



电磁超构表面与天线结构一体化的低RCS阵列

冯奎胜 李娜 杨欢欢

A novel low-RCS antenna array based on integration of electromagnetic metasurface and conventional antenna

Feng Kui-Sheng Li Na Yang Huan-Huan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 194101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210746

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210746>

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

一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计

A coding metasurface antenna array with low radar cross section

物理学报. 2020, 69(24): 244101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200978>

阵列结构下的低频信号合成方法研究

On method of composing low frequency signals based on array structures

物理学报. 2020, 69(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200501>

一种编码式宽带多功能反射屏

A wideband coding reflective metasurface with multiple functionalities

物理学报. 2017, 66(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064203>

基于随机场照射的最优微波成像

Optimal microwave imaging with random field illuminations

物理学报. 2019, 68(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182122>

一种新型的低散射微带天线阵设计

Novel design of microstrip antenna array with low scattering performance

物理学报. 2019, 68(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181708>

一种复合型极化转换表面及其在天线辐射散射调控中的应用

Composite polarization conversion metasurface and its application in integrated regulation radiation and scattering of antenna

物理学报. 2020, 69(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200797>

电磁超构表面与天线结构一体化的低 RCS 阵列*

冯奎胜¹⁾²⁾ 李娜¹⁾²⁾ 杨欢欢^{2)†}

1) (阳光学院人工智能学院, 福州 350015)

2) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2021 年 4 月 20 日收到; 2021 年 5 月 14 日收到修改稿)

提出一种电磁超构表面与天线一体化设计以实现低散射阵列的新方法. 该方法利用传输线将超构表面部分单元串联, 并采用同轴馈电激励, 以此得到新型天线阵列, 该阵列的辐射性能和传统阵列几乎相同; 当外来雷达波照射该阵列时, 利用超构表面和其周围天线结构散射场的差异, 将能量在空间重新分配, 从而实现天线工作频带内的雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩. 基于该方法, 以 2×1 阵列为例, 构建了天线模型, 数值分析了其性能, 验证了该阵列的良好辐射和低 RCS 特征, 并详细阐述了天线的工作机理, 进一步的分析还揭示了超构表面结构对天线辐射和散射性能的影响规律. 遵循该规律, 可以灵活设计满足需求的阵列天线. 该方法不仅简单易行、集成度高, 还可以拓展至更大规模的阵列天线设计.

关键词: 电磁超构表面, 阵列天线, 一体化, 低雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.70.20210746

1 引言

自然界中不同媒质的分界面存在天然金属、介质表面, 电磁波沿这些表面区域的传输遵循经典的 Snell 定律. 2011 年, 哈佛大学 Cappaso 课题组^[1]首次提出电磁“超表面”的概念, 这类表面是将人工构造的金属/介质结构以“原子”的形式按照特定宏观序排列而成. 和天然表面相比, 这类超表面可以突破经典 Snell 定律的限制, 实现对电磁波任意的反射、折射, 甚至是极化方式、传播模式的转换^[2]. 随后, 东南大学崔铁军课题组^[3]提出数字和可编程超表面的概念, 由此, 超构表面的研究如雨后春笋不断涌现, 宽带^[4,5]、多功能^[6,7]、可重构^[8]、可编程^[9,10]等各种高性能的超构表面得到长足发展, 与之相伴的基于超构表面的功能器件, 如高性能天线^[11]、极化转换器^[12]、分频器^[13]、先进透镜^[14]

等也多有报道.

将超构表面用于天线设计为天线技术的发展提供了广阔空间. 尤其值得关注的是, 超构表面还为解决传统天线面临的雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 偏高的难题开辟了全新技术路径^[15–18]. 早在 2007 年, 研究人员就提出利用超构表面的同相反射特性和金属表面产生的反相场抵消^[19], 可以缩减天线 RCS. 而后, 为了增加 RCS 减缩带宽, 研究人员还将两种超构表面或极化旋转超构表面用于天线^[20–23], 在对天线辐射性能影响较小的同时缩减了 RCS. 此外, 我们提出利用超构表面的完美吸波^[24,25]和选择透波^[26]特性, 也可以有效抑制天线散射的峰值. 以上研究表明, 利用超构表面缩减天线工作频带外 RCS 较易实现. 相比之下, 天线工作频带内的 RCS 减缩则要困难得多, 且往往会对天线辐射性能造成影响. 如文献^[27]将超构表面环形加载在波导缝隙天线的金属口面周围, 利用

* 国家自然科学基金 (批准号: 61801508, 61701523, 61671464)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2019JQ-103, 2020JM-350, 20200108, 2020022) 和博士后创新基金 (批准号: BX20180375, 2019M653960) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianye8901@126.com

散射场对消原理使带内 RCS 最大减缩 20 dB 以上, 但天线单元的口径尺寸增加到 $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ (λ 为天线谐振频率对应的工作波长), 同时方向图也发生了变化, 增益提高 1.7 dB. 文献 [28] 将吸波型超构表面加载到波导辐射缝隙周围, 天线带内 RCS 最大减缩 14 dB, 增益下降 0.6 dB. 文献 [29] 基于散射对消和极化旋转机理, 通过在印刷天线周围加载超构表面, 实现了圆极化天线带内带外 6 dB 以上的 RCS 减缩, 同时口径尺寸增大到 $1.6\lambda \times 1.6\lambda$, 天线增益提高 5.6 dB. 文献 [30] 将具有吸波和极化旋转性能的混合型超构表面加载到缝隙天线阵列的上方, 在包含辐射频带的宽带内实现了 RCS 减缩, 天线增益下降 0.8 dB. 这些研究反复证明, 电磁超构表面可以用于缩减天线带内 RCS, 但如何在缩减 RCS 的同时保持天线辐射性能不变依然非常具有挑战性. 总结国内外研究现状可以看出, 天线带内 RCS 减缩仍是当前研究的热点, 实现辐射性能不变且带内 RCS 减缩的难度较大, 相关报道也相对较少. 另一方面, 相较于早期多采用超构表面加载于天线周围缩减其 RCS 的应用方式, 超构表面和天线的一体化具有更紧凑的结构 [18,31,32], 更符合现代电子系统的集成化、小型化的发展趋势. 但怎样兼顾天线与超构表面的结构, 同时综合考虑超构表面性能和天线的辐射、散射性能是其中的关键.

针对上述问题, 本文提出一种电磁超构表面与阵列天线一体化设计的新方法, 该方法以电磁超构表面直接作为天线辐射结构的一部分, 并通过适当的馈电技术实现阵列天线的辐射, 而对于外来雷达波, 电磁超构表面的散射和天线其他结构的散射共同作用, 在空间的散射场叠加对消, 使得阵列天线具有带内低 RCS 特性. 采用提出的方法, 本文设计并仿真、验证了一个二元天线阵, 结果证实了方法的有效性.

2 电磁超构表面与天线结构一体化设计方法

传统印刷微带天线的贴片尺寸近似为半波长, 而电磁超构表面的单元尺寸通常为亚波长, 基于此, 本文提出把超构表面的多个单元相连, 并采用适当的馈电激励构成天线的辐射结构, 此外, 传统微带天线除辐射贴片外还有尺寸略大于贴片的金属地, 故在超构表面之外增加介质地, 由此得到新的天线结构. 为进一步说明该方法的具体实施过程和由该方法设计的天线辐射、散射工作原理, 结合图 1, 以二元阵为例进行详细阐述. 图 1(a) 为提出的超构表面与天线结构一体化设计的三维视图, 图 1(b) 为对应的俯视图. 图 1(c) 为传统微带天线阵列的俯视图, 矩形金属辐射贴片印刷在介质板的上表面, 并采用同轴线馈电, 介质板的下表面为天线的金属地板. 由图 1(c) 的传统阵列天线得到图 1(a) 和图 1(b) 所示提出天线的过程和原理可概括为 3 步.

第一步: 传统阵列天线的单元工作在 TM_{10} 模式, 其辐射贴片沿 y 方向 (天线主极化方向) 的长度接近 $\lambda/2$, 而超构表面单元为亚波长, 若采用 $\lambda/4$ 波长设计, 则可以利用两个超构表面单元相连构成天线的辐射结构, 结合参数微调即可保证提出一体化天线的工作频率和传统天线一致.

第二步: 超构表面对雷达波的反射特性需要有一定数量规模的单元时才能较好体现, 因此图 1 的设计中利用 4×4 超构表面代替传统阵列的辐射贴片; 根据第一步的分析, 采用传输线沿 y 方向将超构表面的 2 个单元相连, 并将相邻 2 个相连单元连接, 通过同轴线馈电, 以此保证天线的工作频率、带宽和传统天线一致.

第三步: 分别优化超构表面单元沿 x 和沿 y 方

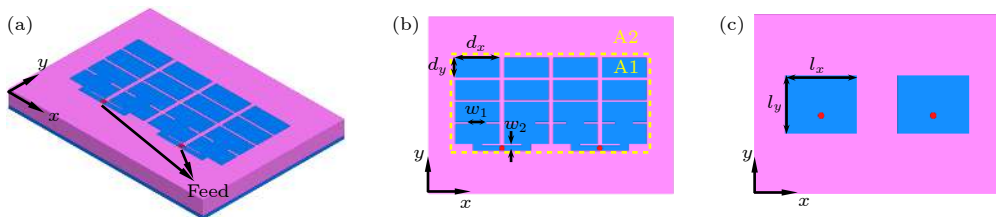


图 1 天线结构示意图 (a), (b) 超构表面与天线阵列一体化侧视图与俯视图; (c) 传统天线阵列俯视图

Fig. 1. Configurations of antennas: (a) Side view and (b) top view of metasurface antenna array; (c) top view of conventional antenna array.

向的两个关键尺寸 d_x , d_y , 保证提出天线的工作频率和图 1(c) 的传统阵列天线一致, 同时使提出天线对 x 和 y 极化雷达波都具有较低 RCS.

为进一步阐述优化 d_x , d_y 对阵列天线 RCS 的影响, 对提出天线的 RCS 可按 (1) 式计算分析^[33],

$$\sigma = |\sqrt{\sigma_s} - (1 - \Gamma_a) \sqrt{\sigma_a} e^{j\varphi}|^2, \quad (1)$$

其中, σ_s 和 σ_a 分别表示结构项和模式项 RCS, Γ_a 是天线端口的反射系数, φ 是结构项和模式项 RCS 的相位差. 在天线工作频带内, 由互易原理可知, y 极化照射雷达波将被天线端接匹配负载所吸收, 此时由天线二次辐射产生的模式项 RCS 近似为 0, 且当天线口径较小时, 其结构项 RCS 也很小, 因此, 在保证天线良好匹配的前提下, 提出的天线在 y 极化方向天然具有低 RCS 性能. 对于 x 极化雷达波, 模式项 RCS 因极化正交为 0, 此时天线阵列可视为中心区域的超构表面 (图 1(b) 中黄色虚线包围部分 A1) 和周围介质地 (区域 A2) 两个部分构成的普通散射体; 由于天线所用介质板为低损耗材料, 因此两部分对垂直照射雷达波的反射幅度都接近为 1, 在垂直雷达波照射下, 该天线的散射电场可表示为

$$E = E_0(S_{A1} e^{j\varphi_1} + S_{A2} e^{j\varphi_2}), \quad (2)$$

其中, S_{A1} 和 S_{A2} 分别为区域 A1 和 A2 的面积, φ_1 和 φ_2 分别为对应的反射相位, E_0 为单位面积的散射场, 由此可知, 若 A1 和 A2 的面积及反射相位差合适, 两部分的散射场在空间将产生矢量抵消的效果, 从而实现 RCS 减缩. 综上所述, 改变 d_y 的尺寸可以调节天线的工作频带和 y 极化方向的 RCS, 改变 d_x 的尺寸可以调节天线沿 x 极化方向的 RCS. 且以上述方法设计的天线在实现带内低 RCS 的同时, 可以兼顾天线良好的辐射性能.

3 阵列天线仿真与分析

为了验证上述设计方法的有效性, 采用基于有限元的数值方法, 分别对图 1 中的传统天线阵列和提出天线阵列进行仿真分析. 提出天线的中心区域由 4×4 的超构表面构成, 每个超构表面单元为矩形金属贴片结构, 贴片的尺寸为 $d_x \times d_y$, 周期为 $p_x \times p_y$. 以 F4 B 玻璃布板作为整个天线的介质板, 其介电常数为 2.65, 损耗角正切 0.002. 优化后, d_x 取 11.0 mm, d_y 取 4.5 mm, p_x 取 12.0 mm,

p_y 取 5.0 mm, w_1 取 4.0 mm, w_2 取 1.2 mm. 传统天线阵列和提出天线阵列采用电参数和物理尺寸完全相同的介质板, 两个阵列的外形尺寸都为 $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ($x \times y \times z$). 传统天线阵列的单元贴片尺寸 l_x 取 16.0 mm, l_y 取 13.0 mm, 单元馈电点距离中心点 2.5 mm, 两个单元的间距为 24 mm (近似为 6.3 GHz 对应波长的 1/2).

3.1 一体化超构表面天线与传统天线的性能对比

作为对比, 以传统的 2×1 矩形贴片微带阵列天线为参考天线阵 (ref., 下同), 图 1 所示的一体化超构表面阵列天线为新提出天线阵 (prop., 下同). 图 2 给出了两种天线的辐射性能数值分析结果. 从图 2(a) 可以看出, 新提出天线阵的阻抗带宽为 6.09—6.52 GHz, 略宽于参考天线阵; 图 2(b) 和图 2(c) 为天线阵列在 6.3 GHz 的辐射方向图, 参考天线阵和新提出天线阵的主辐射空域和增益几乎一致. 为了理解天线的辐射机理, 图 3(a) 和图 3(b) 对比给出了两种天线的表面电流分布. 图 3(b) 表明参考天线阵的单元工作于 TM_{10} 模式, 两个单元的辐射电流同相, 辐射场在空间同方向叠加, 形成聚焦波束; 由图 3(a) 可以看出, 同轴馈电的电流经传输线, 在与传输线相连的超构表面单元上流动, 而未与传输线相连的超构表面单元在耦合作用下也感应有幅度略小的电流, 所有超构表面单元上的电流都主要沿 y 方向流动, 且相位同向, 它们的辐射场同样在空间同相叠加, 形成汇聚波束, 且由于新提出天线阵的表面电流在超构表面的下半部分强度略大, 导致天线的辐射波束沿 $-y$ 方向稍有倾斜, 这解释了图 2(b) 中的方向图结果. 上述电流分析说明, 采用传输线连接和同轴馈电的新提出天线阵可以有效辐射, 且与传统阵列的辐射性能基本相同.

采用平面波分别垂直照射两种天线阵列, 图 4 和图 5 给出了不同极化波照射下阵列天线的散射性能. 图 4 比较了阵列的单站 RCS, 可以看到, 对于 x 极化雷达波, 参考天线阵的 RCS 随频率变化几乎直线上升, 而新提出天线阵在 5.7—8.0 GHz 内较参考天线有 RCS 减缩, 且在 6.05—7.15 GHz 内 RCS 减缩超过 5 dB; 对于 y 极化波, 参考天线阵和新提出天线阵在辐射频带内的 RCS 都相对较低. 进一步地, 图 5 对比了两种天线在辐射工作频带内外的散射方向图, 其中图 5(a)—图 5(d) 对应

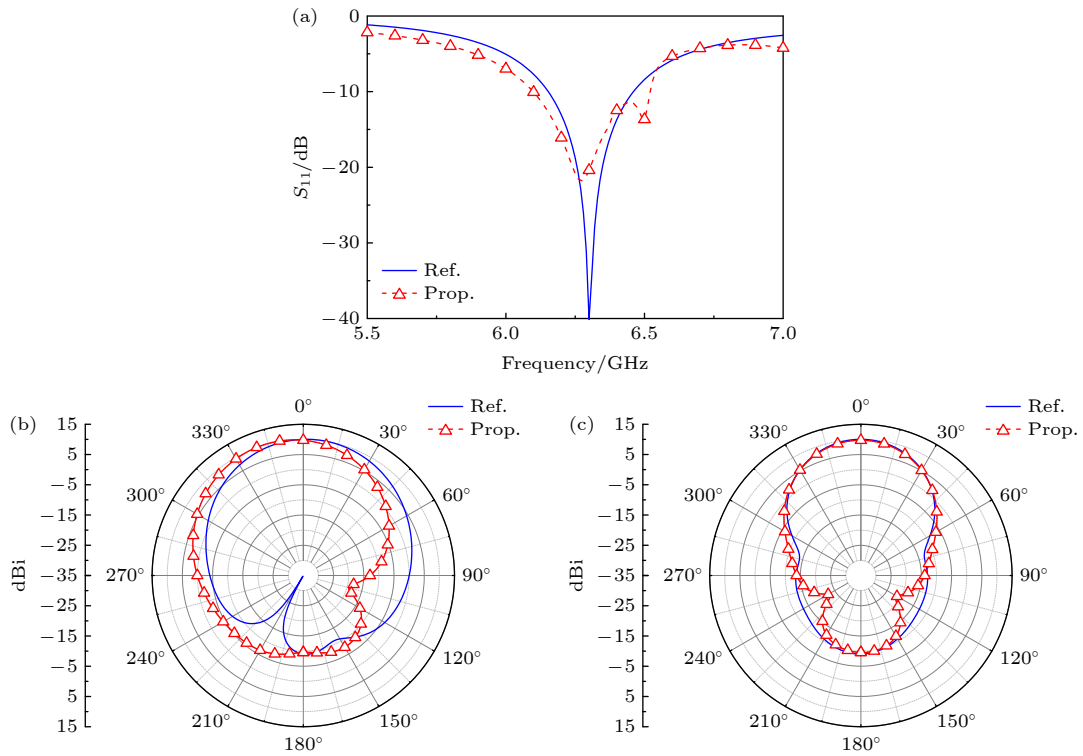


图 2 天线阵列辐射性能对比 (a) 反射系数; (b) E 面方向图; (c) H 面方向图

Fig. 2. Radiation performance comparison of the antenna arrays: (a) Reflection coefficients; (b) E -plane radiation patterns; (c) H -plane radiation patterns.

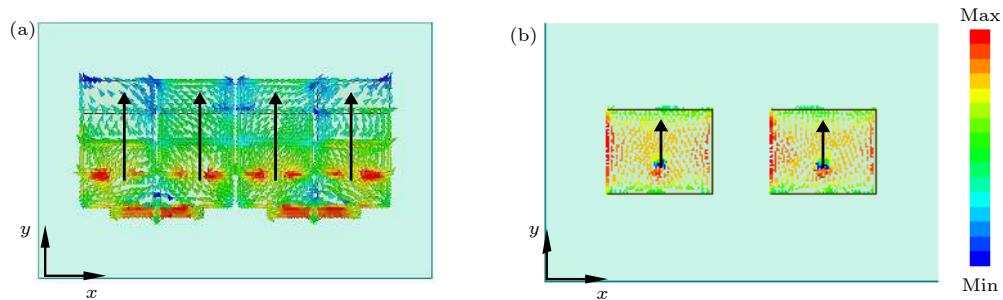


图 3 6.3 GHz 天线阵列表面电流 (a) 新提出天线阵; (b) 参考天线阵

Fig. 3. Surface current distributions at 6.3 GHz: (a) Proposed antenna array; (b) reference antenna array.

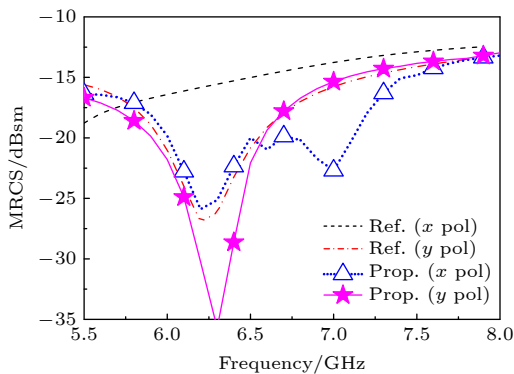


图 4 天线阵列 RCS 对比

Fig. 4. RCS comparison of the antenna arrays.

参考天线阵, 图 5(e)—图 5(h) 对应新提出天线阵。对比图 5(a) 和图 5(e)、图 5(c) 和图 5(g) 可知, 对于 x 极化, 参考天线阵 RCS 较高的原因在于天线法线方向形成了强散射峰, 而新提出天线阵将散射能量打散至整个空间, 因此 RCS 得到了明显减缩。对于 y 极化, 图 5(b) 和图 5(f) 表明, 参考天线阵和新提出天线阵的散射场都很小, 此时, 外来雷达波的能量主要被天线馈电端的匹配负载所吸收^[8]; 而在天线工作频带外, 由于不存在匹配吸收, 此时两种天线的散射场都较高, 如图 5(d) 和图 5(h)。为更深入理解天线的散射机理, 图 6 对比了不同极化

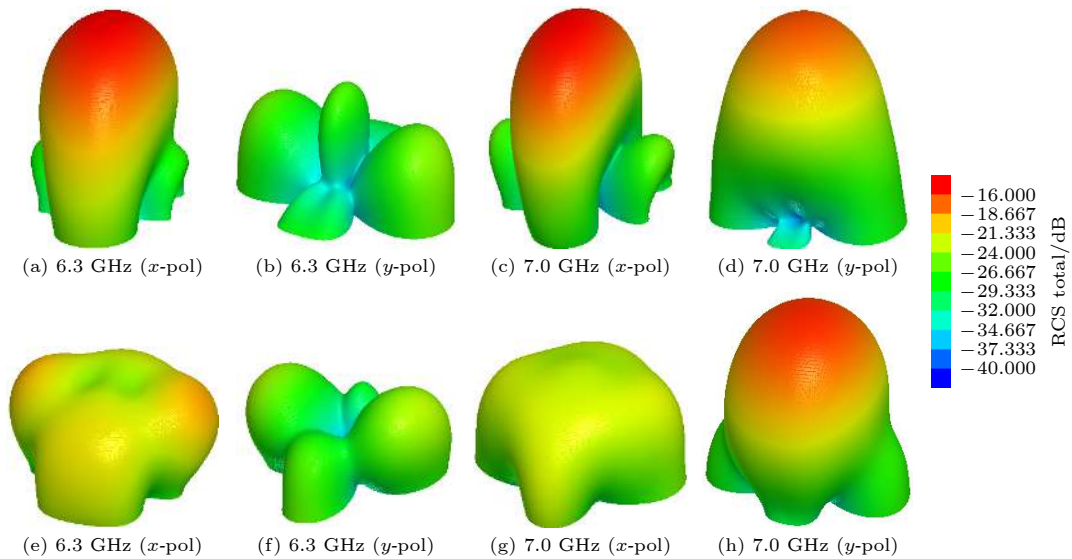


图 5 天线阵列散射方向图对比 (a)–(d) 参考天线阵; (e)–(h) 新提出天线阵

Fig. 5. Scattering patterns comparison of the antenna arrays: (a)–(d) Reference antenna array; (e)–(h) the proposed antenna array.

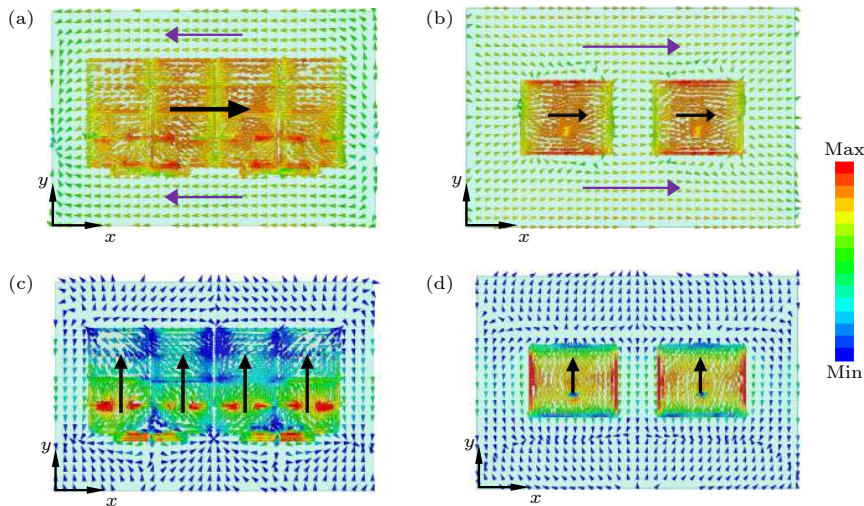


图 6 不同极化平面波照射下天线阵列在 6.3 GHz 的表面电流 (a), (b) x 极化; (c), (d) y 极化

Fig. 6. Surface current distributions at 6.3 GHz of the two antennas under different polarized plane waves: (a), (b) x polarization; (c), (d) y polarization.

波照射下天线阵列的表面感应电流. 从图 6(a) 和图 6(b) 可以看出, 在 x 极化雷达波照射下, 参考天线阵在 A1 和 A2 区域内激励起同相电流, 这导致法向散射场较大, 而新提出天线阵在 A1 和 A2 区域内激励的电流方向相反, 散射场在空间可以有效抵消; 图 6(c) 和图 6(d) 表明, 在 y 极化雷达波照射下, 两种天线的表面散射电流和图 3(a) 以及图 3(b) 的辐射电流非常相似, 这印证了天线的互易性, 此外, A1 区域的电流幅度明显强于 A2 区域, 此时天线的结构项散射也很小, 因此, 两种天线对 y 极化波都具有带内低散射特点. 总之, 上述结果说明,

一体化设计的天线在辐射工作频带内对不同极化都具有低 RCS 性能, 且当雷达波和天线极化正交时, 还具有宽带低 RCS 特点.

3.2 超表面结构对天线性能的影响

值得关注的是, 由于超构表面和天线结构是一体化的, 所以超构表面的尺寸和天线的性能息息相关. 上一节的分析表明, 天线阵列在 x 极化雷达波照射下的低 RCS 主要得益于超构表面和四周金属地的散射场抵消, 而在 y 极化雷达波照射下的低 RCS 主要是天线辐射工作频带内的匹配吸收所致.

基于此,可以预测,对于 x 极化,当超构表面的贴片尺寸 d_x 增大时,其同相反射频带将向低频偏移,从而使天线的 RCS 减缩频带也向低频移动,而 d_y 变化时,对天线 RCS 的影响将很小;对于 y 极化,结合图 3 中的电流分布可知, d_x 和 d_y 都将影响天线的工作频带,且 d_y 的变化直接改变辐射时的电流路径,因此影响要大于 d_x ,故低 RCS 频带对 d_y 的敏感性要大于对 d_x 的敏感性.按照相同的思路和方法,也可以分析其他结构参数如 p_x, p_y, w_1 等对天线性能的影响,限于篇幅,这里不再赘述.为

证实上述分析的有效性,图 7—图 9 给出了天线的阻抗带宽和单站 RCS 随 d_x, d_y, w_1 的变化结果.图 7(a) 和图 8(a) 表明,随着 d_x, d_y 的增大,天线的工作频带整体都向低频移动,且对 d_y 的变化更敏感,图 9(a) 表明,随着 w_1 的增大,工作频带向高频移动;与之相对应,图 7(c) 和图 8(c) 说明 y 极化雷达波照射下的低 RCS 频带也向低频移动,图 9(c) 则向高频移动,其变化规律和天线辐射时工作频带的变化规律相同.比较图 7(b)、图 8(b) 和图 9(b) 可知, d_x 增大时,低 RCS 频带整体向低频移动,而

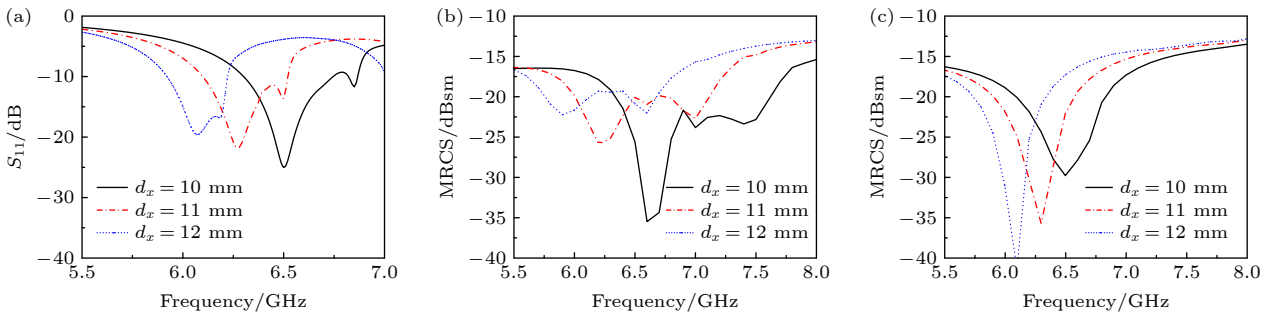


图 7 d_x 对天线性能的影响 (a) 反射系数; (b) x 极化 RCS; (c) y 极化 RCS

Fig. 7. Effects of d_x on antenna's performance: (a) Reflection coefficient; (b) RCS under x polarized plane wave; (c) RCS under y polarized plane wave.

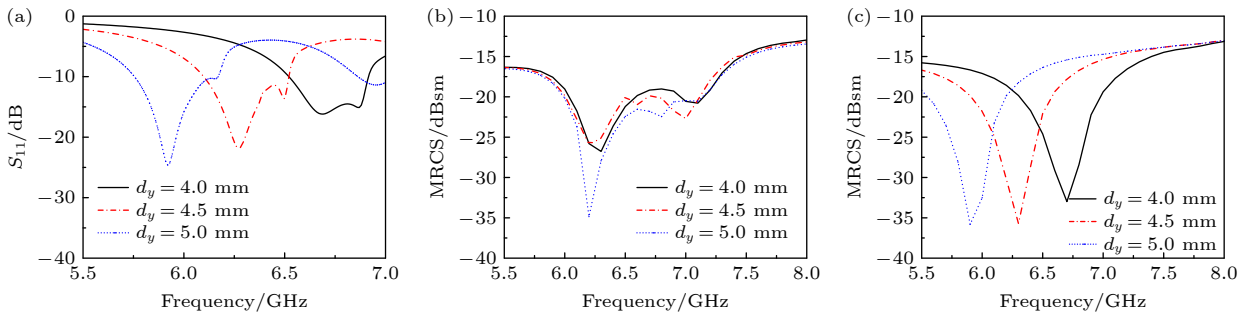


图 8 d_y 对天线性能的影响 (a) 反射系数; (b) x 极化 RCS; (c) y 极化 RCS

Fig. 8. Effects of d_y on antenna's performance: (a) Reflection coefficient; (b) RCS under x polarized plane wave; (c) RCS under y polarized plane wave.

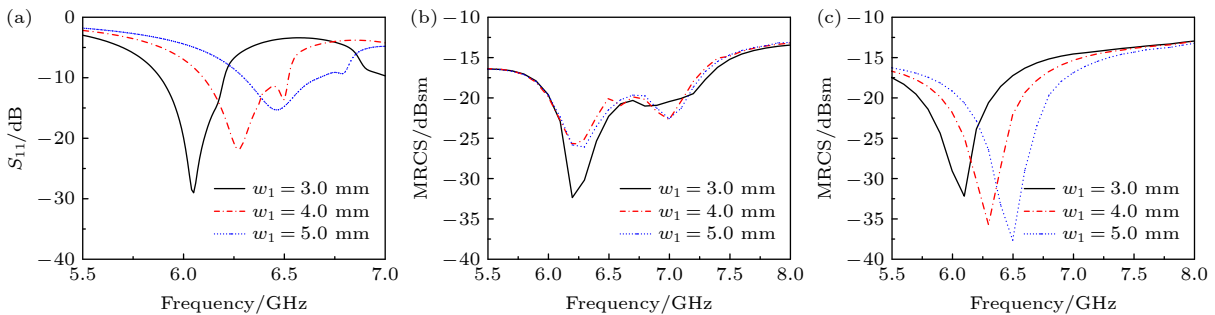


图 9 w_1 对天线性能的影响 (a) 反射系数; (b) x 极化 RCS; (c) y 极化 RCS

Fig. 9. Effects of w_1 on antenna's performance: (a) Reflection coefficient; (b) RCS under x polarized plane wave; (c) RCS under y polarized plane wave.

d_y 和 w_1 的变化对低 RCS 频带几乎无影响. 综上所述, 数值分析结果完全验证了理论分析的正确性. 根据这些规律, 可以通过超构表面单元参数的选择, 设计在所需频率具有低 RCS 性能的天线阵列.

4 实验验证

采用成熟的印刷电路板技术, 对新提出天线阵列和参考天线阵列进行了加工, 图 10 是新提出天线的实物图及散射测试系统原理图. 利用矢量网络分析仪 Agilent N5230C 测试得到两种天线阵的端口反射系数, 如图 11 所示. 与图 2(a) 相比, 新提出天线和参考天线的工作频带都向高频偏移约 200 MHz, 这主要是由加工误差和介质参数偏差引起的, 但两种天线的谐振频率基本重合, 工作频带基本一致. 在远场暗室中, 测试了两种天线在 6.5 GHz 的增益方向图. 从图 12 的结果中可以看到, 参考天线阵和新提出天线阵的增益分别为 9.5 和 9.47 dBi, 两种天线的 E 面和 H 面方向图都较为符合, 这些结果说明新提出天线阵的辐射性能和传统天线阵基本相同. 受实验条件所限, 在微波暗室中采用空间波法对两种天线的散射场分别进行了测试, 如图 10 所示, 两个工作频段为 1—18 GHz 的喇叭天线分别连接在 Agilent N5230C 的两个端口上, 其中一个作为发射, 另一个接收经待测天线散射的信号, 收发天线距离待测天线 3 m, 且收发

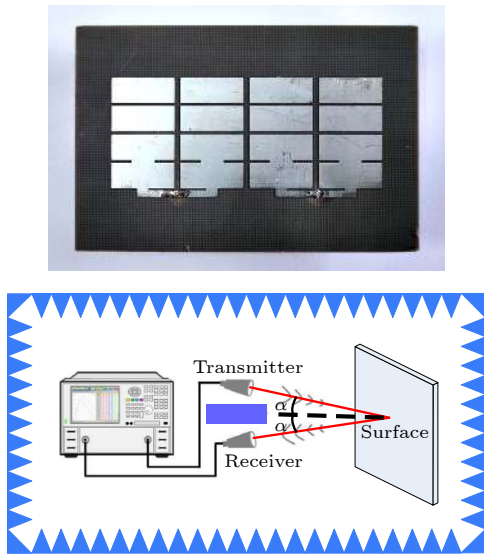


图 10 新提出天线阵列实物及散射测试系统

Fig. 10. Picture of the proposed antenna array and the scheme of scattering test.

天线的中心都指向待测天线表面的中心, 实验中, 为了减小收发天线间的耦合, 将一块吸波材料置于收发天线中间进行隔离, 并用时域门技术抑制多径效应. 前面的理论分析表明, 两种天线对 y 极化波都具有带内隐身的特点, 因此, 实验中仅测试了 x 极化波照射下的散射场, 并通过比较, 得出新提出天线阵较参考天线阵的 RCS 减缩的结果, 如图 13 所示, 为了便于分析, 图中同时给出了仿真数据. 可以看出, 测试结果整体较仿真向高频偏移 160 MHz, 导致这种偏差的原因包括加工误差、介质误差及仿

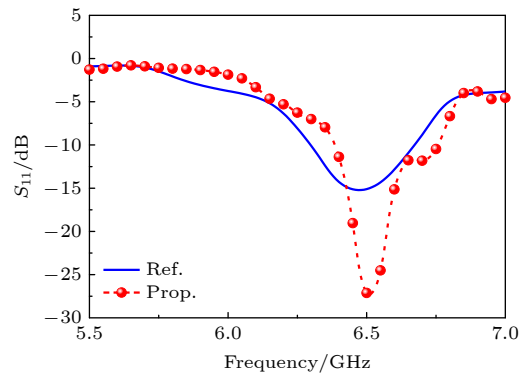


图 11 实测天线阵的 $|S_{11}|$ 曲线

Fig. 11. Measured $|S_{11}|$ of the proposed antenna array.

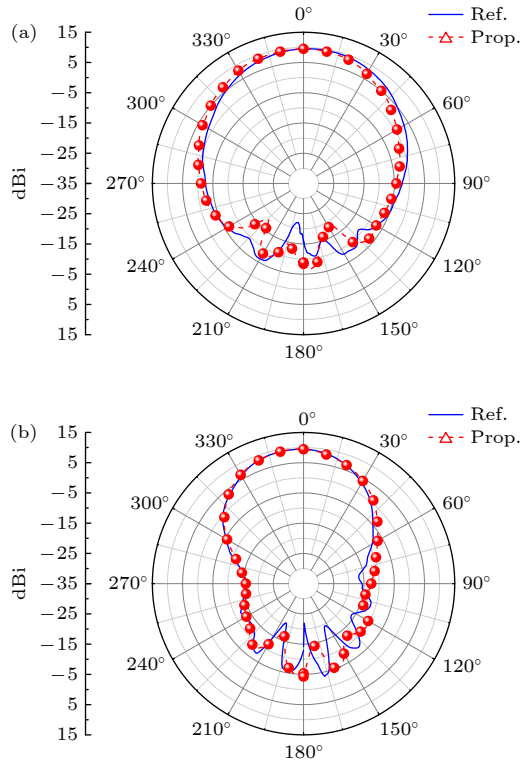


图 12 6.5 GHz 实测天线阵方向图 (a) E 面; (b) H 面

Fig. 12. Measured radiation patterns at 6.5 GHz: (a) E plane; (b) H plane.

真与实验方法的偏差等,但总体上看,测试的 RCS 趋势与减缩量 and 仿真结果符合较好.因此,实测结果证实了新提出天线阵的良好性能,也进一步证实了提出方法的有效性.

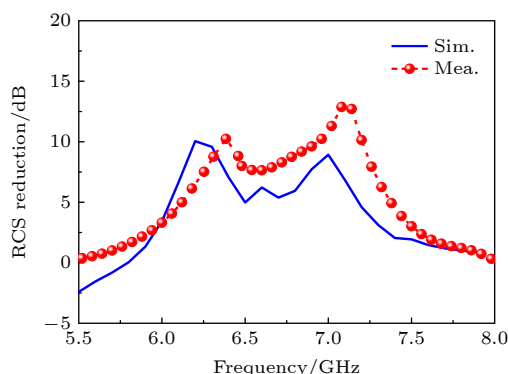


图 13 天线阵单站 RCS 减缩曲线

Fig. 13. Monostatic RCS reduction of the proposed antenna array.

5 结 论

为了获得低雷达散射截面阵列天线,本文提出了电磁超构表面和天线结构一体化设计的新方法,利用传输线把超构表面单元相连,并结合适当的馈电技术构成天线阵列.以二元阵为例,详细说明了该方法的实施过程,阐述了基于该方法设计天线的物理工作机理,数值分析了阵列的辐射和散射性能,并与传统微带阵列进行了对比,结果表明,传输线可以将超构表面单元有效激励,形成良好辐射,以此得到的天线和传统阵列的辐射性能基本相同.同时,利用超构表面与天线其他部分结构对外来雷达波散射性能的不同,新天线还具有工作频带内低雷达散射截面的优点.此外,天线表面电流分布和参数分析还表明,通过选择适当的超构表面尺寸,可以灵活控制低雷达散射截面频段.最后,对天线进行了加工,测试结果证实了该方法简单、有效.本文提出的一体化设计方法,较好地平衡了天线辐射和低散射的矛盾,且具有结构紧凑、实用性高、拓展性强的特点.

参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Yang F, Xu S H, Liu X, Yang X, Pan X T, Wang M, Xiao Y, Li M K 2018 *Chin. J. Radio Sci.* **33** 256 (in Chinese) [杨帆, 许慎恒, 刘骁, 杨雪, 潘笑天, 王敏, 肖钰, 李懋坤 2018 *电波科学学报* **33** 256]
- [3] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light:Sci. Appl.* **3** e218
- [4] Cheng Y Z, Withayachunmankul W, Upadhyay A, Headland D, Nie Y, Gong R Z, Bhaskaran M, Sriram S, Abbott D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 18111
- [5] Koziel S, Abdullah M 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 2028
- [6] Zhang C, Gao J, Cao X Y, Li S J, Yang H H, Li T 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 3301
- [7] Chen Q, Guo M, Sang D, Sun Z S, Fu Y Q 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1223
- [8] Li T, Yang H H, Li Q, Zhang C, Han J F, Cong L L, Cao X Y, Gao J 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 1161
- [9] Yang H H, Cao X Y, Yang F, Gao J, Xu S H, Li M K, Chen X B, Zhao Y, Zheng Y J, Li S J 2016 *Sci. Rep.* **6** 35692
- [10] Li L L, Cui T J, Ji W, Liu S, Ding J, Wan X, Li Y B, Jiang M H, Qiu C W, Zhang S 2017 *Nat. Commun.* **8** 197
- [11] Liu W, Chen Z N, Qing X M 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3325
- [12] Jia Y T, Liu Y, Guo Y J, Li K, Gong S X 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 179
- [13] Guo W L, Chen K, Wang G M, Luo X Y, Feng Y J, Qiu C W 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 1426
- [14] Chen K, Feng Y J, Monticone F, Zhao J M, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y, Ding X M, Zhang S, Alu A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [15] Jia Y T, Liu Y, Feng Y J, Zhou Z P 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 6516
- [16] Liu Y, Li N, Jia Y T, Zhang W B, Zhou Z P 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 492
- [17] Al-Nuaimi M K T, Hong W, Whittow W G 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 1048
- [18] Yang H H, Li T, Xu L M, Cao X Y, Jidi L R, Guo Z X, Li P, Gao J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 1239
- [19] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, Maagt P D 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3630
- [20] Rajabalipanah H, Abdolali A 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1233
- [21] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Yao X, Liu T, Li W Q, Li S J 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 2954
- [22] Li K, Liu Y, Jia Y T, Guo Y J 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 4288
- [23] Pan W B, Huang C, Chen P, Ma X L, Hu C G, Luo X G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 945
- [24] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Ma J J, Yao X, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064103 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 马嘉俊, 姚旭, 李文强 2013 *物理学报* **62** 064103]
- [25] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 1479
- [26] Yang H H, Cao X Y, Zheng Q R, Ma J J, Li W Q 2013 *Radio Engineering* **22** 1275
- [27] Tan Y, Yuan N C, Yang Y, Fu Y Q 2011 *Electron. Lett.* **47** 1
- [28] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION* **61** 1479
- [29] Zheng Q, Guo C J, Ding J, Vandenbosch G A 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 3529
- [30] Liu Y, Jia Y T, Zhang W B, Li F 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 3644
- [31] Li T, Yang H H, Li Q, Jidi L R, Cao X Y, Gao J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 5325
- [32] Hao B, Yang B F, Gao J, Cao X Y, Yang H H, Li T 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 244101 (in Chinese) [郝彪, 杨宾锋, 高军, 曹祥玉, 杨欢欢, 李桐 2020 *物理学报* **69** 244101]
- [33] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 163

A novel low-RCS antenna array based on integration of electromagnetic metasurface and conventional antenna*

Feng Kui-Sheng¹⁾²⁾ Li Na¹⁾²⁾ Yang Huan-Huan^{2)†}

1) (*College of Artificial Intelligence, Yango University, Fuzhou 350015, China*)

2) (*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

(Received 20 April 2021; revised manuscript received 14 May 2021)

Abstract

Aiming at obtaining low scattering antenna array, in this paper a novel method of integrating electromagnetic metasurface with conventional antenna is proposed. The theoretical analysis and practical implementation of this method are presented. Using this method, a novel antenna array is obtained by connecting partial unit cells of metasurface with transmission line and adopting coaxial excitations. In the radiation mode, the metasurface is excited and radiates effectively. Besides, the array has almost the same performance as the conventional array. In the scattering mode, this array demonstrates low in-band RCS due to the scattering cancellation of middle metasurface and other surrounding structures. Using this method, a 2×1 array, as an example, is designed and numerically analyzed. The results show that the array has the well-behaved radiation performance and low RCS property. The working principle of the proposed array is illustrated by investigating the current and resultant field. Further analysis also reveals the effecting law of metasurface unit cells in antenna's radiation and scattering performance. Therefore, flexible designs can be obtained to fit different requirements. Finally, experiments are conducted. And the good agreement between computations and measurements further verifies the validity of the proposed design. Moreover, the proposed method also features easy implementation and high integrity and can be extended to the designing of large scale array antennas.

Keywords: electromagnetic metasurface, array antenna, integration, low radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.70.20210746

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61801508, 61701523, 61671464), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2019JQ-103, 2020JM-350, 20200108, 2020022), and the Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (Grant Nos. BX20180375, 2019M653960).

† Corresponding author. E-mail: jianye8901@126.com