

本文引用格式:徐娟,袁波,秦小萌. 辐散一体化高性能贴片天线阵列设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 197-205.

Citation format: XU Juan, YUAN Bo, Qin Xiaomeng. Design of integrated high-performance patch antenna arrays for spoke dispersion[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(2): 197-205.

文章编号 1672-6634(2025)02-0197-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024100010

辐散一体化高性能贴片天线阵列设计

徐娟,袁波,秦小萌

(曲阜师范大学 网络空间安全学院, 山东 曲阜 273165)

摘要 提出了一种新型的集成辐射特性与散射特性一体化的贴片阵列天线。所提出的贴片天线阵列由两种相位相差 180° 的贴片结构组成,利用特征模式分析,通过遗传算法计算出阵因子在反射域中最大值最小时的编码方式,使两种天线单元按其方式排布成 4×4 的天线阵列。天线阵列 -10 dB 阻抗带宽为 $8.1 \sim 9.2$ GHz(相对带宽 12.7%),在工作频段内的峰值增益为 18.7 dB,在宽频段 $6.9 \sim 10.5$ GHz(41.4%)范围内实现了 x 极化入射波下单站 RCS 6 dB 以上的缩减。在没有引入额外结构和集总元件的情况下实现了天线的隐身功能。

关键词 天线阵列;辐散一体化;特征模式;遗传算法

中图分类号 TN820

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Design of Integrated High-Performance Patch Antenna Arrays for Spoke Dispersion

XU Juan, YUAN Bo, Qin Xiaomeng

(School of Cyber Science and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, 273165, China)

Abstract A novel patch array antenna integrating radiation characteristics and scattering characteristics is proposed. The proposed patch antenna array consists of two kinds of patch structures with 180° phase difference, and the coding mode of the array factor with the minimum maximum value in the reflection domain is calculated by genetic algorithm using the feature pattern analysis, so that the two kinds of antenna units are arranged into a 4×4 antenna array according to their mode. The antenna array -10 dB impedance bandwidth is $8.1 \sim 9.2$ GHz (12.7% relative bandwidth), and the peak gain is 18.7 dB in the operating band; more than 6 dB of single-station RCS reduction under x -polarized incident wave is achieved in the wide band $6.9 \sim 10.5$ GHz (41.4%). The stealth function of the antenna is realized without introducing additional structures and collector elements.

Key words antenna array; radiation scattering integration; characterization; genetic algorithm

收稿日期:2024-10-23

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023MF038)资助

通信作者:徐娟,女,汉族,博士,副教授,研究方向:电磁场与微波技术, E-mail: xujuan125@163.com。

0 引言

天线作为通信系统中不可或缺的组成部分,但是因其功能往往会在通信平台中产生较高的雷达散射截面,这就会造成武器装备在战场上的低存活率。因此,设计出具有低雷达散射截面的天线对现代军事战争取得胜利尤为重要。随着国内外众多学者对隐身技术^[1,2]的研究,提出了众多减少天线雷达散射截面的方法,其中电磁超表面的引入将天线低散射特性研究带进了新的领域。如加载有源器件和吸收涂层^[3-5]的设计降低天线 RCS,但此种设计方法电路设计复杂、加工成本较高,并且对天线的辐射特性有很大的影响。人工磁导体^[6-8]、相位梯度超表面^[9,10]、极化转换超表面^[11,12]和频率选择超表面^[13,14]等超表面研究与天线集成减少天线 RCS,该设计方式将超表面结构和天线单独设计,使超表面结构布置在天线辐射结构的周围用于降低带内和带外的 RCS。这种方法的优点是在不影响天线辐射性能的下实现较高的 RCS 降低,缺点是此设计方式增加了天线孔径。

为了获取较高的带外 RCS 降低,具有良好传输性能的带通 FSS 和 ATFSS 天线罩应运而生,该二维集成方式利用通带高传输、通带两侧波束散射实现了天线的高增益和带外宽带 RCS 缩减,进一步增强了覆层天线的隐身性能。但上述集成方式,在结构之间存在空气层或泡沫层,整体外形更高,虽能实现较高的辐射特性和带外宽 RCS 降低,不能保证目标天线在带内的隐身特性。

为解决上述集成方式出现的缺点,通过“集辐射与散射一体化”的思想,对具有人工磁导体特性的贴片添加馈源,利用 AMC 结构具有相位差的特性,设计出同时具有辐射特性和散射功能的天线阵列^[15]。文献^[16]提出了一种集辐射和散射性能的多功能人工电磁表面,对相位相差 180°的 AMC 结构添加馈电结构实现了不同频段的辐射特性和 RCS 降低。因此,将超表面充当辐射体设计低 RCS 阵列天线成为了当前热点研究方向。

针对上述需求,提出了一种集辐射特性与散射特性一体化的贴片阵列天线设计方法。所提出的贴片天线阵列由两种具有 180°相位差的贴片结构组成,通过调整馈电位置及地板缝隙长度使两类贴片天线工作在同一频段内,并利用特征模式分析,对天线结构馈电位置的设置进行了分析。最后根据编码超表面理论,将两种天线单元分别视作“0”和“1”单元,通过遗传算法计算出阵因子在反射域中最大值最小时的编码方式,使两种天线单元按其方式排布成 4×4 的天线阵列,实现了天线的隐身功能。

1 天线结构与模态分析

关于使用两种贴片天线单元组成具有辐射散射一体化天线阵列,两个天线子阵列有相同的单元间距和相似的辐射特性,天线阵列的散射和辐射性能仍然可以使用阵列理论进行研究。

对于 $M \times N$ 的天线阵列,在天线阵列的辐射情况下,第 mn 个单元的远场辐射场为

$$E_{mn_rad} = C J_{mn} \frac{e^{-jkr}}{r} e^{jk \langle md_x \cos\varphi + nd_y \sin\varphi \rangle \sin\theta}, \quad (1)$$

式中 J_{mn} 为第 mn 个单元的激励电流, C 是与 mn 无关的元素因子。

则整个天线阵列的远场辐射方向图为

$$E_{total_rad} = \sum_m \sum_n E_{mn_rad} = C \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} J_{mn} e^{jk \langle md_x \cos\varphi + nd_y \sin\varphi \rangle \sin\theta}, \quad (2)$$

式中 J_{mn} 表示天线单元 A 的 J_a 或天线单元 B 的 J_b 。

对于天线阵列的散射模式,不考虑相互耦合,阵列的总散射场为

$$E_{total_sca} = EP \cdot AF, \quad (3)$$

式中 EP 是单元散射模式, AF 为阵列因子。阵列因子可以表示为

$$AF = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{j \langle m-0, 5 \rangle \langle kp \sin\theta \cos\varphi \rangle + \langle n-0, 5 \rangle \langle kp \sin\theta \sin\varphi \rangle + \varphi \langle m, n \rangle}, \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda_0$, p 为两个单元之间的中心距离, θ 与 φ 分别为俯仰角和方位角, $\varphi(m, n)$ 表示为天线阵列中第 (m, n) 个单元的反相位。

因此对于两种单元组成的天线阵列,假如在垂直入射波下的反射幅值相同,为了满足 10 dB 的 RCS 缩减,两种贴片天线的反相位差必须满足 $143^\circ \leq \Delta\varphi \leq 217^\circ$ 。

天线单元结构如图 1 所示。两种天线单元结构从下往上分别由金属地板、介电常数为 2.65、损耗角正切为 0.001 的 F4B 介质基板、上层金属贴片以及馈电结构组成。天线 A 的上层贴片是通过矩形贴片进行刻蚀,形成对称于 x 轴和

y 轴的缝隙结构;介质层中的长方形金属贴片与 SMA 馈电结构相连,形成 L 型结构,用于耦合馈电,实现辐射特性;下层为开槽的金属地板结构。与天线 A 相比,天线 B 的主要区别在于上层贴片,其由两端相同的长方形金属贴片和中间刻蚀一条缝隙的长方形金属贴片组成。具体结构参数如表 1 所示。

表 1 (a) 天线单元相同参数; (b) 天线单元不同参数

Tab. 1 (a) Same parameters for antenna units; (b) Different parameters for antenna units

(a)

Parameter/mm	P	ws	wlp	h_1	h_2	wd
AntennaA	20	0.2	2	4	3	0.87
AntennaB						

(b)

Parameter /mm	lf_a	lf_b	wf_4	lf_4	wf_5	lf_5	lf_6	ls_2	lp_2
AntennaA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Parameter /mm	lf_1	wf_1	lf_2	wf_2	wf_3	wf_s	ls_1	lp_1	—
AntennaB	2	2	2	2	2	2	2	2	—

图 2 显示了两个阵列天线单元的 S 参数和增益曲线。天线 A 和天线 B 在 8.15~9.2 GHz 的频段内有相同的阻抗带宽且谐振频点相似,中心频点在 8.7 GHz,增益在 7.5~10 GHz 的频段内均在 7 dB 附近,增益相差小于 0.3 dB,增益曲线基本吻合。图 3 为天线 A, B 在 8.7 GHz 处的归一化辐射方向图,辐射特性高度相似,可以用来组成天线阵列。

图 4 展示了天线 A 和天线 B 的散射特性,在 x 极化入射波照射下,两个天线单元具有相似的反射幅值,基本为 0 dB,具有全反射特性。在 y 极化入射波照射下,天线 A 和天线 B 分别在 6~11 GHz 和 6~9.8 GHz 频段范围内反射幅值小于 -3 dB,在 y 极化入射波下可以吸收一半以上的能量。两个阵列天线单元能在 y 极

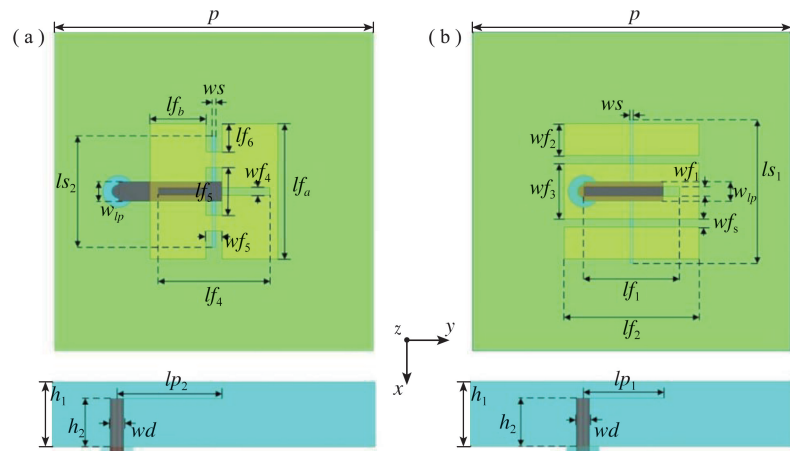


图 1 天线单元结构示意图 (a) 天线 A 结构; (b) 天线 B 结构

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the antenna unit

(a) Antenna A structure; (b) Antenna B structure

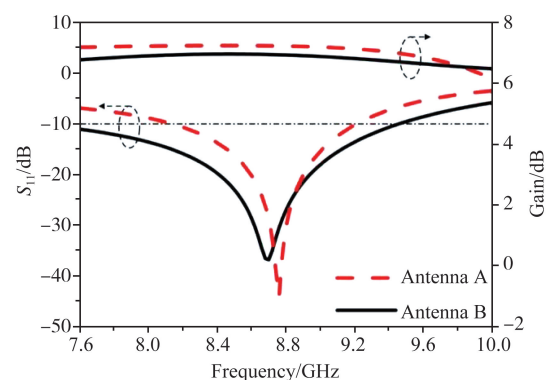


图 2 天线 A 和天线 B 的 S_{11} 和增益

Fig. 2 S_{11} and gain of antenna A and antenna B

化入射波下实现能量的吸收是因为馈电贴片沿 y 轴放置,当 y 极化波照射时,根据互易原理, y 极化波会被吸收,造成反射幅值的降低。反射相位在 7.8~9.4 GHz 的频段范围内满足相位相消条件,且在该频段内反射幅值为 0 dB,满足相位对消要求,故组成天线阵列后可实现 RCS 缩减。

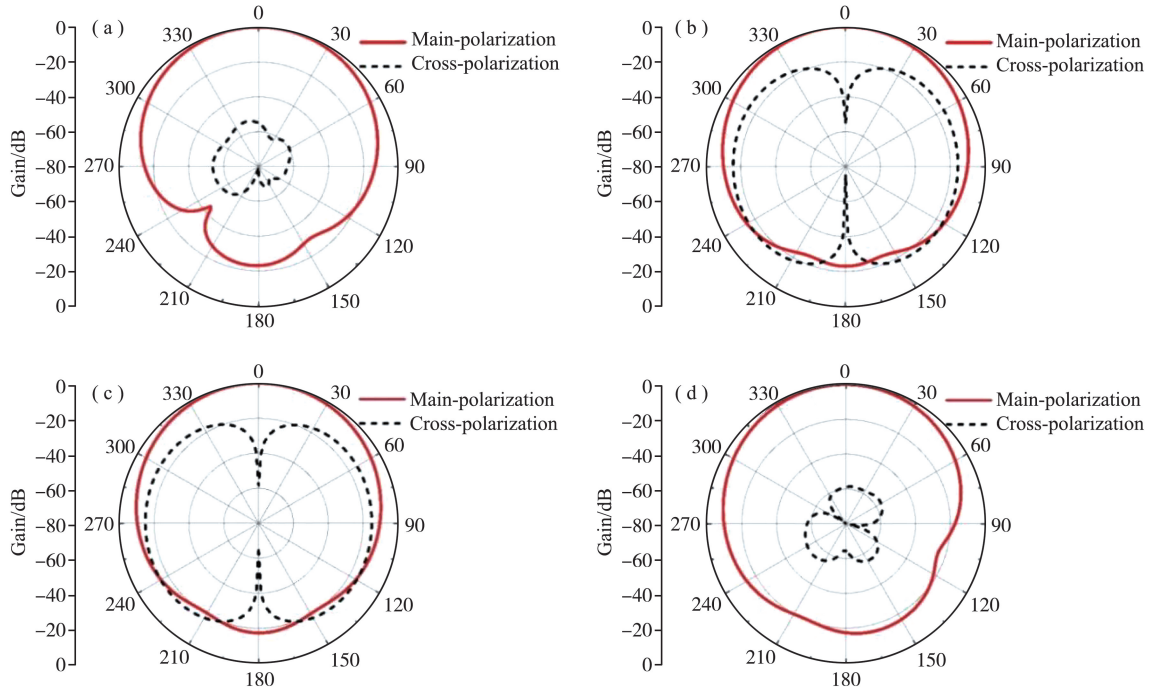


图3 天线 A 和天线 B 在 8.75GHz 辐射方向图 (a) 天线 A_{xoz} 面 (b) 天线 A_{yoz} 面 (c) 天线 B_{xoz} 面 (d) 天线 B_{yoz} 面

Fig. 3 Radiation direction of antenna A and antenna B at 8.75 GHz (a) antenna A_{xoz}-plane (b) antenna A_{yoz}-plane (c) antenna B_{xoz}-plane (d) antenna B_{yoz}-plane

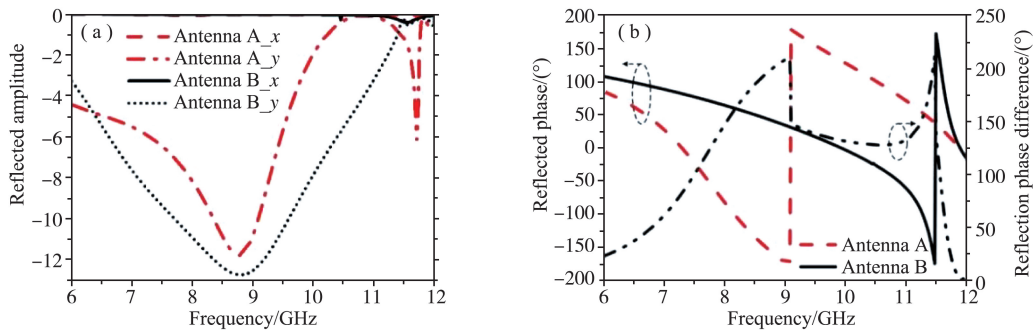


图4 天线 A 和天线 B 反射特性 (a) 反射振幅; (b) 反射相位和相位差

Fig. 4 Reflection characteristics of antenna A and antenna B (a) Reflected amplitude; (b) Reflected phase and phase difference

利用电磁仿真软件 CST 对设计结构的顶层金属结构进行特征模态分析研究^[17,18]其固有特性,探究极化模式。特征模定义了一系列与源无关的正交模式电流,可以用特征方程 $XJ_n = \lambda_n R J_n$ 来描述。式中 J_n 、 λ_n 分别为导体的第 n 阶模式的特征电流和特征值。由于特征值变化不易观察,因此使用模式重要性系数(Modal Significance)观察

$$M_s = \frac{1}{|1 + j\lambda_n|} \in [0, 1], \quad (5)$$

从式中可以看出,当 λ_n 无限趋近于 0 的时候,模式重要性系数的值就会无限近似为 1。当某个频率下的模式重要性系数值近似等于 1 时,这就表示在该频率下的特征模式更加容易被激发谐振模式。同样的道理可知,当 λ_n 无限趋近于正无穷或者 λ_n 无限趋近于负无穷的时候,模式重要性系数的值就会无限近似为 0。当某个频率下的模式重要性系数值近似等于 0 时,表示在该频率下的特征模式很难被激发产生谐振模式。因此模式重要性系数的值会在 0 到 1 的范围内波动,模式重要性系数的值越低,表示在该模式下与激励源产生耦合

的能力越差,被激励产生谐振就越困难。反之,当模式重要性系数的值越高时,表示在该模式下与激励源产生耦合的能力越强,给予合适的激励源时将会更加容易被激励产生谐振。此外,根据模式重要性系数的值大小可以分为显著模式和非显著模式,显著模式要求模式重要性系数的值大于或者等于 0.707,而当模式重要性系数的值小于 0.707 时则被称为非显著模式。显著模式和非显著模式代表了该模型的特征模式成功被激励的难易程度,同时激励源的方式和位置也在其中扮演着重要的角色,合适的激励源将会更加容易成功激励模式产生谐振。

根据上述内容可以知道,当 $M_s > 0.707$ 时,在理论上可以认为该模式能被有效激励产生谐振,在 CST 中计算了 7.5~10 GHz 频率范围内天线 A 中四种模式和天线 B 中四种模式的模式重要性系数值,得出了 M_s 曲线,模式 1(M_1)非常容易被激励产生谐振。模式 2(M_2)的 M_s 值在 7.5~8.8 GHz 的频段范围内大于 0.707,则代表着模式 2(M_2)在 7.5~8.8 GHz 的范围也极易被激励产生谐振。至于模式 3(M_3)和模式 4(M_4),从图中可以看出随着频率的变化,曲线全部位于虚线的下方,且 M_s 值接近于 0,表明模式 3(M_3)和模式 4(M_4)被激励产生谐振非常困难,所以舍去。天线 B 的 M_s 曲线变化如图 5(b)所示,在 4 种模式中只有模式 1(M_1)的模式重要性系数曲线在 7.86~10 GHz 的频段范围内高于 0.707,所以天线 B 只有一种模式在该频段内会被激发产生谐振,至于模式 2(M_2)、模式 3(M_3)和模式 4(M_4)由于其 M_s 值曲线远远低于 0.707,所以在被激励时产生谐振极其困难,应当舍去。

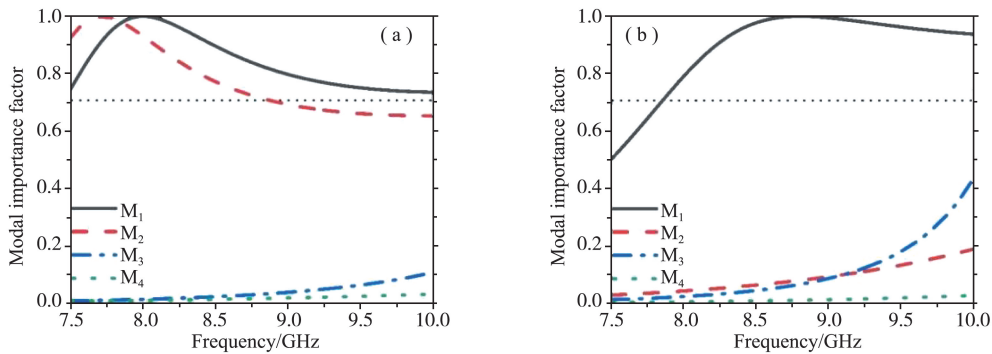


图5 天线 A 与天线 B 的特征参数值 (a) 天线 A; (b) 天线 B

Fig. 5 Characteristic parameter values of antenna A and antenna B (a) Antenna A; (b) Antenna B

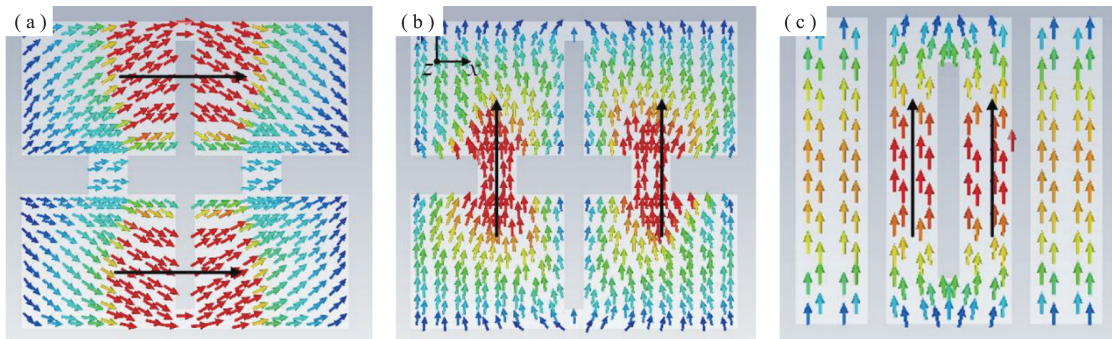


图6 模态电流分布 (a) 模式 2(M_2); (b) 模式 1(M_1); (c) 模式 1(M_1)

Fig. 6 Modal current distribution (a) Mode 2 (M_2); (b) Mode 1 (M_1); (c) Mode 1 (M_1)

为了研究两个天线单元结构的极化模式和选择有效的馈电方式,探究了如图 6(a~c)所示的模式电流,图 6(a~c)为天线 A 中 M_1 和 M_2 在 8.7、7.8 GHz 频点处的模式电流,可以看出模式 2 的电流方向主要沿 x 轴流动,模式 1 主要沿 y 轴流动。图 6(c)是天线 B 中 M_1 在 8.7 GHz 时的模式电流,由图可知电流的方向沿 y 轴流动,与天线 A 中模式 1 的模式电流的方向是同向的。可知,3 种模式电流的方向在各自的频点处基本都在同一个方向上,由同向模式电流可以激励线性极化模式得出,激发其中任何一种模式都会产生线性极化。由于天线 A 和天线 B 的模式 1 的模式电流方向都沿 y 轴流动,为了更好的激发线性极化模式,因此添加了沿 y 轴放置的 L 型馈电结构、同时为了增强两个天线单元的辐射模式,并在模式电流的正交方向上

对金属地板刻蚀了矩形缝隙。

2 辐射一体化天线阵列设计与仿真

设计了结构相似-10 dB的阻抗带宽为8.2~9.2 GHz的参考天线,利用遗传算法相关程序得出了在8.5 GHz处设计天线阵列最优RCS值时的排列方式,该程序代码分别把天线A和天线B作为变量“0”和“1”,把这两个变量带入到适应度函数中进行计算。此处种群规模设置为600个,交叉概率0.7,变异概率设置为0.1,迭代次数为100次,最后得出了如图7(b)所示的集辐射散射一体化的设计天线阵列。该设计天线阵列与参考天线阵列大小相同皆为80 mm×80 mm,相邻贴片单元间的中心距离 Ld 皆为20 mm,然后使用电磁仿真软件ANSYS-HFSS对两个天线阵列进行仿真。

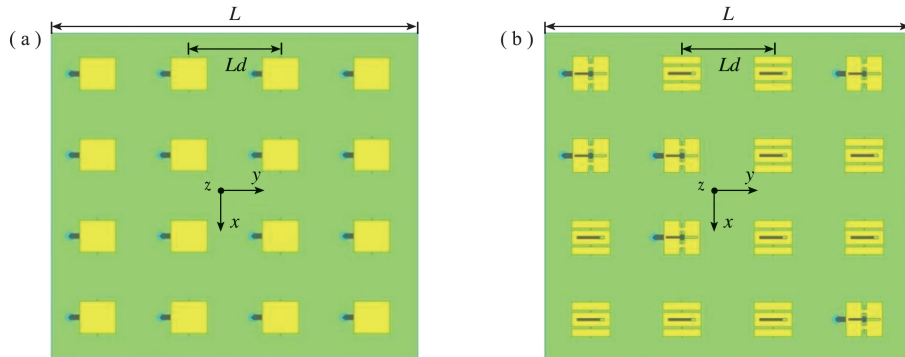


图7 天线阵列结构示意图 (a) 参考天线阵列; (b) 设计天线阵列

Fig. 7 Schematic diagram of antenna array structure (a) Reference antenna array; (b) Design antenna array

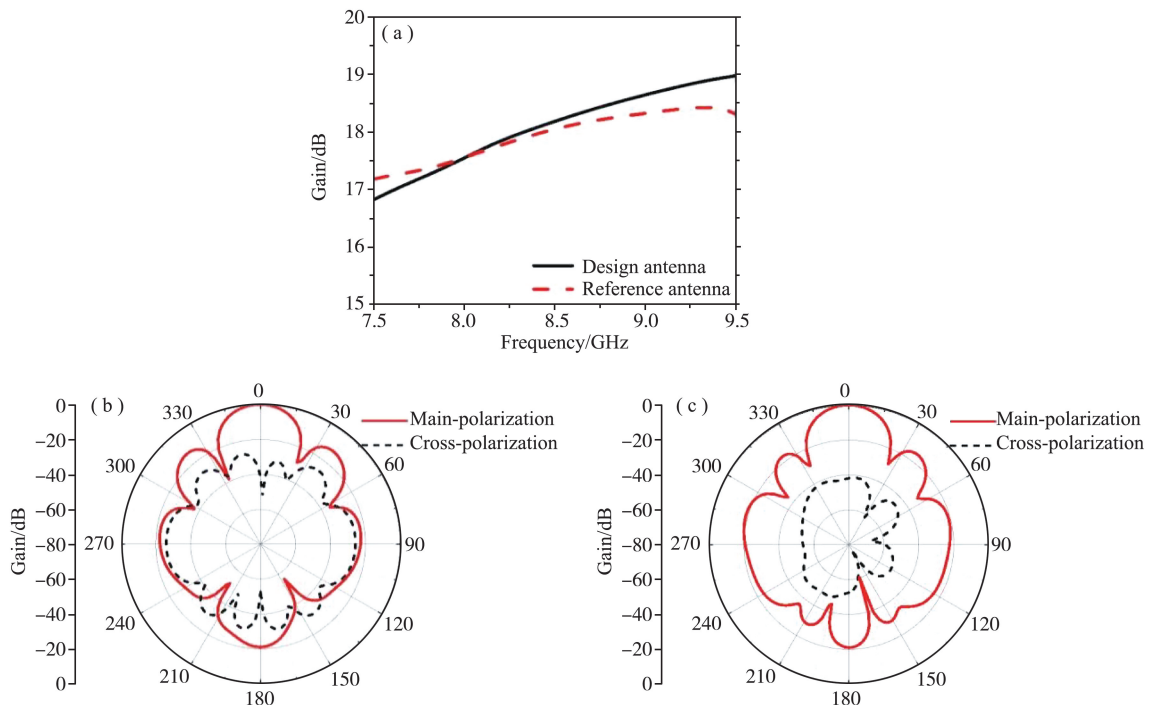


图8 天线阵列辐射性能 (a) 天线阵列增益; (b) xoy 面; (c) $yo z$ 面

Fig. 8 Antenna array radiation performance (a) Antenna array gain; (b) xoy -plane; (c) $yo z$ -plane

图8为天线阵列的辐射特性,设计天线阵列和参考天线阵列在7.5~9.5 GHz的频带范围内辐射增益曲线基本吻合,频段范围内的增益在17~19 dB之间变化,如图8(b,c)所示设计天线阵列在 xoz 面和 $yo z$ 面的副瓣较小,辐射主方向上主极化和交叉极化增益在宽角域内相差20 dB以上、辐射方向性强,表明设计天线阵列拥有良好的辐射性能。

图9展示了设计天线阵列与参考天线阵列在 x 极化波和 y 极化波垂直入射下的单站 RCS 曲线。设计天线阵列在 x 极化波入射下能够实现 6~12.5 GHz 频带内的 RCS 缩减;在 7.4 GHz 时实现最大 RCS 缩减,最大缩减量为 15 dB。当 y 极化波入射时,设计天线阵列能够实现 6~10.8 GHz 范围内的 RCS 缩减,在 9.14 GHz 时实现最大 RCS 缩减,最大缩减量达 10.5 dB。

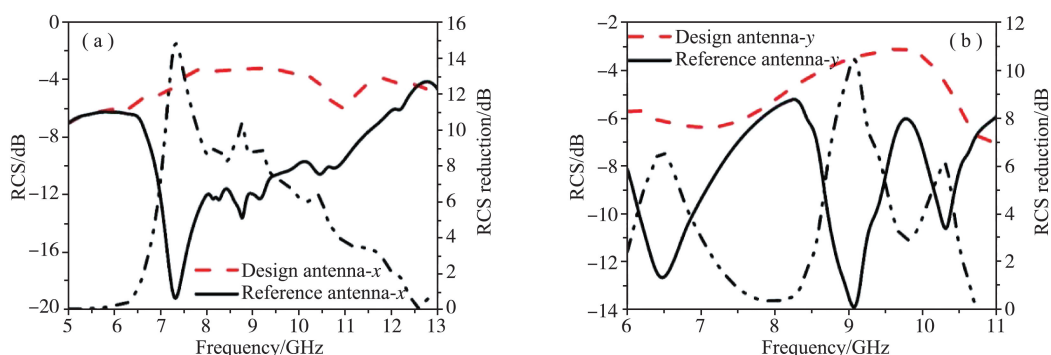


图9 设计天线阵列单站 RCS 曲线 (a) x 极化单站 RCS; (b) y 极化单站 RCS

Fig. 9 Single station RCS curve of the designed antenna array (a) x -polarized single-site RCS ; (b) y -polarized single-site RCS

图10展示了参考天线阵列和设计天线阵列在不同频点处及不同极化波垂直入射时的三维散射方向图,(a,e)分别为参考天线阵列和设计天线阵列在 7.4 GHz 时 x 极化入射波下的三维散射方向图,(d,h)为在 9.14 GHz 处 y 极化入射波照射下的三维散射方向图,(b,c)、(f,g)为在 8.75 GHz 时 x 极化入射波和 y 极化入射波下参考天线阵列和设计天线阵列三维散射方向图。可以观察到参考天线阵的反射波束较少,反射能量主要集中在法线方向上;设计天线阵列由于非周期性排列形成了多个散射峰,使反射能量有效的分散到多个反射波束上,同时展现了其漫散射的特性,大幅度缩减了 RCS 的峰值。

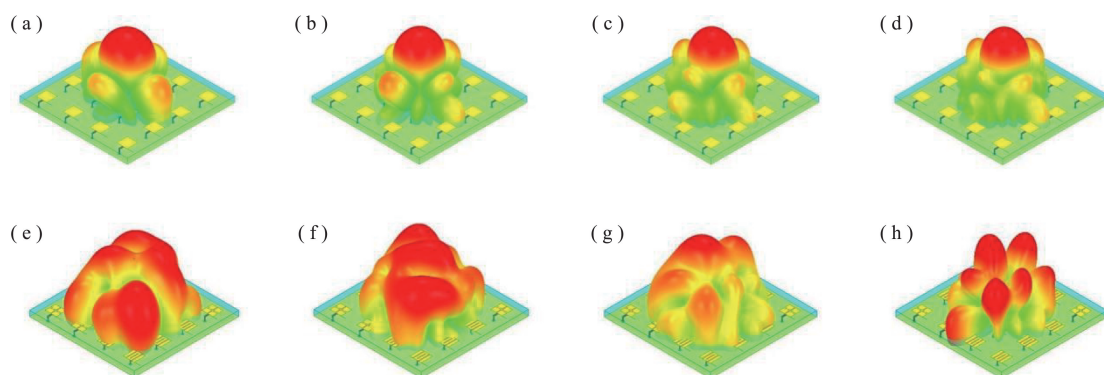


图10 两种天线阵列三维散射方向图

Fig. 10 Three-dimensional scattering direction diagrams of two antenna arrays

3 辐射一体化天线阵列测试结果分析

为了验证所设计天线阵列实际辐射和散射性能,利用 PCB 电路印刷技术将仿真天线阵列模型加工成实物样件,并在微波暗室中对设计天线阵列进行辐射散射性能测试。实物加工如图11所示,采用1个 $1/2$ 功分器和2个 $1/8$ 功分器对设计天线阵列加载 $50\ \Omega$ 匹配负载,使用矢量网络分析仪对设计天线阵列进行测试分析。

图12给出了设计天线阵列的 S 参数和天线增益实测曲线,设计天线阵列 -10 dB 阻抗带宽为 8.1~9.2 GHz(相对带宽 12.7%),在此频段范围内的峰值增益达到 18.7 dB,实测增益曲线与仿真结果基本吻合。从 8.75 GHz 频点处的 xoz 面和 $yo z$ 面归一化辐射方向图可以看出,在辐射主波束方向上,在 $\pm 20^\circ$ 的角域内交叉极化远低于主极化水平,且辐射副瓣较小,辐射方向性强。归一化辐射方向图实测结果曲线与仿真效果基本重合,表明设计天线阵列具有良好的辐射性能。

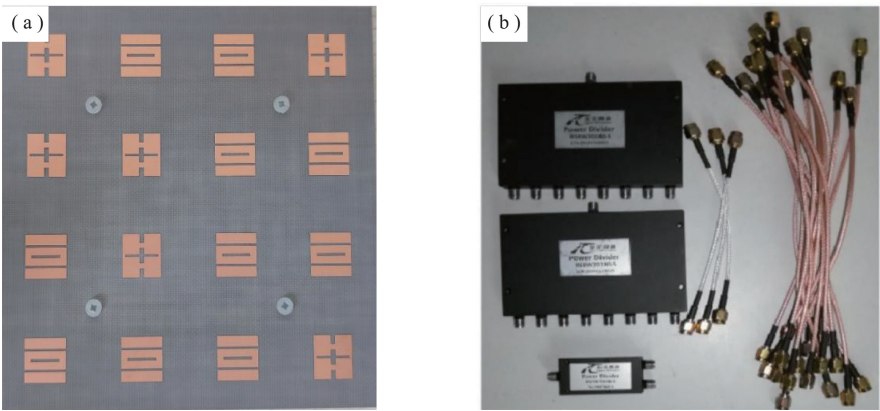


图 11 设计天线实物加工 (a)设计天线阵列样品(b) 功分器

Fig. 11 Physical processing of the designed antenna (a) Design of antenna array samples(b) Divider

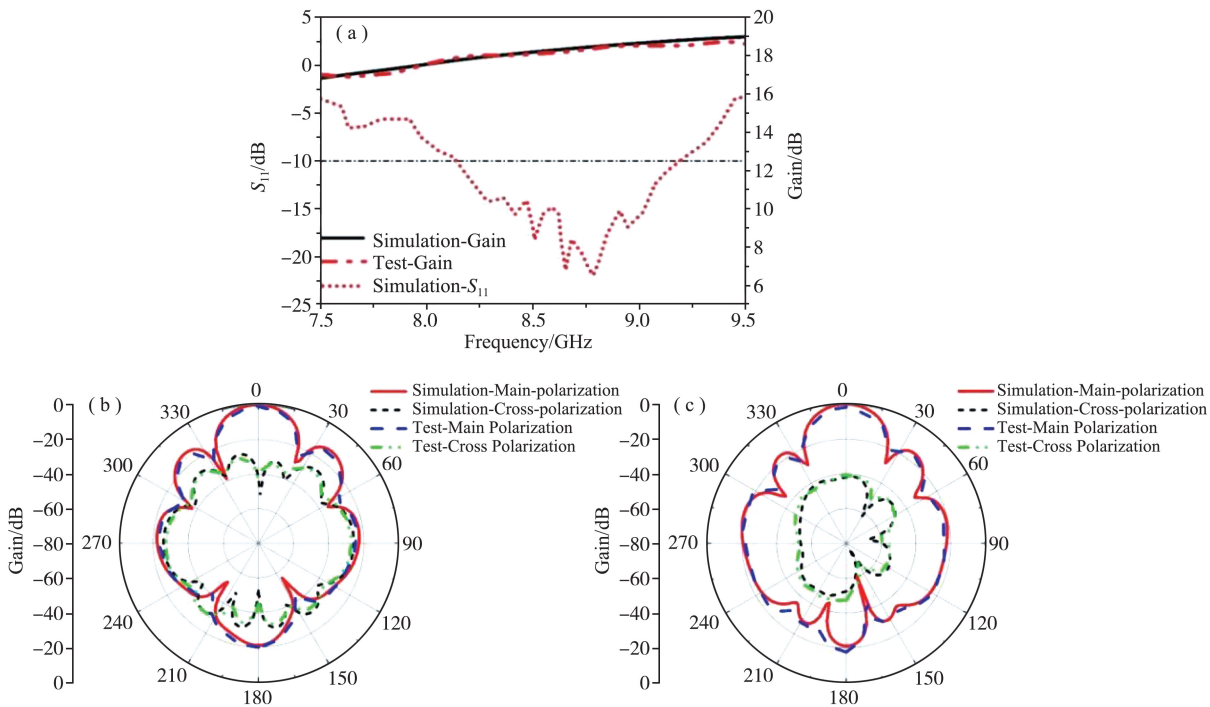


图 12 设计天线阵列性能测试结果 (a)设计天线阵列辐射特性; (b) xoy 面; (c) $yo z$ 面

Fig. 12 Designed antenna array performance test results (a) Design of antenna array radiation characteristics; (b) xoy -plane; (c) $yo z$ -plane

图 13 展示了在 x 和 y 极化入射波垂直照射下单站 RCS 实测曲线,实测结果曲线和仿真结果曲线虽然有较小的波动,但趋势基本吻合。在现实测量中,由于加工过程和测试环境并非是理想情况,从而导致实际测试结果相较于仿真测试结果有轻微的波动,但产生的波动偏差在允许的合理范围内,证明了设计理论的可行性与有效性。

表 2 超表面天线阵列性能对比

Tab. 2 Comparison of performance of metasurface antenna arrays

Literature	Layout	Whether the unit is Co-frequency operation	Operating frequency band/GHz	Peak gain/dB	Single-site RCS reduces band width/GHz	Whether it is diffuse scattering or not
Text	Random	Yes	8.1~9.2(12.7%)	18.7	6.9~10.5(41.4%)	Yes
[15]	Random	Yes	6.25~6.97(10.9%)	15.9	4.2~9.0(72%)	Yes
[16]	Chessboard	No	5.8/7.04	-	5.5~7.5(30.7%)	No

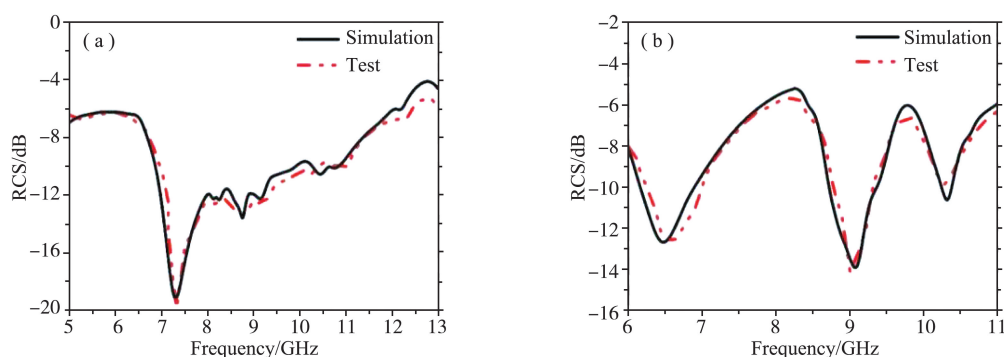


图 13 不同极化波入射下单站 RCS 实测曲线 (a) x 极化波; (b) y 极化波

Fig. 13 Measured RCS curves of a single station under different polarization wave incidence

(a) x -polarized wave; (b) y -polarized wave

表 2 给出了与参考文献的性能对比,所设计的天线阵列单元贴片结构简单,降低了设计难度,易于实现;天线阵列不仅在辐射性能方面表现优异,且在宽频段 6.9~10.5 GHz(41.4%)范围内实现了 x 极化入射波下单站 RCS 6 dB 以上的缩减。由于其按随机排布方式,所以表现出漫散射特性,天线阵列综合性能较为良好。

4 结论

提出一种具有低 RCS 特性的超表面天线阵列。采用两种相位相差 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的超表面单元,利用特征模对两个单元进行分析并添加合适的馈电结构使其具有辐射性能,通过参数优化使两个天线单元工作在相同的频带内。最后利用遗传算法对两个天线单元优化排布得到 4×4 的天线阵列,在不影响天线辐射特性的情况下更好的实现了低 RCS 功能。通过对超表面单元加载馈电结构,实现了具有高辐射和低散射特性的天线阵列,解决了天线阵列难以同时实现良好辐射功能和散射功能的难题,对低 RCS 天线阵列的设计提供了一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] AHMAD H, TARIQ A, SHEHZAD A, et al. Stealth technology: methods and composite materials-a review[J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4457-4472.
- [2] WANG Q, HE Z, SONG B, et al. Overview on RF stealth technology research[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1505-1514.
- [3] JAYALAKSHMI C G, LNAMEADAR A, ANAND A, et al. Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts[J]. Advanced Science News, 2019, 136(14): 1-21.
- [4] CHOI W, KWAK B, NAM Y. Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross section reduction[J]. Wiley, 2019, 62(3): 1-5.
- [5] HUANG H, WANG W, CAO T, et al. Broadband radar absorbing performance of corrugated structure[J]. Science Direct, 2020, 5(1): 525-535.
- [6] EL-SEWEDY M F, ABDALLA M A. A monostatic and bistatic RCS reduction using artificial magnetic conductor metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 71(2): 1988-1992.
- [7] AMERI E, ESMAELI S H, SEDIGHY S H. Ultra wide band radar cross section reduction using multilayer artificial magnetic conductor metasurface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(28): 285304.
- [8] CHEN M L N, JIANG L J, SHA W E L. Artificial perfect electric conductor-perfect magnetic conductor anisotropic metasurface for generating orbital angular momentum of microwave with nearly perfect conversion efficiency[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(6): 064506.
- [9] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2014, 29(12): 960-976.

(下转第 298 页)

- bicarbonate-based culture system[J]. 3 Biotech, 2021, 11(9): 412.
- [70] DE LUCA V, DEL PRETE S, VULLO D, et al. Expression and characterization of a recombinant psychrophilic gamma-carbonic anhydrase (NcoCA) identified in the genome of the Antarctic cyanobacteria belonging to the genus *Nostoc*[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2016, 31(5): 810-817.
- [71] SHANG J L, ZHANG Z C, YIN X Y, et al. UV-B induced biosynthesis of a novel sunscreen compound in solar radiation and desiccation tolerant cyanobacteria[J]. Environmental Microbiology, 2018, 20(1): 200-213.
- [72] AI Y F, YANG Y W, GAO X, et al. Heterologous expression of three stress-responsive genes from *Nostoc flagelliforme* confers tolerance to abiotic stresses in *Escherichia coli*[J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(1): 123-129.
- [73] WEI Y, NISHIUCHI T, SAKAMOTO T. Characterization of mycosporine-like amino acids in the edible cyanobacterium *Nostoc commune* (Di Pi Cai) from China[J]. Journal of General and Applied Microbiology, 2021, 67(6): 260-264.
- [74] JUNGBLUT A D, RAYMOND F, DION M B, et al. Genomic diversity and CRISPR-Cas systems in the cyanobacterium *Nostoc* in the High Arctic[J]. Environmental Microbiology, 2021, 23(6): 2955-2968.
- [75] EFFENDI D B, SAKAMOTO T, OHTANI S, et al. Possible involvement of extracellular polymeric substrates of Antarctic cyanobacterium *Nostoc* sp. strain SO-36 in adaptation to harsh environments[J]. Journal of Plant Research, 2022, 135(6): 771-784.
- [76] KAUTSAR S A, SUAREZ DURAN H G, BLIN K, et al. plantiSMASH: automated identification, annotation and expression analysis of plant biosynthetic gene clusters[J]. Nucleic Acids Research, 2017, 45(W1): W55-W63.
- [77] DVORÁK P, HASLER P, POULÍČKOVÁ A. New insights into the genomic evolution of cyanobacteria using herbarium exsiccatae[J]. European Journal of Phycology, 2020, 55(1): 30-38.
- [78] ROUTRAY D, GHATAK A, CHATURVEDI P, et al. Comparative analysis of geotypic variations in the proteome of *Nostoc commune* [J]. Plant Signaling and Behavior, 2024, 19(1): 2370719.
- [79] GUO M, XING D, WANG J, et al. Potent intestinal mucosal barrier enhancement of *Nostoc commune* Vaucher polysaccharide supplementation ameliorates acute ulcerative colitis in mice mediated by gut microbiota[J]. Nutrients, 2023, 15(13): 3054.

(责任编辑:刘庆松)

(上接第 205 页)

- [10] MAVRIDOU M, FERESIDIS A P. Dynamically reconfigurable high impedance and frequency selective metasurfaces using piezoelectric actuators[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(12): 5190-5197.
- [11] GONG S, MENG Y, WANG C, et al. Full-Stokes polarimetry based on rotating metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(5): 051110.
- [12] ARTIGA X, BRESCIANI D, LEGAY H, et al. Polarimetric control of reflective metasurfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11(12): 1489-1492.
- [13] DING F, PORS A, BOZHEVOLNYI S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 81(2): 026401.
- [14] LI Z, KIM M H, WANG C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. Nature nanotechnology, 2017, 12(7): 675-683.
- [15] ZHANG Z, LIU T, CAO X, et al. An integrated 2-bit metasurface array antenna with broadband low radar cross-section covering large incident angle space[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2022, 16(6): 367-377.
- [16] ZHENG Y, CAO X, GAO J, et al. Integrated radiation and scattering performance of a multifunctional artificial electromagnetic surface [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30001-30012.
- [17] CHEN Y, WANG C F. Characteristic modes: theory and applications in antenna engineering[M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [18] ELIAS B B Q, SOH P J, AL-HADI A A, et al. A review of antenna analysis using characteristic modes[J]. IEEE Access, 2021, 9(7): 98833-98862.

(责任编辑:赵海军)