



## 一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计

郝彪 杨宾锋 高军 曹祥玉 杨欢欢 李桐

### A coding metasurface antenna array with low radar cross section

Hao Biao Yang Bin-Feng Gao Jun Cao Xiang-Yu Yang Huan-Huan Li Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 244101 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200978

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200978>

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>

#### 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>

#### 太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

#### 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>

#### 太赫兹频率编码器

Terahertz frequency coding metasurface

物理学报. 2019, 68(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190032>

#### 一种宽角域散射增强超表面的研究

Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface

物理学报. 2018, 67(19): 198101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181053>

## 一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计\*

郝彪 杨宾锋<sup>†</sup> 高军<sup>‡</sup> 曹祥玉 杨欢欢 李桐

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2020年6月24日收到; 2020年7月26日收到修改稿)

设计了一种非周期排布的低雷达散射截面超表面天线阵列. 该阵列由两种天线单元构成, 两种天线单元的上层贴片形状相同, 正交放置, 作为天线单元能以同种极化方式在相同频带下工作, 作为超表面单元相互之间能形成  $180^\circ \pm 37^\circ$  的有效相位差. 阵列在  $x$  极化方向与  $y$  极化方向上分别利用相位抵消与吸波原理减缩雷达散射截面. 同时, 根据编码超材料理论, 使用编程软件将两种单元进行非周期编码, 使阵列的反射场呈漫散射状分布, 有效降低了其峰值雷达散射截面. 仿真结果显示天线阵列的辐射性能良好. 与同等大小的金属板相比, 在  $x$  极化波垂直入射时, 设计天线阵列单站雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的 6 dB 减缩带宽为 4.8—7.4 GHz, 相对带宽为 42.6%; 在  $y$  极化波垂直入射时, 设计天线阵列单站 RCS 的 6 dB 减缩带宽为 4.6—7.8 GHz, 相对带宽为 51.6%. 同时, 设计天线阵列较棋盘式天线阵散射能量分布更加均匀, 空间中 RCS 峰值明显降低. 实测结果与仿真结果符合较好.

**关键词:** 低雷达散射截面, 贴片天线阵, 漫散射

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

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200978

## 1 引言

随着信息化时代的来临, 战争的形态也正在从机械化战争逐步向信息化战争过渡, 世界各国对武器装备的性能也在向信息化迈进. 通信设备作为战争中不可或缺的部分, 对战场信息的快速传递起到重要作用. 为保证无线通信设备正常工作, 其天线常常处于相对暴露的位置从而产生较大的雷达散射截面 (radar cross section, RCS), 导致装备被对方侦测到<sup>[1]</sup>. 因此, 降低装备中天线的 RCS 成为军用天线设计的热点问题. 电磁超表面 (metasurface, MS) 是电磁超材料的二维形态, 同样具有自然界难以存在的奇异电磁特性, 从其早期研究的人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC)<sup>[2–4]</sup>、频

率选择表面<sup>[5–7]</sup>和完美吸波体<sup>[8–10]</sup>, 到近年来研究的极化旋转表面<sup>[11–13]</sup>、相位梯度表面<sup>[14–16]</sup>等, 都在缩减天线 RCS 方面得到了广泛的应用.

文献<sup>[17]</sup>通过在圆极化槽缝天线周围加载“王”型 AMC, 在提升天线带宽及增益的同时, 在 9—19 GHz 范围内降低了天线的 RCS. 文献<sup>[18]</sup>通过 MATLAB 软件计算, 以非周期编码的方式将两种具有相位抵消特性的 MS 组成  $8 \times 8$  阵列, 使阵列表面散射场成漫散射状. 文献<sup>[19]</sup>将具有相位抵消特性的 MS 按非周期编码的排布方式加载在  $2 \times 2$  贴片天线阵列的周围, 在 8—28 GHz 实现了天线阵列法线方向单站 RCS 的降低, 并且散射场在空间中呈漫散射状分布. 文献<sup>[20–22]</sup>均设计出两种工作频率相近而表面反射相位相差  $180^\circ$  的贴片天线单元, 并将其按规则排布方式组成  $4 \times 4$  阵

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61671464, 61701523, 61801508)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2017JM6025, 2019JQ-103) 和博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20180375) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: bf\_yang@163.com

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: gjgj9694@163.com

列,降低了天线阵的 RCS,实现了辐射散射一体化设计.虽然上述研究对天线 RCS 减缩取得有效成果,但仍有改善和优化的空间.文献 [17] 及文献 [19] 是将天线与 MS 分开设计,设计过程中无法对组合后的天线辐射性能进行评估,并且加载后天线口径明显增大.文献 [20—22] 将天线设计与 MS 设计融于一体,解决了文献 [17] 与文献 [19] 中存在的矛盾,但仍然需要设计两种贴片形状,过程复杂.此外,采用规则方式排布,虽在法线方向上减小了单站 RCS,但其他方向上出现了较强的散射峰.

本文针对以上不足,设计了一种由开口环组成的贴片结构,其在  $x$  极化方向与  $y$  极化方向上的反射波之间存在有效相位差.将两贴片正交放置后其反射波在相同极化方向上能够进行相位抵消.在两贴片下方分别调整馈电,使两者工作在同一频段、同一模式.因此组成天线阵后,与由一种单元组成的天线阵辐射性能相同.最后根据编码超材料理论,视天线的散射为“二次辐射”,将天线阵辐射理论中的阵因子函数作为适应度函数,通过遗传算法计算出阵因子在整个反射域中最大值最小时的编

码方式,将贴片单元按该方式排布,在实现阵列法向单站 RCS 减缩的同时避免了其他方向出现较强的散射峰.本文在设计天线阵过程中,在考虑天线单元辐射性能的同时,充分利用了天线单元的散射性能来降低天线阵的 RCS.若对天线单元的数量、表面的散射特性进行调整,则可以设计出更多不同类型的低散射天线阵,例如可以设计三种辐射特性相似、反射相位相差  $120^\circ$  的天线单元进行组阵,使设计出的天线阵 RCS 减缩带宽更宽.因此本文的设计思想具有一定的普适性.

## 2 单元设计与仿真

利用 Ansoft HFSS 14 商用电磁仿真软件对设计天线进行建模仿真,天线单元结构如图 1 所示.两单元介质板均使用介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.001 的 F4B 材质.单元 A 上层金属贴片由 1 个十字型结构加上 4 个正方形开口环组成,贴片整体具有两条正交的对称轴;中间层的长方形金属贴片与 SMA 馈电结构连接,共同组成 L 型探针对上层

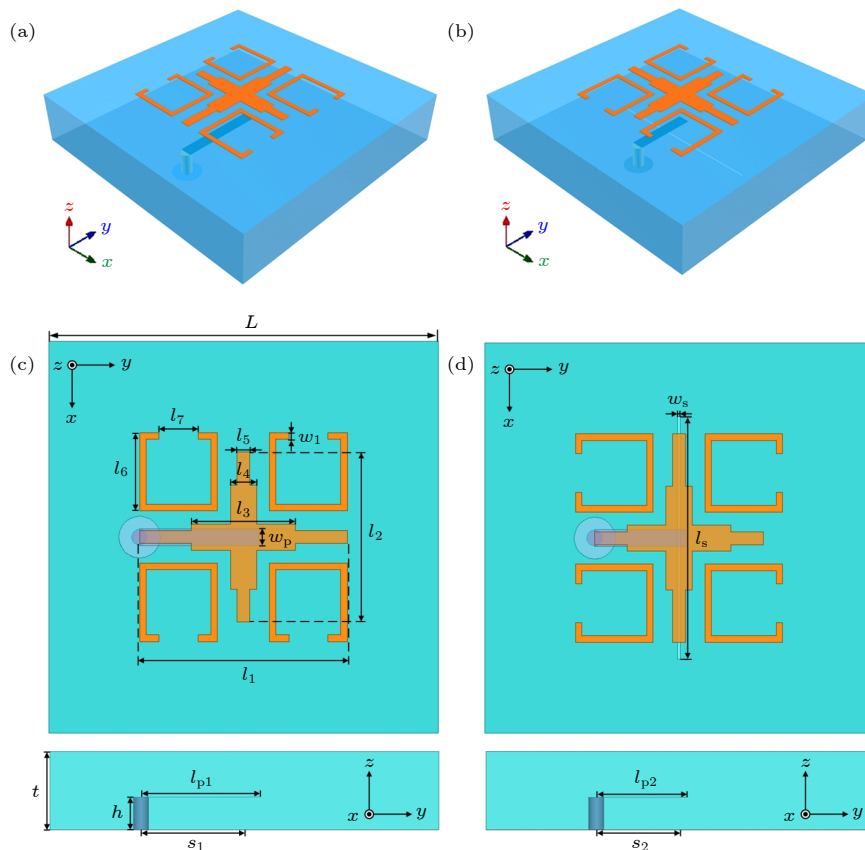


图 1 天线单元结构示意图 (a) 单元 A 立体结构; (b) 单元 B 立体结构; (c) 单元 A 平面结构; (d) 单元 B 平面结构  
 Fig. 1. Three-dimensional geometry of (a) element A and (b) B; two-dimensional geometry of (c) element A and (d) B.

贴片进行耦合馈电; 下层为金属地板结构. 单元 B 在单元 A 的基础上稍加改变得到, 其上层贴片与单元 A 上层贴片形状相同, 方向正交; 中间层长方形金属贴片宽度不变, 长度变短, 馈电位置有所调整; 下层对金属地板进行了开槽. 两单元具体结构参数如下:  $L = 30$  mm,  $l_1 = 16$  mm,  $l_2 = 13$  mm,  $l_3 = 8$  mm,  $l_4 = 2$  mm,  $l_5 = 1$  mm,  $l_6 = 6$  mm,  $l_7 = 3$  mm,  $l_{p1} = 9.2$  mm,  $l_{p2} = 7$  mm,  $w_p = 1.3$  mm,  $l_s = 18.6$  mm,  $w_s = 0.2$  mm,  $w_1 = 0.5$  mm,  $h = 2.5$  mm,  $s_1 = 8$  mm,  $s_2 = 6.5$  mm,  $t = 6$  mm.

对两单元加载  $50 \Omega$  匹配负载后, 使用主从边界条件和 Floquet 端口激励对其反射特性进行仿真. 同时, 为确保两单元能有相似的辐射特性, 使用辐射边界条件和集总端口激励对其辐射特性进行同步仿真. 由于单元 B 的上层贴片由单元 A 旋转  $90^\circ$  得到, 且馈电贴片对反射相位影响很小, 因此单元 A 对  $x$  极化波的反射相位与单元 B 对  $y$  极化波的反射相位基本相同. 同时, 两单元在相同极化方向上的反射幅度也具有相似性, 即在  $x$  极化波照射时, 其反射接近于全反射; 在  $y$  极化波照射时, 由于馈电贴片沿  $y$  轴放置, 根据互易原理, 电磁波

会被部分吸收, 部分频段反射幅度降低. 结合以上分析, 针对上层贴片, 原本需要对两单元反射特性的仿真可简化为仅对单元 A 反射特性进行仿真, 在不失准确性的前提下, 一定程度上降低了设计难度.

仿真分析两单元上层贴片参数  $l_2$ ,  $l_6$  的变化对单元辐射及散射特性的影响, 结果如图 2 所示. 对于  $l_2$  的变化, 在  $y$  极化波照射时,  $l_2$  对单元 A 反射特性基本无影响; 在  $x$  极化波照射时, 单元 A 反射相位随  $l_2$  增大而向低频移动, 反射幅度基本保持在 1, 呈现全反射状态; 单元 A 的  $|S_{11}|$  基本不受  $l_2$  影响, 单元 B 的  $|S_{11}|$  随  $l_2$  增大向低频移动且带宽变窄. 对于  $l_6$  的变化, 单元 A 对  $y$  极化波反射相位随  $l_6$  增大明显向低频移动, 同时反射幅度最小值也随  $l_6$  增大而往低频移动;  $x$  极化波对其反射特性影响很小, 反射相位随  $l_6$  增大微向低频移动, 反射幅度接近于 1; 两单元  $|S_{11}|$  均随  $l_6$  增大向低频移动, 但对单元 A 的影响更明显.

仿真分析单元 B 的馈电贴片长度  $l_{p2}$  及地板开槽长度  $l_s$  的变化对单元辐射及散射特性的影响, 结果如图 3 所示. 当  $y$  极化波入射时,  $l_{p2}$  对反射相位有微小影响, 对反射幅度影响明显; 当  $x$  极化波入

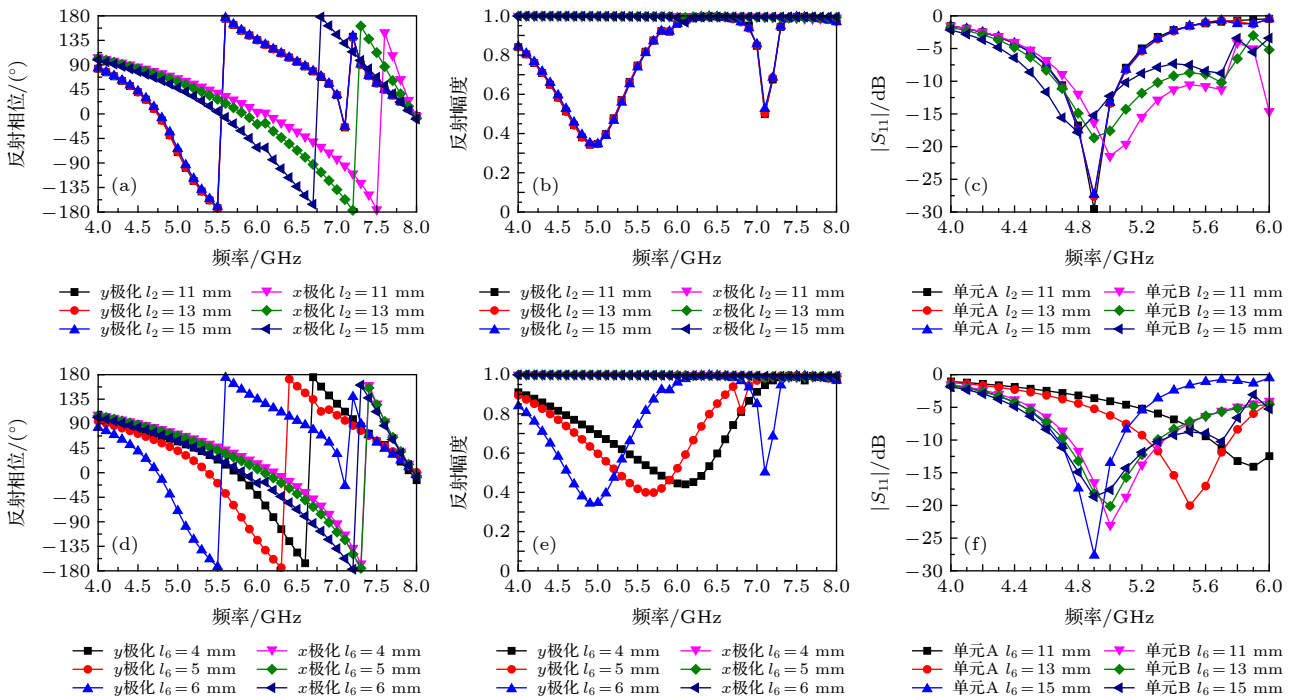


图 2 不同参数对两单元性能的影响 (a)  $l_2$  对单元 A 反射相位的影响; (b)  $l_2$  对单元 A 反射幅度的影响; (c)  $l_2$  对两单元  $|S_{11}|$  的影响; (d)  $l_6$  对单元 A 反射相位的影响; (e)  $l_6$  对单元 A 反射幅度的影响; (f)  $l_6$  对两单元  $|S_{11}|$  的影响

Fig. 2. Effects of  $l_2$  and  $l_6$ : Effects of  $l_2$  on (a) reflection phase of element A, (b) reflection magnitude of element A, and (c)  $|S_{11}|$  of element A and B; effects of  $l_6$  on (d) reflection phase of element A, (e) reflection magnitude of element A, and (f)  $|S_{11}|$  of element A and B.

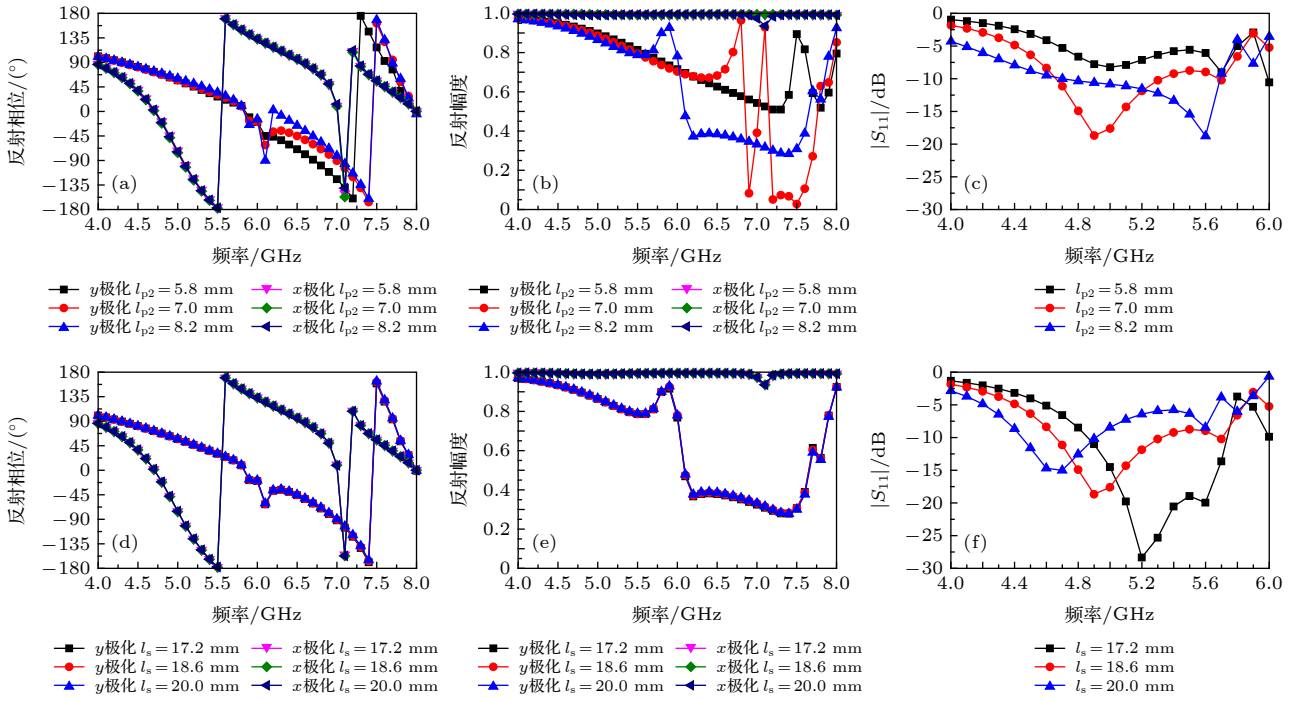


图3 不同参数对单元B性能的影响 (a)  $l_{p2}$ 对反射相位的影响; (b)  $l_{p2}$ 对反射幅度的影响; (c)  $l_{p2}$ 对 $|S_{11}|$ 的影响; (d)  $l_s$ 对反射相位的影响; (e)  $l_s$ 对反射幅度的影响; (f)  $l_s$ 对 $|S_{11}|$ 的影响

Fig. 3. Effects of  $l_{p2}$  and  $l_s$  on element B: Effects of  $l_{p2}$  on (a) reflection phase, (b) reflection magnitude, and (c)  $|S_{11}|$ ; effects of  $l_s$  on (d) reflection phase, (e) reflection magnitude, and (f)  $|S_{11}|$ .

射时,  $l_{p2}$  基本不对反射特性造成影响;  $|S_{11}|$ 受  $l_{p2}$  影响明显, 随  $l_{p2}$  增大先达到匹配, 再向高频移动.  $l_s$  对反射特性基本没有影响,  $|S_{11}|$ 随  $l_s$  增大向低频移动, 带宽变窄.

通过对以上参数分析, 可以发现上层贴片参数变化对单元的反射特性和辐射特性同时构成影响, 而馈电贴片长度、地板开槽长度仅对单元辐射特性构成较大影响, 因此可先对贴片参数进行优化, 使单元 A 两极化方式反射相位相差  $180^\circ$ , 而后对两单元馈电贴片长度及单元 B 地板开槽长度进行调整, 使两单元可以工作在同一频段.

两单元辐射特性如图 4 所示, 散射特性如图 5 所示. 由图 4(a) 看出, 两单元在 4.68—5.12 GHz 时  $|S_{11}|$  小于 -10 dB, 在共同工作带宽内增益稳定在 6 dB 以上; 由图 4(b) 与图 4(c) 看出两单元辐射方向图良好, 主极化相似度高, 交叉极化在  $0^\circ$  附近保持在较低水平. 由图 5(a) 可以看出单元 A 在  $x$  极化时的反射相位曲线与单元 B 在  $y$  极化时的反射相位曲线相似度高, 在正交方向上反射相位曲线同样相似度高, 证明了关于优化上层贴片尺寸时仅对单元 A 进行反射特性仿真的合理性. 由图 5(b) 和图 5(c) 可知, 在  $x$  极化时, 两单元反射相位差在

5.1—7.0 GHz 内满足  $180^\circ \pm 37^\circ$  的有效相位差条件, 且反射幅度都接近于 1, 符合相位抵消的要求, 使组阵后阵列 RCS 得到降低; 在  $y$  极化时, 两单元对入射电磁波有各自的吸收频段, 这是组阵后 RCS 减小的主要原因, 同时在 5.4—6.0 GHz 时两单元反射幅度相近并且满足有效相位差条件, 亦可通过相位抵消对 RCS 减缩起到辅助作用.

为更好说明上层贴片对反射相位的影响, 分析了两单元  $x$  极化波照射情况下, 反射相位为  $0^\circ$  时对应频率下的表面电流分布, 结果如图 6 所示. 单元 A 中心贴片电流沿  $x$  轴负方向, 开口环内部电流较弱; 单元 B 开口环内部电流连续, 靠近  $x$  轴一侧电流较强且与中心贴片电流方向一致, 都沿  $x$  轴负方向, 其整体电流长度比单元 A 长, 因此频率较单元 A 往低频移动, 从而使得两种单元在设计频率出现有效相位差.

### 3 低 RCS 天线阵设计与仿真

为实现组阵后阵列具有低 RCS 特性, 选取单元 A 与单元 B 各 8 个进行组阵. 同时为保证天线阵具有漫散射特性, 利用遗传算法算出在 6 GHz

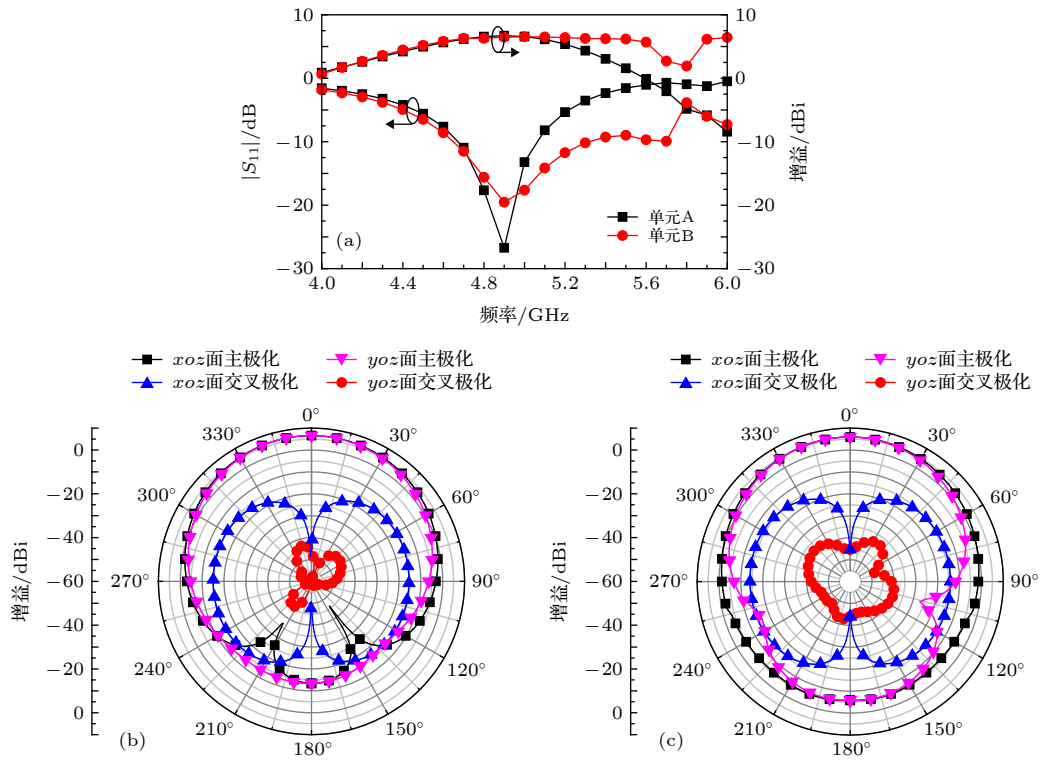


图 4 两单元的辐射特性 (a)  $|S_{11}|$ 及增益曲线; (b) 单元 A 在 5 GHz 时的辐射方向图; (c) 单元 B 在 5 GHz 时的辐射方向图  
Fig. 4. Radiation characteristics of two elements: (a)  $|S_{11}|$  and gain; radiation pattern of (b) element A and (c) element B at 5 GHz.

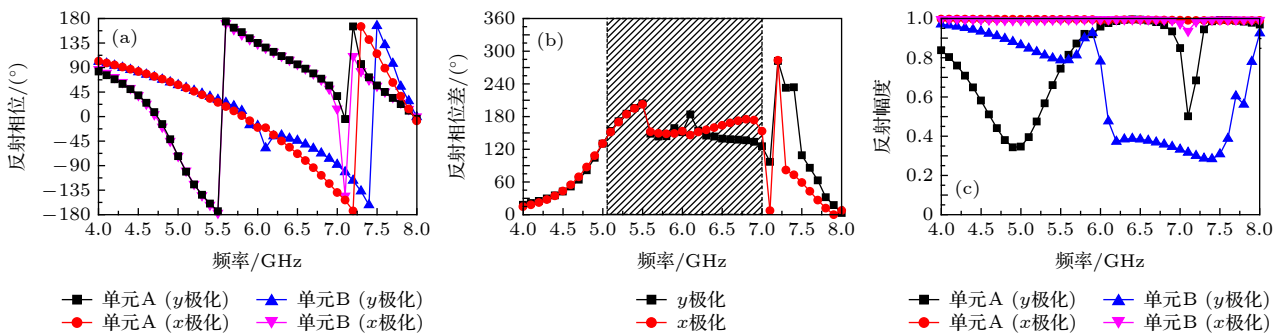


图 5 两单元的反射特性 (a) 反射相位; (b) 反射相位差; (c) 反射幅度  
Fig. 5. Reflection characteristics of two elements: (a) Reflection phase; (b) reflection phase difference; (c) reflection magnitude.

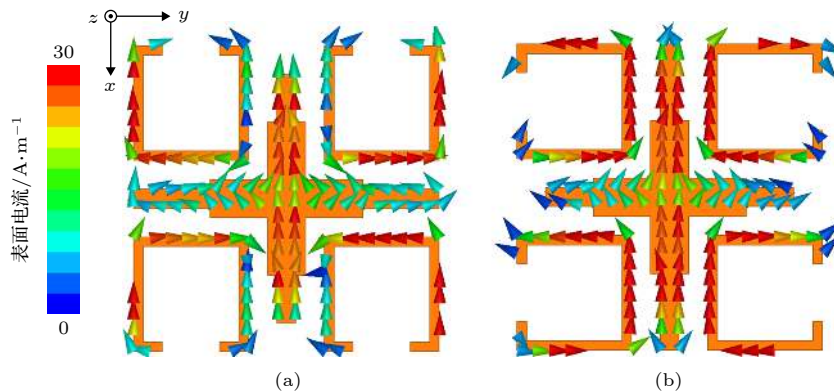


图 6 两单元表面电流分布 (a) 单元 A 在 5.7 GHz 时; (b) 单元 B 在 4.7 GHz 时  
Fig. 6. Surface current distributions of (a) element A at 5.7 GHz and (b) element B at 4.7 GHz.

时阵列 RCS 峰值最小时的排布方式. 把单元 A 和单元 B 视作“0”和“1”, 作为变量代入适应度函数中, 设置种群规模为 500、保留最佳个体数量为 10、交叉概率为 0.75、变异概率为 0.2, 运行程序算出使适应度函数最小时所对应的编码方式, 把单元 A 和单元 B 按该编码方式排列, 得到最终设计出的天线阵列, 如图 7(a) 所示, 其中中心 4 个单元命名为 E1, E2, E3, E4. 为更好说明所设计天线阵的

工作特性, 使用传统棋盘式天线阵作为对比, 如图 7(b) 所示. 两阵列大小均为  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ , 相邻贴片单元中心间距为  $30\text{ mm}$ .

对天线阵中 16 个天线单元进行等幅同相馈电, 得到天线阵的辐射特性如图 8 所示. 两天线阵辐射特性相似, 设计天线阵在  $4.6\text{—}5.4\text{ GHz}$  仿真实际增益在  $15.5\text{ dBi}$  以上; 天线阵中心单元受耦合影响较小,  $-10\text{ dB}$  阻抗带宽较其单独工作时基

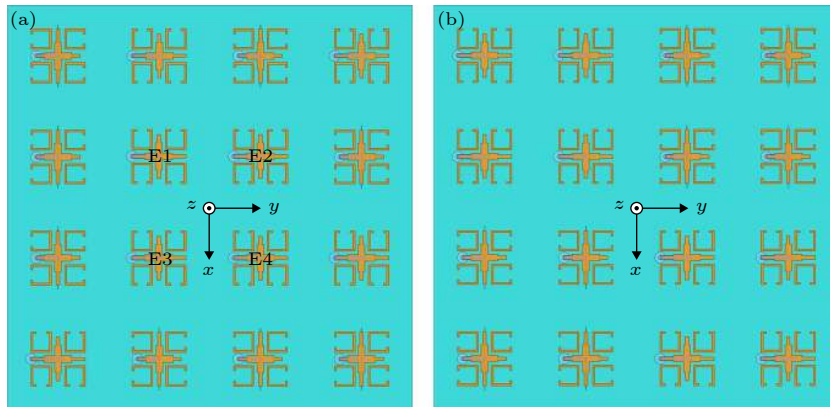


图 7 天线阵列结构示意图 (a) 设计天线阵; (b) 棋盘式天线阵  
Fig. 7. Geometry of (a) proposed array and (b) chessboard type array.

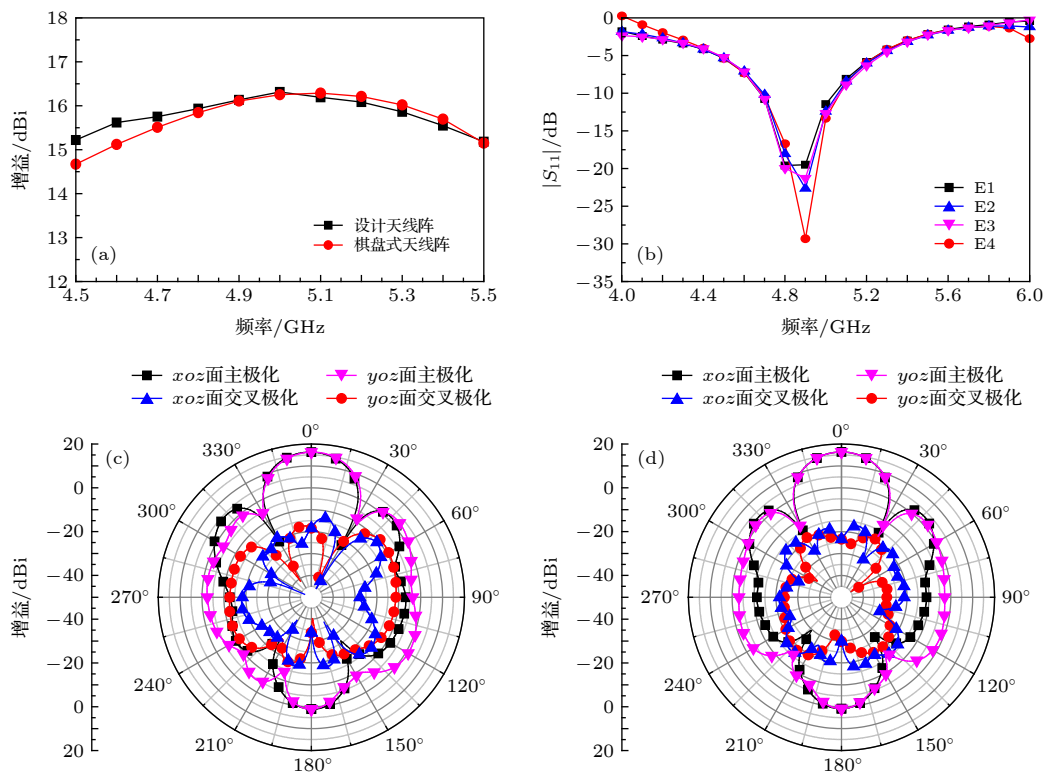


图 8 两天线阵列辐射特性 (a) 实际增益曲线; (b) 设计天线阵中心单元的  $|S_{11}|$  曲线; (c) 设计天线阵在  $5\text{ GHz}$  时的辐射方向图; (d) 棋盘式天线阵在  $5\text{ GHz}$  时的辐射方向图

Fig. 8. Radiation characteristics of two arrays: (a) Realized gain; (b)  $|S_{11}|$  of elements of proposed array; radiation pattern of (c) proposed array and (d) chessboard type array at  $5\text{ GHz}$ .

本不变;设计天线阵辐射方向图良好,在最大辐射方向处交叉极化较低.

相比于等大金属板,两天线阵法线方向单站 RCS 减缩量曲线如图 9 所示. 在  $y$  极化波照射时,设计天线阵 6 dB 减缩带宽为 4.6—7.8 GHz (相对带宽为 51.6%),较棋盘式天线阵 4.6—5.4 GHz 与 7—8 GHz 的 6 dB 减缩带宽有明显拓展;在  $x$  极化波照射时,两天线阵的 6 dB 减缩带宽基本相同,为 4.8—7.4 GHz (相对带宽 42.6%),设计天线阵在 6.4 GHz 时 RCS 减缩量最大,达 27.34 dB.

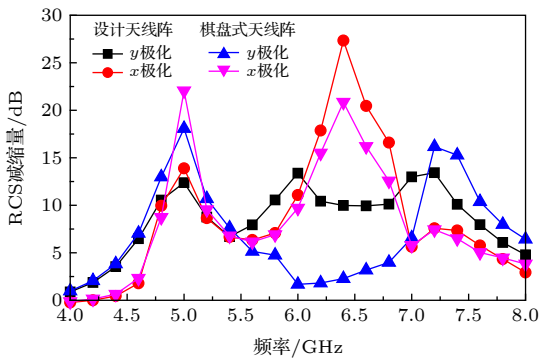


图 9 天线阵单站 RCS 减缩曲线  
Fig. 9. RCS reduction.

天线阵在  $x$  极化波垂直入射时的三维散射场方向图如图 10 所示. 采用棋盘布阵时天线阵中心 RCS 明显减小,但在阵列对角线方向上仍有较大

反射峰;采用非周期编码所设计的天线阵不仅在法线方向 RCS 有大幅减缩,而且在空间中形成多个幅度较小的散射峰,使能量散布更加均匀,有效降低了峰值 RCS.

为进一步说明天线阵的漫散射特性,图 11 给出了在 4.8 GHz,电磁波以  $xoz$  面为入射面斜入射时,设计天线阵的三维散射场分布.可以直观看出,在不同角度入射时,不论电磁波是 TE 极化波还是 TM 极化波,均未在其镜像位置激起较大的散射峰,电磁波能量被打散形成多散射峰,出现了漫散射的效果.

图 12 给出了在  $xoz$  面斜入射时,天线阵列的镜像双站 RCS 减缩曲线.随入射角度变大,阵列在 TM 极化波照射时 6—8 GHz 的 RCS 减缩值有所降低,在 TE 极化波照射时 5.5—7 GHz 的 RCS 减缩值较  $y$  极化波垂直入射时有所降低,在 7—8 GHz 频带内 RCS 减缩情况整体较好.这是由于从不同角度入射时,天线单元间反射相位差较垂直入射时发生了改变,导致满足有效相位差条件频段发生改变造成的.

为更加清晰地说明本文的工作,与文献 [20—22] 所做工作进行对比,结果如表 1 所列.本文设计的天线阵贴片仅由一种形状构成,降低了设计难度,同时对单元进行编码,使阵列出现了漫散射特性,综合性能良好.

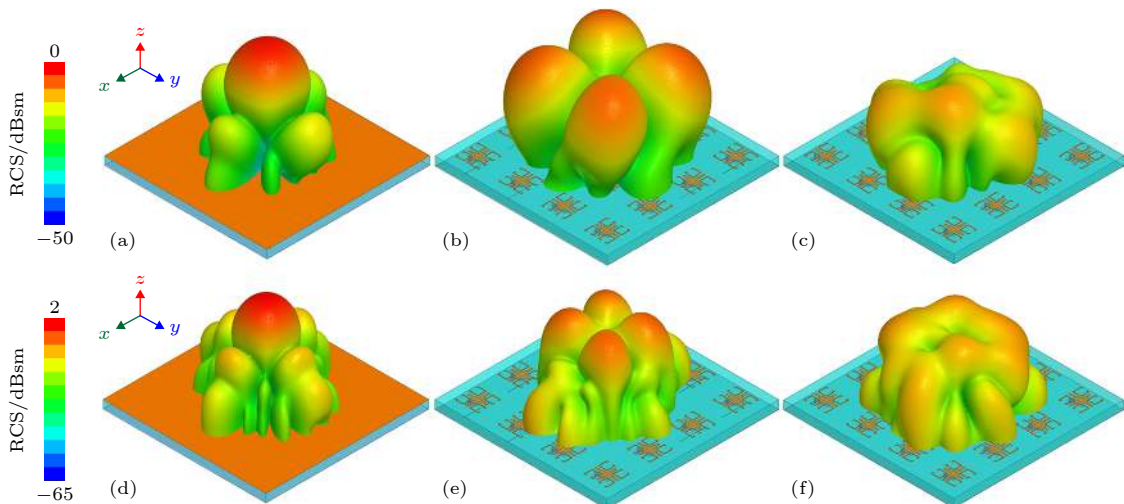


图 10 垂直入射时三维散射场分布 (a) 5 GHz 时金属板散射场分布; (b) 5 GHz 时棋盘式天线阵散射场分布; (c) 5 GHz 时设计天线阵散射场分布; (d) 6.4 GHz 时金属板散射场分布; (e) 6.4 GHz 时棋盘式天线阵散射场分布; (f) 6.4 GHz 时设计天线阵散射场分布

Fig. 10. Three-dimensional scattering field for normal incidence: (a) Metal board, (b) chessboard type array and (c) proposed array at 5 GHz; (d) metal board, (e) chessboard type array and (f) proposed array at 6.4 GHz.

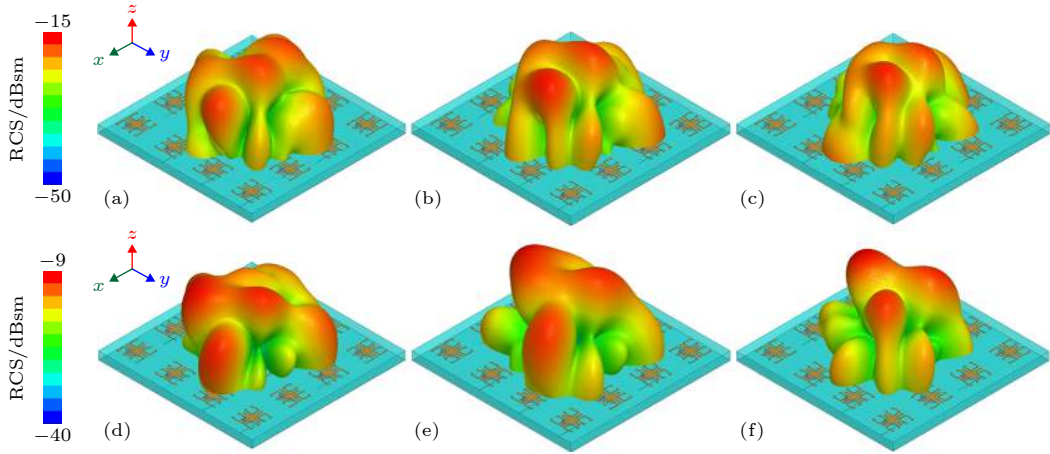


图 11 斜入射时三维散射场分布 (a) TE 极化波 15°入射; (b) TE 极化波 30°入射; (c) TE 极化波 45°入射; (d) TM 极化波 15°入射; (e) TM 极化波 30°入射; (f) TM 极化波 45°入射

Fig. 11. Three-dimensional scattering field: (a) 15°, (b) 30°, (c) 45° under TE polarized plane wave; (d) 15°, (e) 30°, (f) 45° under TM polarized plane wave.

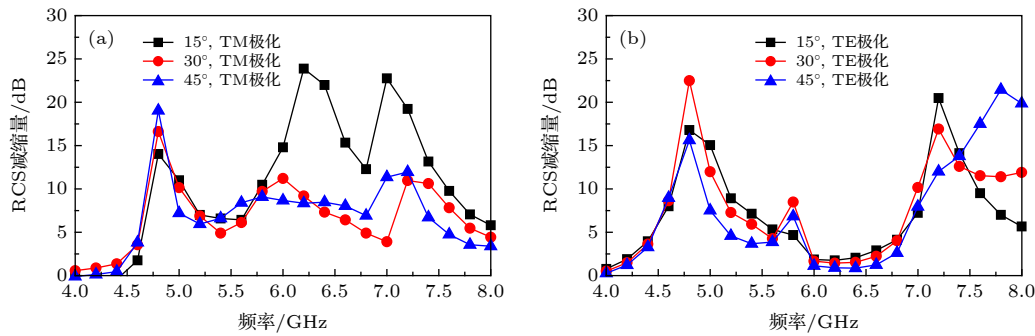


图 12 天线阵镜像双站 RCS 减缩曲线 (a) TM 极化波; (b) TE 极化波

Fig. 12. Mirror bistatic RCS reduction: (a) TM polarized plane wave; (b) TE polarized plane wave.

表 1 几种超表面天线阵列性能对比

Table 1. Comparison of other metasurface antenna arrays.

文献	单元上层贴片形状	布阵方式	是否所有单元同频工作	工作频段/GHz	法线方向单站 RCS 6 dB 减缩带宽/GHz	是否出现漫散射
文献[20]	2种	棋盘布阵	否	5.7—6.2 (8.4%), 6.5—7.3 (11.6%)	5.6—7.4 (12.3%)	否
文献[21]	2种	棋盘布阵	是	5.6—6.0 (6.9%)	5.5—7.0 (24.0%)	否
文献[22]	2种	条带布阵	是	4.8—5.3 (9.9%)	4.6—7.4 (46.7%)	否
本文	1种	非周期布阵	是	4.7—5.1 (8.2%)	4.8—7.4 (42.6%)	是

#### 4 加工实测

为了观察所设计天线阵实际的辐射散射性能, 将仿真阵列模型加工成实物样件, 如图 13(a) 所示. 使用 1 个 RS2W20180-S 1/2 功分器与 2 个 RS8W20180-S 1/8 功分器对阵列进行馈电, 如图 13(b) 所示. 使用 Agilent N5230C 矢量网仪在暗室对阵列进行测试, 如图 13(c) 所示.

图 14 给出了天线阵中心单元的实测  $|S_{11}|$  曲线,

测试结果与仿真结果变化趋势一致, 存在的带宽损失主要是由于测试时其他单元所接匹配负载不是理想的  $50 \Omega$  以及加工、装配误差引起, 但整体误差在合理范围之内, 不会影响天线阵的正常工作. 图 15 给出了设计阵列在 5 GHz 时的实测方向图, 方向图主瓣实测与仿真拟合较好, 后瓣实测低于仿真是由于发射信号受转台中心转轴遮挡所致. 图 16 给出了设计阵列实测法线方向单站 RCS 减缩曲线, 仿真与实测结果一致性较好, 实测单站 RCS 的 6 dB 减缩带宽与仿真基本相同.

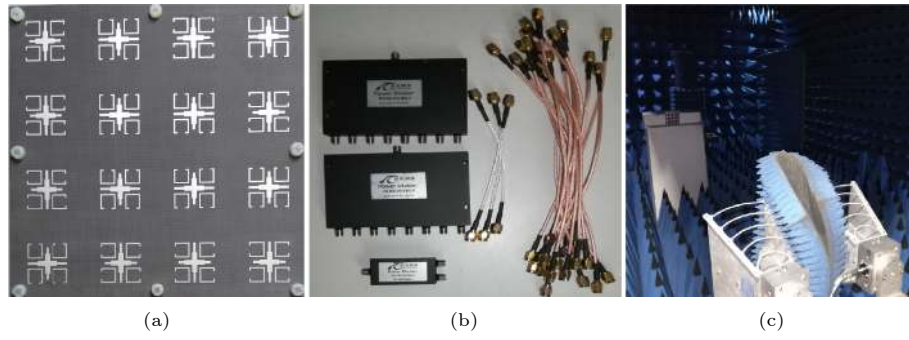


图 13 样品天线测试 (a) 天线阵样品; (b) 功分器; (c) 散射测试环境

Fig. 13. Testing proposed array: (a) Sample; (b) power dividers; (c) testing environment of scattering performance.

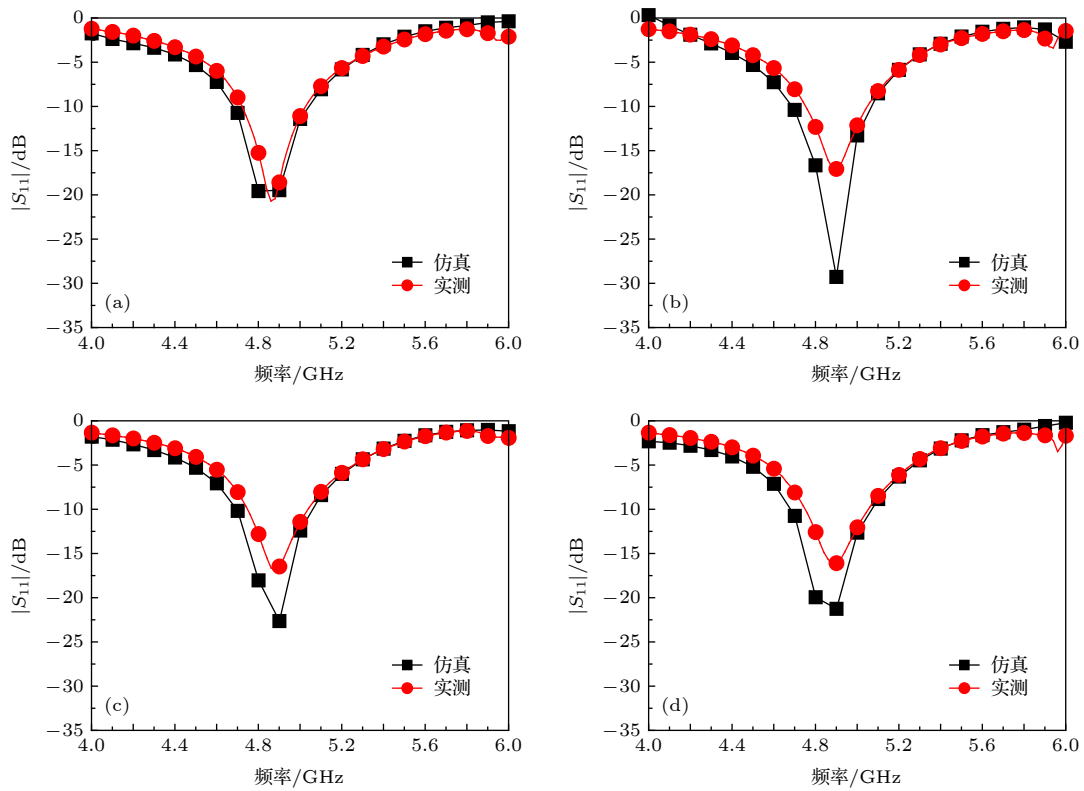


图 14 实测天线阵中心单元的 $|S_{11}|$ 曲线 (a) E1 单元; (b) E2 单元; (c) E3 单元; (d) E4 单元

Fig. 14. Measured  $|S_{11}|$  of elements of proposed array: (a) E1; (b) E2; (c) E3; (d) E4.

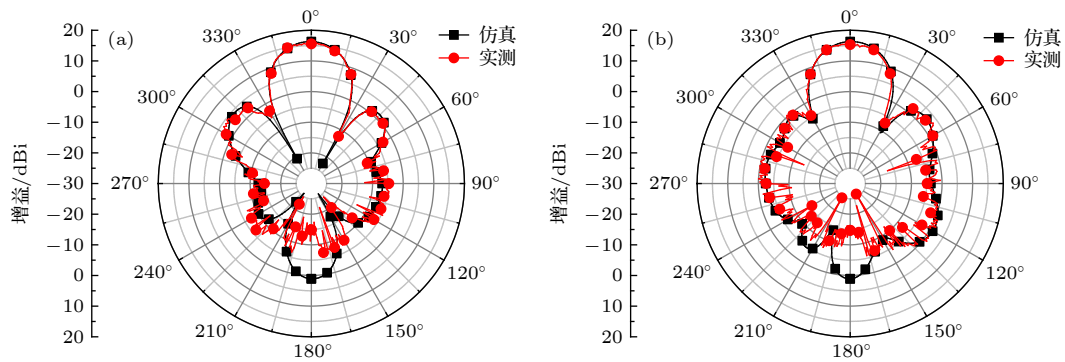


图 15 实测天线阵方向图 (a)  $xoz$  面; (b)  $yo z$  面

Fig. 15. Measured radiation patterns of proposed array: (a)  $xoz$  plane; (b)  $yo z$  plane.

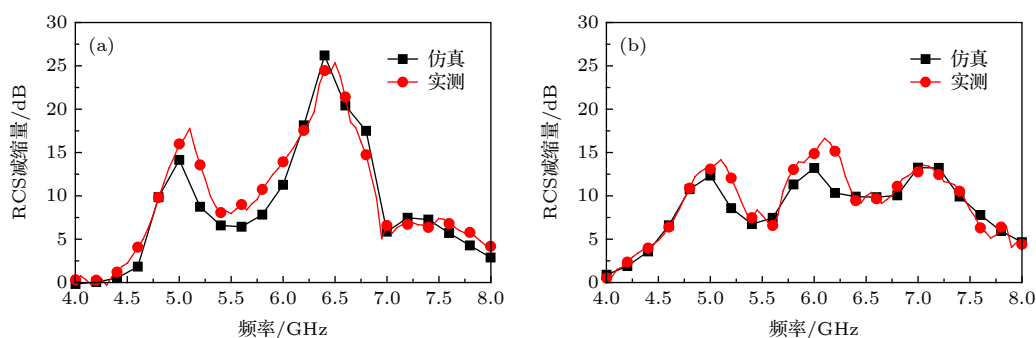

 图 16 实测天线阵单站 RCS 减缩曲线 (a)  $x$  极化; (b)  $y$  极化

 Fig. 16. Measured monostatic RCS reduction: (a)  $x$ -polarized; (b)  $y$ -polarized.

## 5 结 论

本文通过综合调控辐射与散射特性的方法对天线单元进行设计. 设计天线单元时利用了上层贴片正交极化方向上反射相位差在  $180^\circ \pm 37^\circ$  的特点, 将贴片正交放置设计出两种上层贴片形状相同的天线单元, 使同方向极化波之间产生相位抵消, 利用这一特点, 调整贴片反射相位时仅对一种单元仿真即可, 简化了仿真过程. 在设置单元排布时, 采用非周期的布阵方式, 不仅使法线方向 RCS 减缩明显, 而且实现了漫散射, 降低了整个空间的 RCS 峰值; 同时天线阵的辐射性能保持良好. 本文充分利用辐射体自身的散射特性, 解决了阵列天线难以同时具有良好辐射特性与低散射特性的难题, 同时改良了天线贴片的设计过程, 设计思想具有普适性, 对设计低 RCS 天线阵有一定借鉴意义. 本文工作仍有进步空间, 若两天线单元在  $y$  极化方向上的反射幅度能保持一致, 则能充分发挥两天线单元在该极化方向上有效相位差的作用, 进一步减小  $y$  极化波照射时的 RCS.

## 参考文献

[1] Li W Q, Cao X Y, Gao J, Zhao Y, Yang H H, Liu T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094102 (in Chinese) [李文强, 曹祥玉, 高军, 赵一, 杨欢欢, 刘涛 2015 物理学报 **64** 094102]  
 [2] Son X T, Ikmo P 2014 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **13** 587  
 [3] Li G H, Zhai H Q, Li L, Liang C H, Yu R D, Liu S 2015

*IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 525  
 [4] Yoon J H, Yoon Y J, Lee W, So J 2012 *Electron. Lett.* **48** 50  
 [5] Deng T W, Li Z W, Chen Z N 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 5886  
 [6] Saptarshi G, Kumar V S 2018 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **60** 166  
 [7] Yan M B, Qu S B, Wang J F, Zhang J Q, Zhang A X, Xia S, Wang W J 2014 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **13** 639  
 [8] Bai Y, Zhao L, Ju D Q 2015 *Opt. Express* **23** 8670  
 [9] Agarwal M, Behera A K, Meshram M K 2016 *Electron. Lett.* **52** 340  
 [10] Ren J Y, Gong S X, Jiang W 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 102  
 [11] Liu X B, Zhang J S, Li W, Lu R, Zhu S T, Xu Z, Zhang A X 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 1028  
 [12] Zhang L B, Zhou P H, Lu H P, Zhang L 2016 *Opt. Mater.* **6** 1393  
 [13] Yu H C, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Han J F, Zhu X W, Li T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 224101 (in Chinese) [于惠存, 曹祥玉, 高军, 杨欢欢, 韩江枫, 朱学文, 李桐 2018 物理学报 **67** 224101]  
 [14] Zhang J M, Yan L, Li L P, Zhang T, Li H H, Wang Q M, Hao Y N, Lei M, Bi K 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 014501  
 [15] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110  
 [16] Wang X P, Wan L L, Chen T N, Song A L, Du X W 2016 *AIP Adv.* **6** 065320  
 [17] Sharma A, Gangwar D, Kanaujia B K, Dwari S 2018 *AEU Int. J. Electron. Commun.* **91** 132  
 [18] Liu X, Gao J, Cao X Y, Zhao Y, Li S J 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 724  
 [19] Su J X, Kong C Y, Li Z R, Yin H C, Yang Y Q 2017 *Electron. Lett.* **53** 1088  
 [20] Zheng Y J, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Zhou Y L, Liu T 2017 *Opt. Express* **25** 30001  
 [21] Lan J X, Cao X Y, Gao J, Han J F, Liu T, Cong L L, Wang S M 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 034101 (in Chinese) [兰俊祥, 曹祥玉, 高军, 韩江枫, 刘涛, 丛丽丽, 王思铭 2019 物理学报 **68** 034101]  
 [22] Liu Y, Jia Y T, Zhang W B, Wang Y Z, Gong S X, Liao G S 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 6199

# A coding metasurface antenna array with low radar cross section\*

Hao Biao    Yang Bin-Feng<sup>†</sup>    Gao Jun<sup>‡</sup>    Cao Xiang-Yu  
Yang Huan-Huan    Li Tong

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

( Received 24 June 2020; revised manuscript received 26 July 2020 )

## Abstract

An aperiodic metasurface antenna array with low radar cross section (RCS) is designed. The upper patches of the two antenna elements have the same shape and are placed at an orthogonal position, which can effectively reduce the workload of simulating the reflection characteristics of the patch. As antenna elements, they have identical operational band and polarization mode, and as metasurfaces, they can form an effective phase difference of  $180^\circ \pm 37^\circ$ . The RCS of the array is reduced mainly by phase cancellation under the  $x$  polarization and by absorption under the  $y$  polarization. According to the coding metamaterial theory, the two elements can be coded aperiodically by using the programming software. Regarding element A and element B as “0” and “1”, respectively, the coding matrix can be solved by a genetic algorithm. Element A and element B are arranged according to positions “0” and “1” to obtain a proposed array. The scattering field of proposed array is diffusive, and the peak RCS is effectively reduced. In order to highlight the characteristics of the proposed array, the chessboard-type array is designed for comparison. The simulation results show that the radiation performance of proposed array is good. Comparing with the metal board of the same size, the 6 dB reduction bandwidth of the monostatic RCS is 4.8–7.4 GHz (relative bandwidth is 42.6%) under the  $x$  polarization and 4.6–7.8 GHz (relative bandwidth is 51.6%) under the  $y$  polarization. Comparing with the chessboard type array, the scattering energy distribution of the designed antenna array is very uniform and the peak RCS in space reduces obviously. When a 4.8 GHz electromagnetic wave is incident with different incident angles and polarization modes, the scattering field is diffusive. Compared with other similar arrays, the proposed array has advantages of simple design process and even scattering field. The experimental results are in good agreement with the simulation results. This work makes full use of the scattering characteristics of the antenna element itself to solve the problem that the array antenna possesses both good radiation characteristics and low scattering characteristics at the same time, and improves the design process of the antenna patch. This design method has certain universality and reference significance for designing the low RCS antenna array.

**Keywords:** low radar cross section, patch antenna array, diffusion

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

**DOI:** [10.7498/aps.69.20200978](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200978)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61671464, 61701523, 61801508), the Natural Science Foundational of Shanxi Province, China (Grant Nos. 2017JM6025, 2019JQ-103), and the Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (Grant No. BX20180375).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bf\\_yang@163.com](mailto:bf_yang@163.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [gjgj9694@163.com](mailto:gjgj9694@163.com)