

幅值可控的逆反射和镜像反射双通道 超表面结构拓扑优化设计*

史鹏飞¹⁾ 马馨莹¹⁾ 向川¹⁾ 赵宏革^{1)†} 李渊²⁾ 高仁璟^{3)‡} 刘书田³⁾

1) (大连海事大学船舶电气工程学院, 大连 116023)

2) (武汉理工大学, 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

3) (大连理工大学, 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116023)

(2023 年 5 月 13 日收到; 2023 年 9 月 5 日收到修改稿)

对斜入射电磁波产生包含逆反射通道的双反射通道, 对于提高目标识别性能、导航性能等具有重要意义. 在双通道反射中, 控制逆反射与镜像反射占比则是实现反射功率分配的关键. 为实现双通道反射功率占比的可控, 本文提出了一种双通道反射超表面微结构拓扑优化设计方法. 构建了包括逆反射的双通道反射超表面实现机理及物理模型, 建立了具有特定逆反射与镜像反射幅值比值或占比的超表面微结构拓扑优化模型. 作为数值算例, 针对 TE 模式下频率为 10 GHz 俯仰角 -30° 方向入射平面波, 对逆反射与镜像反射功率比 1:1 的双通道反射器进行设计, 所设计超表面在 $\pm 30^\circ$ 方向表现出较强的方向性, 两方向反射幅值大小相等. 同时, 对具有最大逆反射占比的反射超表面进行设计, 逆反射功率占总功率比值为 0.093, 无镜像反射及其他方向奇异反射, 超表面强反射集中在 -30° , 主波束功率占总反射功率比为 0.900. 仿真及实验测试结构均验证了所提方法的可行性.

关键词: 超表面, 双通道, 拓扑优化

PACS: 78.67.Pt, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.72.20230775

1 引言

近年来, 由于包括下一代移动通信等无线设备的高速发展, 相关领域对多径传输特征表现出了突出的技术需求, 反射面(体)的多通道反射特性引起了相关领域研究人员的重视, 其中, 对包含逆反射通道的多通道反射面(体)的研究显得尤为突出. 逆反射是一种反射波沿其入射路径返回的特殊电磁、光学及声学物理现象, 其满足广义斯涅尔定律, 然而无法由自然界已有物质直接实现, 为打破该限

制, 包括复晶格超光栅在内的一些特异反射机制被陆续提出^[1-4]. 随着逆反射理论的深入和实现形式及工艺不断推陈出新, 其已广泛覆盖光波段、厘米波及毫米波波段、声波波段, 并在卫星定位、目标识别等领域表现出了巨大的应用潜力^[5,6]. 自然物质自身并不具备与生俱来的逆反射特性, 多通道反射中如何实现逆反射则成为了需要重点解决的问题. 常用逆反射机制主要包括两种: 以金属角反射器、角形梯度光栅、U 形反射波导为代表的局部立体空间内多次镜像反射或折射机制; 以龙勃透镜为代表的空间材料的非均匀化引导机制^[7-10]. 然而,

* 国家自然科学基金(批准号: U1808215)、湖北省教育厅科学研究计划指导项目(批准号: B2022620)和深圳市科技计划(批准号: JSGG20200102155001779)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaohg@dlmu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: renjing@dlut.edu.cn

已有反射器多以三维立体结构为基础, 严重限制了其装备背景. 为实现小型化的双/多向反射表面的逆反射通道, 研究人员提出了基于相位调控的二维平面型逆反射通道实现机制^[11,12].

2011年 Yu 等^[13]指出相位差可由不同辐射单元结构实现, 其使用不同 V 型谐振结构产生感应相位差, 通过对其进行梯度相位的一维排列, 实现了光波段的一维逆反射. 基于此思想, 进一步研究表明, 在超表面阵列单周期内搭建被动金属格栅, 各格栅相位响应差异使斜入射电磁波的梯度相位反向, 该逆向梯度响应相位可产生反向波束赋形^[14-16]. 基于梯度相位的逆反射实现机理, 更多的梯度相位实现形式被提出用以满足不同的背景需求^[17]. 针对离散型梯度相位超表面, 推导表明基于梯度相位实现逆反射时单周期所需的最小格栅数为两个, 单周期内两个结构产生 360° 的相位变化即可实现这种二进制逆反射器^[18,19], 该种二进制超表面可以实现高反射率的逆反射. 文献^[20]基于二进制超表面模型, 以六边形作为最小格栅单元, 设计了三向同性逆反射超表面. 目前研究中逆向单通道反射得以实现, 即在逆反射角方向获取高反射功率, 而在保证逆反射方向具有一定反射功率比例同时具有常规镜像反射特性的反射器同样是被需要的. 具有特定空间响应相位分布的非周期性超表面被发现可用于波的反射、折射等传播方向的控制, 同样包括针对不同极化形式的逆反射, 其基于不同阵元位置反射相位的叠加, 然而该种超表面需要较大的阵列规模^[21]. 文献^[22-25]指出, 以包含梯度相位的超胞阵列组成周期阵列, 在不同的超胞边长与波长比时反射会在多反射通道内发生镜像反射、逆反射或寄生反射等多通道反射, 一定比例下可同时实现镜像常规反射和逆反射, 而对于如何控制各通道反射强度没有给出答案.

斜入射波激励下超表面产生包括逆反射的多通道反射中, 超表面对不同通道表现出不同的梯度相位, 同时表现出不同的响应阻抗, 响应阻抗决定了对应通道反射功率, 而基于一维排列栅型相位梯度超表面在梯度相位前提下调整响应阻抗目前仍没有系统的方法. 反射器包含逆反射通道本身较难实现, 在此基础上控制不同通道反射占比则变得更加复杂. 以周期性超表面的一个超胞作为设计域, 获取合理的贴片分布可实现周期内所需 360° 相位差, 同时获取对应通道下具有所需阻抗的微结构成

为重要的设计目标. 拓扑优化在解决包括电磁微结构在内的均匀化材料设计中表现出优异的可行性, 通过调整优化离散设计域内材料排布, 获取具有最优模型特性参数的可行解. 在逆反射超表面设计中, 微结构对其响应具有决定性作用, 微结构更充分的细节易于精确控制自身反射相位及阻抗特性; 常规尺寸或形状优化难以找到设计域内针对相位及阻抗的共同敏感区域, 而拓扑优化对局部区域有充分的考虑, 同时获取合理的相位及阻抗特性, 避免基于典型结构的尺寸优化受限于初始微结构的问题.

基于以上分析, 本文对包含逆反射的双通道反射器实现模型进行了设计, 提出了具有特定逆反射、镜像反射比值或占比的反射器微结构的拓扑优化方法, 对其进行算例设计及验证, 验证了所提方法的有效性.

2 包含逆反射的双通道反射机理

斜入射电磁波照射到常规反射表面, 反射波沿不同反射路径到达同一出射点, 则光程及到达相位均相同. 设反射表面沿表面切向响应相位差为 $d\phi_x$, 反射角 θ_r 与入射角 θ_i 的关系为

$$k_0 n_0 \sin \theta_i dx = k_0 n_0 \sin \theta_r dx - d\phi_x, \quad (1)$$

其中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为波数, λ_0 为入射波波长, n_0 为介质折射率, 无切向梯度下反射介质表面发生常规镜像反射.

然而, 反射介质表面具有特定相位梯度时, 则介质表面可满足一组以上入射、反射波和透射波边界条件, 介质表面可能会表现出多通道反射特性. 如果反射介质为周期性介质, 则反射介质表面的反射通道数取决于其周期特性, 当周期 d 小于入射波波长 λ_0 , 反射介质表面仅表现出通常的镜像反射, 当 $d > 2\lambda_0$ 时, 介质表面可能具有 3 个以上反射通道. 周期 $\lambda_0 < d \leq 2\lambda_0$ 的前提下, 介质表面可能具有 $+\theta_r$ 或 $-\theta_r$ 向双通道反射^[25], 如图 1 所示. 在该尺寸范围内设定周期尺寸, 对 (1) 式进一步推导, 即化为广义斯涅耳定律:

$$\sin \theta_i - \sin \theta_r = \frac{\lambda_0 d\phi_x}{2\pi n_0 dx}. \quad (2)$$

为在反射介质表面获取相位梯度, 引入周期性梯度电磁超表面, 周期内相邻子域沿反射表面切向等间

隔排列, 为简化设计, 设相位仅沿 x 方向线性变化, 无 z 向相位梯度, 则 $\phi_x = 2\pi x/(2d)$, 为使超表面的响应中包含逆反射通道, (2) 式应存在满足 $\theta_i = -\theta_r$ 的解, 超胞在尺寸满足下式情况下包含逆反射通道, 即: $2d = \lambda_0/\sin\theta_i$. 进一步, 设单周期内波数满足条件 $k_g = 2\pi/d = 2k_0 \sin\theta_i$, 则为包含逆反射通道, 单周期内仅需包含最小相位梯度单元数 N 为

$$N = 2 \times \text{round} \left(\frac{k_0}{k_g} \right) = 2 \times \text{round} \left(\frac{1}{2 \sin\theta_i} \right). \quad (3)$$

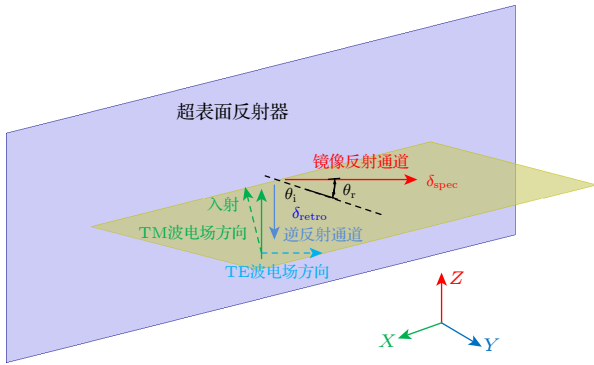


图 1 介质表面镜像反射通道和逆反射通道

Fig. 1. Specular reflection and retroreflection of medium surface.

当入射角 $\theta_i \geq 19.5^\circ$, $N = 2$ 条件下超表面可包含逆反射通道, 即单周期内包含 2 个离散子结构单元. 为简化设计, 在满足超胞产生双通道反射的尺寸限定下, 考虑以包含 2 个子结构的超胞进行双通道反射器设计.

由 (2) 式可知, 逆反射超表面的工作频率严重依赖于阵列超胞尺寸, 所产生响应相位及阻抗在满足波长与超胞尺寸关系下可严格获取所需最优反射特征. 工作频率的偏移破坏原有相位梯度, 使所需反射特征有一定偏差, 两向辐射功率占比发生改变, 一定的辐射特性容错率下超表面具有一定的工作带宽.

在所提超胞尺寸限定下, 通过调整超表面特性实现对镜像反射通道的反射占比 δ_{spec} 和逆反射通道反射占比 δ_{retro} 的控制. 以贴附金属微结构的介质板为超表面实现基体, 如图 2(a) 所示, 包含平面介质基板、基板后侧满铺的接地导体层和基板前侧二维导体微结构阵列. 取单周期超胞为设计对象, 超胞尺寸设为 $2d \times d$, 以二维周期排列, 超胞是具有满足一定相位及反射阻抗分布的微结构,

图 2(b), (c) 为超胞二维周期阵列及超胞微结构. 为实现针对特定频率、特定入射角的具有特定反射功率比的双通道反射超表面, 对超胞微结构进行优化设计.

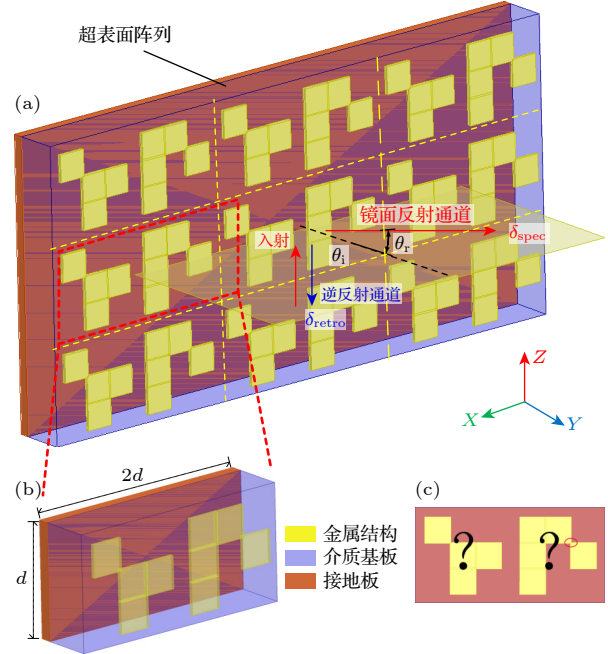


图 2 双通道超表面阵列及超胞 (a) 平面型二维超表面阵列; (b) 超表面超胞; (c) 超表面超胞结构

Fig. 2. Double-channel metasurface array and super unit: (a) 2D planar metasurface array; (b) metasurface super unit; (c) the microstructure of the super unit.

将超胞内正面覆金属区域作为设计域进行微结构设计, 该设计域为规则矩形设计域, 将其划分为离散的周期矩形网格阵列, 网格内贴附金属贴片或为空, 网格内为空时仅为基板表面, 网格内贴片的有无由一维二进制向量 \mathbf{X} 表示, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$. $x_i = 1$ 代表网格内存在金属贴片, $x_i = 0$ 代表空, 以 \mathbf{X} 为设计变量进行优化设计, 即对设计域网格内贴片排布组合进行设计. 为保证相邻网格内贴片的连接性, 设置网格内金属贴片尺寸略大于网格尺寸, 相邻贴片的连接性如图 2(c) 中红圈圈出位置所示.

对超胞内金属网格贴片分布进行优化设计以获取合理的超胞微结构. 超胞在所给定尺寸下可实现包括镜像反射通道、逆反射通道、奇异反射通道在内的多通道反射, 对两通道反射功率建立相应系数方程. 通过数值方法计算超表面阵列远场散射特性 (双站雷达散射截面积, radar cross section, 即双站 RCS), 所扫描俯仰角 θ 向双站 RCS 为 $D(\mathbf{X}; \theta)$.

提取镜像反射方向 (即 θ_r 方向) 和逆反射方向 (即 $-\theta_i$ 方向) 双站 RCS 数值, 分别设置为 $D(\mathbf{X}; \theta_r)$ 和 $D(\mathbf{X}; -\theta_i)$, 为获取特定双通道功率比, 以加权双通道 RCS 差值最小为设计目标, 设两通道功率权重分别为 α 和 β , 同时约束逆反射功率占各俯仰向扫描角度反射总功率比值大于限定阈值 T , 则优化列式表示为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T, \\ & \min_{\mathbf{S}} F(\mathbf{X}; \theta_i) = |\alpha\delta_{\text{spec}} - \beta\delta| \\ & = |\alpha D(\mathbf{X}; \theta_r) - \beta D(\mathbf{X}; -\theta_i)|, \\ & \text{s.t. } \frac{D(\mathbf{X}; -\theta_i)}{\int_{\theta_L}^{\theta_U} D(\mathbf{X}; \theta) d\theta} \geq T, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, θ 为俯仰角向扫描角度, θ_U 和 θ_L 分别为扫描角度上下限. 在此基础上, 若需反射通道尽量由逆反射占据, 可以逆反射通道 (单一逆反射角度下) 功率占各角度总反射功率比值 (即逆反射占比) 最大为设计目标, 优化列式可调整为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T, \\ & \max_{\mathbf{S}} F(\mathbf{X}; \theta_i) = \frac{D(\mathbf{X}; -\theta_i)}{\int_{\theta_{\text{low}}}^{\theta_{\text{up}}} D(\mathbf{X}; \theta) d\theta}. \end{aligned} \quad (5)$$

拓扑优化流程图见图 3. 使用遗传算法作为优化问题的求解算法, 设定优化参数, 包括种群规模 m 、交叉及变异率, 个体基因序列长度为设计变量规模 n , 随机生成初始种群, 比较获取该种群中最优个体, 即 $\exists \mathbf{X}_{\text{opt},1} \in \{\mathbf{X}_{i,1}, i = [0, m]\}$, 在本代种群中设计目标最优. 以本代最优设计变量作为下一代种群父本, 通过交叉、变异生成新生种群, 求解模型并计算设计目标, 进入迭代循环, 规定代数内无更优个体, 则迭代停止, 以当前最优个体作为最优设计变量. 通过数值方法 (包括商用有限元软件) 计算求解超表面远场散射特性, 由 Matlab 软件调用并提取设计目标、控制迭代及优化过程. 基于前述实现机理所设计的超表面针对 TE 及 TM 波均适用 (TE 与 TM 模下电场强度方向如图 1 所示), 但单一微结构构型并非针对两种入射波均可同时实现逆反射通道, 若需要同时实现两种入射模态的逆反射通道, 可在所提单目标优化设计基础上作进一步延展.

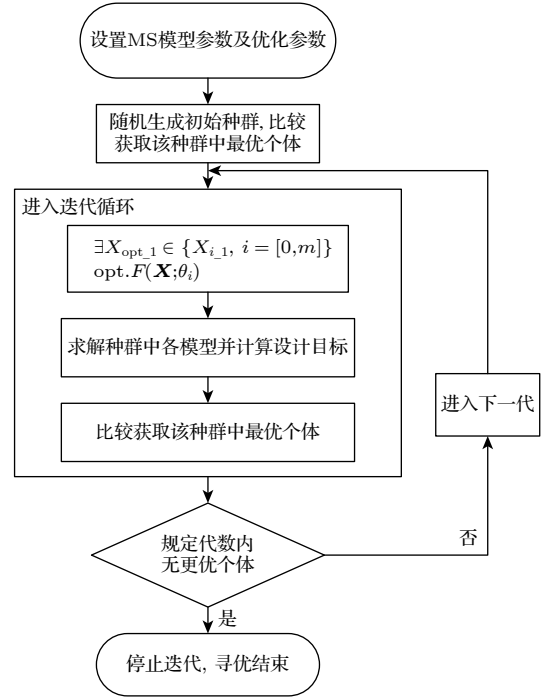


图 3 逆反射超表面拓扑优化流程图

Fig. 3. Flow chart of topology optimization for retroreflection metasurface.

3 数值算例设计

针对包含逆反射及镜像反射的双通道超平面, 所提拓扑优化设计方法为一种一般性方法, 在可达到的工艺水平下受工作频率限制有限. 为验证所提方法的可行性, 对特定入射频率及入射角度下双通道超表面反射器进行数值算例设计及验证. 选择 FR4 作为超表面介质基板, 基板厚度 1.5 mm. 基板上下两侧金属均为铜, 铜层厚度 0.02 mm. 选取 TE 模入射波频率为 10 GHz, 垂直极化电磁波以 $\theta_i = -30^\circ$ 俯仰角斜射向超表面. 计算可得超胞宽度为 $2d = \lambda_0 / \sin \theta_i = 30$ mm, 超胞尺寸 $2d \times d = 30$ mm \times 15 mm, 超胞内各单胞设计域为 12 mm \times 12 mm, 各单胞设计域离散为 12×12 网格, 尺寸为 1 mm \times 1 mm, 各贴片尺寸为 1.2 mm \times 1.2 mm.

3.1 两通道反射功率 1:1 反射器

该算例中, 所需超表面反射器在 $\pm 30^\circ$ 方向具有最大反射功率, 希望对超表面进行设计以在 $\pm 30^\circ$ 方向逆反射与镜像反射通道反射功率比为 1:1. 对超表面反射器超胞微结构进行拓扑优化设计, 优化列式如 (4) 式, 模型的数值分析过程由 Ansys HFSS 全波模拟实现. 在反射特性分析中,

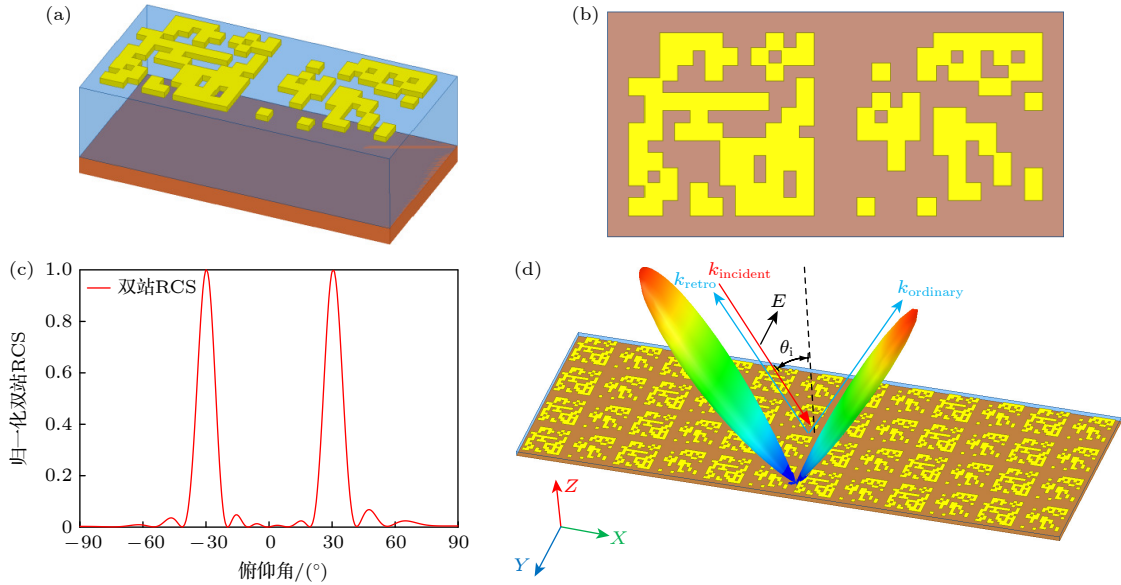


图 4 所设计双通道反射功率 1:1 超表面反射器及反射特性 (a) 超胞; (b) 微结构; (c) 反射器俯仰向归一化双站 RCS; (d) 三维双站 RCS

Fig. 4. Designed double-channel metasurface reflector with a 1:1 ratio of retroreflection power to specular reflection power and its reflection characteristics: (a) The unit cell; (b) the microstructure; (c) the normalized bistatic RCS in the elevation coordinate; (d) the three-dimensional bistatic RCS of the designed reflector.

包围阵列空气盒子所贴附边界为完美匹配层, 入射波为平面波激励, 超表面阵列内超胞数量为 4×6 , 对其归一化双站 RCS 进行计算. 使用遗传算法优化过程中, 种群规模设置为包含 100 个个体, 交叉率 0.5, 变异率 0.04, 6 代及以上种群未有更优个体产生则迭代停止. 经迭代优化后, 最终所设计超胞微结构如图 4(a), (b) 所示. 计算所得其归一化双站 RCS 见图 4(c), 反射器严格在俯仰角 -30° 方向与 30° 方向表现出高反射性, 两方向反射幅值大小相等, 由三维辐射方向图 4(d) 可见其波束较窄, 在 $\pm 30^\circ$ 方向表现出较强的方向性.

仍以 10 GHz 及俯仰角 -30° TE 波照射全金属反射器, 对其反射特性进行计算. 由图 5 表明, 该反射器仅在 30° 方向具有常规的镜像反射, 无法产生逆反射通道. 同时, 需要强调的是, 使用常规结构实现逆反射通道是较困难的, 而获取包含逆反射通道的双通道反射并且反射功率占比可控的反射器同样具有一定的难度. 在满足单胞尺寸范围的前提下, 通过寻优可以寻到的反射器微结构形式数量十分有限, 并非任意的微结构形式均可产生逆反射.

对所设计超表面进行实验测试验证, 实验平台示意图如图 6(a) 所示. 将超表面测试试件水平放置, 一个喇叭天线作为发射天线固定在一端所需入

射角度的摇臂上, 另一个天线作为接收天线固定在旋转摇臂, 用于测试各反射角度下超表面反射效率, 两个喇叭天线通过同轴线与矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 连接, 通过对所需频点双端口 S_{21} 参数的读取得到角度扫描下的反射特性. 所制备超表面试件如图 6(b) 所示, 采用覆铜板刻蚀工艺制备, 试件尺寸 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 二维阵列中包含 10×10 个超胞. 以最大反射功率进行散射参数归一化, 测试结果如图 6(c) 所示, 反射器在 -28° 和 28° 方向上反射最大, 幅值近似相等, 在 $\pm 30^\circ$ 方向归一化双站 RCS 幅值高于 0.90, 测试结果与仿真结果基本接近. 所测最大幅值方向较所

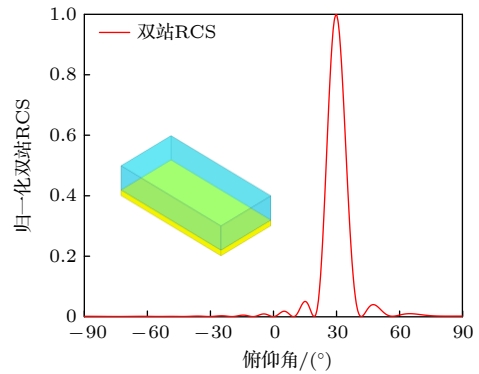


图 5 仅金属接地板归一化双站 RCS

Fig. 5. Normalized bistatic RCS of the reflector only with metallic ground.

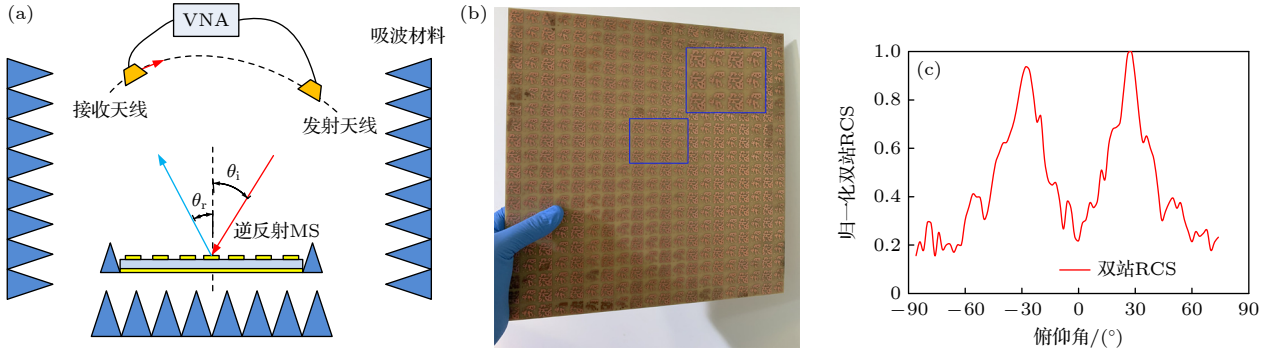


图 6 双通道超表面实验测试平台及结果 (a) RCS 测试示意图; (b) 所设计超表面试件; (c) 测试所得反射特性

Fig. 6. Experimental platform for the double-channel metasurface reflector testing and the tested results: (a) The schematic diagram of the RCS testing platform; (b) the designed metasurface specimen; (c) the tested reflection characteristics.

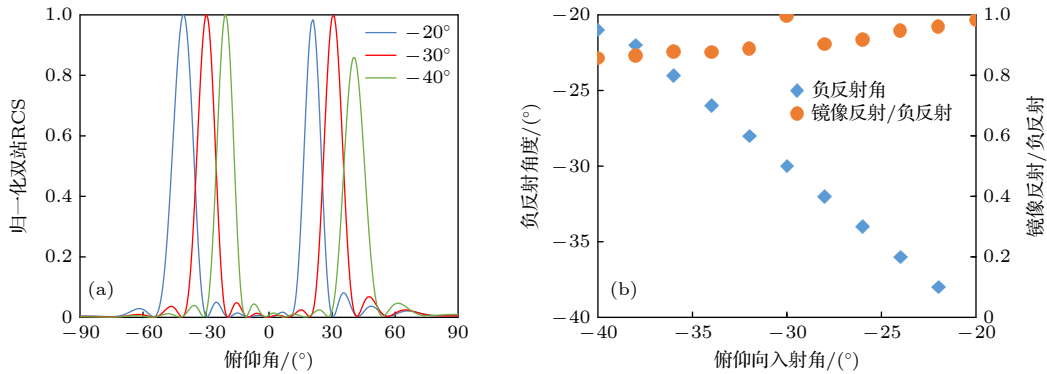


图 7 入射角度偏差下的反射功率 1:1 超表面反射特性 (a) 归一化双站 RCS; (b) 负反射角度及镜像反射与负反射幅值比

Fig. 7. Reflection characteristics of the metasurface with a 1:1 ratio of retroreflection power to specular reflection power when the incident angle is adjusted: (a) The normalized bistatic RCS of the metasurface; (b) the retro-reflection angle and ratio between the specular reflection and retro-reflection.

需方向相差 2° , 主要误差来源包括制备误差、平台及试件放置误差。

讨论入射角度及频率偏差下超表面反射特性. 首先对入射波的入射角 (俯仰角向角度) 偏差所产生的反射特性的影响进行分析. 保持方位角 0° 不变, 调整入射角由 -30° 至 -20° . 入射角偏移情况下超表面不再发生逆反射, 而是在入射角度负方向发生反射, 反射角与入射角居于超表面法线同侧但夹角不等大, $\theta_i \neq -\theta_r$, 即负反射. 负反射及镜像反射方向均向低数值角度方向偏转, 分别偏转至 -40° 和 20° . 调整入射角由 -30° 至 -40° , 则负反射及镜像反射方向均向高角度方向偏转, 分别偏转至 -20° 和 40° , 而负反射 (峰值) 与镜像反射通道内幅值比值保持较稳定状态. 对入射波工作频率偏差对反射特性的影响进行分析, 如图 7 所示. 设定若幅值容错 (幅值差值) 在 ± 0.50 , 则超表面工作频率在 9.7—10.5 GHz, 带宽 0.8 GHz, 此时两通道反射角分别漂移至 -32° 和 -26° , 如图 8 所示.

3.2 逆反射占比最大反射器

为验证所提方法的通用性, 对两通道具有不同反射功率占比的超材料微结构进行设计, 该算例给出一种特殊设计需求, 即双通道中具有最大逆反射占比, 同样以 -30° 为入射波照射方向, 超表面反射器要求在 -30° 方向具有最大反射功率. 优化列式如 (5) 式, 拓扑优化所设计超胞微结构如图 9(a), (b). 计算所得其归一化双站 RCS 如图 9(c) 所示, 反射器在 -30° 方向具有最大反射幅值, 逆反射功率占总功率比值 (即 -30° 方向反射功率占总反射功率比值) $F(S; \pi/6) = 0.093$, 第一旁瓣在 -15° 方向最大幅值为 0.006. 超表面阵列使入射平面波沿初始入射方向发生反射, 无镜像反射及其他方向奇异反射, 半功率波束宽度 10° . 主波束功率占总反射功率比为 0.900. 实验试件尺寸参数与前述相同, 实验测试所得辐射特征表明超表面强反射集中在 -30° , 其他方向具有极低反射功率, 见图 9(d).

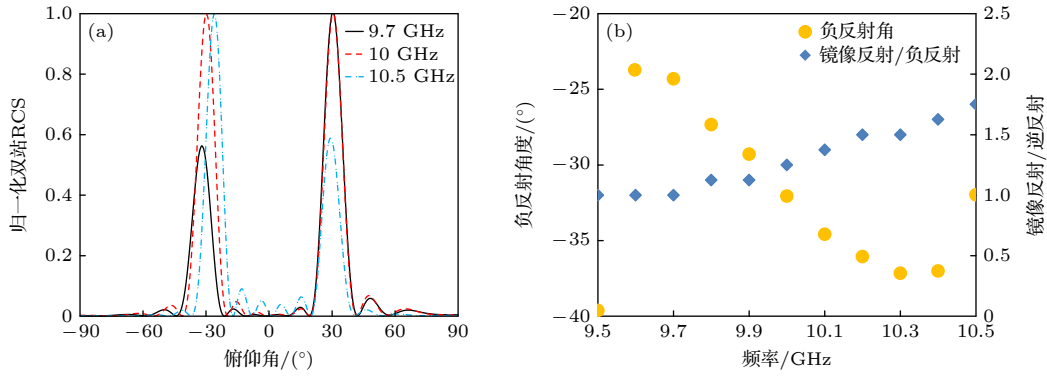


图 8 入射波频率偏差下的反射功率 1:1 超表面反射特性 (a) 归一化双站 RCS; (b) 负反射角度及镜像反射与负反射幅值比
 Fig. 8. Reflection characteristics of the metasurface with a 1:1 ratio of retroreflection power to specular reflection power when the frequency of the incident wave is biased: (a) The normalized bistatic RCS of the designed metasurface; (b) the retroreflection angle and the ratio between the specular reflection and retroreflection.

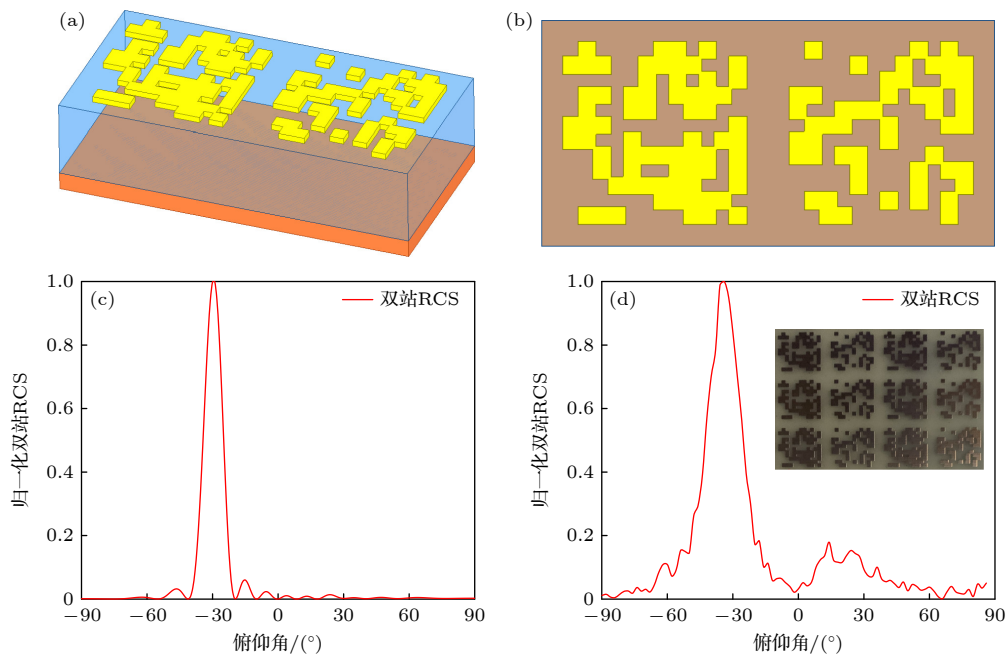


图 9 所设计的逆反射占比最大超表面反射器及反射特性 (a) 超胞; (b) 微结构; (c) 俯仰向归一化双站 RCS; (d) 测试所得反射特性及所设计超表面试件
 Fig. 9. Designed metasurface reflector with the maximum retroreflection ratio and its reflection characteristics: (a) The unit cell; (b) the microstructure; (c) the normalized bistatic RCS in the elevation coordinate; (d) the tested radiation pattern and the metasurface retroreflector prototype.

分析俯仰向入射角度偏差下超表面负反射角度和逆反射占比的变化, 仿真计算所得结果如图 10. 调整入射角由 -40° 至 -20° , 入射波方向在 -26° 至 -34° 变化过程中, 逆反射占比始终高于 0.05, 所设计反射器表现出了一定的入射角度容错性. 分析入射波频率偏差对超表面反射特性影响, 所分析频率范围在 9—11 GHz, 如图 11 所示. 当频率高于 10.4 GHz, 负反射即消失, 当入射波频率由 9 GHz 升至 10.4 GHz 过程中, 主波束方向逐渐由 -38° 漂

移至 -27° , 逆反射占比在 9.4 GHz 升至 10.2 GHz 范围内始终高于 0.05.

4 结 论

本文提出了一种用以实现双通道反射的超表面实现形式, 双通道反射可同时包含镜像反射及逆反射. 建立了针对特定频率及斜入射角度入射波的双通道反射功率占比可控的超表面微结构拓扑优化方法, 搭建了双通道超表面微结构拓扑优化模

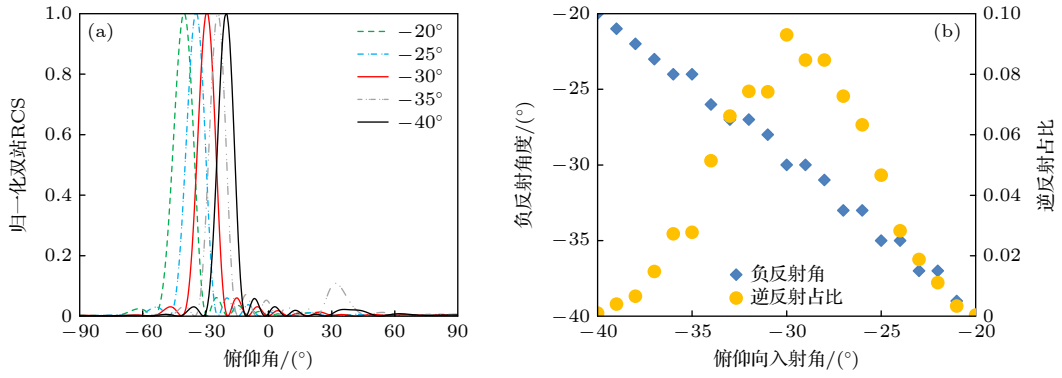


图 10 入射角度偏差下的逆反射占比最大超表面反射特性 (a) 归一化双站 RCS; (b) 负反射角度及逆反射功率占比
 Fig. 10. Reflection characteristics of the metasurface with the maximum retroreflection ratio when the incident angle is adjusted: (a) The normalized bistatic RCS of the metasurface; (b) the retroreflection angle and retroreflection ratio under excitation of incident waves with different incident angle.

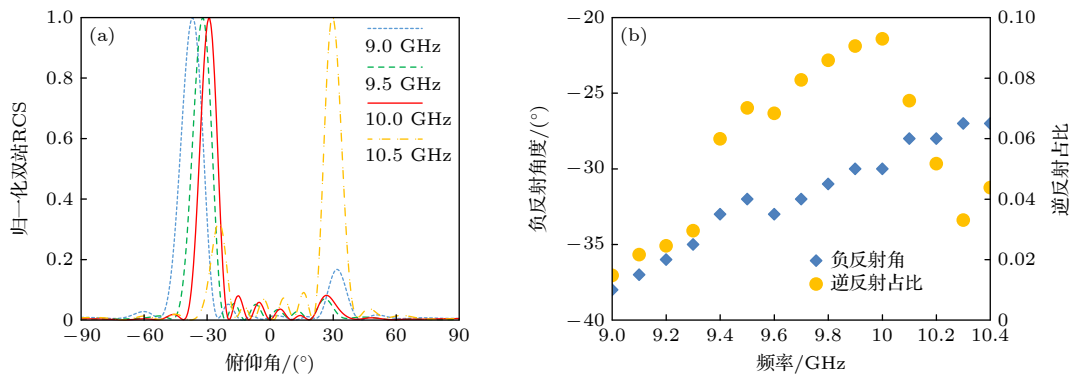


图 11 入射波频率偏差下的逆反射占比最大超表面反射特性 (a) 归一化双站 RCS; (b) 负反射角度及逆反射功率占比
 Fig. 11. Reflection characteristics of the metasurface with the maximum retroreflection ratio when the frequency of the incident wave is biased: (a) The normalized bistatic RCS of the designed metasurface; (b) the retroreflection angle and retroreflection ratio under excitation of incident waves with different frequencies.

型. 针对 10 GHz 入射角度 -30° 入射波, 分别以镜像反射与逆反射权值 1:1、具有最大逆反射占比的反射器为例, 对两种超表面阵列形式及微结构进行设计, 所得超表面可满足两通道反射功率占比要求, 仿真及实验结果验证了所提方法的可行性.

参考文献

[1] Kuga Y, Ishimaru A 1984 *J. Opt. Soc. Am. A* **1** 831
 [2] Yang D Q, Wang L, Wang X L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054301 (in Chinese) [杨丹青, 王莉, 王新龙 2015 物理学报 **64** 054301]
 [3] Sheng Q, Geng J N, Wang A H, Wang M, Qi Y, Liu J J, Fu S J, Shi W, Yao J Q 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 044203 (in Chinese) [盛泉, 耿婧旋, 王爱华, 王盟, 齐岳, 刘俊杰, 付士杰, 史伟, 姚建铨 2023 物理学报 **72** 044203]
 [4] Yang R, Fan Y, Zhu W, Hu C, Chen S, Wei H, Chen W, Chang C T, Zhao Q, Zhou J, Zhang F, Qiu C W 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2200975
 [5] Jin X, Holzman J F 2010 *IEEE Sens. J.* **10** 1875
 [6] Vitaz J A, Buerkle A M, Sarabandi K 2010 *IEEE Trans.*

Antennas Propag. **58** 3539
 [7] Deroba J C, Sobczak K D, Good A, Larimore Z, Mirotznik M 2019 *IEEE Aero. El. Sys. Mag.* **34** 20
 [8] Kim H, Lee B 2007 *Opt. Eng.* **46** 094002
 [9] Kadera P, Jimenez-Saez A, Burmeister T, Lacik J, Jakoby R 2020 *IEEE Access* **8** 212765
 [10] Chang C C, Chen T Y, Tsai J C 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 554
 [11] Pon C Y 1964 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **12** 176
 [12] Yan L, Shen Z 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 736
 [13] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tettienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
 [14] Hessel A, Schmoys J, Tseng D Y 1975 *J. Opt. Soc. Am.* **65** 380
 [15] Jull E V, Heath J W, Ebbeson G R 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 557
 [16] Ra'Di Y, Soumas D L, Alu A 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 067404
 [17] Hoang T V, Lee C H, Lee J H 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 2451
 [18] Wong A M H, Eleftheriades G V 2017 *Phys. Rev. X* **8** 011036
 [19] Wong A M H, Christian P, Eleftheriades G V 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 2892
 [20] Lee S G, Lee J H 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69**

3588

Phys. Rev. Appl. **13** 044040

- [21] Tao C, Itoh T U 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 6193
- [22] Estakhri N M, Alù A 2016 *Phys. Rev. X* **6** 041008
- [23] Wang X C, Díaz-Rubio A, Li H, Tretyakov S A, Alù A 2020

- [24] Wang X, Díaz-Rubio A, Tretyakov S A 2020 *Phys. Rev. Appl.* **14** 024089
- [25] Asadchy V S, Díaz-Rubio A, Tsvetkova S N, et al. 2017 *Phys. Rev. X* **7** 031046

Topology optimization design of dual-channel metasurface structure with controllable amplitude of retroreflection and mirror reflection*

Shi Peng-Fei¹⁾ Ma Xin-Ying¹⁾ Xiang Chuan¹⁾ Zhao Hong-Ge^{1)†}Li Yuan²⁾ Gao Ren-Jing^{3)‡} Liu Shu-Tian³⁾

1) (*School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116023, China*)

2) (*National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks,*

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

3) (*State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

(Received 13 May 2023; revised manuscript received 5 September 2023)

Abstract

For oblique incident electromagnetic waves, the generation of double reflection channels including retroreflection channel is of great significance in improving target recognition performance and navigation performance. In double channel reflection, controlling the ratio of retroreflection to specular reflection is the key to realizing reflection power distribution. In order to realize the control of the proportion of the reflected power in each channel, a topology optimization method for designing the reflective metasurface microstructure with dual channel is proposed in this paper. The implementation mechanism is investigated, physical model of metasurface with dual reflection channel including retroreflection channel is established, and the topology optimization model of metasurface microstructure with specific power ratio of the retroreflection to specular reflection is established. As a numerical example, a dual channel metasurface reflector with a 1:1 ratio of retroreflection power to specular reflection power is designed for a 10 GHz plane wave in the TE mode with a pitch angle of -30° . The designed metasurface exhibits strong directionality in the retroreflective direction, and the reflection amplitudes in both directions are similar. The retroreflective metasurface with the maximum retroreflection ratio is designed. The retroreflection ratio of the designed metasurface is 0.093. There is no specular reflection or other singular reflection, and the strong reflection on the metasurface is concentrated at -30° . The ratio of the main beam power to the total reflection power is 0.900. The simulated and experimental results verify the feasibility of the proposed method.

Keywords: metasurface, dual channel, topology optimization

PACS: 78.67.Pt, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.72.20230775

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1808215), the Guidance Project of Scientific Research Program of Department of Education of Hubei Province, China (Grant No. B2022620), and the Program of Science and Technology of Shenzhen, China (Grant No. JSGG20200102155001779).

† Corresponding author. E-mail: zhaohg@dlmu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: renjing@dlut.edu.cn



幅值可控的逆反射和镜像反射双通道超表面结构拓扑优化设计

史鹏飞 马馨莹 向川 赵宏革 李渊 高仁璟 刘书田

Topology optimization design of dual-channel metasurface structure with controllable amplitude of retroreflection and mirror reflection

Shi Peng-Fei Ma Xin-Ying Xiang Chuan Zhao Hong-Ge Li Yuan Gao Ren-Jing Liu Shu-Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 247801 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230775

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230775>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拓扑优化的自由形状波分复用超光栅

Freeform wavelength division multiplexing metagrating based on topology optimization

物理学报. 2022, 71(22): 224204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221013>

基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料

Broadband absorbent materials based on topology optimization design

物理学报. 2018, 67(21): 217801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181170>

微纳尺度体点导热的拓扑优化

Topology optimization of the volume-to-point heat conduction problem at micro- and nano-scale

物理学报. 2019, 68(20): 200201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190923>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

新型手性电磁超材料非对称传输性能设计分析

Analysis and design of new chiral metamaterials with asymmetric transmission characteristics

物理学报. 2020, 69(21): 214101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200728>

简单结构超表面实现波长和偏振态同时复用全息显示新方法

A new method of implementing simultaneous multiplexing holographic display of wavelength and polarization state with simple structure metasurface

物理学报. 2021, 70(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201047>