

一种具有宽带双极化低散射特征的微带阵列天线

韩嘉良, 贾丹, 韩国栋, 杜彪, 赵泽康, 刘亚昆

(中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对阵列天线宽带散射缩减设计进行研究, 设计了一种基于无源对消技术的低散射阵列天线, 该新型微带阵列天线在宽频带内具有双极化低雷达散射截面 (RCS, radar cross section) 性能; 对基于两种散射性能不同的单元组成阵列的 RCS 性能进行了理论研究, 进行了单元的散射幅度和相对阵列 RCS 的影响分析; 提出了一种加载 T 型缝隙的新型微带天线结构, 该单元结构的辐射性能与散射性能能够进行独立调控和综合优化, 该单元与传统微带贴片单元具有相似的辐射特性, 并可在宽频带 (带内和带外) 内与传统微带单元产生有效相位差; 将传统微带单元和加载 T 型缝隙的新型微带单元组成 4×4 阵列天线, 仿真结果表明, 提出的阵列天线在 3~7 GHz (相对带宽 80%) 频带内实现了同极化 RCS 缩减, 在 3.3~7 GHz (相对带宽 71.8%) 频带内实现了交叉极化 RCS 缩减, 缩减峰值分别为 16.3 dB 和 36.3 dB, 带内 RCS 缩减均值分别为 14.1 dB 和 17.6 dB; 与传统微带阵列天线相比, 提出的阵列天线增益下降小于 0.1 dB; 提出的微带阵列天线具有高效率辐射和宽频带双极化低散射性能, 为低散射阵列天线设计提供了新的思路。

关键词: 雷达散射截面缩减; 散射对消; 微带天线; 宽频带; 双极化

A Microstrip Array Antenna with Wideband Dual Polarization Low Scattering Characteristics

HAN Jialiang, JIA Dan, HAN Guodong, DU Biao, ZHAO Zekang, LIU Yakun

(China Electronics Group Corporation No. 54 Research Institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In this paper, a low scattering array antenna based on passive cancellation technology is proposed, which has the performance of wideband dual polarization low radar cross section (RCS). The RCS performance of the antenna array consist of two kinds of elements with different scattering properties is studied theoretically. The influence of the scattering amplitude and phase of elements on the RCS of array antenna is analyzed. A new microstrip antenna element structure is designed by loading T-slot on the edge of the microstrip antenna radiation patch. By modifying the microstrip antenna element, its radiation performance and scattering performance can be independently regulated and comprehensively optimized. It has similar radiation characteristics with the reference microstrip antenna element and the effective phase difference between the two elements is produced in a wide band (in-band and out-of-band). The traditional microstrip antenna element and the new microstrip element loaded with T-slot are composed of 4×4 array antenna. The simulation results show that, the design array antenna achieves the reduction of co-polarization RCS in the frequency band of 3~7 GHz (relative bandwidth 80%) and cross-polarization RCS in the frequency band of 3.3~7 GHz (relative bandwidth 71.8%). The peak values of RCS reduction are 16.3 dB and 36.3 dB, and the mean in-band RCS reduction are 14.1 dB and 17.6 dB, respectively. Compared with the traditional microstrip array antenna, the gain loss of the proposed array antenna is less than 0.1 dB. Therefore, the proposed microstrip array antenna has high radiation efficiency and wideband dual polarization low scattering performance and a new idea for the design of low RCS antenna array is presented.

Keywords: RCS reduction; scattering cancellation; microstrip antenna; broadband; dual-linear polarization

0 引言

随着信息化战争时代的快速到来, 武器装备隐身性能成为各国的重要发展领域^[1]。天线作为武器装备的重要组成部分, 其雷达散射截面对武器装备总的 RCS (radar cross section) 具有不可忽视的影响。微带阵列天线具有重量轻、剖面低、易共形等优点, 已广泛应用于低可探测平台, 微带阵列天线隐身设计已成为研究热点。

天线隐身设计的方法主要有修形技术^[2-3]、基于频率选择表面 (FSS, frequency selective surface) 的天线罩设计^[4-6]、加载雷达吸波材料 (RAM, radar absorber metamaterials)^[7-8]和电磁超表面 (EMS, electromagnetic surface)^[9-11]。其中, 修形技术主要用于单元设计而难以直接应用于阵列修形。频率选择天线罩可降低阵列天线带外 RCS, 而无法降低天线带内 RCS。超材料吸收体 (MA, metamaterial absorber)^[12]和极化转换超表面^[13-15]等方法可在较宽的频

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-02-23。

作者简介: 韩嘉良 (1997-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事阵列天线隐身技术方向的研究。

通讯作者: 贾丹 (1987-), 女, 河北石家庄人, 博士, 高级工程师, 主要从事天线隐身技术和超材料技术方向的研究。

引用格式: 韩嘉良, 贾丹, 韩国栋, 等. 一种具有宽带双极化低散射特征的微带阵列天线[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 281-288.

带上显著降低阵列天线的 RCS，但是该方法会增大天线的剖面高度且天线增益损失较大。通过人工磁导体 (AMC, artificial magnetic conductor) [16-20] 对电磁波的特殊反射相位，可实现与传统金属结构的散射抵消。将该无源散射抵消思路应用于阵列天线设计中，通过使两种结构不同的单元产生 180° 相位差可降低阵列天线的 RCS [20-24]，该方法可在不改变天线尺寸的基础上实现天线 RCS 缩减。

文献 [17] 通过在缝隙耦合贴片天线单元周围加载 AMC 结构，在 6.4~21.7 GHz 范围内降低了天线的 RCS，但单元天线的横向尺寸约为波长的 3 倍。文献 [19] 将三种 AMC 结构放置在一维微带阵列天线下方，通过对三种 AMC 单元的布阵优化，在 11.5~16.5 GHz 宽带范围内实现了 3 dB 以上的 RCS 减缩，但在未进行组阵的方向，其横向尺寸远大于 1 个波长。兰俊祥等人 [20] 设计了一种在矩形辐射贴片上开弧形缺口的单元结构，与传统微带单元组成的阵列天线在 5.6~6.2 GHz 范围内实现了 6 dB 以上的双极化 RCS 减缩。贾永涛等人 [21] 设计了一种加载 U 型缝隙的新型单元，与传统矩形贴片单元组成阵列天线双极化 RCS 减缩带宽 66.7%。郝彪等人 [22] 设计了两种上层贴片形状相同、正交放置的微带天线，利用遗传算法将两种天线单元进行非周期排布，双极化 RCS 减缩带宽 41.6%。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] 和 [19] 是将天线单元与 AMC 结构分开设计，AMC 单元是直接用于单元天线的 RCS 减缩，通过降低单元的 RCS 来实现阵列 RCS 减缩，但是在天线单元周围增加额外的 AMC 无源抵消结构，会使得加载后天线单元横向尺寸明显增大，应用于阵列天线时由于天线单元间距增大会导致阵列天线扫描范围受限。文献 [20-22] 将阵列天线设计与散射抵消结构设计融为一体，单元周期均约为半波长尺寸，解决了文献 [17] 和 [19] 中存在的矛盾，采用两种散射相位差 180° 的天线单元组成阵列天线，通过控制散射阵因子实现了阵列天线的 RCS 减缩。该散射抵消方法可以在不改变阵列天线的单元间距和剖面高度的基础上降低阵列天线的 RCS，即具有较大的研究价值也具有极大的应用价值。但是通过设计两种新型单元结构实现阵列天线的宽带 RCS 减缩，设计过程及单元结构设计较为复杂，尚缺乏对宽带抵消单元设计方法的详细研究。

针对上述问题，本文理论研究了基于两种散射性能不同的单元组成阵列的 RCS 性能，分析了单元的散射幅度和相位对阵列 RCS 的影响，研究了影响单元相位曲线的因素。为了实现天线的宽带辐射和宽带 RCS 减缩，本文提出并设计了一种新型的天线单元结构，该结构的辐射性能与散射性能能够进行独立调控和综合优化。通过在辐射贴片边缘加载 T 型缝隙结构改变散射电流路径，实现对散射相位的有效调控。该 T 型缝隙与传统微带贴片单元的散射性能可在宽频带内产生有效相位差，为阵列天线宽带 RCS 减缩奠定基础。将该新型单元与传统微带天线单元组成 4×4 阵列天线，当入射波极化与天线工作极化正交时，两种天线

单元的散射场反相而相互抵消；而当入射波极化与天线极化相同时，利用天线阻抗匹配对入射波的吸收可实现 RCS 减缩，最终实现了高效率辐射和宽频带双极化 RCS 减缩。

1 散射抵消理论分析

本文首先研究了由两种散射性能不同的单元组成的阵列天线的散射性能，典型阵列结构如图 1 所示。

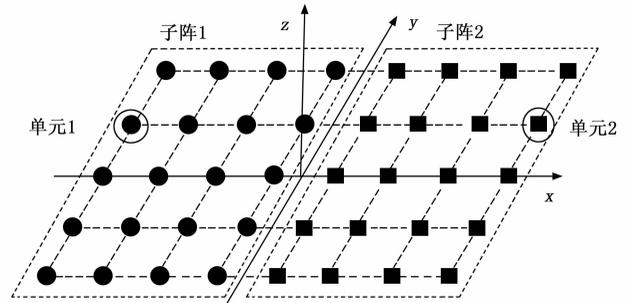


图 1 由两种单元组成的阵列天线结构示意图

本文首先研究由两种散射性能不同的单元组成的阵列天线的散射性能，典型的阵列天线结构如图 1 所示。平面波照射下，两种天线单元的电场反射幅度分别为 A_1 和 A_2 ，电场反射相位分别为 φ_1 和 φ_2 ，则两种单元组成的阵列天线的总反射场可以写为：

$$E^S = A_1 e^{j\varphi_1} F_1 + A_2 e^{j\varphi_2} F_2 \quad (1)$$

式中， E^S 代表阵列天线的总散射场， F_1 和 F_2 分别是两个子阵的散射阵因子，表达式如下：

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

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

其中： x 和 y 代表阵元位置，可写为：

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

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

式中， θ 和 φ 为入射波分别与水平面与垂直面的夹角， $k = 2\pi/\lambda$ ， d 为单元间距。

当电磁波垂直入射时， θ 和 φ 均为 0° ，此时 F_1 和 F_2 的值为 2，则式 (1) 可简化为：

$$E^S = 2(A_1 e^{j\varphi_1} + A_2 e^{j\varphi_2}) \quad (6)$$

参考阵列天线由相同结构的单元组成，即所有单元的反射电场辐射和相位相同，各单元的反射幅度满足 $A = A_1 = A_2$ ，反射相位满足 $\varphi_1 = \varphi_2$ ，则参考阵列天线的总散射场 E_0 可写为：

$$E_0 = 4Ae^{j\varphi_1} \quad (7)$$

与传统微带阵列天线相比，对于由两种不同单元组成的同规模阵列天线，其 RCS 减缩量要到达 β dB，需要满足以下条件：

$$10 \times \log(|E^S|^2 / |E_0|^2) = -\beta \quad (8)$$

当两种单元的反射幅度不同时，设反射幅度比为 $\gamma = A_1/A_2$ ，将式 (6)、(7) 代入式 (8) 中，得到任意幅度比和相位差情况下，RCS 减缩量要高于 β dB 的条件为：

$$|e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}|^2 = 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \leq 4 \times 10^{-\beta/10} \quad (9)$$

如果要求 RCS 缩减量要到达 10 dB ($\beta=10$), 可得:

$$|e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}|^2 = 1 + \gamma^2 + 2\gamma\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \leq 0.4 \quad (10)$$

下面给出两种特殊情况的分析:

1) 当两种单元反射幅度相同, 即 $A=A_1=A_2$, 可得两种单元的相位差满足:

$$140^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ \quad (11)$$

即当两单元的反射相位差在 $143^\circ \sim 217^\circ$ 之间时, RCS 缩减量高于 10 dB, 该相位差称为有效相位差。

2) 当两种单元反射相位相反 (即相位差为 180°), 即 $\varphi_1 = \varphi_2 + \pi$, 可得两单元的幅度比满足:

$$\gamma = A_1/A_2 \geq 0.37 \quad (12)$$

即当两单元的反射幅度比大于 0.37, 即反射幅度差小于 4.32 dB 时, RCS 缩减量高于 10 dB, 该幅度比称为有效幅度比。

综上所述可知, 对于天线同极化的带外 RCS 缩减和交叉极化 RCS 缩减, 两种单元的反射幅度基本相同, 因此, 决定阵列天线 RCS 缩减带宽的主要是两个单元散射的有效相位差带宽。

2 宽带有效相位差的天线单元设计

2.1 新型修形单元结构设计

随着现代通讯事业迅速发展, C 波段微带天线在雷达、广播、导航、卫星及无线通信等领域应用的优势愈发明显, 本文在基于有限元法的商用电磁仿真软件中建模并设计了工作在 C 波段的微带天线, 以 C 波段阵列天线为例开展阵列天线 RCS 缩减技术研究。为了实现阵列天线的散射抵消, 通常需设计两种结构不同的天线单元。为了提高设计效率, 本文研究通过设计一种新型单元, 使其与传统微带单元的散射形成宽带有效相位差, 实现阵列天线的宽带、双极化 RCS 缩减。

通过对辐射贴片边缘修形可以调控散射电流路径, 从而实现对散射相位的调控。以矩形微带贴片为例, 如图 2 (a) 所示, 对于 y 极化平面波照射情况下的 RCS 缩减, 可在辐射贴片平行于 y 轴的边缘进行修形, 例如加载矩形槽、边缘弧形槽, 如图 2 (a) 所示。以边缘加载矩形槽、边缘弧形槽的天线单元结构为例, 本文研究了不同修形结构的散射相位性能, 分析其在宽带范围内的相位曲线特点。传统微带贴片天线单元与矩形槽、边缘弧形槽的天线单元的散射相位随频率的变化曲线如图 2 (b) 所示, 从图中的反射相位仿真可以看出, 传统微带天线 (称为单元 A) 的相位随频率呈非线性变化, 而加载矩形槽、边缘弧形槽的两种修形单元的反射相位在高频处呈线性变化, 仅在 $3.4 \sim 4.3$ GHz 频段内与传统微带天线单元的反射相位满足 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的有效相位差。通过理论分析可知, 这两种结构难以实现宽频带散射抵消。

为了使修形单元与传统微带贴片单元间形成宽带有效相位差, 本文提出在辐射贴片上加载 T 型缝隙 (称为单元 B), 在 y 极化平面波照射下, T 型缝隙可增加散射电流的

等效电长度, 使得 y 极化波的反射相位向低频移动, 且两种单元的相位曲线变化曲率基本一致, 如图 2 (b) 所示。因此, 单元 B 与单元 A 之间可以形成宽带有效相位差, 从而使得组阵后的阵列天线可以实现宽频带 RCS 缩减。

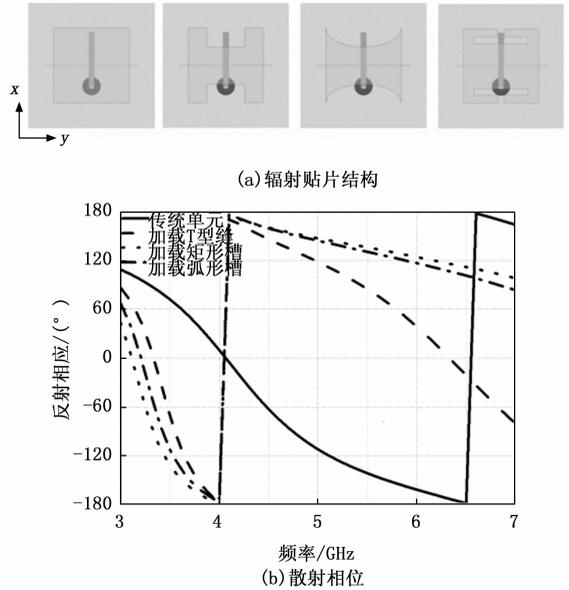


图 2 四种贴片修形微带天线单元

为了进一步说明 T 形缝隙对散射电流的调控机理, 使用主从边界条件和 Floquet 端口激励对单元 A 和单元 B 辐射贴片上所激励出的散射电流进行仿真分析, 频率 4 GHz 的 y 极化平面波垂直照射的情况下的散射电流分布仿真结果如图 3 所示。从图中可以看出, 单元 B 辐射贴片上的电流路径比单元 A 辐射贴片上的电流路径长, 因此, 单元 B 的散射谐振频率会向低频移动, 从而与单元 A 之间产生相位差。通过调节 T 型缝隙的长度可实现对单元 B 的 y 极化散射相位的调控, 同时通过优化馈电点位置、馈电贴片长度和地板上的缝隙尺寸, 使得单元 A 与单元 B 工作在相同频段的同时, 实现宽频段有效反射相位差。

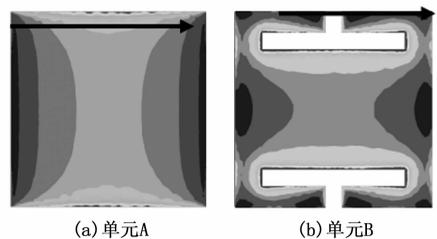
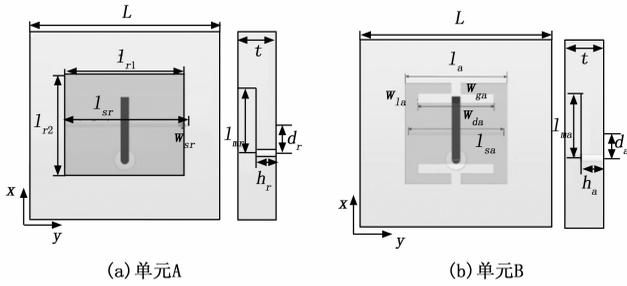


图 3 单元 A 和单元 B 辐射贴片表面的散射电流分布

为了实现阵列天线的宽带辐射和宽带双极化 RCS 缩减的一体化设计, 本文提出在辐射贴片上加载 T 形缝隙结构, 并通过耦合馈电方式实现对天线单元辐射性能和散射性能的独立调控, 单元 A 和单元 B 的结构如图 4 所示。单元 A 和单元 B 的天线结构相似, 均由三层结构组成。下层为金属地板结构, 金属地上刻蚀有矩形长缝隙; 中层介质板采用聚四氟乙烯 (介电系数为 2.2, 介质损耗为 0.009), 长方

形金属贴片与 SMA 馈电结构连接, 通过 L 型探针对上层贴片进行耦合馈电; 单元 A 上层为矩形贴片, 单元 B 上层贴片上加载 T 型缝隙。



(a) 单元A (b) 单元B

图 4 天线单元 A 和单元 B 结构示意图

为了分析单元 B 的结构参数对其辐射和散射性能的影响, 在单元 B 加载 50 Ω 匹配负载情况下, 使用主从边界条件和 Floquet 端口激励对两种单元的反射特性进行仿真计算。通过全波仿真分析计算了 T 形缝隙长度 w_{da} 、馈电贴片长度 l_{ms} 、馈电位置 d_a 、地板缝隙长度 l_{sa} 等主要参数对阻抗匹配性能和 y 极化平面波反射性能的影响, 结果如图 5 所示, 图中给出了 S_{11} 和反射相位随参数的变化曲线。从图 5 (a) 中可以看出, 随着 T 形缝隙长度 w_{da} 的增加, 辐射谐振频点逐渐向低频轻微移动, 反射相位向低频发生明显偏移。从图 5 (b) 中可以看出, 馈电贴片长度 l_{ms} 的改变对反射相位影响很小, 同时随着 l_{ms} 的增加, 谐振频率没有变化, 阻抗匹配程度变得更好。从图 5 (c) 中可以看出, 馈电位置 d_a 的改变对反射相位影响很小, 同时随着 d_a 的增加, 驻波频点逐渐向高频移动。从图 5 (d) 中可以看出, 地板缝隙长度 l_{sa} 的改变对反射相位影响很小, 随着地板缝隙长度 l_{sa} 的增加, 驻波频点逐渐向低频移动。通过对以上参数分析可知, 辐射贴片上的 T 型缝隙结构既影响其辐射性能也影

响其散射性能, 金属地板上的矩形长缝隙以及 L 型馈电结构主要用于调控单元的阻抗匹配特性, 对散射幅度和相位影响基本可忽略。经过上述分析可知, T 型缝隙大小是影响天线反射特性的关键参数, 馈电结构与地板开槽长度参数是影响天线辐射特性的关键参数。因此, 本文提出的单元结构可实现对辐射性能和散射性能的独立调控, 可通过优化 T 形缝隙尺寸, 使得单元 B 和单元 A 在交叉极化入射平面波照射下的反射相位相差 180°, 并通过对两单元馈电结构及地板开槽长度进行优化, 使单元 A 和单元 B 两单元的工作频段重合。

2.2 宽带散射对消单元的辐射性能和散射性能分析

通过上述分析可知, 首先通过对 T 型缝隙的尺寸优化, 可实现宽频段范围内的有效反射相位差。在保证散射性能的宽带有效相位差基础上, 通过优化金属地板上的矩形长缝隙和 L 型馈电结构的尺寸实现对辐射性能的调控, 使得单元 B 与单元 A 的谐振频段重合, 因此, 本文的天线结构可实现辐射性能和散射性能的单独立调控以及综合优化。通过优化得到两种天线单元的详细结构尺寸, 尺寸参数如表 1 所示。

表 1 天线主要尺寸参数

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
L	30	l_{r1}	19	l_{ms}	13
t	6	l_{r2}	16	w_{da}	1.5
h_r	2	l_{sr}	24	l_a	18
d_r	9	w_{sr}	0.3	l_{sa}	22

经过优化设计, 单元 A 和单元 B 的驻波 (S_{11}) 及辐射方向图仿真结果如图 6 所示。两种天线单元的谐振频率均约为 4 GHz, 在 3.38~4.46 GHz (相对带宽 27.6%) 频段内, 单元 A 的 S_{11} 小于 -10 dB; 在 3.64~4.18 GHz (相对带宽 13.8%) 频段内, 单元 B 的 S_{11} 小于 -10 dB, 两种天线单元的共同工作带宽为 3.64~4.18 GHz, 相对带宽为 13.8%。图 6 (b) 给出了两种天线单元在谐振点 4 GHz 的辐射方向图, 两种天线单元的 xoz 面辐射方向图和 $yo z$ 面辐射方向图基本一致, 因此, 在阵列天线辐射时可将两种单元看作相同阵元。

在周期性边界条件下计算了两种单元对垂直入射平面波的反射性能, 结果如图 7 所示。x 极化平面波垂直照射情况下, 在天线工作频段及其附近频段, 由于天线的阻抗和极化匹配, 入射波部分能量被天线元件吸收, 所以其反射幅度较小, 如图 7 (a) 所示。y 极化平面波垂直照射情况下, 两种单元反射幅度基本相同, 在 3.5 Hz~7 GHz 范围内产生有效反射相位差 ($180^\circ \pm 37^\circ$), 如图 7 (b) 所示, 为组阵后阵列天线 RCS 缩减奠定基础。

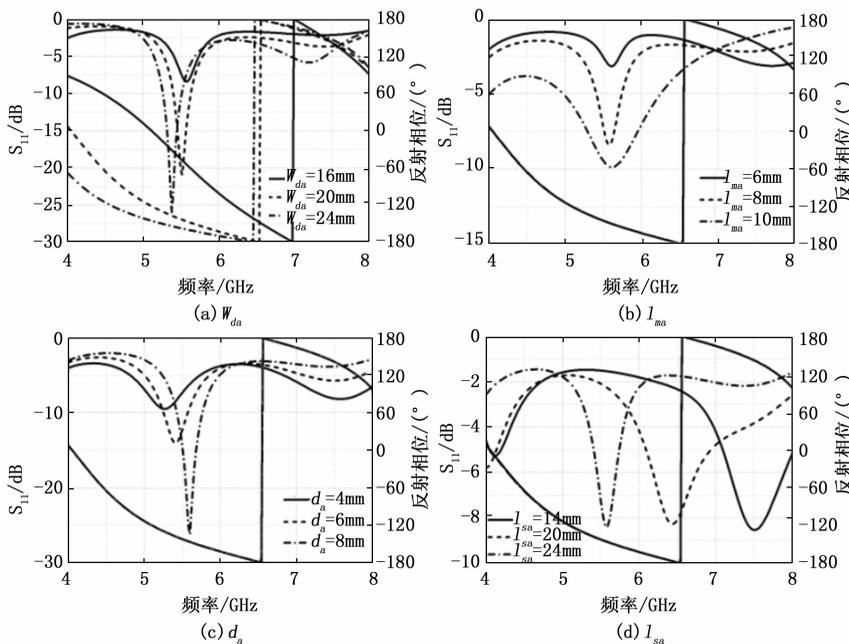
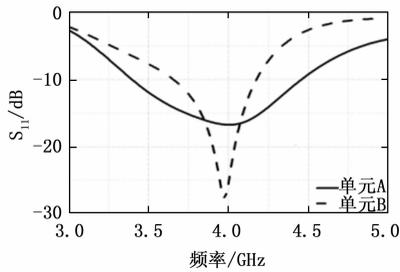
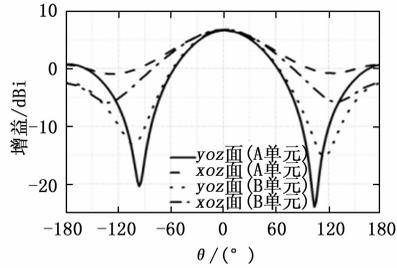


图 5 主要结构参数对单元天线辐射与散射性能的影响分析



(a) S_{11} 曲线



(b) 辐射方向图

图 6 单元 A 和单元 B 的辐射性能仿真结果

在 3.8 GHz 与 6.3 GHz 频点处, 由于两种单元的反射相位差为 180° , 因此, 在这两个频点产生 RCS 缩减极大值点。对于 x 极化平面波, 在天线工作频内, 由于天线阻抗匹配, 入射波部分能量被天线吸收, 因此其 RCS 缩减主要来源于对入射电磁波的吸收; 在 4.2 GHz 与 5.6 GHz 频点单元 A 与单元 B 的反射相位差约为 180° , 因此在这两个频点附近, 出现了 RCS 缩减的极大值点。

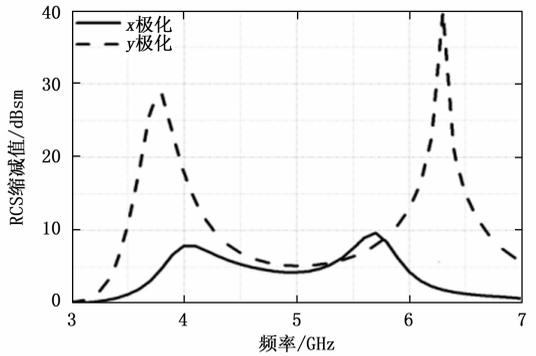
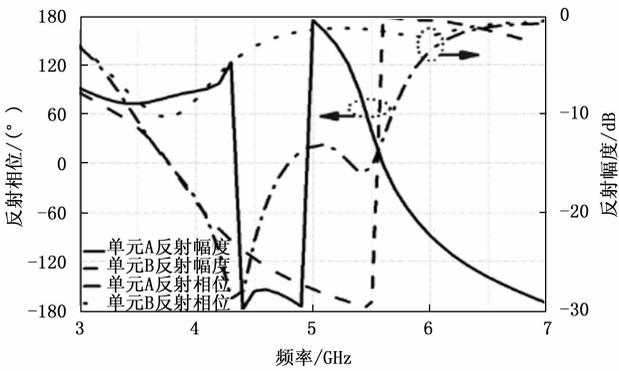
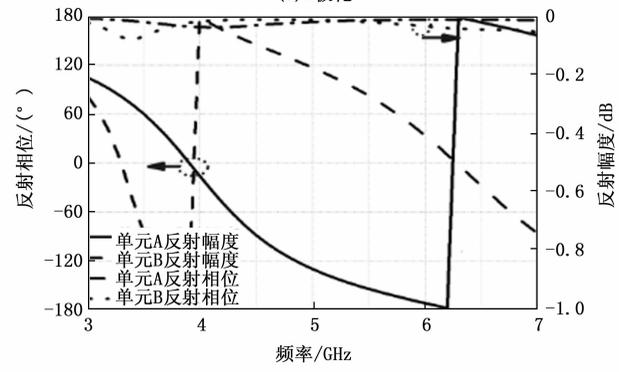


图 8 阵列天线 RCS 缩减理论值计算结果



(a) x 极化



(b) y 极化

图 7 单元 A 和单元 B 的散射性能仿真结果

为了快速分析单元 A 和单元 B 组成阵列天线的散射性能, 将两种单元的反射特性 (反射幅度与反射相位) 代入式 (9), 计算得到两种单元组成的阵列天线的 RCS 理论缩减值, RCS 缩减值计算结果如图 8 所示。从计算结果可以看出, 对于 y 极化平面波, 阵列天线在 3~7 GHz 频段内实现了宽带 RCS 缩减, 这来源于两种单元的宽带散射抵消;

3 宽带双极化低散射微带阵列天线设计

3.1 基于两种散射抵消单元的阵列布阵设计

将单元 A 和单元 B 组成 4×4 阵列天线, 在阵列规模有限的情况下, 阵中单元并处于严格的周期性环境, 阵中单元 A 和单元 B 的散射性能会发生变化, 因此, 阵列天线的 RCS 与理论 RCS 存在一定的差距。本节通过研究不同组阵形式对阵列天线 RCS 的影响, 设计出适合本文天线单元的组阵形式。

规模为 4×4 阵列的典型组阵形式有 AABB、ABAB、BAAB、棋盘结构等, 如图 9 所示。阵列 1 在 x 轴方向上由结构相同的天线单元组成, 在 y 轴方向上天线单元 A 与天线单元 B 以 AABB 的方式排布; 阵列 2 在 x 轴方向上由结构相同的天线单元组成, 在 y 轴方向上天线单元 A 与天线单元 B 以 BABA 的方式排布; 阵列 3 在 x 轴方向上由结构相同的天线单元组成, 在 y 轴方向上天线单元 A 与天线单元 B 以 BAAB 的方式排布; 阵列 4 中的天线单元 A 与天线单元 B 以棋盘布阵的组合方式排布。

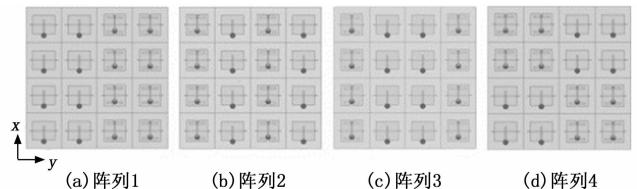


图 9 不同组阵形式的阵列天线结构示意图

分别对组阵形式为 AABB、ABAB、BAAB、棋盘结构的阵列天线的 RCS 进行仿真计算, 结果如图 10 所示。图中给出了 3~7 GHz 频段内, 不同组阵形式的阵列天线的 y 极化 RCS 以及相同尺寸的金属板的 y 极化 RCS。从图中可以看出, 与金属板相比, 四种组阵形式的阵列天线均实现了宽带 RCS 缩减, 但是组阵形式对 4×4 阵列天线的 RCS 影响明显。

组阵形式为 AABB、ABAB、BAAB、棋盘结构的阵列天线在 3~7 GHz 频段内的 RCS 缩减均值分别为 7.3 dB、5.9 dB、7.7 dB、6.8 dB，其中组阵形式为 BAAB 的阵列天线 RCS 缩减均值最大，且在天线工作频段内的 RCS 缩减值最大，因此本文阵列天线采用 BAAB 的组阵形式。

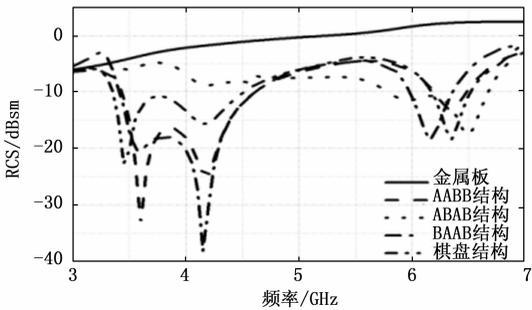


图 10 不同组阵形式阵列天线的 y 极化 RCS 仿真结果

3.2 宽带双极化低散射微带阵列天线散射性能和辐射性能分析

当入射平面电磁波垂直照射到设计阵列天线时，分别计算了 x 极化和 y 极化电磁波的 RCS，单站 RCS 仿真结果如图 11 所示，图中分别给出了设计阵列天线和相同尺寸金属板的单站 RCS。从图中可以看出，当 x 极化平面波照射时，设计阵列天线的 RCS 减缩带宽为 3~7 GHz，平均 RCS 缩减值为 6.6 dB，在 4.1 GHz 频点处达到最大 RCS 减缩，缩减值为 16.3 dB；在工作频带 (3.64~4.18 GHz) 内 RCS 平均缩减值为 14.1 dB。x 极化平面波下的阵列天线的带内 RCS 缩减主要来源于两种天线单元对电磁波的吸收作用，带外 RCS 缩减主要来源于两种天线单元的吸收作用，同时在 5.6 GHz 频点，两种单元反射相位差为 180°，因此无源散射对消对带外 RCS 缩减也产生了一定作用。当 y 极化平面波照射时，在 3.3~7 GHz 频段实现了 RCS 减缩，平均 RCS 缩减值为 7.7 dB，在 4.15 GHz 频点处达到最大 RCS 缩减，缩减值高达 36.3 dB；在工作频带 (3.64~4.18 GHz) 内 RCS 平均缩减值高达 17.6 dB；阵列天线对 y 极化平面波的 RCS 缩减来源于两种单元形成的无源散射对消。

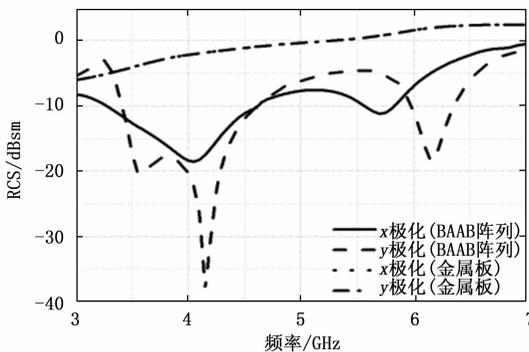


图 11 设计阵列天线的单站 RCS 仿真结果

结合公式推导及阵列天线的全波仿真结果可以看出，基于散射对消技术的阵列天线要实现宽带 RCS 缩减，在相应带宽内需要产生多个 RCS 缩减极值点，即通过多个散射

对消谐振的方法可实现阵列天线宽频带 RCS 缩减。同时，要实现阵列天线宽带双极化 RCS 缩减，对于天线的交叉极化 RCS 缩减，需要两种单元产生宽带有效散射相位差；对于同极化 RCS 缩减，在天线吸波作用的基础上，两种单元还要在带外具有有效相位差，通过吸波和散射对消两种措施实现同极化电磁波的宽带 RCS 缩减。

为了直观地说明散射对消方法降低阵列天线 RCS 的机理，图 12 给出了在 y 极化平面波垂直入射时 4 GHz 频点的三维散射方向图。从图中可以看出，金属地板呈强镜面反射，其散射方向图在垂直方向呈最大值。设计阵列天线的散射方向图呈中心凹陷的形态，即在垂直入射方向的 RCS 值较小，散射峰值集中在低仰角角域。这是由于阵列天线中的不同单元对 y 极化电磁波的散射相位差 180°，使得设计阵列天线产生了散射对消，散射峰值被转移至非探测角域，使得阵列天线的单站 RCS 实现了有效减缩。

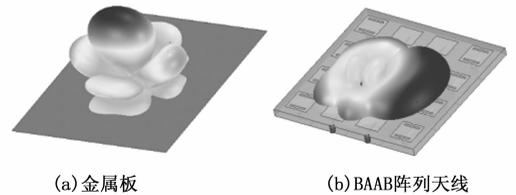


图 12 金属板和设计阵列的三维散射方向图仿真结果

将设计阵列天线中的 16 个天线单元进行等幅同相馈电，阵列天线的辐射方向图仿真结果如图 13 所示。从图中可以看出，设计阵列天线与参考阵列天线的辐射方向图基本一致，增益下降小于 0.1 dB。

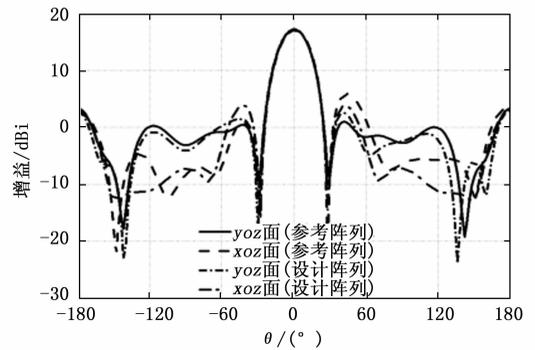


图 13 设计阵列天线和参考阵列天线的辐射方向图仿真结果

综上所述可知，本文设计的阵列天线具有较好的辐射和散射性能。将本文设计阵列天线的辐射性能和散射性能与其他文献中的低散射微带阵列天线进行了对比，如表 2 所示。从表中可以看出，本文所设计的阵列天线在保持宽带辐射 (相对带宽 14.6%) 的前提下，实现了交叉极化在 71.8% 带宽内的 RCS 缩减和同极化在 80% 带宽内的 RCS 缩减，双极化 RCS 缩减带宽优于其他论文结果；特别是 RCS 缩减 6 dB 的带宽相较其他论文有了明显扩宽；工作频带内的 RCS 缩减均值也得到了提升。本文提出的低散射阵列天线采用一种新型天线单元即实现了宽带低 RCS 缩减，与其他论文的设计相比，其辐射的工作带宽较宽，双极化 RCS 缩减带宽较宽，为低散射阵列天线设计提供了新的思路。

表 2 本文设计的低散射微带阵列天线与文献[20-23]中设计阵列天线性能对比表

论文	工作频带/GHz	RCS 缩减频带/GHz		RCS 缩减 6 dB 带宽/GHz	带内 RCS 缩减值/dBsm	
		交叉极化	同极化		交叉极化	同极化
本文	3.64~4.18(13.8%)	3.3~7(71.8%)	3~7(80%)	3.5~6.6(61.4%)	17.6	14.1
文献[20]	5.6~6.0(6.9%)	5.6~6.0(59%)	5~7(16.7%)	5.0~7.2(24%)	—	—
文献[21]	4.75~5.25(10%)	4~8(66.7%)	4~8(66.7%)	—	13	13
文献[22]	4.7~5.1(8.2%)	4~8(66.7%)	4~8(66.7%)	4.8~7.4(42.6%)	—	—
文献[23]	5.05~5.42(7.1%)	~	4~8(66.7%)	5.1~6.9(30%)	—	16.5

4 结束语

本文理论研究了由两种散射性能不同单元组成的阵列天线的散射性能,研究了影响 RCS 缩减带宽的因素;提出一种新型单元结构,可实现对微带天线的辐射性能与散射性能的独立调控;提出在辐射贴片上加载 T 形缝隙,通过对一种单元修形即在宽频段内实现散射的有效相位差;将 T 形缝隙单元和参考单元组成 4×4 阵列天线,研究了不同组阵形式对阵列 RCS 的影响。设计阵列天线在 3.64~4.18 GHz (相对带宽 13.8%) 频段内具有良好的辐射性能,与参考天线相比,增益下降小于 0.1 dB。在 3.3~7 GHz (相对带宽 71.8%) 频段内实现了交叉极化 RCS 缩减,在 3~7 GHz (相对带宽 80%) 频段内实现了同极化 RCS 缩减。

综上,本文清晰给出了散射对消阵列的设计过程,设计的新型微带阵列天线兼具宽带辐射性能和宽带双极化低 RCS 的优点,对低 RCS 阵列天线的设计有一定的借鉴意义,对微带阵列天线在低可探测平台的应用有一定的意义。本文工作仍有进步空间,通过对参考天线进行修形设计还可进一步提高阵列天线的 RCS 缩减带宽和 RCS 缩减量值。

参考文献:

[1] 桑建华. 飞行器隐身技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.

[2] LIU Y, LI N, ZHANG W, et al. Low RCS and high-gain patch antenna based on a holographic metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18 (3): 492-496.

[3] 刘亚昆, 贾丹, 杜彪. 基于特征模理论的微带天线双极化 RCS 缩减设计 [J]. 现代雷达, 2021, 43 (5): 73-79.

[4] MEHDI P, NADER K, MAJID K. Broadband RCS reduction of microstrip antenna using coding frequency selective surface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17 (8): 1382-1385.

[5] 林佳曼. 吸透一体频率选择表面研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[6] YE H, WEI J, LIN L, et al. A frequency selective surface absorber based on four functional layers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69: 2768-2778.

[7] 耿彦峰, 丁梦洁, 裴立力, 等. 一种宽带吸波超材料在天线 RCS 缩减中的应用 [J]. 测试技术学报, 2022, 152 (2): 153-159.

[8] LI Y, LI D, LUO H, et al. Co-evaluation of reflection loss and surface wave attenuation for magnetic absorbing material [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66 (11): 6057-6060.

[9] DENG S, ZHANG X, DING J, et al. Low-profile high-gain broadband circularly polarized slot antenna with RCS reduction using polarization conversion metasurface [J]. Microw Opt. Technol. Lett., 2023, 65: 281-289.

[10] ZHENG Q, GUO C J, DING J, et al. Wideband low-RCS circularly polarized antenna with metasurface combining wave diffusion and polarization conversion [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2023, 37 (2): 207-218.

[11] 富新民, 韩亚娟, 王甲富, 等. 一种带有透波窗口的宽带 RCS 缩减超表面设计 [J]. 空军工程大学学报, 2022, 23 (1): 24-29.

[12] 甘雷. 天线模式项散射场分析方法及其应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[13] LIU Y, LI K, JIA Y, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 64 (1): 326-331.

[14] LI K, LIU Y, JIA Y, et al. A circularly polarized high-gain antenna with low RCS over a wideband using chessboard polarization conversion metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65 (8): 4288-4292.

[15] 吕彦贺. 超表面天线的辐射与散射特性一体化设计研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[16] LIU Y, JIA Y T, ZHANG W, et al. An integrated radiation and scattering performance design method of low-RCS patch antenna array with different antenna elements [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2019, 67 (9): 6199-6204.

[17] XUE J J, JIANG W, GUO S. Wideband RCS reduction of slot-coupled patch antenna by AMC structure [J]. Electronics Letters, 2017, 50 (22): 1454-1456.

[18] BAHARE Z, ZAKER F, ABOLGASEM Z, et al. Wideband RCS reduction using three different implementations of AMC structures [J]. IET Microw. Antennas Propag., 2019, 13 (5): 533-540.

[19] CHENG Y F, FENG J, LIAO C, et al. Analysis and design of wideband low-RCS wide-scan phased array with AMC ground [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021,

20 (2): 492-496.

- [20] 兰俊祥, 曹祥玉, 高 军, 等. 一种新型的低散射微带天线阵列设计 [J]. 物理学报, 2019, 68 (3): 154-163.
- [21] LIU Y, JIA Y T, ZHANG W, 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.
- [22] 郝 彪, 杨宾锋, 高 军, 等. 一种编码式低雷达散射截面超
- (上接第 263 页)

4 结束语

针对传统 SSA 算法易收敛在局部极值, 平衡能力差、精度相对较低的缺陷, 通过提出一种融合神经网络的改进麻雀搜索算法得出以下结论。

1) 通过三层神经网络对规划环境进行栅格化建模; 引入低差异序列中的 Halton 序列, 使得初代麻雀种群分布广泛且均匀, 有很好的遍历性, 改善了初始麻雀种群随机性过大, 位置分布不均匀导致取得局部极值的问题;

2) 采用布朗运动步长策略, 实现前期全局过程搜索范围广, 中后期搜索精度高的平衡与切换, 当算法收敛于局部最优值, 也可通过布朗运动策略跳出局部最优, 更快脱离算法停滞;

3) 引入 clothoid 曲线法进行最终的路径平滑, 避免了尖锐拐弯, 运行时急转急停, 减少了机器人运行时机械磨损和降低了能耗。

4) 经 6 个标准函数验证和 Wilcoxon 检验 P 值对比可知, 改进后的算法相较于 SSA 和 CSSA 算法各项指标得到明显优化, 且具有和 SSA 同一水平的复杂度。

仿真结果进一步显示, 改进后的 SSA 算法在求解机器人避障问题时, 不同地图环境的避障结果均好于传统 SSA 算法和 CSSA 算法, 改进算法收敛速度快, 规划路径短, 拐点少且平滑, 更满足机器人实际工作的运行需求。

参考文献:

- [1] 殷绍伟, 彭 力, 戴菲菲. 融合改进 A~* 蚁群和滚动窗口法的平滑路径规划 [J]. 计算机科学与探索, 2021, 15 (10): 1969-1979.
- [2] 汤红杰, 王 鼎, 皇攀凌, 等. 优化 Dijkstra 算法在工厂内物流 AGV 路径规划的研究 [J]. 机械设计与制造, 2018 (S1): 117-120.
- [3] 胡 杰, 张 华, 傅海涛, 等. 改进人工势场法在移动机器人路径规划中的应用 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (3): 6-10.
- [4] 李维维, 李建东. 栅格环境下机器人导航路径的双种群蚁群规划 [J]. 机械设计与制造, 2021 (8): 286-290.
- [5] 陈秋莲, 郑以君, 蒋环宇, 等. 基于神经网络改进粒子群算法的动态路径规划 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (2): 51-55.
- [6] 高 扬, 李鹏鹏, 刘佳浩. 考虑可定位性的改进型 A~* 路径规划算法 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (23): 13-17.

表面天线阵列设计 [J]. 物理学报, 2020, 69 (24): 125-135.

- [23] GAO K, CAO X, GAO J, et al. Low-RCS metasurface antenna array design with improved radiation performance using odd and even-mode analysis [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2022, 21 (2): 421-425.
- [24] 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.
- [7] 游达章, 康亚伟, 刘 攀, 等. 一种改进灰狼优化算法的移动机器人路径规划方法 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (11): 1-6.
- [8] 周 晟, 邴佳燕. 基于改进蚁狮算法的仓储机器人路径规划 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (12): 32-36.
- [9] 潘 纹, 肖任贤. 基于动态步长果蝇算法的 AGV 路径规划 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (4): 21-25.
- [10] 陈 薇, 陈泽钰, 王 雷, 等. 基于天牛须搜索的无人机路径规划算法的鲁棒性分析 [J]. 浙江理工大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (4): 542-548.
- [11] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [12] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8 (1): 22-34.
- [13] ZHANG J N, XIA K W, HE Z P, et al. Semi-supervised ensemble classifier with improved sparrow search algorithm and its application in pulmonary nodule detection [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1-18.
- [14] ZHU Y L, YOUSEFI N. Optimal parameter identification of PEMFC stacks using adaptive sparrow search algorithm [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (14): 9541-9552.
- [15] LI H M, ZHANG Y. Study of transformer fault diagnosis based on sparrow optimization algorithm [C] //2020 International Conference on Control, Robotics and Intelligent System, Xiamen, 2020: 63-66.
- [16] 许 亮, 张紫叶, 陈 曦, 等. 基于改进麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的气动光学成像偏移预测 [J]. 光电子·激光, 2021, 32 (6): 653-658.
- [17] LIU G, SHU C, LIANG Z, et al. A modified sparrow search algorithm with application in 3d route planning for UAV [J]. Sensors, 2021, 21 (4): 1224.
- [18] 欧阳城添, 朱东林, 王丰奇, 等. 基于折射麻雀搜索算法的无人机路径规划 [J]. 电光与控制, 2022, 29 (6): 25-31.
- [19] 汤安迪, 韩 统, 徐登武, 等. 基于混沌麻雀搜索算法的无人机航迹规划方法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (7): 2128-2136.
- [20] 吕 鑫, 慕晓冬, 张 钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法 [J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-10 [2021-05-17].
- [21] 吕 鑫, 慕晓冬, 张 钧. 基于改进麻雀搜索算法的多阈值图像分割 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (2): 318-327.