

基于共享孔径技术的低 RCS 电磁超构表面天线设计*

李桐¹⁾ 杨欢欢^{1)†} 李奇²⁾ 廖嘉伟¹⁾ 高坤¹⁾ 季轲峰¹⁾ 曹祥玉¹⁾

1) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

2) (中国空间技术研究院系统创新中心, 西安 710100)

(2024 年 1 月 20 日收到; 2024 年 4 月 15 日收到修改稿)

提出一种基于共享孔径技术设计低雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 电磁超构表面天线的新方法. 该方法首先设计具有低 RCS 性能的超构表面, 然后借鉴共享孔径技术思想, 将超构表面和传统天线的辐射结构直接共享口径紧密排列, 得到新型低 RCS 天线结构, 并结合电流分析和局部结构修正, 优化天线的辐射性能, 最终同时实现天线的良好辐射和宽带低 RCS 性能. 为了阐明该方法, 基于极化旋转机理设计了一款低 RCS 超构表面, 采用共享孔径思想和电流分析, 得到了一款宽带低 RCS 超构表面天线, 详细分析了该天线的工作机理与性能. 结果表明: 设计的天线在保证较好辐射的同时, 实现了超宽带 RCS 减缩, 提出的设计方法摒弃了从天线到低 RCS 天线的传统设计思路, 通过逆向思维, 将散射的优化问题转化为辐射的优化问题, 不仅实现了天线与超构表面的一体化设计, 还显著地降低了低 RCS 天线优化设计的难度, 加速了天线优化进程.

关键词: 电磁超构表面, 天线, 共享孔径技术, 低雷达散射截面**PACS:** 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf**DOI:** 10.7498/aps.73.20240142

1 引言

电磁超构表面是由人工排列的周期或准周期“原子”结构构成的具有特殊电磁特性的薄型结构. 这类超构表面可以突破传统电磁媒质表面所具有的电磁性能限制^[1,2], 实现同向反射^[3,4]、完美吸波^[5,6]、极化旋转^[7,8]、波模转换^[9,10]、相移透射^[11,12]等很多奇异特性. 巧妙运用这些特性可以解决很多传统方法无法实现的技术难题^[13-17]. 比如, 天线对雷达照射波的隐身问题一直是困扰平台隐身性能提高的瓶颈之一. 传统的天线隐身方法需要在天线表面涂覆吸波材料或对天线结构修形, 这都不可避免地会导致天线辐射性能的下降. 将电磁超构表面的特性运用于天线, 为天线雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩提供了新思路.

超构表面对电磁波的吸收特性可以将照射到天线表面的雷达波能量直接吸收. Liu 等^[18]利用超构表面的电磁谐振特性设计了超薄、窄带完美吸波体, 并将其贴于波导缝隙天线的金属地板上方, 在增益损失 0.6 dB 的同时获得了天线带内 RCS 减缩. Zhang 等^[19]将超构表面吸波体加载于紧耦合阵列天线口径上方, 在天线工作频带内、辐射正交极化方向获得 8 dB 以上 RCS 减缩, 最大增益损失不到 0.5 dB. 与直接吸收电磁能量相比, 利用超构表面将散射波引导至关心空域之外, 也可以缩减 RCS, 且有望减轻辐射性能的恶化, 因此基于该思路的研究较多, 相关成果集中表现为三条技术路线. 一是利用超构表面的相位调控特性, 将具有不同反射相位的单元组合排列, 基于不同相位散射场的空间矢量叠加缩减 RCS. 文献^[20, 21]基于该思路, 将超构表面分别围绕在波导缝隙天线、微带天

* 国家自然科学基金 (批准号: 62371466, 62171460, 62203464)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2024JC-ZDXM-39, 20220104, 2020022) 和空间微波技术国家重点实验室基金 (批准号: HTKJ2022KL504004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianye8901@126.com

线辐射口径周围,都缩减了天线 RCS,且没有恶化天线辐射性能. Liu 等^[22]利用液态金属合金制作反射相位可调的超表面,并将其加载于缝隙阵列天线口径上方,在较小影响天线辐射性能的同时,实现了天线工作频带外的宽频 RCS 减缩. 二是利用超构表面的极化旋转特性,基于不同极化散射场的空间矢量叠加缩减 RCS. Liu 等^[23]将棋盘排列的极化旋转超构表面置于双极化缝隙阵列口径上方,在不改变天线辐射性能的同时,实现了带外宽频 RCS 减缩. Yao 等^[24]分析了极化旋转超构表面单元排列方式对 RCS 的影响,并结合特征模理论,采用缝隙激励超构表面将其作为天线的辐射结构,直接得到了宽带低 RCS 天线. 三是利用超构表面的多功能特性,拓展天线的 RCS 减缩带宽. Liu 等^[25]将具有频率选择吸波和极化旋转性能的复合超构表面置于缝隙天线阵列口径上方,天线增益损失 0.8 dB, RCS 减缩带宽达 100%. Zhu 等^[26]将吸波和相位调控特性集成于一个超构表面单元,通过激励超构表面形成有效辐射,利用低频吸波、高频散射对消实现了宽带低 RCS. Guo 等^[27]将反射频带可调的吸收型频率选择反射型超构表面作为端射天线的地板,置于天线下方,在天线工作的同时实现了天线带外宽频 RCS 减缩. 许多优秀的成果都已证实,采用这些设计方法可以实现天线 RCS 的有效减缩. 但同时值得关注的是,从结构上看,超构表面在天线中的应用方式多是采用额外加载的方法,即将超构表面环绕在天线口面的周围或者置于天线口面的上/下方. 此外,为了尽量减小两者的相互影响,超构表面通常距离天线辐射电流较远,这无疑将会增加天线的体积和重量,削弱了其在航空平台等很多对射频孔径有苛刻要求场合的应用前景. 另外,从工作频率上看,当超构表面与天线的工作频率相距越远时,越有利于减小两者的耦合. 因此,获得天线辐射频带内的 RCS 减缩要比带外难度更大,实现起来更具挑战性. 尽管近来有研究人员提出采用一体化的设计方法可以解决上述问题^[28-30],但也存在一些限制,比如,仅适用于阵列天线或 RCS 减缩带宽较窄等.

针对上述问题,本文提出一种新的设计思路,即借鉴共享孔径技术的设计思想,首先设计具有低 RCS 性能的超构表面,再将超构表面和天线直接共享孔径紧密排列. 对于这种设计思路可能带来的天线辐射性能恶化的问题,采用耦合电流分析的

方法,结合适当的局部结构修正,不仅实现了天线与超构表面的一体化设计,同时保证了天线的良好辐射和宽带低 RCS 性能.

2 基于极化旋转机理的低 RCS 超构表面

直接设计低 RCS 天线的难点在于需同时兼顾辐射和散射性能. 相比之下,低 RCS 超构表面的设计则更简单. 本文首先基于极化旋转机理设计一款宽带低 RCS 超构表面,再与天线共享孔径,实现天线的低 RCS 性能. 不同于文献中常见的设法——在现有天线的基础上加入超构表面缩减天线 RCS 的思路,本文采用在低 RCS 超构表面的基础上融入天线实现 RCS 减缩,这种逆向思维的设计将散射的优化问题转化为辐射的优化问题,将使得低 RCS 天线的设计难度降低,加速天线优化进程.

极化旋转超构表面可以用来构造低 RCS 表面^[22,23]. 在 Ren 等^[31]单层极化旋转超构表面结构的基础上,本文提出双层极化旋转超构表面单元结构,以拓展其工作带宽. 如图 1(a) 和图 1(b) 所示,提出的单元由两层介质板和三层印刷金属层构成,其中顶层和中间层金属结构均为双缺口方环,底层为金属地板. 结合图 1(b) 对该单元的极化旋转机理进行阐述,将 xy 坐标系逆时针旋转 45° 得到 uv 坐标系. 设照射该结构的雷达波为 x 极化,其电场分量沿结构对称的 u, v 轴分解,即

$$\mathbf{E}_i = E_i e^{jkz} \mathbf{e}_x = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{jkz} (\mathbf{e}_u + \mathbf{e}_v). \quad (1)$$

经该结构反射后,反射电场表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r = & \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{-jkz} (r_{uu} e^{j\varphi_{uu}} \mathbf{e}_u + r_{vv} e^{j\varphi_{vv}} \mathbf{e}_v) \\ & + \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{-jkz} (r_{uv} e^{j\varphi_{uv}} \mathbf{e}_u + r_{vu} e^{j\varphi_{vu}} \mathbf{e}_v), \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $r_{uu}, r_{vv}, r_{uv}, r_{vu}$ 分别表示 u 极化到 u 极化、 u 极化到 v 极化、 v 极化到 v 极化、 v 极化到 u 极化的反射幅度, $\varphi_{uu}, \varphi_{vv}, \varphi_{uv}, \varphi_{vu}$ 为对应的反射相位. 鉴于结构沿 u, v 轴的对称性,设 $r_{vu} = r_{uv} = 0$, 则

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{-jkz} (r_{uu} e^{j\varphi_{uu}} \mathbf{e}_u + r_{vv} e^{j\varphi_{vv}} \mathbf{e}_v). \quad (3)$$

若满足 $r_{uu} = r_{vv}$, 当 $\varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pi + 2k\pi$ (k 为整数) 时, $\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i e^{-jkz} r_{uu} e^{j\varphi_{uu}} (\mathbf{e}_u - \mathbf{e}_v)$, 即可实

现反射波为 y 极化, 相较于入射波具有 90° 的极化旋转功能.

结合图 1(a) 和图 1(b), 取 $l_1 = 3.0$ mm, $l_2 = 4.5$ mm, $d_1 = 1.3$ mm, $d_2 = 2.0$ mm, 顶层和中间层双缺口方环的线宽分别为 0.7 mm, 0.8 mm, 单元周期为 6.0 mm, 两层介质板都为 F4B 玻璃布板, 其相对介电常数为 2.65, 厚度分别为 1.0 mm, 3.0 mm. 图 2(a) 给出了数值计算得到的该结构对 x 极化照射波的反射幅度, 可以看出, 该结构在 5—16 GHz 的正交极化反射幅度都高于 0.8; 图中同时将该双层结构与单层结构进行了对比, 可见,

双层结构较单层结构的极化旋转带宽明显拓宽. 图 2(b) 和图 2(c) 分析了 u 极化波、 v 极化波分别入射下的反射性能. 图 2(b) 说明反射幅度 $r_{uu} \approx r_{vv} \approx 1$, $\varphi_{uu} - \varphi_{vv}$ 在观察频段内接近 180° , 且在 5.65, 8.18, 14.43 GHz 为 180° , 满足上述极化旋转的理论条件. 进一步地, 图 2(c) 分析了 3 个极化旋转极值频点的电流分布, 在 5.65 GHz, 顶层与中间层的双缺口方环与 u 极化入射波耦合强烈, 且电流方向与地板上的电流方向相反; 在 8.18 GHz, 只有顶层双缺口方环与 u 极化入射波耦合强烈, 且电流方向与地板上的电流方向相反; 在 14.43 GHz,

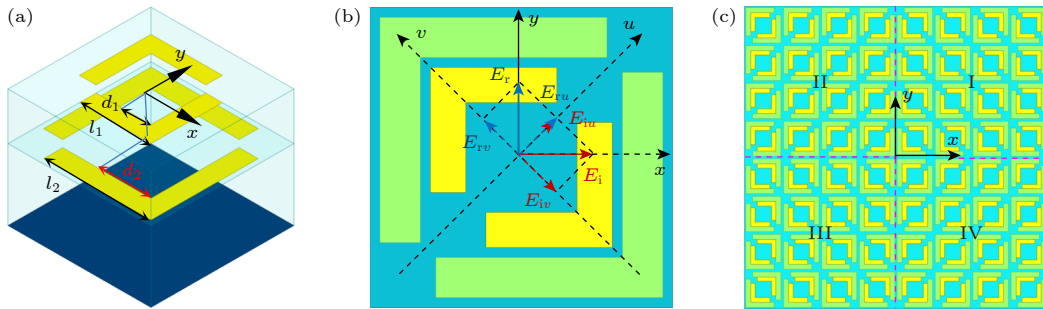


图 1 极化旋转表面 (a) 单元透视图; (b) 单元俯视图; (c) 表面俯视图

Fig. 1. Polarization rotation metasurface: (a) Perspective view; (b) top view of unit cell; (c) top view of proposed surface.

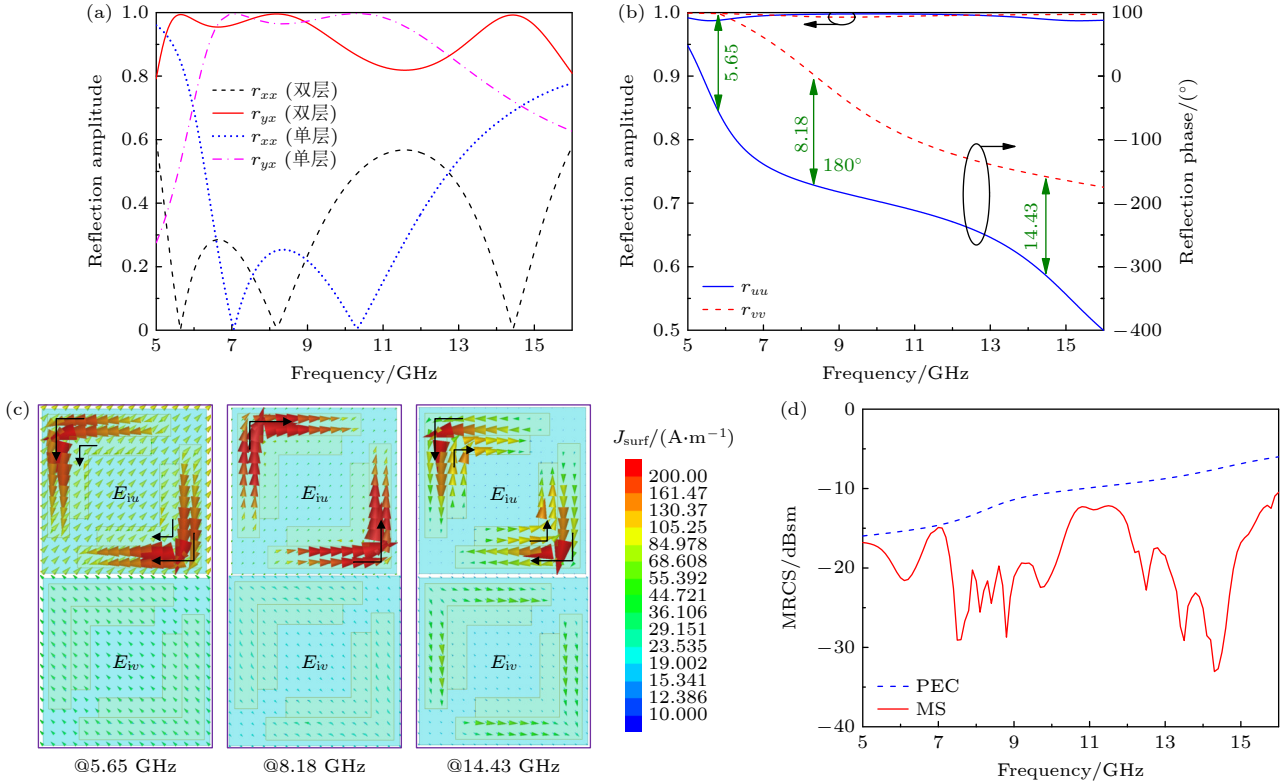


图 2 极化旋转表面性能 (a) 单元反射幅度; (b) 单元反射性能分析; (c) 电流分析; (d) 表面单站 RCS

Fig. 2. Performance of proposed polarization conversion metasurface: (a) Reflection amplitude of unit cell; (b) reflection performance analysis of unit cell; (c) surface current analysis; (d) RCS of proposed surface.

顶层与中间层的双缺口方环之间在 u 极化波照射下耦合较强且电流方向相反, 而地板上电流很小. 此外, 三个频点对 v 极化波耦合都很弱, 这种耦合 u, v 极化波强弱的显著差别使得在三个频点都产生了反射相位的明显差异, 由此造成了反射相位 180° 相移, 即满足了极化旋转的产生条件. 将该单元 4×4 周期排列, 构成超构表面块, 并将 4 个该超构表面块按照图 1(c) 所示排列, 根据每个超构表面块对雷达波的反射极化不同和空间场的矢量叠加原理 [24], 所构造的超构表面将在法线方向具有低 RCS 性能. 图 2(d) 为该表面的单站 RCS 结果, 相对于同尺寸的金属板, 该表面在 5—16 GHz 明显具有更低 RCS, 且低 RCS 凹陷极值对应的频率与图 2(a) 基本一致.

3 低 RCS 超构表面与天线孔径共享的低 RCS 天线设计与分析

上述构造的超构表面具有结构轻薄的特点, 可以采用印刷电路板直接制作. 类似地, 传统的微带印刷天线也具有低剖面、轻薄的特点, 也多采用印刷电路板制作. 基于超构表面与传统印刷天线结构

和制作工艺的相同性, 本文提出借鉴共享孔径技术的设计思想, 在以上低 RCS 性能超构表面设计的基础上, 将超构表面和传统天线的辐射结构直接共享孔径紧密排列, 得到新型低 RCS 天线结构.

3.1 传统天线与低 RCS 超构表面孔径共享设计与电流分析

为了进一步阐明上述设计思路, 图 3 给出了超构表面与天线共享孔径设计的流程, 其中, 图 3(a) 为低 RCS 超构表面的俯视图, 图 3(b) 为传统贴片天线俯视图, 用图 3(b) 中虚线框出的天线结构直接替换图 3(a) 对应虚线内的结构, 得到图 3(c) 所示的共享孔径天线 1, 该天线将超构表面单元与传统微带天线的辐射贴片紧密排列, 没有增加传统天线的体积. 值得注意的是, 这种超构表面与天线结构上的紧致排列, 易于导致因相互耦合而产生天线辐射性能的变化. 为此, 仿真对比了传统天线 (Ref) 与共享孔径天线 1 (Ant1) 的辐射性能. 从图 4(a) 可以看出, 采用共享孔径设计后, 天线的工作带宽 ($|S_{11}| < -10$ dB) 有所减小, 谐振特性总体变化不大; 图 4(b) 表明, 在天线工作频带内, 共享孔径天线 1 的增益总体呈快速下降趋势, 且明显低于传统

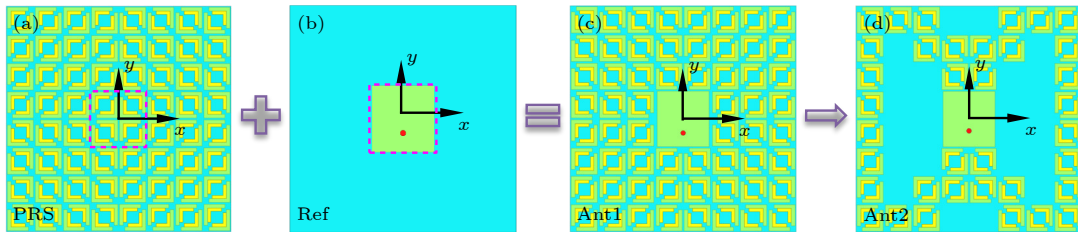


图 3 超构表面与天线共享孔径设计流程 (a) 超构表面; (b) 传统天线; (c) 共享孔径天线 1; (d) 共享孔径天线 2

Fig. 3. Shared aperture of metasurface and antenna: (a) Metasurface; (b) conventional antenna; (c) shared-aperture antenna 1; (d) shared-aperture antenna 2.

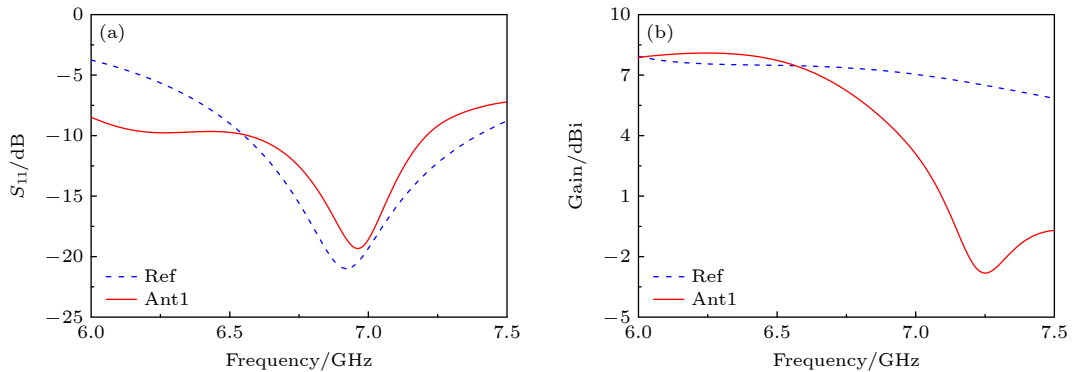


图 4 传统天线与共享孔径天线 1 的辐射性能对比 (a) 反射系数; (b) 增益

Fig. 4. Radiation performance comparison of shared-aperture antenna 1 with conventional antenna: (a) Reflection coefficient; (b) gain.

天线, 这说明共享孔径设计导致了天线辐射方向图的恶化.

根据经典电磁理论可知, 天线的辐射场是由电流源产生的. 因此, 从电流源的角度对天线进行分析, 以解决上述增益下降问题. 图 5 给出了天线在工作频带内任取两频点 7.0, 7.3 GHz 的电流分布. 从图 5(a) 和图 5(d) 可以看出, 传统微带天线在中心贴片上的辐射电流沿 y 轴规律分布, 同向电流使得其辐射场空间叠加, 在天线法向形成聚焦波束. 相比之下, 共享孔径天线 1 的口面辐射电流分布则变得更加复杂. 如图 5(b) 和图 5(e) 所示, 天线中心辐射贴片在强制馈电激励下的电流仍然沿 y 轴同向规律分布, 其周围超构表面单元上耦合产生的电流既有沿 y 轴方向的分量, 也有沿 x 轴方向的分量, 这里沿 x 轴方向的电流分量以 y 轴为对称轴近似对称分布, 其辐射场在空间矢量对消, 对天线主极化方向图影响不大; 而图 5(b) 和图 5(e) 中 A 区域内沿 y 轴方向的电流与紧连的天线中心贴片上的电流存在反向情况, 其辐射场将抵消掉中心贴片电流的辐射, 从而影响天线法向的聚焦效果, 导致天线法向增益的下降. 此外, 从图 5(e) 可以看到, 在 7.3 GHz, B 区域内的电流与天线中心贴片上的电流也是反向的, 其辐射也将导致天线法向增益的下降.

综合上述电流分析可知, 共享孔径天线 1 中心辐射贴片周围的超构表面单元耦合贴片上的辐射电流, 形成了反向的二次电流, 造成了天线法向增

益的恶化. 从改善天线增益的角度出发, 应去掉这些超构表面单元, 且超构表面单元数越少, 有望对天线增益影响越小. 而从低 RCS 的角度出发, 超构表面单元数越多, 超构表面周期性越好, 其低 RCS 性能也将越好. 综合考虑, 采用有限剔除策略对共享孔径天线 1 的结构进行修正, 即去掉图 5(b) 和图 5(e) 中 A, B 区域内与天线中心辐射贴片距离较近、耦合较强且与贴片电流反向的部分超构表面单元, 得到图 3(d) 所示的共享孔径天线 2 (Ant2). 该天线对应的表面电流分布如图 5(c) 和图 5(f) 所示, 可以看出, 尽管靠近天线左右两边的超构表面单元上感应电流与中心贴片上电流反向, 但其幅度较弱; 而沿 y 轴方向与中心贴片靠近的超构表面单元上感应电流相对较强, 且其方向与贴片一致, 因此, 共享孔径天线 2 的增益较共享孔径天线 1 将得到改善.

3.2 低 RCS 天线性能分析

采用有限元法对共享孔径天线 2 (Ant2) 的辐射、散射性能进行计算. 为了比较, 同时计算了图 3(b) 所示的传统天线 (Ref, 参考天线). 图 6 对比了天线的辐射性能. 从图 6(a) 可以看到, 参考天线的工作频段 ($|S_{11}| < -10$ dB) 为 6.55—7.45 GHz, 共享孔径天线 2 的工作频段为 6.3—7.48 GHz, 共享孔径天线 2 与参考天线的工作频段几乎一致, 还略有展宽. 图 6(b) 对比了两副天线的增益, 可以看出, 在工作频带内, 共享孔径天线 2 较参考天线增益

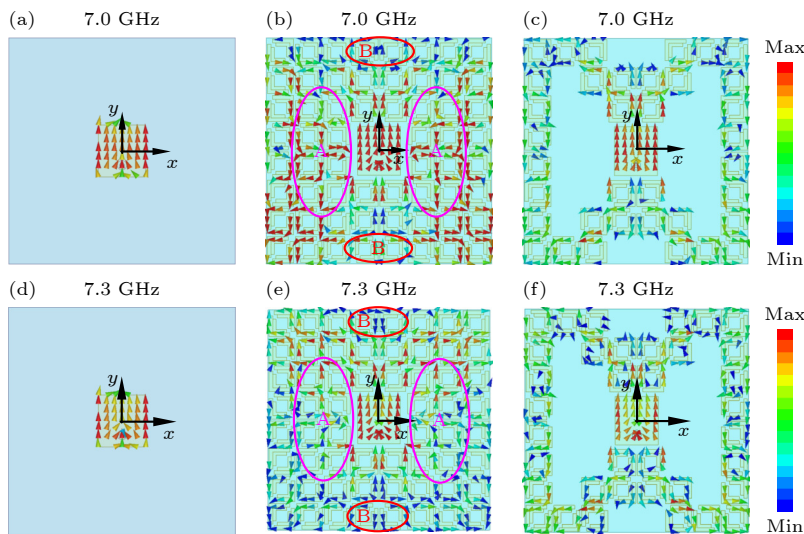


图 5 天线表面电流分析 (a), (d) 传统天线; (b), (e) 共享孔径天线 1; (c), (f) 共享孔径天线 2

Fig. 5. Surface current analysis: (a), (d) Conventional antenna; (b), (e) shared-aperture antenna 1; (c), (f) shared-aperture antenna 2.

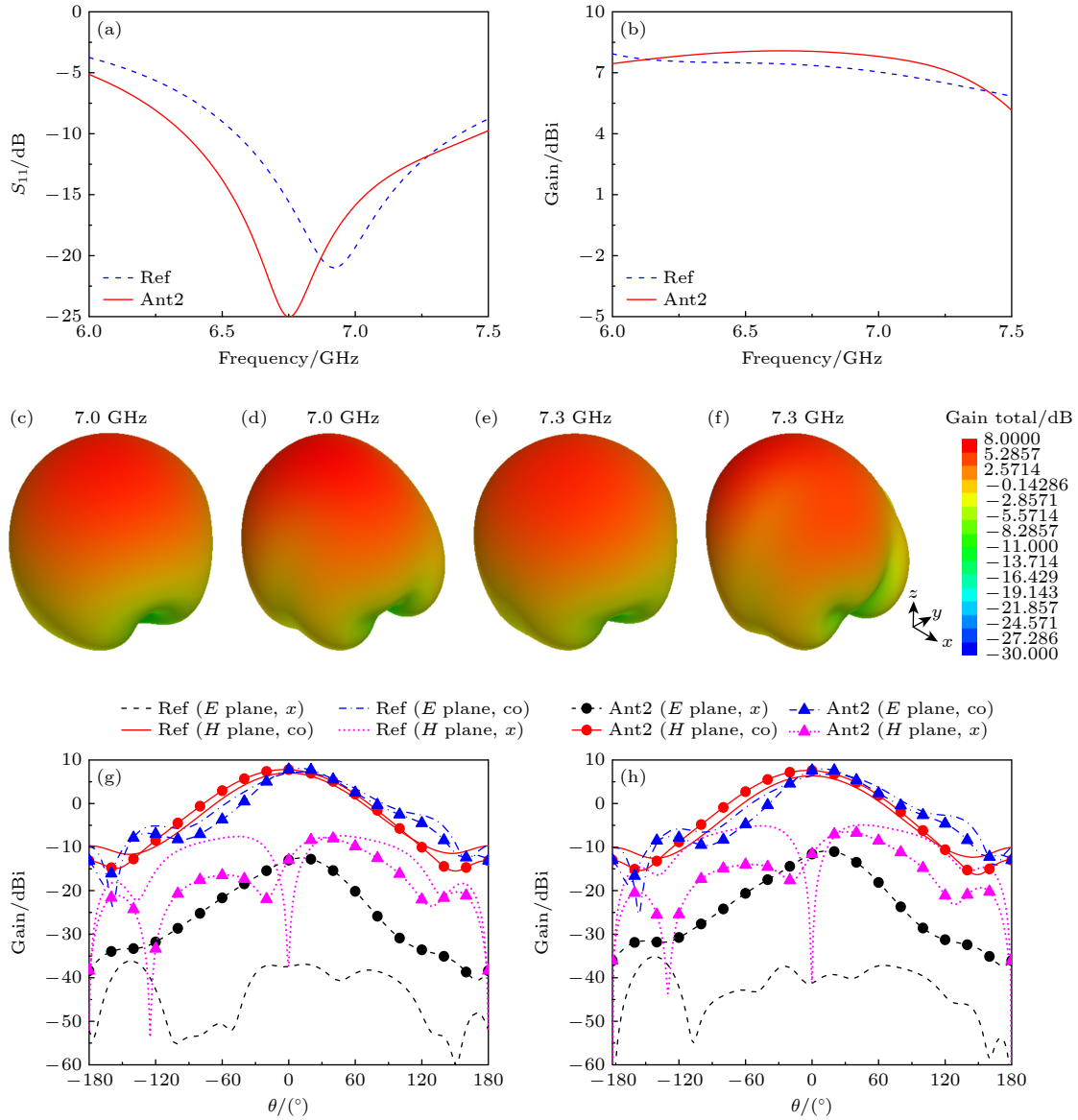


图 6 天线辐射性能对比 (a) 反射系数; (b) 增益; (c)–(f) 三维辐射方向图, 其中 (c), (e) 传统天线, (d), (f) 共享孔径天线 2; (g), (h) 二维辐射方向图

Fig. 6. Radiation performance comparison of the antennas: (a) Reflection coefficient; (b) gain; (c)–(f) 3D radiation patterns, (c), (e) conventional antenna, (d), (f) shared-aperture antenna 2; (g), (h) 2D radiation patterns.

略有提升, 最大提升幅度约 1 dB. 结合图 5(c) 和图 5(f) 可知, 这一提升主要是由沿 y 轴方向与中心贴片靠近的超构表面单元上感应电流的二次辐射贡献的. 图 6(c)–(f) 对比了天线在不同频点的三维方向图, 可以看到, 共享孔径天线 2 与参考天线的最大辐射方向都沿天线口径上方, 说明天线的辐射电流在口径上方形成了同向叠加的空间场. 图 6(g) 和图 6(h) 对比了天线主极化、交叉极化方向的二维方向图, 可以看出, 引入超构表面单元后, 天线主极化方向的增益得到提升, 同时天线 E 面交叉极化总体有所抬升. 结合图 5(c) 和图 5(f), 这主要是由超构表面上感应的 x 方向电流引起的, 进

一步印证了前面理论分析的正确性. 总结上述天线辐射性能结果可以得出, 采用提出的共享孔径结合电流分析的设计方法得到的共享孔径天线 2, 不仅没有恶化传统天线的辐射性能, 还获得了比传统天线更宽的工作频段和更高的增益, 但总体上, 两者辐射性能相比变化不大.

为了验证设计天线的低 RCS 性能, 采用雷达波沿 $-z$ 方向分别照射共享孔径天线 2、共享孔径天线 1、参考天线, 得到的单站 RCS 结果如图 7 所示. 可见, 无论对 x 极化或 y 极化波, 共享孔径天线 2 在 6–16 GHz 较参考天线都表现出 RCS 减缩效果, 最大减缩幅度超过 20 dB; 与共享孔径天

线 1 相比, 共享孔径天线 2 的 RCS 在减缩幅度上有所变化, 但 RCS 减缩频段和总体趋势基本一致; 此外, 共享孔径天线 1 与图 2(b) 中的 RCS 减缩曲线一致性更好, 这一结果说明所采用的有限剔除超构表面单元策略虽然可能影响 RCS 数值, 但仍保证了 RCS 减缩趋势和效果, 且 RCS 减缩频段包括了天线的辐射频段, 即同时实现了天线工作频带内和频带外的 RCS 减缩. 图 8 对比了天线工作频带内 (7.3 GHz) 和频带外 (13.6 GHz) 的散射方向图. 图 8(a)–(d) 表明传统天线的强散射峰值与其辐射峰值方向相同, 天线口面法线方向的散射最强. 相比之下, 图 8(e)–(h) 表明, 共享孔径天线 2 的结构将照射雷达波的能量散射至法线方向之外, 使得天线的散射能量在空间不再聚焦, 不仅显著降低了天线法向的 RCS, 也使天线在整个空间的散射峰值有明显的减小, 这里的散射方向图再次证明了

第 2 节低 RCS 超构表面设计的有效性. 图 9 进一步给出了天线在斜入射、不同极化波照射下沿镜像方向的 RCS 结果. 从图 9(a)–(c) 可以看出, 当入射角增大到 30° 时, 无论对 TE 还是 TM 极化, 共享孔径天线 2 在 6–16 GHz 较参考天线仍有明显 RCS 减缩; 从图 9(d)–(f) 可以看出, 当入射角增大到 60° 时, 尽管 RCS 减缩幅度有所减小, 但宽频带的 RCS 减缩总体趋势保持较好, 这表明设计天线的 RCS 减缩效果具有较好的角度、极化稳定性.

综上所述, 采用共享孔径结合电流分析设计的共享孔径天线 2, 在没有恶化天线主极化辐射性能的同时, 实现了包括天线辐射频带在内的超宽带 RCS 有效减缩. 数值分析结果完全验证了理论分析的正确性, 也证实了提出设计方法的可行性. 值得一提的是, 提出的“辐射、低 RCS 独立设计+共享孔径结构+辐射电流分析+有限剔除超构表面”

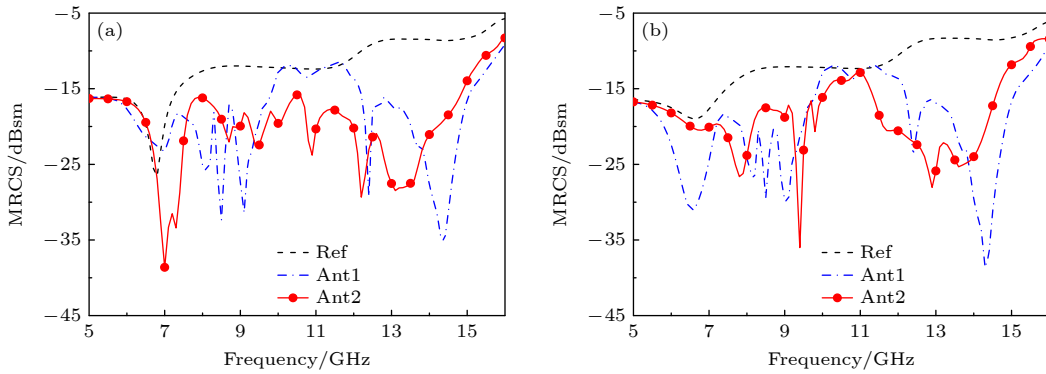


图 7 天线 RCS 对比 (a) x 极化; (b) y 极化

Fig. 7. RCS comparison of the antennas: (a) x polarization; (b) y polarization.

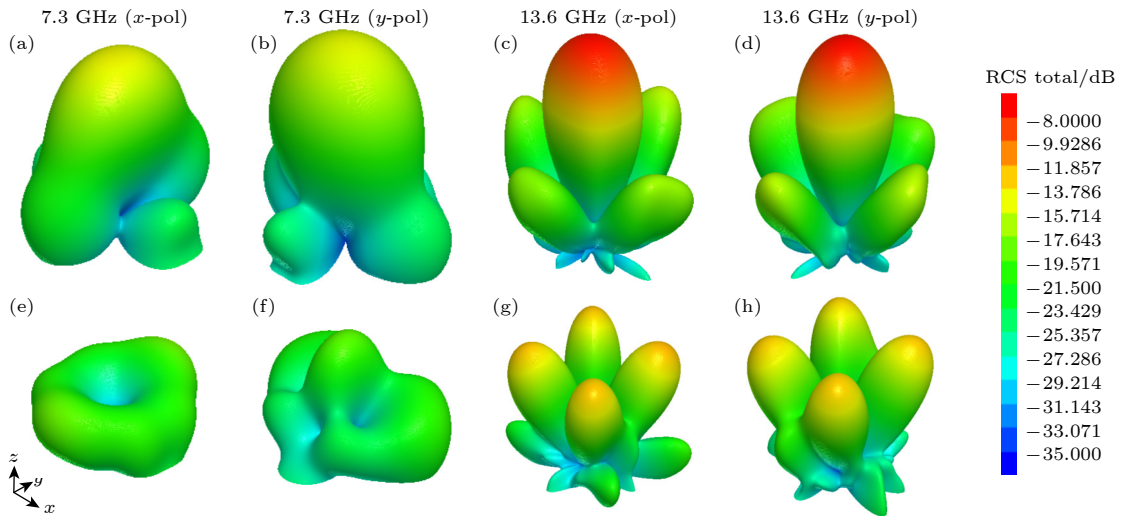


图 8 天线散射方向图对比 (a)–(d) 传统天线; (e)–(h) 共享孔径天线 2

Fig. 8. Scattering patterns comparison of the antennas: (a)–(d) Conventional antenna; (e)–(h) shared-aperture antenna 2.

方法摒弃了从天线到低 RCS 天线的传统设计思路, 将散射的优化问题转化为辐射的优化问题, 不仅实现了超构表面与天线的结构一体化设计, 还显著地降低了低 RCS 天线优化设计的难度, 节省了散射优化所需的大量时间, 加速了天线优化进程.

表 1 将本文提出的共享孔径天线 2 与文献中同样基于散射场矢量叠加设计的低 RCS 天线进行了对比. 与文献 [23, 32] 采用额外加载超构表面的设计方法相比, 本文采用的共享孔径方法没有增加传统天线的尺寸. 文献 [28, 30] 从辐射散射一体化的角度思考, 直接将超构表面作为天线, 同时实现辐射和 RCS 减缩, 这种设计的优点在于不会增加

天线的尺寸, 但在优化过程中, 需同时兼顾辐射、散射性能, 某种程度增加了优化设计复杂度. 文献 [29, 31] 采用激励低 RCS 超构表面的方法, 既没有增加天线的尺寸, 又同时实现了带内、带外 RCS 减缩, 但怎样在低 RCS 表面设计的同时兼顾天线辐射性能是其中的难点. 相比之下, 本文提出天线与超构表面共享孔径的设计方法和有限剔除超构表面单元的策略, 可以先将辐射、低散射相对独立设计, 共享孔径后再有策略地综合优化, 降低了设计难度, 且依据该方法设计的共享孔径天线 2 既没有增加天线尺寸, 又同时实现了辐射带宽、增益提升和带内、带外 RCS 减缩.

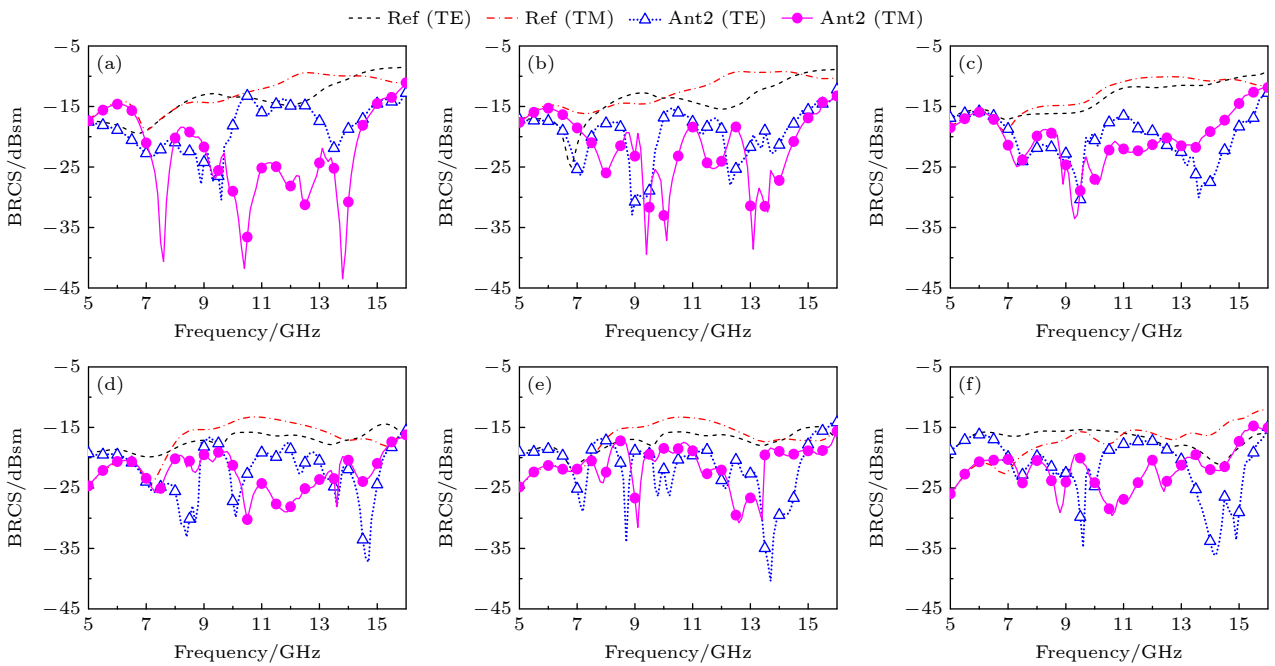


图 9 斜入射下天线双站 RCS 对比 (a) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 0^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 180^\circ$; (b) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 90^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 270^\circ$; (c) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 315^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 135^\circ$; (d) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 0^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 180^\circ$; (e) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 90^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 270^\circ$; (f) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 315^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 135^\circ$

Fig. 9. Bistatic RCS under different polarized oblique incidences: (a) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 0^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 180^\circ$; (b) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 90^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 270^\circ$; (c) $\theta_{inc} = 30^\circ, \varphi_{inc} = 315^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 135^\circ$; (d) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 0^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 180^\circ$; (e) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 90^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 270^\circ$; (f) $\theta_{inc} = 60^\circ, \varphi_{inc} = 315^\circ, \theta_{sca} = 30^\circ, \varphi_{sca} = 135^\circ$.

表 1 本文设计共享孔径天线 2 与已有文献天线比较

Table 1. Comparison of shared-aperture antenna 2 in this work and antennas in previous work.

对象	设计思路	设计方法	尺寸增加	辐射带宽拓宽	增益提升	带内/带外RCS减缩	设计复杂度
[23]	辐射→低散射	加载超表面	是	否	否	仅带外	低
[32]	辐射→低散射	加载超表面	是	是	否	带内+带外	低
[28]	辐射散射一体	激励超表面	否	否	否	带内	高
[30]	辐射散射一体	激励超表面	否	否	否	带内+带外	高
[29]	低散射→辐射	激励超表面	否	是	是	带内+带外	高
[31]	低散射→辐射	激励超表面	—	是	是	带内+带外	高
本文	低散射→辐射	共享孔径	否	是	是	带内+带外	低

4 实验验证

为进一步验证上述设计的有效性,采用印刷电路板技术加工了图 3(d) 所示的共享孔径天线 2 和图 3(b) 所示的传统天线. 图 10 为制作的天线样件. 在微波暗室中分别测试了两副天线的辐射和散射性能. 图 11 为实测的天线 $|S_{11}|$ 曲线, 参考天线的工作频段为 6.51—7.06 GHz, 共享孔径天线 2 的工作频段为 6.25—6.97 GHz, 共享孔径天线 2 的工作频段几乎包含了参考天线, 这一趋势与仿真结果一致. 与图 6(a) 相比, 两副天线的实测工作频段都向低频偏移约 180 MHz, 分析认为, 这里实测与仿真的频偏主要是由多层介质板的加工及参数误差引起的. 在两副天线的共同工作频段内, 随机选取 6.7 GHz 测试对比了天线的增益方向图. 如图 12 所示, 两副天线的方向图形状基本一致, 尤其在主瓣区域差别很小, 共享孔径天线 2 的增益较参考天线高 0.6 dB. 采用空间波法分别测试了两副天线对 x 极化、 y 极化照射波的反射信号 [17], 得到共享孔径天线 2 相对参考天线的 RCS 减缩值. 图 13 为

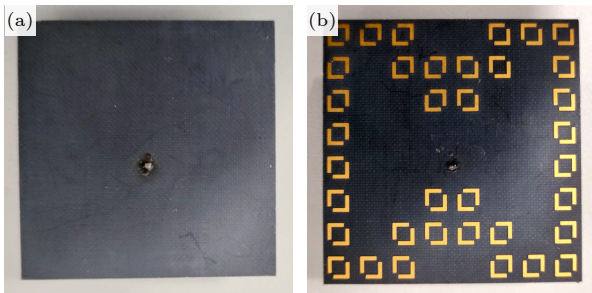


图 10 天线样件实物 (a) 传统天线; (b) 共享孔径天线 2
Fig. 10. Picture of fabricated antennas: (a) Conventional antenna; (b) shared-aperture antenna 2.

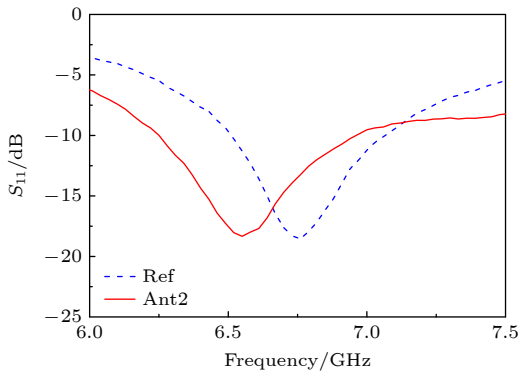


图 11 实测天线的 $|S_{11}|$ 曲线
Fig. 11. Measured $|S_{11}|$ of fabricated antennas.

雷达波垂直照射天线时的 RCS 减缩曲线. 可以看到, 无论对 x 极化还是 y 极化照射波, 实测 RCS 减缩曲线都较仿真向低频偏移约 200 MHz, 且实测曲线总体上与仿真吻合较好, 这一趋势与实测的 $|S_{11}|$ 曲线相一致. 综上所述, 实验结果验证了共享孔径天线 2 的良好辐射性能与宽带 RCS 减缩性能, 也证实了本文提出设计方法的有效性.

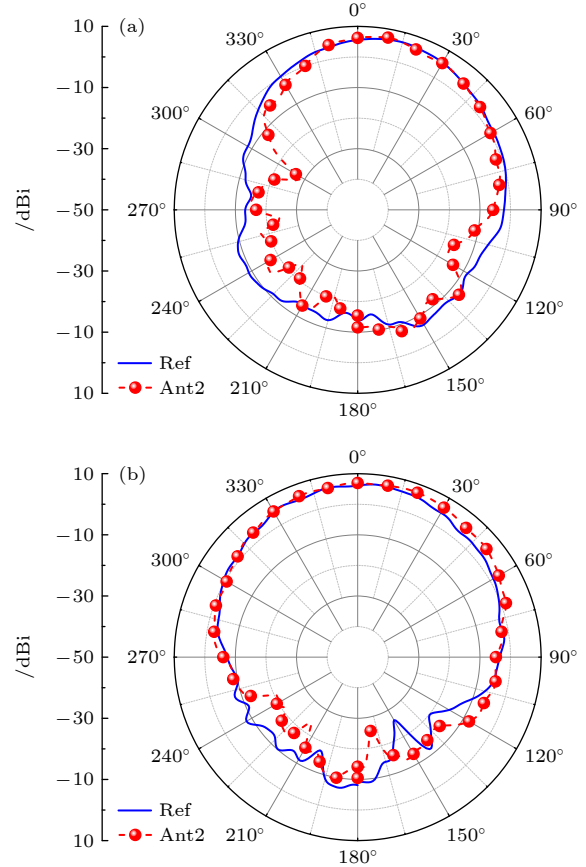


图 12 6.7 GHz 实测天线方向图 (a) E 面; (b) H 面
Fig. 12. Measured radiation patterns at 6.7 GHz: (a) E plane; (b) H plane.

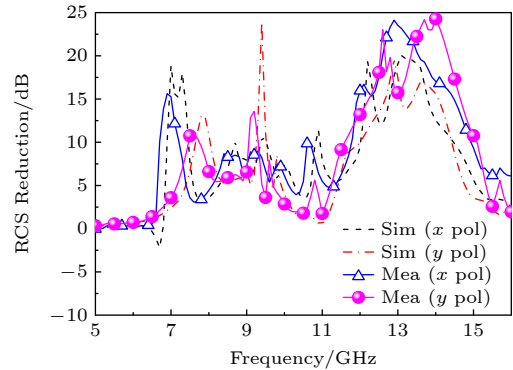


图 13 共享孔径天线 2 单站 RCS 减缩曲线
Fig. 13. Monostatic RCS reduction of shared-aperture antenna 2.

5 结 论

传统低雷达散射截面 (RCS) 天线的设计多是从常见天线出发, 设法减小其 RCS, 这种思路的本质是在确保辐射性能的基础上优化散射性能, 而散射性能的优化需兼顾辐射性能, 其难度较大且散射优化通常较为耗时. 本文采用逆向思维, 提出了一种基于共享孔径技术设计低 RCS 电磁超构表面天线的新方法, 这种方法的设计过程可总结为“天线辐射、低 RCS 超构表面独立设计+共享孔径结构+辐射电流分析+有限剔除超构表面”, 其本质是先将辐射、低散射相对独立设计, 共享孔径后, 在确保低散射的基础上有策略地综合优化辐射性能, 即将传统散射的优化问题转化为辐射的优化问题, 因此降低了低 RCS 天线设计的难度, 加速了天线设计进程. 为了验证提出方法的有效性, 首先设计了一款低 RCS 超构表面, 然后将该超构表面和传统天线的辐射结构直接共享孔径紧密排列, 并通过电流分析修正天线的局部结构, 既保证了天线的良好辐射, 又实现了宽带 RCS 减缩. 对设计天线进行了加工测试, 结果证实设计的天线辐射性能较好, 其 RCS 减缩频段较宽且覆盖了天线辐射频段. 本文提出的方法不仅适用于单元天线, 也可用于阵列天线, 其可拓展性强, 采用该方法设计的天线具有设计简单、结构紧凑、实用性强等特点.

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] Cui T 2017 *J. Opt.* **19** 084004
- [3] Li T, Yang H H, Li Q, Zhu X W, Cao X Y, Gao J, Wu Z B 2019 *IET Microwaves Antennas Propag.* **13** 185
- [4] Li T, Yang H H, Li Q, Tian J H, Gao K, Li S J, Cao X Y 2024 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **23** 1206
- [5] Zhao B, Huang C, Yang J N, Song J K, Guan C L, Luo X G 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 982
- [6] Dhumal A, Mahesh S B, Bhardwaj A, Saikia M, Malik S, Srivastava K V 2023 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **65** 96
- [7] Ghosh S, Ghosh J, Singh M S, Sarkhel A 2023 *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* **70** 76
- [8] Xi Y, Jiang W, Wei K, Hong T, Gong S X 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 422
- [9] Yu J, Jiang W, Gong S X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 1058
- [10] Wang C, Li Y F, Feng M C, Wang J F, Ma H, Zhang J Q, Qu S B 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 6508
- [11] Huang C, Pan W B, Ma X L, Luo X G 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 448
- [12] 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
- [13] Ha T D, Zhu L, AlSaab N, Chen P Y, Guo J L 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 67
- [14] Zhang T Z, Pang X Y, Zhang H, Zheng Q 2023 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 665
- [15] Li T, Yang H H, Li Q, Jidi L R, Cao X Y, Gao J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 5325
- [16] Yang H H, Cao X Y, Yang F, Gao J, Xu S H, Li M, Chen X B, Zhao Y, Zheng Y J, Li S J 2016 *Sci. Rep.* **6** 35692
- [17] Feng K S, Li N, Yang H H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 194101 (in Chinese) [冯奎胜, 李娜, 杨欢欢 2021 物理学报 **70** 194101]
- [18] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q Y, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 1479
- [19] Zhang Z C, Huang M, Chen Y K, Qu S W, Hu J, Yang S W 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 7927
- [20] Tan Y, Yuan N, Yang Y, Fu Y Q 2011 *Electron Lett.* **47** 582
- [21] Zheng Y J, Gao J, Cao X Y, Yuan Z D, Yang H H 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **14** 1582
- [22] Liu Y, Liu Z S, Wang Q, Jia Y T 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 8955
- [23] Liu J, Li J Y, Chen Z N 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 3834
- [24] Yao W, Gao H T, Tian Y, Wu J, Guo L Y, Huang X J 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 5663
- [25] Liu Y, Jia Y T, Zhang W B, Li F 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 3644
- [26] Zhu L, Sun J W, Hao Z Y, Kuai X L, Zhang H H, Cao Q S 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 975
- [27] Guo Q X, Chen Q, Su J X, Li Z R 2024 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **23** 768
- [28] 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
- [29] Yang H H, Li T, Jidi L R, Gao K, Li Q, Qiao J X, Li S J, Cao X Y, Cui T J 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 4075
- [30] Wang P F, Jia Y T, Hu W Y, Liu Y, Lei H Y, Sun H B, Cui T J 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 5626
- [31] Ren J Y, Jiang W, Gong S X 2018 *IEEE Microwaves Antennas Propag.* **12** 1793
- [32] Jia Y T, Liu T, Zhang W B, Wang J, Liao G S 2018 *IEEE Access* **6** 23561

Low-RCS electromagnetic metasurface antenna based on shared-aperture technique*

Li Tong¹⁾ Yang Huan-Huan^{1)†} Li Qi²⁾ Liao Jia-Wei¹⁾
Gao Kun¹⁾ Ji Ke-Feng¹⁾ Cao Xiang-Yu¹⁾

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

2) (*System Innovation Center of China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China*)

(Received 20 January 2024; revised manuscript received 15 April 2024)

Abstract

In this paper, a novel shared-aperture method of electromagnetic metasurface and antenna is proposed to obtain low radar-cross-section (RCS) performance. In this method, the low-RCS metasurface is first designed, then this metasurface is combined with traditional antenna to obtain novel low-RCS antenna based on shared-aperture technique. Besides, the analysis and corresponding local structure modification are also conducted to ensure that the antenna has good radiation performance while reducing broadband RCS. Using this method, a dual-layer polarization rotation unit cell is first proposed and its broadband working principle is investigated by both theoretical analysis and numerical comparison. Based on this unit cell, a broadband low-RCS metasurface is constructed. Then an initial shared-aperture metasurface antenna is obtained by substituting the middle cells in the metasurface with traditional patch antenna directly. Through careful analysis of surface current in radiation mode, the gain decrease of this metasurface antenna is revealed. On this basis, a finite removal strategy is put forward and some metasurface cells in the antenna are removed by using the electric current analysis. Consequently, an improved shared-aperture metasurface antenna is proposed. This improved antenna works in a frequency range from 6.3 to 7.48 GHz, which is slightly wider than the traditional patch antenna. Its gain is also higher than that of traditional antenna, with a maximum improvement of 1 dB. Meanwhile, the apparent RCS decreases from 6 to 16 GHz for any polarized incident wave, and the reduction peak is larger than 20 dB. Finally, fabrications and measurements are conducted. The measurement results and numerical calculations are in good agreement. The well-behaved radiation performance and broadband low-RCS property of this metasurface antenna verify the effectiveness of the proposed method. Unlike most of reported design methods of low-RCS antennas directly from traditional antennas, the proposed method adopts reverse thinking to transform scattering optimization into radiation optimization, realizing the integration between metasurface and antenna, thus making low-RCS antenna design easier and faster.

Keywords: electromagnetic metasurface, antenna, shared-aperture technique, low radar cross section

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

DOI: [10.7498/aps.73.20240142](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240142)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62371466, 62171460, 62203464), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2024JC-ZDXM-39, 20220104, 2020022), and the Foundation of National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave (Grant No. HTKJ 2022KL504004).

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



基于共享孔径技术的低RCS电磁超构表面天线设计

李桐 杨欢欢 李奇 廖嘉伟 高坤 季轲峰 曹祥玉

Low-RCS electromagnetic metasurface antenna based on shared-aperture technique

Li Tong Yang Huan-Huan Li Qi Liao Jia-Wei Gao Kun Ji Ke-Feng Cao Xiang-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 124101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240142

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240142>

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

电磁超构表面与天线结构一体化的低RCS阵列

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

物理学报. 2021, 70(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210746>

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>

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>

有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体

Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid incorporation of active devices

物理学报. 2022, 71(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211254>

天线方向系数的一类计算逼近方法

A class of approximate computation method for antenna directivity

物理学报. 2020, 69(2): 028401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191268>

幅相同调的吸波-对消雷达散射截面减缩超表面设计

Absorption and cancellation radar cross-section reduction metasurface design based on phase- and amplitude-control

物理学报. 2022, 71(8): 084102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212174>