

# 基于辐射散射一体化技术的 低 RCS 贴片天线阵列设计

郝 彪, 杨宾锋, 高 军, 曹祥玉, 杨欢欢, 李 桐

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 提出并设计了一种基于辐射散射一体化技术的  $4 \times 4$  低 RCS 贴片天线阵列, 该阵列由 2 种辐射特性相似、反射相位相差  $180^\circ$  的天线单元组成。利用遗传算法优化得到散射场在各方向均匀分布的非周期阵列结构, 有效减小了天线阵的峰值 RCS。仿真结果表明: 天线阵列的增益在 16 dBi 以上; 法线方向  $x$  极化波照射时, 单站 RCS 减缩频带为 8~15.9 GHz, 最大减缩量为 17.1 dB;  $y$  极化波照射时, 单站 RCS 减缩频带为 9.5~16 GHz, 最大减缩量为 13.1 dB。测试结果与仿真拟合较好。该阵列集超材料和贴片天线于一体, 利用天线单元自身相位差有效降低了其 RCS 值, 为降低天线阵列 RCS 提供了一种新的方法。

**关键词** 低雷达散射截面; 天线阵列; 编码超材料

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.04.012

**中图分类号** TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)04-0074-06

## Low RCS Patch Antenna Array Based on Integrated Radiation and Scattering Performance

HAO Biao, YANG Bin Feng, GAO Jun, CAO Xiangyu, YANG Huanhuan, LI Tong

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

**Abstract** In this letter, a low RCS patch antenna array based on integrated of radiation and scattering performance has been designed. The  $4 \times 4$  array is comprised of two different antenna units, which have similar radiation characteristics but  $180^\circ$  reflection phase difference. By using genetic algorithms, aperiodic configuration can be obtained, which makes the scattering field evenly scattered in all directions and effectively reduces the peak value of RCS. Simulation results shows gain of the proposed array is more than 16 dBi. Under  $x$  polarization the monostatic RCS in normal direction is reduced from 8 GHz to 15.9 GHz and the peak reduction is 17.1 dB. Under  $y$  polarization the monostatic RCS in normal direction is reduced from 9.5 GHz to 16 GHz and the peak reduction is 13.1 dB. The proposed array was manufactured for test and the measured results show good agreement with the simulation results. The proposed array has characteristics of metamaterial and patch antenna. The RCS is reduced because of phase difference of antenna units without any other metamaterial, which provides a new method to reduce the RCS of the antenna array.

**Key words** low RCS; antenna array; coding metamaterial

**收稿日期:** 2020-05-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471389, 61671464, 61801508)

**作者简介:** 郝彪(1996—), 男, 河南开封人, 硕士生, 主要从事人工磁导体与贴片天线阵列研究。E-mail: 2105712612@qq.com

**通信作者:** 杨宾锋(1976—), 男, 陕西户县人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事导航天线技术研究。E-mail: bf\_yang@163.com

**引用格式:** 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. HAO Biao, YANG Bin Feng, GAO Jun, et al. Low RCS Patch Antenna Array Based on Integrated Radiation and Scattering Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(4): 74-79.

随着战争形态的不断升级,世界各国对武器装备隐身特性的要求也越来越高。天线作为无线通信设备中的重要组成部分,因其特殊作用往往会引起较大的雷达反射截面(Radar Cross Section, RCS),直接降低武器装备在战场的生存性<sup>[1]</sup>。因此,设计出低 RCS 天线对现代军事装备发展具有重要意义。

近些年,电磁超材料(Metamaterial, MTM)的蓬勃发展,为降低天线 RCS 提供了新方向。电磁超材料多指自然界中不存在,具有特殊电磁特性的人造亚波长周期结构<sup>[2]</sup>。几个主要的研究方向有频率选择表面<sup>[3-4]</sup>、人工磁导体<sup>[5-7]</sup>、完美吸波体<sup>[8-9]</sup>、极化旋转表面等<sup>[10-12]</sup>。但是,传统方法将超材料单元与天线单元分别设计,而后按一定排列方式组合在一起,这样往往会增大天线口径,而且对天线原本的辐射性能产生影响。因此,通过“散射体参与辐射”的思想,将具有人工磁导体特性的贴片接上馈电,利用 2 种人工磁导体相位相差 180°的特点,得到同时具有辐射特性和低 RCS 的天线阵列<sup>[13]</sup>。文献[14]利用电磁偶极子与天线与周围金属地之间的相位差,使天线阵在  $x$  极化和  $y$  极化的 6 dB 减缩频带分别为 5.3~11.9 GHz 和 9.1~12.0 GHz。文献[15]利用 2 种大小不同的方形贴片天线,通过相位对消进行 RCS 减缩,同时 2 种单元分别在其所在频段独立工作。文献[16]与文献[17]都设计了 2 种工作频段相近,反射相位相差 180°的 2 种贴片天线单元,天线阵列的 RCS 得到了明显降低,同时所有阵元可以工作在相同频段。上述文献均通过结合天线的反射相位来降低 RCS,且整体功能也愈加完备。因此,将超材料充当辐射体设计低 RCS 阵列天线成为了当前热点研究方向。

本文提出并设计了一种基于辐射散射一体化技术的低 RCS 贴片天线阵列,该天线阵列在 9.5~11.5 GHz 频段内,仿真增益稳定在 16 dBi 以上。利用遗传算法优化排布结构,使散射场呈现一种漫散射形态,降低了天线阵列在整个空间散射场的 RCS 峰值。法线方向上  $x$  极化波照射时,单站 RCS 在 8~15.9 GHz 有所降低,其最大减缩量达 17.1 dB; $y$  极化波照射时,单站 RCS 在 9.5~16 GHz 有所降低,最大减缩量为 13.1 dB。

### 1 理论分析

通过利用 2 种天线单元表面之间的反射相位差,使 2 种天线单元产生的反射波达到等幅反相的条件,进而使天线阵的 RCS 得到减缩。

设 2 种天线被入射波照射后,产生的等幅的表面电场,大小为  $A$ ,电场反射相位分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,则反射波产生的总场强为:

$$\mathbf{E} = A e^{j\varphi_1} F_1 + A e^{j\varphi_2} F_2 \quad (1)$$

式中: $F_1$  和  $F_2$  是 2 种单元结构的阵因子。

$$F_1 = e^{j(kx+ky)d/2} + e^{j(-kx-ky)d/2} \quad (2)$$

$$F_2 = e^{j(kx-ky)d/2} + e^{j(-kx+ky)d/2} \quad (3)$$

$$x = \sin \theta \cos \varphi \quad (4)$$

$$y = \sin \theta \sin \varphi \quad (5)$$

式中: $\theta$  和  $\varphi$  为入射波分别与水平面与垂直面的夹角, $k = 2\pi/\lambda$ , $d$  为 2 种天线单元中心间距。

当垂直入射时, $\theta$  与  $\varphi$  为 0°,此时  $F_1$  和  $F_2$  的值为 2,则式(1)可化为:

$$\mathbf{E} = 2A(e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}) \quad (6)$$

若 2 种天线单元的反射相位相同,设其反射场为  $\mathbf{E}_0$ ,则:

$$\mathbf{E}_0 = 4Ae^{j\varphi_1} \quad (7)$$

如果要求 RCS 减小的能量达 10 dB,则有:

$$|\mathbf{E}|^2 / |\mathbf{E}_0|^2 \leq -10 \text{ dB} \quad (8)$$

将式(6)、(7)带入式(8)中,得到:

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \leq -0.8 \quad (9)$$

解得:

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ \quad (10)$$

所以理论上讲,当垂直入射时,2 种天线单元的反射相位若能满足式(10),则天线阵相较于同等面积的金属板其 RCS 减缩可达 10 dB。因此,一般将在 143°~217°范围内的相位差称为有效相位差<sup>[18-19]</sup>。

### 2 贴片单元设计与仿真结果

天线阵列由 2 种天线单元构成,结构如图 1 所示,尺寸参数如表 1 所示。2 种天线的基本结构相似,二者介质板的介电常数为 2.2,都采用 L 型探针贴片进行激励,下方焊接 50 Ω 的 SMA 连接器为其馈电,金属地上刻有矩形槽。

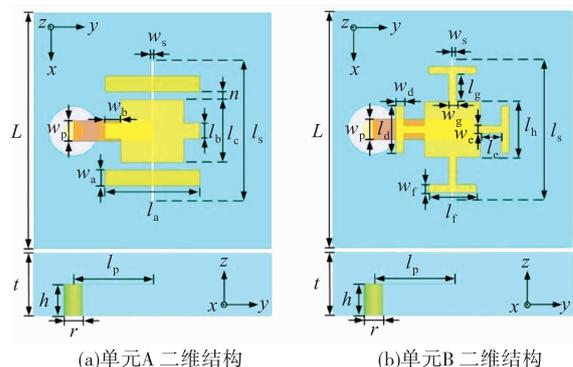


图 1 2 种天线单元结构图

表1 天线尺寸参数 mm

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
$L$	15.0	$W_a$	1.0	$W_e$	0.5
$t$	4.0	$l_a$	6.0	$l_e$	1.3
$h$	2.0	$W_b$	1.0	$W_f$	0.5
$r$	0.6	$l_b$	1.0	$l_f$	3.0
$W_s$	0.2	$l_c$	4.0	$W_g$	0.5
$l_s$	9.0	$n$	0.5	$l_g$	1.75
$W_p$	1.3	$W_d$	0.5	$l_h$	3.5
$l_p$	5.0	$l_d$	3.0		

2种天线单元的 $|S_{11}|$ 及增益仿真曲线如图2所示。单元A的-10 dB带宽为9.1~11.7 GHz,单元B的-10 dB带宽为8.8~11.2 GHz,共同带宽为9.1~11.2 GHz。在其共同的频带下,2种天线单元的增益均在6 dBi以上。2种天线单元的辐射方向图如图3所示,二者方向图相似度较高,且交叉极化小,在天线阵辐射过程中,可看作相同阵元。

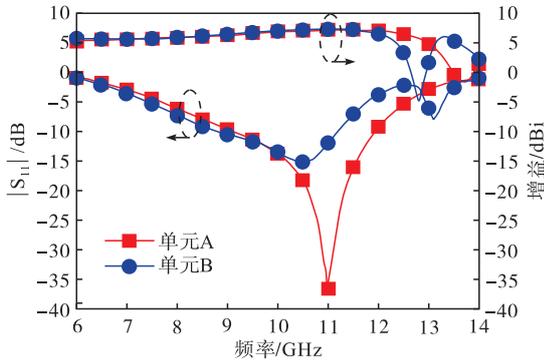


图2 天线单元 $|S_{11}|$ 及增益曲线

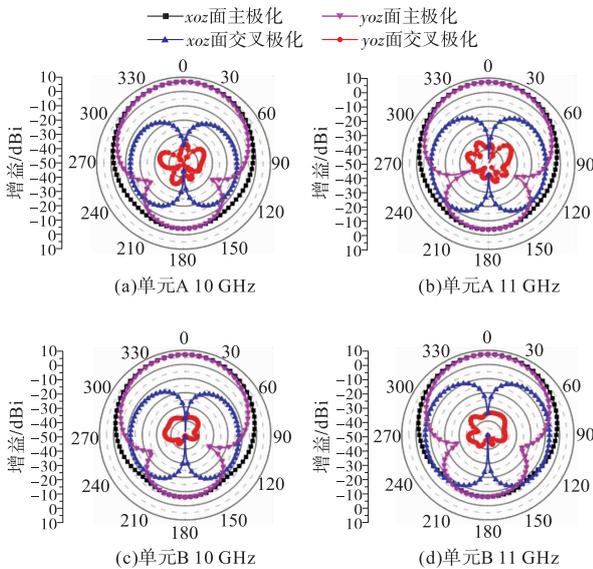
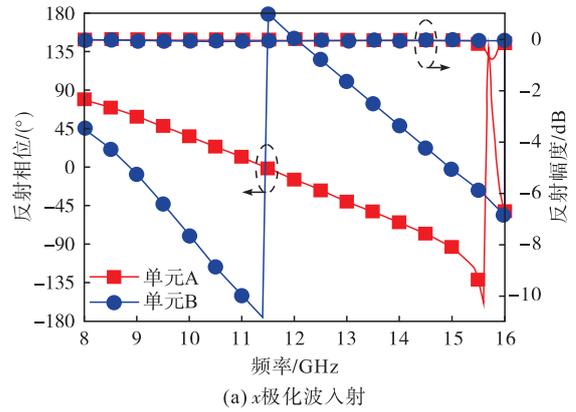


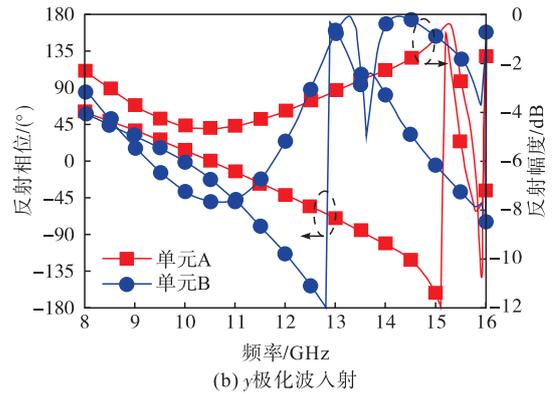
图3 天线单元辐射方向图

2种天线单元的散射特性如图4所示,当 $x$ 极化波垂直照射2种天线单元时,反射幅度保持在0 dB附近,天线不会吸收来波,组成阵列后RCS缩减靠在11.5 GHz附近的相位对消实现。当 $y$ 极化波

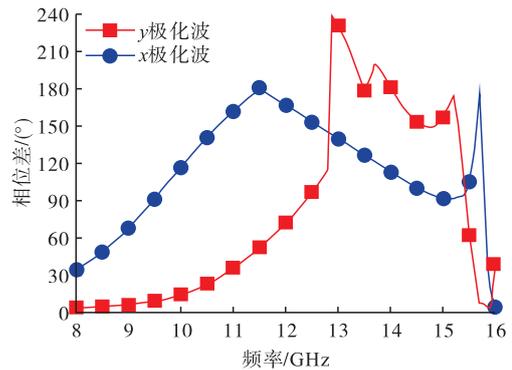
垂直入射时,反射幅度在9~12.5 GHz时小于-3 dB,可以对入射波进行一定程度的吸收,从而减小天线RCS,同时在14 GHz附近可利用2种单元存在 $180^\circ$ 的有效相位差来减缩天线的RCS。



(a)  $x$ 极化波入射



(b)  $y$ 极化波入射



(c) 2种天线单元的反射相位差

图4 天线单元的散射特性

### 3 低 RCS 天线阵列设计与仿真

根据2种天线单元具有相似辐射特性,可以将其组合成为 $4 \times 4$ 天线阵。同时根据2种天线单元的反射特性,组成阵列后其RCS相比同频段 $4 \times 4$ 参考天线阵更低,参考天线阵结构如图5(a)所示。按照传统的棋盘排布方式,垂直入射时,利用相位对消原理将法线方向的RCS进行减缩,对于其他方向仍能造成一些较大的散射峰。依据编码超材料理论,采用非周期的编码排布方式可使超材料产生不

规则的反射,达到一种漫散射效果,使散射能量分布更加均匀,从而降低阵列的峰值 RCS。

遗传算法可高效地计算出使阵列峰值 RCS 最小时的单元排布方式。2 种天线单元在 11 GHz 时,  $x$  极化波垂直入射时反射相位差在有效相位差内, 为了对  $x$  极化时降低天线峰值 RCS,选取 11 GHz 作为遗传算法优化非周期排布的频率参数。最终得到设计天线阵如图 5 (b)所示。

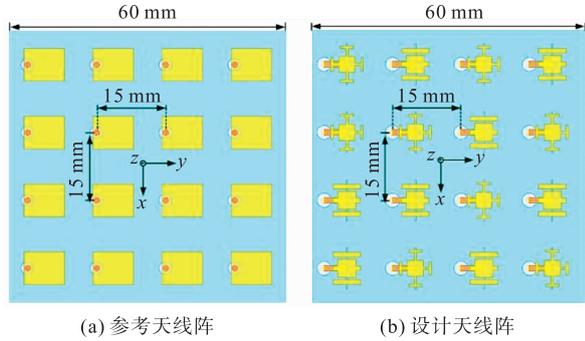


图 5 天线阵列

对天线阵中所有单元等幅同相馈电,仿真增益曲线如图 6 所示,设计天线阵的增益稳定在 16 dBi 以上,且高于参考天线阵的增益值。设计天线阵辐射方向图的仿真结果如图 7 所示,天线阵的副瓣较小,辐射方向性较强,且交叉极化总体保持在较低水平。仿真表明该天线阵总体辐射性能良好。

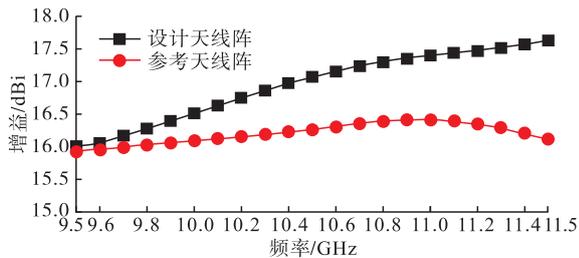


图 6 天线阵列增益仿真曲线

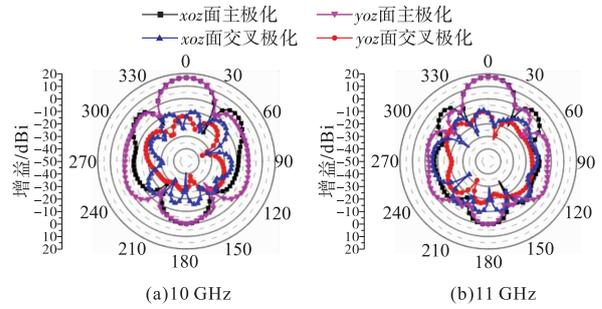


图 7 设计天线阵列辐射方向图

对天线阵的散射特性进行仿真,当电磁波垂直照射时,其单站 RCS 特性曲线如图 8 所示。可以看出,相比于参考天线阵,设计天线阵的 RCS 值减缩明显,当  $x$  极化波照射时,RCS 减缩带宽为 8~15.9 GHz,最大减缩量为 17.1 dB,主要由 2 种天线单元的反射波相互抵消所致;当  $y$  极化波照射时,RCS 减缩带宽为 9.5~16 GHz,最大减缩量为 13.1 dB,由 2 种天线单元对来波的吸收和反射波相互抵消共同作用所致。

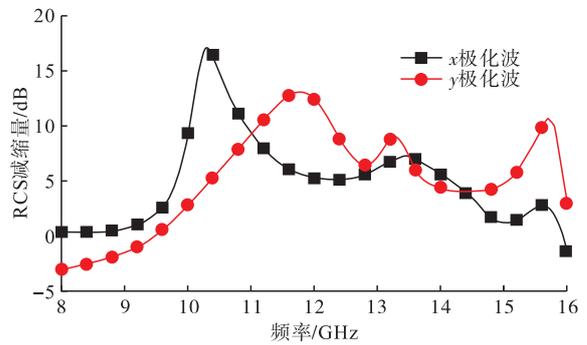


图 8 天线阵法线方向上单站 RCS 特性

由于采用非周期编码,RCS 并不只考虑在法线方向上的减缩,而是对整个空间全盘考虑,使其 RCS 峰值最小,对 11 GHz 时天线阵的三维散射场如图 9 所示。

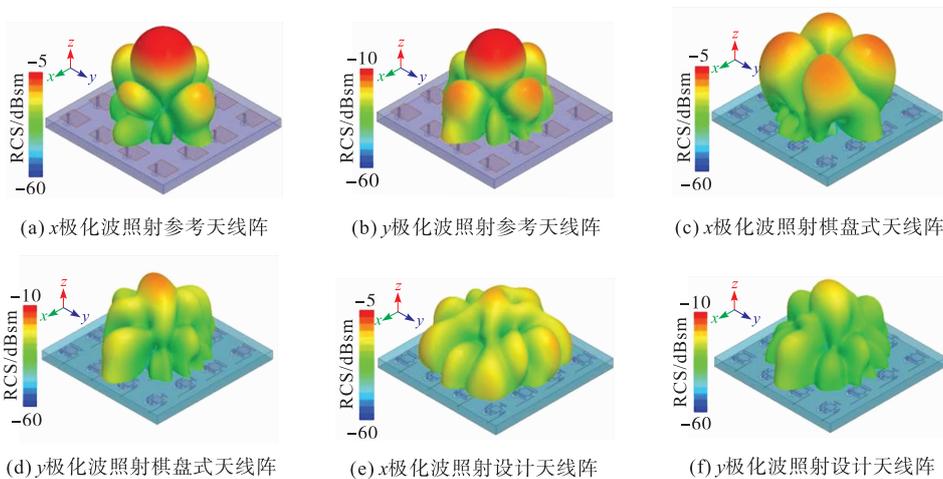


图 9 11 GHz 时天线阵的三维散射场

$x$  极化波照射下,设计天线阵的峰值 RCS 为一 15.5 dBsm,相较于棋盘式天线阵,其整个散射场在

空间中的分布比较均匀,RCS 峰值明显低于棋盘式天线阵; $y$  极化波照射下,其与棋盘式天线阵的散射

场都较为均匀的分布在空间中,但总体来看,其 RCS 峰值仍比棋盘式天线阵低。

为更好说明本文设计天线阵的特点,现将所做

工作与文献[15~17]进行对比,结果如表 2 所示。本文采用不同于其他文献非周期布阵方式,因而出现了漫散射现象,同时具备了良好的辐射性能。

表 2 本文与文献[15~17]所设计天线阵性能对比

文献	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 减缩带宽/GHz	是否出现漫散射
文献[15]	棋盘布阵	否	5.7~6.2 与 6.5~7.3	6 dB 带宽 5.56~7.44( $x$ 极化与 $y$ 极化)	否
文献[16]	棋盘布阵	是	6~8.5	6 dB 带宽 4.2~10.5( $x$ 极化) 3 dB 带宽 5.5~10( $y$ 极化)	否
文献[17]	1,4 列单元 A 2,3 列单元 B	是	4.7~5.3	4~8( $x$ 极化与 $y$ 极化)	否
本文	非周期布阵	是	9.1~11.2	8~15.9( $x$ 极化) 9.5~16( $y$ 极化)	是

### 4 天线阵列加工与测试

为验证所设计天线阵列的性能,对其结构进行软件仿真并进行实际样品的测试,实际天线及测试环境如图 10 所示。

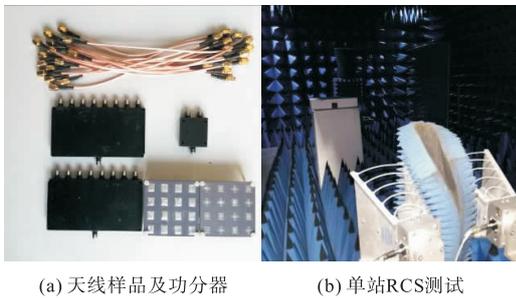


图 10 天线阵列实测

设计天线阵的实测增益曲线如图 11 所示,实测结果较仿真整体略有降低,但随频率增加而升高的趋势不变。个别频点实测增益大于仿真增益,可能是由实物阵列在该点处  $|S_{11}|$  要低于仿真值导致。设计天线阵的实测方向图如图 12 所示,可以看出实测结果与仿真结构拟合较好。

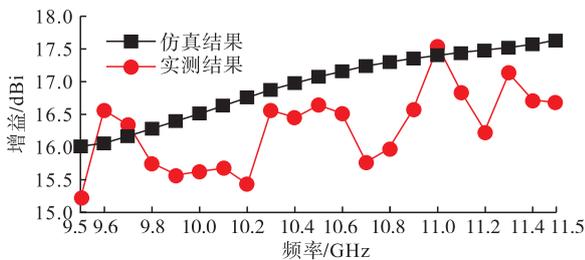
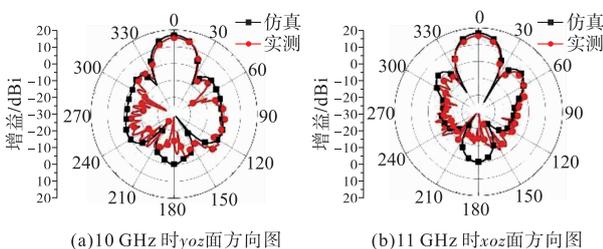


图 11 设计天线阵的增益曲线



(a)10 GHz 时 $yoz$ 面方向图 (b)11 GHz 时 $xoz$ 面方向图

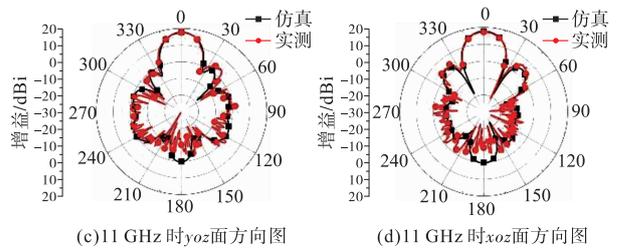


图 12 设计天线阵辐射方向图

实测天线阵列在法线方向上的单站 RCS 减缩曲线如图 13 所示。从实测结果来看,减缩频段往高频偏了约 100 MHz,有可能由于加工误差以及装配误差导致,整体上与仿真结果相吻合。在对阵列 4 角打固定孔后进行后仿真实验,发现 RCS 曲线向右频移了约 50 MHz,是该误差的主要来源。

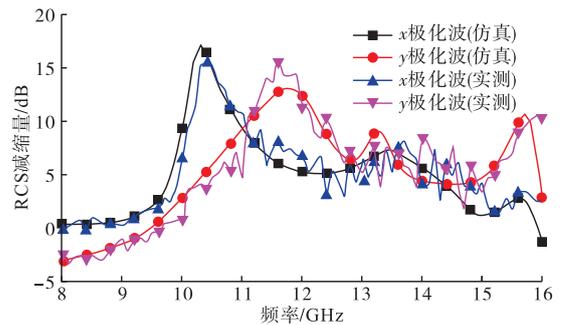


图 13 天线阵法线方向上单站 RCS 特性

### 5 结论

本文设计了一种基于辐射散射一体化技术的低 RCS 贴片天线阵列,通过将具有相似辐射特性而在特定频段反射相位相差  $180^\circ$  的 2 种天线单元按  $4 \times 4$  方式组阵。利用遗传算法高效寻找出能使天线阵列 RCS 峰值最低的非周期排布方式,使天线阵列达到漫反射效果。天线阵列具有良好辐射特性,方向图良好并且副瓣较低,增益较参考天线阵有所提高且稳定在 16 dBi 以上。天线阵同时具有低 RCS 特性,相较参考天线阵,入射波为  $x$  极化与  $y$  极化时,

RCS 分别在 8~15.9 GHz 与 9.5~16 GHz 有所减缩,最大减缩量分别为 17.1 dB 和 13.1 dB;在  $x$  极化波入射时,非周期的排布方式使其较传统的棋盘布阵方式散射场分布更加均匀,峰值 RCS 也更小。该天线阵无需在周围利用其他超材料来帮助其减小 RCS,有效的控制了阵列的口径。该低 RCS 天线阵列设计方法不同于传统方法,为直接设计低 RCS 天线阵提供了一个新的思路,具有一定的研究价值。

### 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] 杨欢欢. 新型电磁表面及其可重构阵列天线应用研究[D]. 西安:空军工程大学, 2016.
- [3] DENG T W, LI Z W, CHEN Z N. Ultrathin Broadband Absorber Using Frequency-Selective Surface and Frequency-Dispersive Magnetic Materials [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65 (11): 5886-5894.
- [4] SAPTARSHI G, KUMAR V S. Broadband Polarization-Insensitive Tunable Frequency Selective Surface for Wideband Shielding[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 60(1): 166-172.
- [5] SON X T, IKMO P. Dual-Band Low-Profile Crossed Asymmetric Dipole Antenna on Dual-Band AMC Surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 587-590.
- [6] LI G H, ZHAI H Q, LI L, et al. AMC-Loaded Wideband Base Station Antenna for Indoor Access Point in MIMO System[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 525-533.
- [7] 朱学文,高军,曹祥玉,等. 一种低剖面低 RCS 兼具高增益特性的覆层微带天线设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(2):44-50.
- [8] BAI Y, ZHAO L, JU D Q, et al. Wide-Angle, Polarization-Independent and Dual Band Infrared Perfect Absorber Based on L Shaped Metamaterial[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8670-8680.
- [9] AGARWAL M, BEHERA A K, MESHARAM M K. Wide-Angle Quad-Band Polarisation Insensitive Metamaterial Absorber[J]. Electronics Letters, 2016, 52(5): 340-342.
- [10] ZHANG L B, ZHOU P H, LU H P, et al. Realization of Broadband Reflective Polarization Converter Using Asymmetric Cross-Shaped Resonator[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(4): 1393.
- [11] LIU X B, ZHANG J S, LI W, et al. An Analytical Design of Cross Polarization Converter Based on the Gangbuster Metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1028-1031.
- [12] 于惠存,曹祥玉,高军,等. 一种超宽带反射型极化转换超表面设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018,19(3):60-65.
- [13] 赵一. 基于新型编码超表面的天 RCS 减缩技术研究[D]. 西安:空军工程大学, 2017.
- [14] 兰俊祥. 新型宽带低散射磁电偶极子天线及其阵列研究[D]. 西安:空军工程大学,2018.
- [15] ZHENG Y J, CAO X Y, GAO J, et al. Integrated Radiation and Scattering Performance of a Multifunctional Artificial Electromagnetic Surface [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30001-30012.
- [16] 刘涛,曹祥玉,高军,等. 宽带低 RCS 超表面天线阵列设计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2095-2102.
- [17] LIU Y, JIA Y T, ZHANG W B, et al. An Integrated Radiation and Scattering Performance Design Method of Low-RCS Patch Antenna Array with Different Antenna Elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(9): 6199-6204.
- [18] LI Y Q, ZHANG H, FU Y Q, et al. RCS Reduction of Ridged Waveguide Slot Antenna Array Using EBG Radar Absorbing Material [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008, 7: 473-476.
- [19] LIU T, CAO X Y, GAO J, et al. RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna with Metamaterial Absorber [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2013, 61(3): 1479-1484.

(编辑:韩茜)