

基于超构表面的低散射天线阵列

朱 瑛, 段 坤, 杨维旭, 罗歆瑶, 赵俊明, 陈 克, 冯一军

(南京大学电子科学与工程学院, 南京, 210023)

摘要 提出了一种将超构表面与天线阵列组合设计的方法,以同时实现高增益辐射和低背向散射功能。该超构表面由多层金属图案结构组成,对 x 极化入射波具有透射功能,从而能使天线辐射场低损耗透过;同时,对 y 极化入射波具有反射相位调制功能,通过将单元按照棋盘格或随机分布排列,可实现 y 极化入射波的漫散射功能,从而降低天线阵列的后向散射。仿真分析表明,所设计的低散射天线阵列峰值增益为18.8 dB,工作带宽约为12.5%。当探测波为 x 极化时,10 dB RCS缩减频带为9.5~10.1 GHz,覆盖天线工作频带,最大缩减值为25 dB;当探测波为 y 极化时,10 dB RCS缩减频带为7.8~12 GHz,最大缩减值高于35 dB。实测结果与仿真分析结果吻合良好。该低散射天线阵列利用超构表面的极化选择特性能实现透、反射功能集成设计,为低散射天线的研究提供了新的思路。

关键词 雷达散射截面;微带天线;超构表面;散射缩减

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.004

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0030-07

A Low Scattering Antenna Array Based on Meta-Surface

ZHU Ying, DUAN Kun, YANG Weixu, LUO Xinyao, ZHAO Junming, CHEN Ke, FENG Yijun

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract This paper proposes a method of combining the meta-surface with antenna array to realize high-gain antenna array with simultaneous low backward scatterings. The meta-surface composed of multi-layered structure is characterized by allowing the x -polarized wave to transmit the y -polarized wave to reflect. Therefore, the radiation from an x -polarized antenna array can pass through the meta-surface, and at the same time, diffusion scattering occurs when the out-of-phase meta-atoms are used to form the checkerboard or random arrangement. The simulated results show that a peak gain of 18.8 dB and an operating band of around 12.5% can be obtained by the method. When the finding wave is x -polarization, the RCS of the antenna reduces by 10 dB from 9.5 GHz to 10.1 GHz and the peak reduction is 25 dB, covering the operating band of the antenna. For y -polarized incidence, 10 dB RCS reduction can be achieved from 7.8 GHz to 12 GHz, and the peak reduction is over 35 dB. The measured results are identical with the simulated results. The proposed design method can reduce the RCS effectively by using the transmission-reflection-selective meta-surface, and the above-mentioned provides low-scattering antenna design with a new path.

Key words radar cross section; micro-strip antenna; meta-surface; RCS reduction

收稿日期: 2021-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0700201);国家自然科学基金(62071215,91963128,61801207,61731010)

作者简介: 朱 瑛(2000—),女,甘肃天水人,硕士生,研究方向为电磁超构表面。E-mail:471252186@qq.com

引用格式: 朱瑛,段坤,杨维旭,等.基于超构表面的低散射天线阵列[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(1):30-36. ZHU Ying, DUAN Kun, YANG Weixu, et al. A Low Scattering Antenna Array Based on Meta-Surface[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 30-36.

天线作为无线电设备中信号收发关键器件,被广泛应用于各个领域。为了提升装备之间的通信质量,通常要求其满足高增益、低副瓣等更为优越的辐射性能。但是,天线也是一个较强的散射体,若不经过低散射设计,会提高装备被敌方探测和打击的风险,降低其在战场中的生存几率^[1]。因此,研究如何在保证天线较好辐射性能的同时减小天线的雷达散射截面(radar cross section, RCS),有着重要的科学意义和应用价值。

国内外研究人员为了缩减天线 RCS,进行了大量研究。根据天线在工作时电流分布与辐射的不均匀性,通过调整几何形状重新定向散射波的方法可使后向散射最小化,如将天线设计为昆虫触手的形状^[2]。但是这种方式设计制备难度大,耗资多,且天线结构复杂度高,应用效果并不十分理想。另有研究人员将吸波结构放置于天线背板或设计频率选择性吸波结构,使入射波的电磁能量以热能的方式耗散,从而降低天线的 RCS^[3-4]。这种方法设计的 RCS 缩减方案带宽较宽、覆盖频段范围较广,但结构整体尺寸较厚,并有可能导致天线辐射能量损失。

近年来,超构表面(metasurface, MS)因其特异的电磁特性而广受关注,它由若干个亚波长单元排布在一个表面上构成^[5-10]。通过设计其空间分布特性进而可实现一系列新颖的电磁调控功能,如涡旋波生成器^[11]、隐身斗篷^[12]等。当超构表面单元之间具有一定的反射相位差时,根据相位相消原理,散射波无法有效叠加,从而可以降低超表面在特定方向的 RCS^[13-14]。2017 年有研究人员通过将 2 个像素化的单元进行棋盘格排布,最终可在相对带宽为 95% 的范围内实现 10 dB RCS 缩减^[15]。此外,有研究表明,通过优化算法,将 2 个相位差在 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的超构表面单元随机排列,超构表面可以在 15.5~26.5 GHz 和 30.5~40.5 GHz 的工作频带内实现 10 dB 散射缩减^[16]。近年来,利用超构表面缩减天线 RCS 的研究已经取得了较好的进展,且超构表面在加工成本以及低剖面等方面更具优势,但关于如何实现更宽带、更宽角域的 RCS 缩减仍然需要进一步的研究与探索。

本文针对高增益的微带天线阵列设计及其 RCS 缩减技术进行了研究。首先设计了工作于 X 波段的 4×4 贴片天线阵列。为了降低该天线的 RCS,设计了一种具有极化选择特性的透反一体超构表面,并将其与天线阵列组合工作。加载超构表面后,天线阵列原有的辐射性能基本不受影响。同时,该天线阵列的背向 RCS 也得到抑制,尤其是对 y 极化探测波而言,几乎可以在整个 X 波段内实现 10 dB 的 RCS 缩减。

1 天线阵列设计与仿真分析

微带贴片天线由一块厚度远小于波长的介质基板一面刻蚀金属辐射贴片、另一面为全金属地面组成。经过馈电,辐射贴片和接地面之间会激励出电磁场,通过贴片周围与接地面间的缝隙进行辐射。由于其具有低剖面、易共形、易集成等优点,微带天线已经被大量应用于卫星通信、雷达、遥感检测和个人无线设备等。

本文设计的微带天线阵列基本辐射单元为经典的矩形贴片微带天线,贴片长度 L 与宽度 W 可根据经典公式得到^[17]。为了降低馈电网络的复杂度,对微带贴片单元采用底部馈电的方式。

天线单元采用介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.002 的 F4B 材料作为介质基板,设计的中心工作频率为 10 GHz,根据微带天线工作原理,结合 CST Microwave Studio 软件的仿真分析结果进行优化,最终贴片单元结构以及参数如图 1 所示,其中 $L = 8.74$ mm, $W = 11.86$ mm, $X_f = 2.5$ mm, $h_1 = 2$ mm, $h_2 = 0.5$ mm, $d_1 = 0.4$ mm, $d_2 = 1.38$ mm。

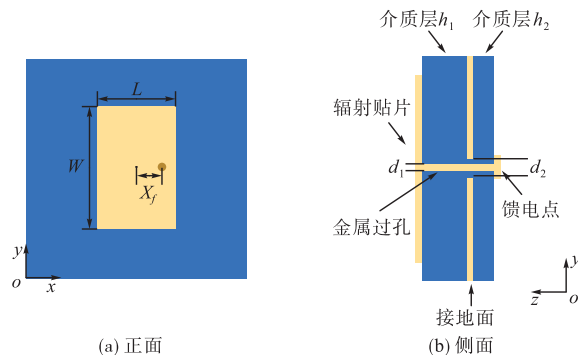


图 1 贴片单元结构示意图

本文设计的微带天线阵列,每个单元采用等幅同相激励,以此在法向获得最大方向性系数。为了实现等幅同相馈电,设计了一个 4×4 并联功分馈电网络,同样选择 F4B 作为介质基板,厚度 $h_2 = 0.5$ mm。利用四分之一波长阻抗变换线和威尔金森功分器的基本原理,调节各个馈线的特性阻抗,使馈电点和总输入端口位置的阻抗为 50Ω ,馈电网络具体结构如图 2 所示。

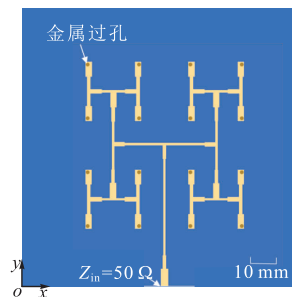


图 2 馈电网络结构示意图

将贴片单元按照 24 mm 的间距组合成 4×4 的微带天线阵列。馈电网络放置于地板的下层,通过金属过孔与辐射贴片相连。这种设计方法可以减小馈线的串扰对辐射效率的影响,同时还可实现馈电网络与天线的分模块设计,降低设计复杂度,单元的排布方式也有更高的自由度。

天线阵的反射系数以及增益-频率曲线的仿真结果如图 3 所示,在 9.15~10.3 GHz 的范围内,阵列的输入端口反射系数保持在 -10 dB 以下,相对带宽约为 11.8%,且在此频段内天线的增益保持在 17 dB 以上,3 dB 增益带宽为 15.2% (9~10.48 GHz)。图 4 为阵列在 10 GHz 处的归一化远场方向图,副瓣电平与交叉极化都维持在比较低的水平。综上所述,所设计的天线阵工作带宽较宽且辐射性能良好。

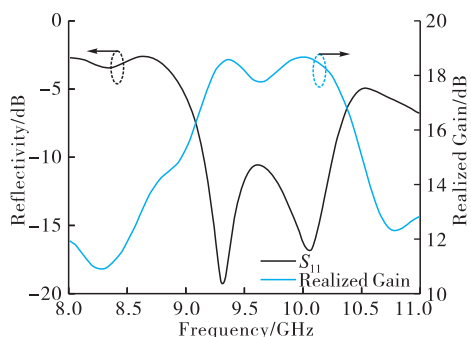


图 3 天线阵列同轴输入端口反射系数及增益曲线

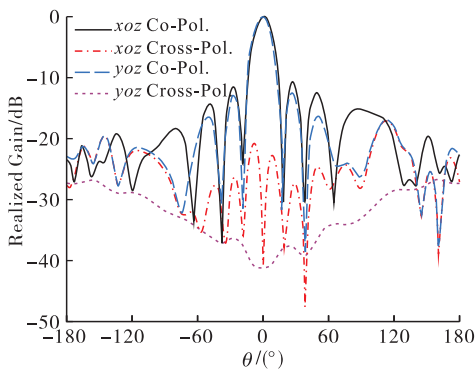


图 4 天线阵列归一化远场方向图

2 超构表面设计

为了在降低天线 RCS 的同时尽量不破坏其辐射性能,本文设计了一种基于极化选择原理的透反射功能一体化超构表面,即对 x 极化入射波具有高透射功能,且各超构表面单元的透射相位差近似为 0,保证天线较高的辐射效率。与此同时,对 y 极化入射波而言,超构表面单元的反射率较高,不同单元

之间的反射相位差在 180° 左右,通过设计特定的单元排布,能够实现对 y 极化波的漫散射功能,从而降低背向散射能量强度,最终实现天线阵列的 RCS 缩减。

2.1 超构表面单元设计与仿真分析

与相同大小的金属板相比,低散射结构表面 RCS 的缩减值可以由下式计算得到^[18]:

$$\text{RCS} = 20 \log |sA_1 e^{jP_1} + (1-s)A_2 e^{jP_2}| \quad (1)$$

式中: s 表示单元 1 在超构表面上的占比; A 表示反射幅度; P 表示反射相位;下标 1、2 分别对应两种单元。假设 2 种单元的反射相位都等于 1,通过式(1)可分析得,实现 10 dB RCS 缩减的前提是 2 个单元的反射相位差介于 $143^\circ \sim 217^\circ$ 之间。因此,为了实现最佳的 RCS 缩减效果,超构表面中的 2 种单元数量需保持相等。

根据上述分析,研究并设计了超构表面单元,该单元由 3 层金属与 2 层厚度相同的介质板构成,如图 5 所示。介质选用相对介电常数为 4.3,损耗角正切为 0.03 的 FR4,每个单元①、②层贴片的尺寸相同,多层设计有助于拓展工作带宽。通过调节上 2 层贴片的长度 l_y ,可对 y 极化入射电磁波实现不同的反射相位响应。第③层在 x 方向与前 2 层相等, y 方向与单元周期相等。该层被设计为极化栅结构,可以实现极化选择性透反功能。最终,通过改变 y 方向上贴片的尺寸,可以实现对 y 极化波的反射相位调控。单元的具体参数如表 1 所示。

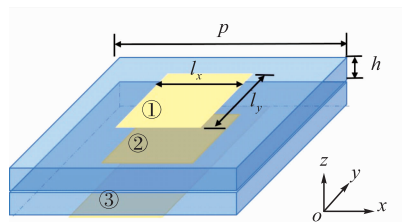


图 5 超构表面单元结构示意图

表 1 超构表面单元尺寸参数 单位:mm

	p	h	l_x	l_y
Element 1	7.6	1.5	5.4	5
Element 2	7.6	1.5	5.4	1.5

图 6 为 2 个单元对不同极化入射波的电磁响应。当 x 极化电磁波垂直入射到单元表面时,在天线的工作频带内,单元的透射率绝大部分保持在 -2 dB 以上,且相位相差不大;对于 y 极化的入射波,在 10 GHz 附近,单元的反射率保持在 -1 dB 之上,且在 7.4~12.1 GHz 内反射相位差可以保持在 $180^\circ \pm 37^\circ$ 范围内,满足 RCS 缩减 10 dB 的条件。

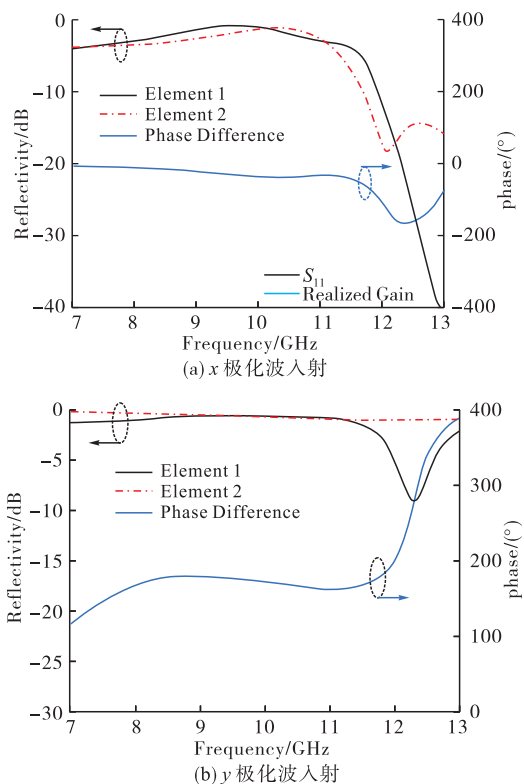


图 6 超构表面单元的宽带电磁响应

2.2 超构表面阵列仿真分析

为实现背向散射缩减的功能,这里将上述单元排列成 2 种结构:8 × 8 的超单元组成棋盘格分布和 4 × 4 的超单元组成随机分布。当 y 极化探测波垂直入射到表面时,棋盘格分布会将入射波分裂成 4 个波束进行反射,而随机分布结构由于其单元的非周期性排布,会发生不规则的反射,如图 7 所示。这种棋盘格或随机分布的方式,可以将 y 极化入射波“打散”,随机分布于非背向位置,从而减小背向散射能量,实现对背向 RCS 的缩减。

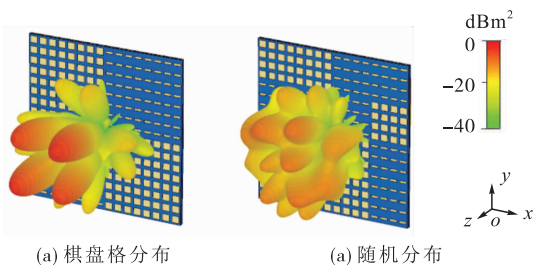


图 7 超构表面归一化散射方向图

当探测信号为 x 极化时,在 10 GHz 左右,绝大部分的入射能量都能透射过超构表面,并且能够覆盖上节设计的天线的工作带宽。将超构表面与天线组合后,当天线不工作时,即端口处接匹配负载时,也可以实现在天线工作频段内实现 RCS 的缩减。

如图 8 所示,相比于相同大小的金属板,y 极化入射波的 10 dB 缩减带宽约为 45.5%,与单元反射相位差在 143°~217°的带宽基本一致;对 x 极化波,

由于能量透射,背向散射强度也得到了降低。这 2 种相位分布下的超构表面的工作带宽和 RCS 缩减强度略有偏差,主要是由于仿真分析单元时使用的是周期边界条件,而构成超构表面的单元实际上是非周期分布的,因此不同的排布方式可能导致单元之间的耦合不同,而这些相互耦合作用会对单元的性能有所影响。

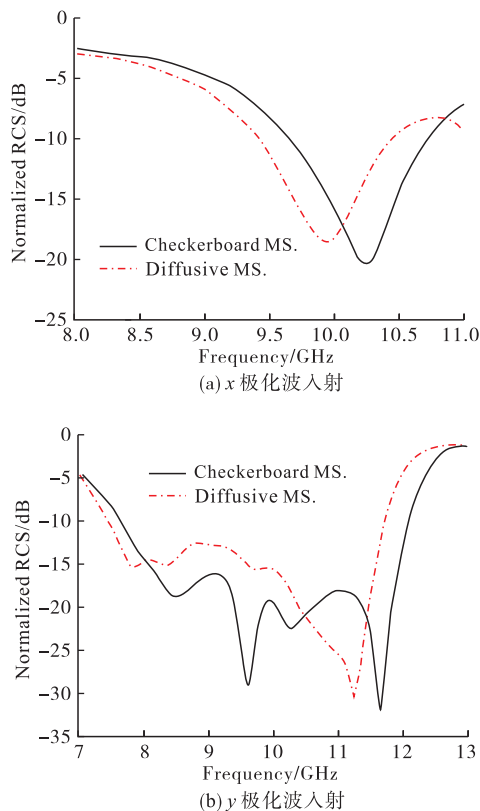


图 8 超构表面的归一化 RCS 曲线图

3 低散射天线阵列性能验证

3.1 仿真验证

将上述 2 个超构表面以 12 mm 的间距与天线阵列组合,通过 CST 仿真验证整个低散射天线阵列的性能。图 9(a)为加载超构表面前后的 S₁₁ 以及增益曲线对比图,将超构表面放置于天线阵列上方合适的位置,超构表面与天线阵列之间会有一些的耦合作用,有助于天线阵列的匹配调谐,使得低散射天线阵列的带宽会向低频略有扩展,且带内平坦度变好,最终在 9~10.2 GHz 和 9.2~10.1 GHz 的频带内可以实现 S₁₁ 分别小于 -10 dB 与 -15 dB。由于低散射天线阵列阻抗带宽变宽,相比未加载超构表面的微带阵列天线,3 dB 增益带宽也有一定的拓展,可以达到 17%。结合 3 种结构在 10 GHz 处的 E 面远场方向图(图 9(b))可知,加载超构表面对于天线的增益、带宽以及方向图无不良影响,且有一定

的改善作用,与该研究的设计初衷相符。

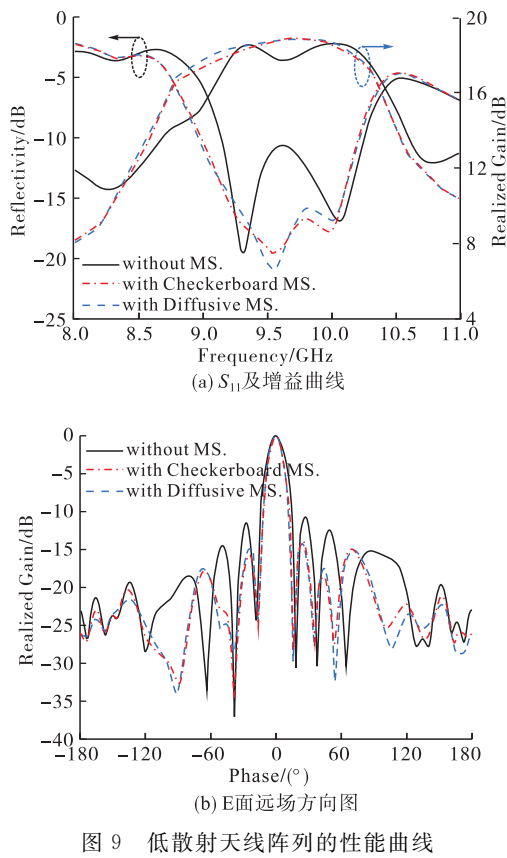


图9 低散射天线阵列的性能曲线

相比于未加载超构表面的天线阵列,低散射天线阵列的归一化 RCS 值如图 10 所示,可见所设计的超构表面对 x 、 y 极化探测波的散射均有一定程度的抑制。对于 x 极化波,可以在约 6% 的相对带宽内实现 10 dB RCS 缩减;对于 y 极化波,由于超

构表面的漫散射作用,背向散射能量低,RCS 的缩减效果也更为明显,10 dB RCS 缩减频带约为 7.8~12.1 GHz,覆盖了整个 X 波段。

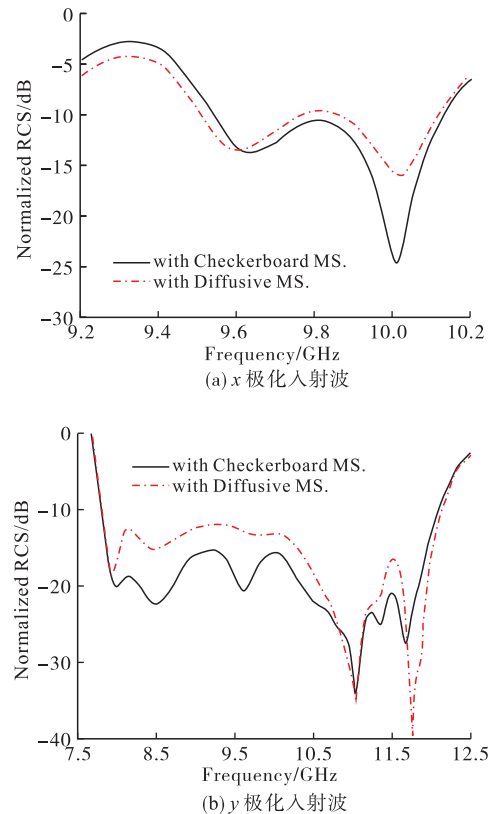


图10 低散射天线阵列归一化 RCS 曲线

表 2 所示为本文工作与文献[19~22]的对比,本文所设计低散射天线阵列的辐射性能和 RCS 缩减带宽均有一定优势。

表2 本文与其他文献工作对比

文献	尺寸/ λ	相对带宽 ($S_{11} < -10$ dB)	峰值增益/ dB	3 dB 增益 相对带宽	RCS 缩减相对带宽/ (10 dB)	RCS 缩减 峰值/dB
本文	4.2×4.2	12.5%	18.8	17%	x 极化: 6% y 极化: 43.2%	x 极化: >15 y 极化: >35
[19]	2.2×2.2	20%	<18		x 极化: <10% y 极化: 11%	x 极化: 17.1 y 极化: 13.1
[20]	4×4		19.8	4.8%	x 极化: <10% y 极化: <10%	x 极化: 3.8 y 极化: 16.4
[21]	1.9×1.9	5.5%	14.13		30%	17
[22]	1.3×0.8	6.3%	9.5			10

3.2 加工与测试

为了进一步验证本文提出的设计方法以及上述结构的各项性能,对设计的天线阵及超构表面进行样品加工与实验测试,样品如图 11 所示,其中,从左至右依次为微带贴片天线阵列、棋盘格超构表面,随机分布超构表面。测试环境如图 12 所示,样品加工使用标准的印刷电路板工艺制作。天线的性能测试在标准微波暗室中进行,并且利用标准喇叭天线来

校准待测样件的实际增益。RCS 的测量采用 2 个宽带喇叭天线与矢量网络分析仪 (Agilent E8363A)。喇叭天线对称地放置在样品法线的两侧,分别充当发射机与接收机。首先测量与样品尺寸相同金属板的 RCS,并将其作为基准,继而对低散射天线阵列的归一化 RCS 进行测试。由于对样品而言,入射角为 5° 时的散射性能与垂直入射时差别较小,受测量条件的限制,下列 RCS 的测试均将 5° 斜

入射看作垂直入射。

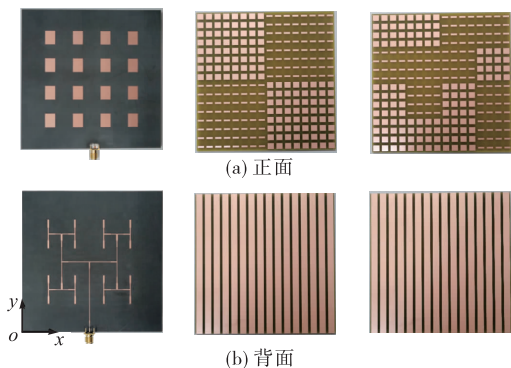


图 11 天线阵列及超构表面样品

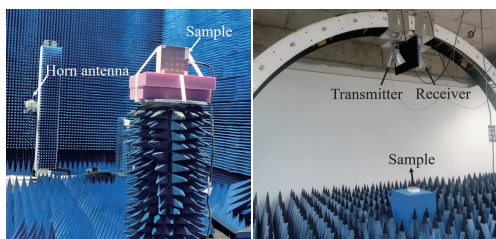
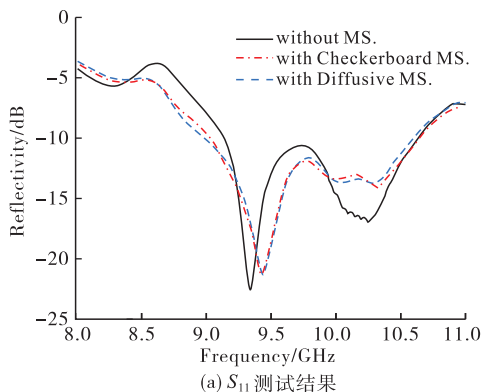
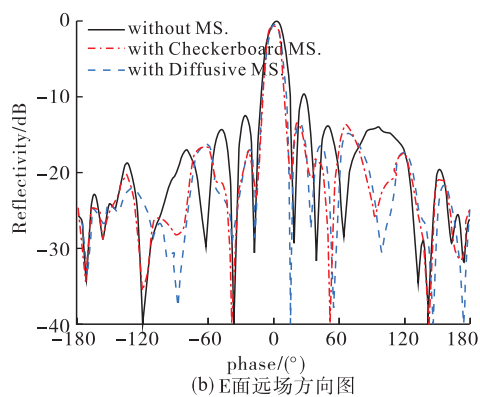


图 12 测试环境

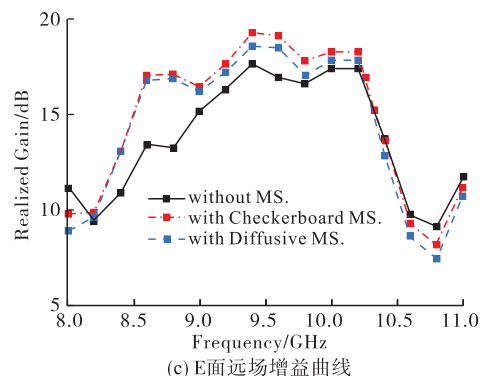
整个结构的辐射性能与散射性能测试结果如图 13 所示。图 13(a)为加载超构表面前后的 S_{11} 测试结果,反射系数小于 -10 dB 的频带范围约为 $9 \sim 10.55$ GHz。由于加工组装误差以及介质材料参数偏差等因素的影响,实测工作频带向高频偏移了 300 MHz 左右,但总体来说与仿真结果吻合良好。图 13(b)和(c)分别为在微波暗室中测得的 E 面远场方向图与增益曲线。加载棋盘格分布超构表面与随机分布超构表面的天线阵列最大增益接近 19 dB, 3 dB 增益带宽约为 17% ,与仿真结果基本一致。图 13(d)和(e)为相较于天线阵列,引入超构表面后的归一化 RCS 曲线,具有这 2 种相位分布的超构表面均可在一定的频带宽度内降低散射,且由于漫散射作用,对 y 极化探测波效果更为明显。由于加工与测试误差,实测结果较仿真结果向低频略有偏移,高频处的衰减稍有减小,但整体趋势与仿真基本相符。



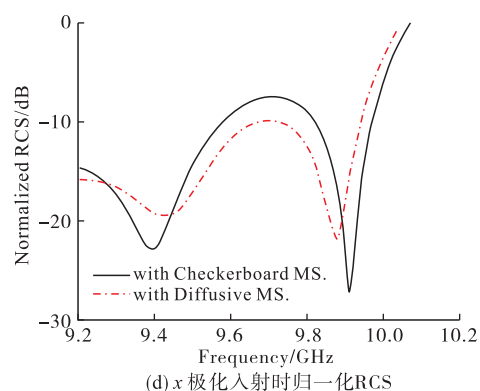
(a) S_{11} 测试结果



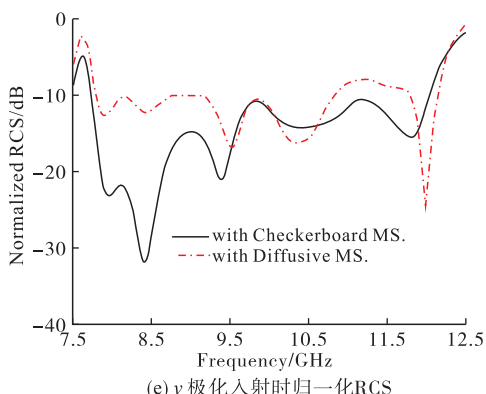
(b) E面远场方向图



(c) E面远场增益曲线



(d) x 极化入射时归一化RCS



(e) y 极化入射时归一化RCS

图 13 低散射天线阵列性能实测结果

4 结语

本文设计了由微带天线阵列与超构表面组合而成的低散射天线阵列。为了降低设计复杂度,减小

馈线之间的串扰及寄生辐射等因素对天线性能的影响,将天线的辐射贴片与馈电网络分别设计在两层介质基板上。所设计的超构表面具有极化选择特性,对天线工作极化(x 极化)的电磁波具有高透射功能,保证了天线的辐射性能;对 y 极化波,通过单元的特定排布,能够实现对入射波的漫散射作用,降低其背向RCS。经仿真分析与实验验证,所设计的低散射天线阵列辐射性能良好,可以实现 $9\sim 10.2$ GHz的工作带宽,最大增益可达 18.8 dB。在X波段内天线的背向散射得到了缩减,对 y 极化探测波效果更为明显,平均衰减值可达 10 dB以上。该方法有望进一步应用于其他天线的散射缩减中。

参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [2] JIANG W, LIU Y, GONG S X, et al. Application of Bionics in Antenna Radar Cross Section Reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 1275-1278.
- [3] PADHY S, DE A, DEBATA R R, et al. Design, Characterization, and Optimization of a Multilayer U-Type Hexaferrite-Based Broadband Microwave Absorber [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 1734-1742.
- [4] MU J, WANG H, WANG H Q, et al. Low-RCS and Gain Enhancement Design of a Novel Partially Reflecting and Absorbing Surface Antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1903-1906.
- [5] 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.
- [6] CUI T J, MEI Q Q, WAN X, et al. Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [7] CHEN K, FENG Y J, MONTICONE F, et al. A Reconfigurable Active Huygens' Metalens [J]. Advanced Materials, 2017, 29(17): 1606422.
- [8] WANG J F, QU S B, MA H, et al. High-Efficiency Spoof Plasmon Polariton Coupler Mediated by Gradient Metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(20): 201104.
- [9] CHEN K, DING G W, HU G W, et al. Directional Janus Metasurface[J]. Advanced Materials, 2020, 32(2): 1906352.
- [10] ZHANG N, CHEN K, ZHENG Y L, et al. Programmable Coding Metasurface for Dual-Band Independent Real-Time Beam Control[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2020, 10(1): 20-28.
- [11] DING G W, CHEN K, LUO X Y, et al. Dual-Helicity Decoupled Coding Metasurface for Independent Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion [J]. Physical Review Applied, 2019, 11: 044043.
- [12] TAO H, ZHAO M, XU Y C, et al. Broadband Metasurface Carpet Cloak in the Near Infrared Region[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1281-1284.
- [13] SHI Y, MENG Z K, WEI W Y, et al. Characteristic Mode Cancellation Method and Its Application for Antenna RCS Reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1784-1788.
- [14] 杨家稷,程用志,裴小军,等. X波段柔性编码超表面设计与RCS缩减研究[J]. 微波学报, 2018, 34(3): 26-30.
- [15] 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.
- [16] YASIR,杨国敏,徐丰. 四叶草形超宽带漫散射编码超表面[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 382-390.
- [17] 米利根,郭玉春,方加云,等. 现代天线设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [18] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHER C R. Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2636-2645.
- [19] 郝彪,杨宾锋,高军,等. 基于辐射散射一体化技术的低RCS贴片天线阵列设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 74-79.
- [20] ZHANG L, WAN X, LIU S, et al. Realization of Low Scattering for a High-Gain Fabry-Perot Antenna Using Coding Metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3374-3383.
- [21] ZHANG C, GAO J, CAO X Y, et al. Low Scattering Microstrip Antenna Array Using Coding Artificial Magnetic Conductor Ground[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(5): 869-872.
- [22] 冯奎胜,李娜,杨欢欢. 电磁超构表面与天线结构一体化的低RCS阵列[J]. 物理学报, 2021, 70(19): 120-128.

(编辑:徐楠楠)