag and conducting oxides hybrid film structures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(12): 11782-11791.

- [7] 马礼举, 胡博, 张翔. 光学窗口电磁屏蔽性能分析与验证[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 55-59.
MA Liju, HU Bo, ZHANG Xiang. Analysis and test of electromagnetic shielding effectiveness of optical window[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 55-59.
- [8] HARTMANN R. Airborne flir optical window examples[J]. *Window & Dome Technologies & Materials III*, 1992, 1760: 86-96.
- [9] BRIGHT C I. Broadband EMI shielding for electro-optical systems[C]//IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Chicago: IEEE, 1994: 340-342.
- [10] 师云云, 徐均琪, 苏俊宏. 多组分复合薄膜的光学、电学、机械性能及其应用[J]. *应用光学*, 2020, 41(2): 405-420.
SHI Yunyun, XU Junqi, SU Junhong. Optical, electrical and mechanical properties and applications of multicomponent composite films[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 405-420.
- [11] MANIYARA R A, MKHITARYAN V K, CHEN T L, et al. An antireflection transparent conductor with ultralow optical loss ($<2\%$) and electrical resistance ($<6\ \Omega\ \text{Sq}^{-1}$)[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13771.
- [12] EL-MAGHRABI H. Electromagnetic shielding effectiveness calculation for cascaded wire-mesh screens with glass substrate[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2018, 33(6): 641-647.
- [13] HAN Y, LIN J, LIU Y, et al. Crackle template based metallic mesh with highly homogeneous light transmission for high-performance transparent EMI shielding[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25601.
- [14] ZHONG H, HAN Y, LIN J, et al. Pattern randomization: an efficient way to design high-performance metallic meshes with uniform stray light for EMI shielding[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7008-7017.
- [15] WANG H, LU Z, LIU Y, et al. Double-layer interlaced nested multi-ring array metallic mesh for high performance transparent electromagnetic interference shielding[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1620-1623.
- [16] LIANG Z, ZHAO Z, PU M, et al. Metallic nanomesh for high-performance transparent electromagnetic shielding[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(3): 796-806.
- [17] TAN J, LU Z. Contiguous metallic rings: an inductive mesh with high transparency, strong electromagnetic shielding, and uniformly distributed stray light[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 790-796.
- [18] WANG H, LU Z, TAN J. Generation of uniform diffraction pattern and high EMI shielding performance by metallic mesh composed of ring and rotated sub-ring arrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22989-23000.
- [19] 陆振刚. 基于圆环和双层金属网栅结构的光学窗电磁屏蔽方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LU Zhengang. Electromagnetic shielding methods for optical windows based on ring and double-layer metallic meshes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [20] YU N, GENEVET P, KATS M, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [21] YANG J, HUANG C, WU X, et al. Dual - wavelength carpet cloak using ultrathin metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(14): 1800073.
- [22] JIANG Z, LIANG Q, LI Z, et al. A 3D carpet cloak with non - euclidean metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(19): 2000827.
- [23] GAO L, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. *Light Science & Applications*, 2015, 4(9): e324.
- [24] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.
LI Xiong, MA Xiaoliang, LUO Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.
- [25] ZHONG H, LIU N, YANG Z, et al. Visible-infrared transparent coding metasurface based on random metal grid for broadband microwave scattering[J]. *ACS Applied Electronic Materials*. 2021, 3(11): 4870-4876.
- [26] 钟慧. 金属栅格电磁超材料的微波散射特性调控及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHONG Hui. Modulation of microwave scattering properties of electromagnetic metamaterial based on metal mesh and relevant applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.