

激光与光电子学进展

基于改进粒子群优化算法的宽角度高吸收率超材料吸波体设计

周瑶¹, 孙俊^{1*}, 彭艺¹, 孙磊², 戴书浩¹

¹昆明理工大学信息与自动化学院, 云南 昆明 650504;

²云南大学工商管理与旅游管理学院, 云南 昆明 650504

摘要 超材料吸波体的性能受电磁波入射角度的影响, 具有宽角度稳定性的吸波体一直是吸波体设计的难点之一。传统设计方式依赖于人工设计和优化, 存在设计困难且周期长的缺陷。针对设计目标的特点, 基于改进粒子群优化算法设计了宽角度高吸收率超材料吸波体。通过添加动态权值和高斯误差解决二进制粒子群优化算法后期局部搜索能力弱的问题, 用改进的二进制粒子群优化算法优化吸波体表层 0、1 编码的离散金属块结构实现高吸收率和宽入射角吸收特性。仿真结果表明, 设计的超材料吸波体在 9.4~13.3 GHz 频段的吸收率大于 90%, 在 11.6~12.6 GHz 频段内可实现完美吸收(吸收率大于 99%), 横电、横磁极化波 60°斜入射情况下超材料吸波体在带宽内的吸收率大于 80%。该设计方法有效弥补了传统设计方法的缺陷, 展现出按需设计和设计过程无需人为干预的独特优势, 在相关领域具有广泛的应用前景。

关键词 光学器件; 超材料; 吸波体; 宽角度; 二进制粒子群优化算法; 编码

中图分类号 TB34

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1123002

Design of Wide-Angle, High-Absorption Metamaterial Absorber Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Zhou Yao¹, Sun Jun^{1*}, Peng Yi¹, Sun Lei², Dai Shuhao¹

¹School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China;

²School of Business and Tourism Management, Yunnan University, Kunming 650504, Yunnan, China

Abstract The performance of metamaterial absorbers can be affected by the incident angle of electromagnetic waves, and it is difficult to design metamaterial absorbers with wide-angle stability. The traditional method relies on artificial design and optimization, which limited by its difficulty and long cycle. According to the target design's characteristics, we design a wide-angle and high-absorptivity metamaterial absorber based on the improved particle swarm optimization algorithm. Dynamic weights and Gaussian errors are added to resolve the problem of weak local search ability in the later stage of binary particle swarm optimization algorithm. To achieve wide-angle and high-absorptivity characteristics of the absorber, the improved binary particle swarm optimization algorithm is used to optimize the structure of discrete metal blocks coded with 0 and 1 on the surface of the absorber. The simulation results show that the designed metamaterial absorber has a high absorptivity of greater than 90% from 9.4-13.3 GHz, and perfect absorption, i. e., absorptivity exceeds 99%, is obtained in the broadband of 11.6-

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-08-31; 录用日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61761025)

通信作者: *31408891@qq.com

12.6 GHz. Moreover, the absorption remains above 80%, even for the incidence angles of up to 60° under both transverse electric and transverse magnetic polarizations. This design method overcomes the shortcomings of the traditional design method and demonstrates the unique advantages of on-demand design without human intervention in the design process. This technique has broad application prospects in related fields.

Key words optical devices; metamaterial; absorber; wide-angle; binary particle swarm optimization algorithm; coding

1 引言

超材料是由人工微结构周期排列构成的新型电磁媒质,能实现许多超常规的电磁特性,如负折射^[1]、同相反射、完美吸收^[2]。超材料吸波成为近年来超材料研究中的热点,受到了人们的广泛关注。基于超材料的吸波体具有厚度薄、质量轻、吸收强、频带宽以及材料电磁参数可设计等诸多优势,在射频隐身领域和天线系统中具有潜在应用价值。

Landy 等^[3]提出了超材料吸波体的概念,可实现对入射电磁波的完美吸收,但存在带宽窄、角度敏感、调控不灵活等关键技术难题。针对这些难题,人们提出了多种解决方法,如平面排布^[4]、多层堆叠^[5]和加载集总原件^[6]。上述方法都是利用谐振损耗吸收电磁波,其性能主要由吸波体的结构类型、结构参数以及组份材料的性质决定。结构类型的多样性、结构参数的不确定性以及材料性质的差异性,导致用传统方式设计超材料吸波体时难以依赖物理模型和经验。因此,在给定电磁性能需求的前提下,如何快速设计超材料吸波体成为了一项具有挑战性的工作。

为了更高效地设计吸波体,科研人员先后提出了等效媒质理论^[7]、等效电路理论^[8]、多级反射^[9]、干涉理论^[10]等方法对超材料吸波机理进行分析,这些方法虽然可以指导结构设计,但要求设计者具备丰富的专业知识,设计门槛较高。近年来,超材料吸波体的实际应用需求牵引着设计形式的变革^[11],人们也开始借助智能算法对超材料进行设计与优化,包括基于梯度的方法^[12]、遗传算法(GA)^[13]、粒子群优化(PSO)算法^[14]、人工蜂群(ABC)算法^[15]以及差分进化(DE)算法^[16]等。Qian 等^[17]基于二进制粒子群优化(BPSO)算法设计了反射编码超表面,可实现对反射相位的调控。Mouna 等^[18]用改进 PSO 算法对不同厚度的介质层进行组合排列叠加,设计了一种宽角度宽频超材料吸波体。Pelluri 等^[19]利用新型 GA 设计了一种宽频超材料吸波体,在 X 频段内的吸收率大于 90%。综上所述,基于智能优化算法

能快速设计出符合散射电磁波频率、幅度和相位等特定电磁性能的电磁超材料,且相比传统设计方法,该设计方法具有简便、高效等优势,但存在算法复杂度高和耗费计算资源的问题。如:GA 的编码和解码过程比较耗时;BPSO 算法虽然能缩短运行时间,但缺乏后期的局部搜索能力。因此,需要针对设计目标的特点对算法进行优化,以更好地将其应用于超材料吸波体的设计中。

本文利用经典的“金属-介质-金属”结构构造超材料吸波体,超材料吸波体表层为 0、1 编码的离散金属块结构。针对吸波体的宽角度、高吸收率特性,提出了一种结合动态权值和高斯误差的二进制粒子群优化(EWBPSO)算法,以优化吸波体的表面金属结构。结果表明,该超材料吸波体在 9.4~13.3 GHz 频段内的吸收率大于 90%,横电(TE)、横磁(TM)极化波 60°斜入射情况下超材料吸波体在带宽内的吸收率依然高于 80%。最后,对超材料吸波体的吸波机理进行了深入研究,并对比了本算法与几种经典智能优化算法的性能,验证了本算法的优越性。

2 理论与设计

2.1 模型设计

超材料吸波体的结构及参数如图 1 所示,吸波体表层覆盖着铜金属块,底层为金属铜膜,中间为介质层。选择 FR-4 为介质层材料,其介电常数为 $4.4 - 0.088i$ 。结构参数:介质层的厚度 $h = 2.6$ mm,金属块的边长 $a = 1$ mm,表层和底层的金属厚度 b 为 0.035 mm,吸波体单元的边长 $p = 8.4$ mm,表层金属区域的边长为 8 mm。

在吸波体的设计中,采用 Fragment 型离散结构的设计理念。具体思路:首先,将给定的设计空间用离散网格剖分成 8×8 个子区域;然后,分别用 0 和 1 表示各个网格区域的状态,标记 1 表示该区域填充了铜金属块,标记 0 则表示该区域为空白,如图 1(b)和图 1(c)所示。最后,形成了 2^{64} 个 8×8 的 0、1 矩阵,每一个 0、1 矩阵对应一个吸波体表面金属结构,进而借助智能算法优化设计 0、1 矩阵,获得特

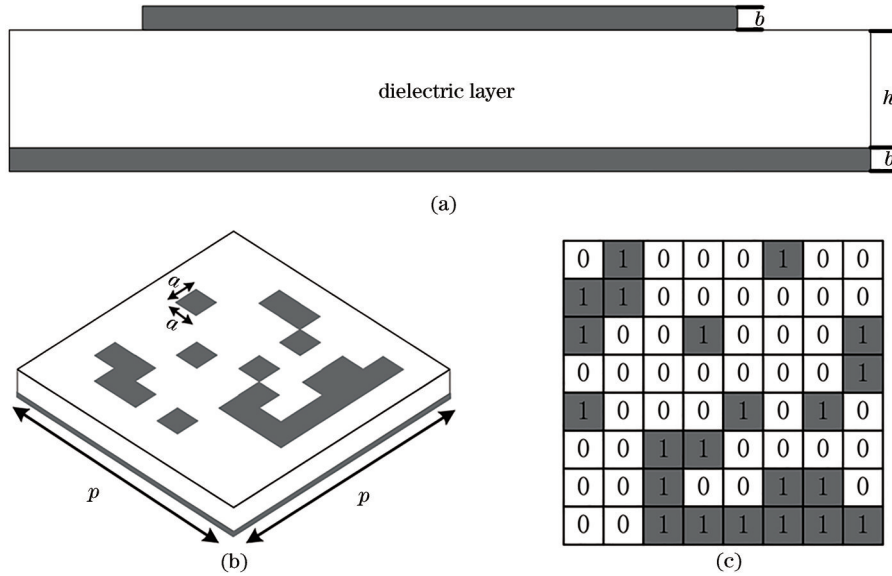


图 1 吸波体的结构。(a)侧视图;(b)吸波体的模型;(c)编码结构图

Fig. 1 Structure of the absorber. (a) Side view; (b) model of the absorber; (c) coding structure diagram

定电磁性能的吸波体结构。

2.2 EWBPSO 算法

宽角度入射下具有高吸收率的超材料吸波体设计问题,可以转化为多目标优化的问题。由于 Fragment 型离散结构的设计空间较大,优化算法的全局搜索能力和收敛速度尤为关键。PSO 算法具有较高的搜索效率且收敛速度快,其中,BPSO 算法是解决非线性离散优化问题的有效工具,可用来优

化吸波体表面 0、1 编码的金属结构。针对 BPSO 算法早熟和后期局部搜索能力较弱的缺陷,用 EWBPSO 算法优化吸波体表层的金属结构,具体实施步骤如图 2 所示。将粒子用 64 位的二进制编码表示,粒子二进制位的位置状态为 0、1。先初始化粒子的速度和位置,再根据粒子位置变化概率和高斯扰动值更新粒子的位置,最后将二进制编码的粒子转化为 8×8 的 0、1 编码矩阵。

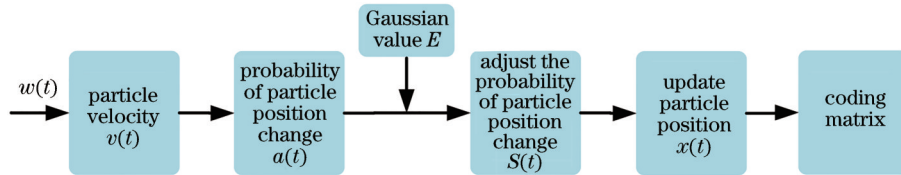


图 2 EWBPSO 算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of the EWBPSO algorithm

粒子二进制位的速度更新规则可表示为

$$v_{id}(t+1) = w(t) \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd} - x_{id}), \quad (1)$$

式中, t 为当前迭代次数, x_{id} 和 v_{id} 分别为第 i 个粒子 d 位二进制的位置和速度, p_{id} 和 p_{gd} 分别为当前最优、全局最优的粒子 d 位二进制的位置, $w(t)$ 为惯性权值, c_1, c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。由式(1)可知,惯性权值对粒子群速度的更新影响较大,为了兼顾算法的全局和局部搜索能力,引入了一种动态惯性权值。该动态权值根据种群进化速度 $\alpha(t)$ 和种群聚合度 $\beta(t)$ 调整权

值,其中, $\alpha(t) = f_{best}(t) / f_{best}(t-1)$, $\beta(t) = f_{avg}(t) / f_{best}(t)$, f_{best} 为种群的全局适应度极值, f_{avg} 为种群的平均适应值。

用 Sigmoid 函数将种群进化速度和种群聚合度与惯性权值联系起来。由文献[20]可知,当惯性权值 $w \in [0.4, 0.95]$ 时,算法的性能较好,可通过调节函数中的参数,使惯性权值恰好位于此区间内。将动态权值定义为

$$w(t) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{X_{iter} \times \alpha(t) \times 1.92}{t \times \beta(t)} - 1.3\right]}, \quad (2)$$

式中, X_{iter} 为总迭代次数。可以发现: $w(t)$ 随 $\alpha(t)$ 的增大而减小, 随 $\beta(t)$ 的增大而增大, 从而增强了粒子搜索方向的启发性; $w(t)$ 随迭代次数的增加大致呈非线性递减趋势, 从而增强算法后期的局部搜索能力。

粒子二进制位的速度值通过 Sigmoid 函数映射到 $[0, 1]$ 区间, 将其转换成二进制位的位置变化概率, 可表示为

$$a(t) = \begin{cases} 1 - \frac{2}{1 + \exp[-v_{id}(t)]}, & v_{id}(t) \leq 0 \\ \frac{2}{1 + \exp[-v_{id}(t)]} - 1, & v_{id}(t) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以发现, 当 $v_{id}(t)$ 接近于 0 时, 二进制位的位置变化概率也接近于 0, 此时粒子的位置不再变化, 可能出现早熟现象。针对该问题, 在粒子二进制位的位置变化概率中添加了一个高斯扰动值, 使粒子跳出局部收敛。根据文献[21]的研究结果, 将高斯扰动值定义为

$$E = X_{erf} \left(\frac{N_F}{T} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{N_F/T} \exp(-t^2) dt, \quad (4)$$

式中, X_{erf} 为高斯误差函数, N_F 为连续迭代中最佳粒子位置未更改的次数, T 为常数(实验中取 4)。粒子二进制位的位置变化概率可表示为

$$S(t) = E + (1 - E) \times a(t), \quad (5)$$

粒子二进制位的位置更新规则可表示为

$$x_{id}(t) = \begin{cases} 1, & X_{rand} \leq S(t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, X_{rand} 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数, 为了避免 $S(t)$ 太靠近 0 和 1, 设置区间 $[-v_{max}, v_{max}]$ 限制 v_{id} 的取值, v_{max} 为粒子的最大飞行速度。

2.3 适应度函数

超材料吸波体的吸收率 $A(\omega)$ 可表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (7)$$

式中, ω 为入射电磁波的角频率, $R(\omega)$ 为反射率,

$T(\omega)$ 为传输率, $R(\omega) = |S_{11}|^2$, $T(\omega) = |S_{21}|^2$, S_{11} 、 S_{21} 为 S 参数, 分别表示吸波体的反射系数和传输系数, 可由 COMSOL5.6 软件仿真得到。将带宽内具有高吸收率且宽角度稳定吸波体的设计转化为多目标优化问题, 优化过程中各个指标的性能往往是互相约束的。在追求高吸收率性能时, 通常会牺牲宽角度稳定性, 因此需要在两个指标之间寻求一个最优的设计目标, 此时, 构造合理的目标函数就成为多目标优化问题的重点。在特定频段内将设计宽角度稳定、高吸收率吸波体问题的目标函数定义为

$$F(x) = g_1(x) + g_2(x), \quad (8)$$

$$g_1(x) = \max(0.9 - \min_{f_i \in [f_{min}, f_{max}]} A_{f_i}, 0), \quad (9)$$

$$g_2(x, \theta) = \max \left(A_{aim} - \min_{f_i \in [f_{min}, f_{max}]} A_{f_i}^{TE/\theta}, A_{aim} - \min_{f_i \in [f_{min}, f_{max}]} A_{f_i}^{TM/\theta}, 0 \right), \quad (10)$$

式中, i 为频率采样点的序号, $g_1(x)$ 为带宽内高吸收率目标函数, f_{min} 、 f_{max} 分别为选定工作频率的上限和下限, A_{f_i} 为频率点对应的吸收率, $g_2(x)$ 为宽角度稳定目标函数, θ 为最大斜入射角度, A_{aim} 为 θ 斜入射角下工作频率内的理想吸收率(实验中 $A_{aim} = 0.8$, $\theta = 60^\circ$), $A_{f_i}^{TE/\theta}$ 、 $A_{f_i}^{TM/\theta}$ 分别为 TE、TM 极化波 θ 斜入射角度下工作频率内频率采样点对应的吸收率。

2.4 设计框架

对于吸波体的设计, 传统设计方法需要基于丰富的电磁理论知识和设计经验, 先通过人工设计出吸波体结构模型再进行参数扫描、优化, 重复试验直至获得符合优化目标的超材料吸波体结构。但当设计需求增多、计算模型较为复杂时, 单纯依靠传统方法很难得到理想的结构。因此, 通过构造多目标 EWPSO 算法联合 COMSOL5.6 软件的计算框架, 设计宽角度、高吸收率超材料吸波体, 极大缩短了设计周期, 且设计过程自动高效。设计框架如图 3 所示。

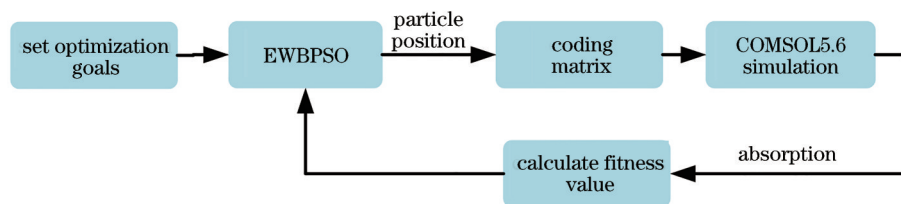


图 3 本算法的设计框架

Fig. 3 Design framework of our algorithm

本算法的详细实现步骤如图 4 所示。首先,利用 COMSOL5.6 软件中提供的 Matlab 软件接口,将 Fragment 型吸波体模型另存为 Matlab 可调用的 M 文件。其中,EWBPSO 算法由 Matlab 完成并获取编码矩阵。然后,Matlab 通过 M 文件调用 COMSOL5.6 软件建立与编码矩阵相对应的 Fragment 型吸波体模型进行仿真,获取 S 参数后通过式 (7) 计算出吸收率。将吸波体工作频段内的吸收率传递给 Matlab,以计算粒子的适应度值,再依次更新粒子位置。算法结束时

的最优粒子对应着最优吸波体表层金属结构。COMSOL5.6 软件的建模过程:设置周期性边界条件和 Floquet 端口以模拟吸波体的周期性结构,波矢量沿 z 轴方向,规定电场方向垂直于 x-z 平面时为 TE 极化,磁场方向垂直于 y-z 平面时为 TM 极化。设置入射波的角度,通过仿真软件获得反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} 并计算吸收率。由于模型的计算成本高,根据经验设置的 EWBPSO 算法种群数为 30,迭代次数为 40,学习因子 $c_1=c_2=2$ 。

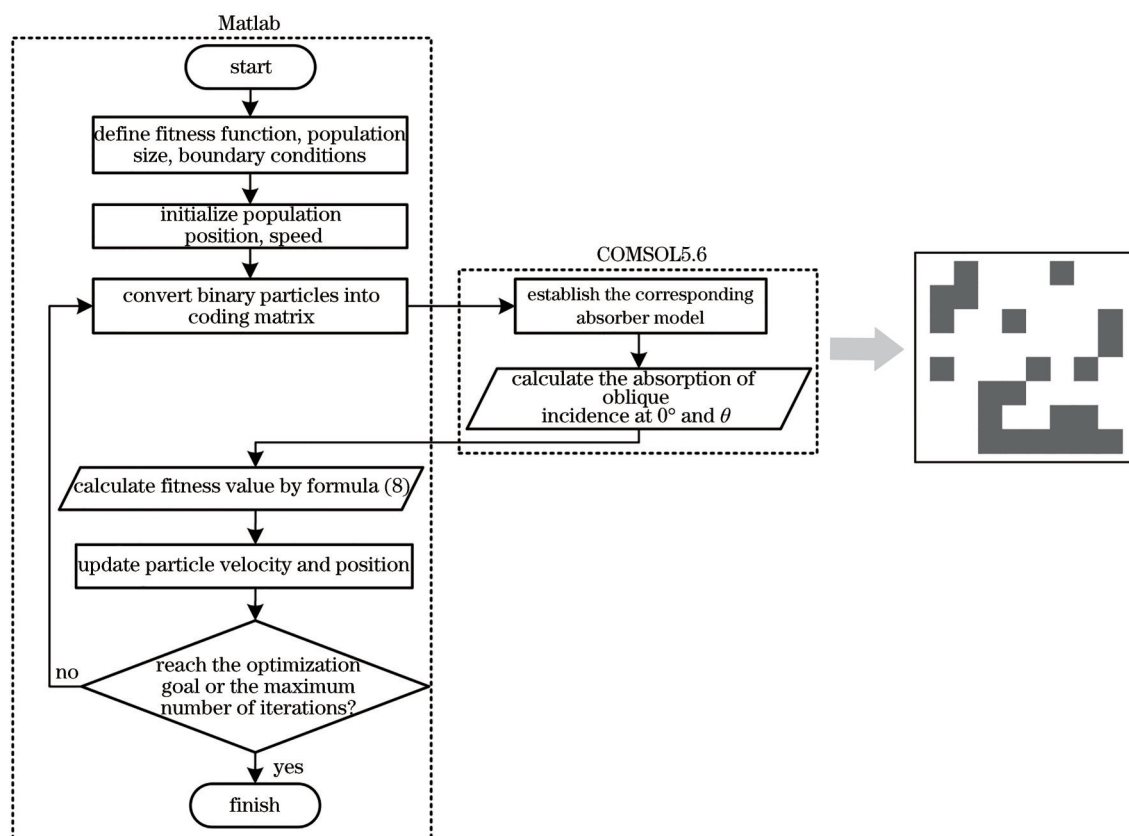


图 4 本算法的设计流程图
Fig. 4 Design flow chart of our algorithm

3 仿真结果与分析

3.1 带宽分析

图 5 为优化后的吸波体表面金属结构图。用 COMSOL5.6 软件对图 5 中的吸波体结构进行仿真,当电磁波垂直入射, $E(y)$ 表示电场 E 沿 +y 方向, $H(x)$ 表示磁场 H 沿 +x 方向, $k(z)$ 表示波矢 k 沿 +z 方向。图 6 为仿真结果的吸收率曲线。可以发现,电磁波垂直入射时超材料吸波体在 9.4~13.3 GHz 频率内达到了 90% 以上的吸收率,平均吸收率高达 96.8%。特别是在 11.6~12.6 GHz 频段内,吸波体

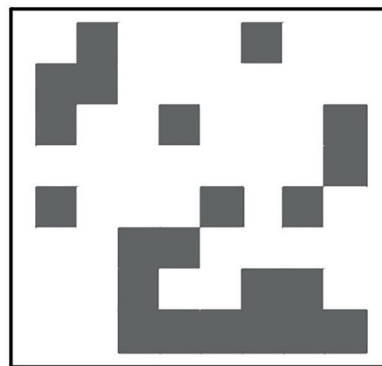


图 5 优化后吸波体表面的金属结构
Fig. 5 Optimized metal structure of the absorber surface

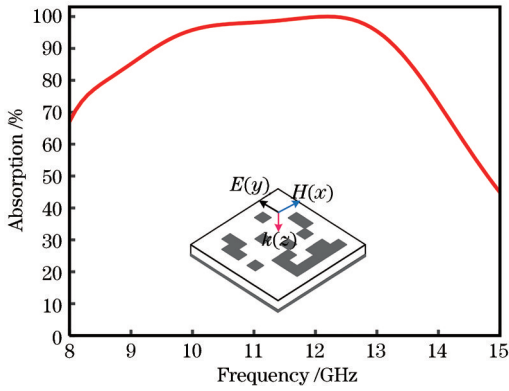


图 6 超材料吸波体的吸收率

Fig. 6 Absorption of the metamaterial absorber

的吸收率达到 99% 以上,实现了高强度平稳吸收电磁波的效果。这表明超材料吸波体结构的等效阻抗与自由空间阻抗形成较好的阻抗匹配,进而实现

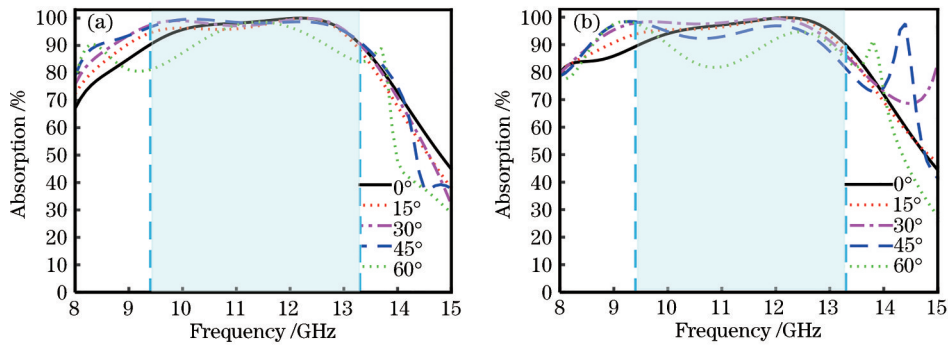


图 7 不同角度斜入射下的吸收率曲线。(a) TE 极化波; (b) TM 极化波

Fig. 7 Absorption curves under different angles of oblique incidence. (a) TE polarization waves; (b) TM polarization waves

3.3 自由空间阻抗与电磁参数分析

超材料吸波体要实现电磁波的完美吸收,阻抗匹配和电磁参数是两个重要因素。文献[24]中给出的超材料吸波体吸收率可表示为

$$A(\omega) = 1 - \left| \frac{Z_m(\omega) - Z_0}{Z_m(\omega) + Z_0} \right|^2, \quad (11)$$

式中, Z_m 为超材料吸波体的输入阻抗, Z_0 为自由空间阻抗, 垂直入射下自由空间阻抗 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$, 斜入射下自由空间阻抗 Z_0 与电磁波的极化模式有关。基于矢量传输线方程推导的两种极化模式下斜入射自由空间的波阻抗可表示为

$$Z_0^{TE} = Z_0 / \cos(\theta), \quad (12)$$

$$Z_0^{TM} = Z_0 \cdot \cos(\theta). \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知, TE、TM 波下自由空间的波阻抗随入射角的变化趋势相反, 在这两种极化波斜入射下超材料吸波体实现阻抗匹配也成为

了理想频段内高吸收率的设计目标。

3.2 宽入射角特性

为了验证超材料吸波体的宽角度吸波特性和仿真了超材料吸波体分别在 TE、TM 极化波入射角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时的吸收率曲线, 结果如图 7 所示。可以发现, 当入射角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, TE、TM 极化波斜入射情况下超材料吸波体的吸收率曲线变化微小且相似, 带宽基本保持不变; 随着入射角的增大, TE 极化波斜入射时吸波体表层金属的磁场分量减小, 导致有效磁响应降低; TM 极化波斜入射时吸波体表层金属的电场分量减小, 有效电响应强度降低, 进而导致阻抗失配, 影响吸波体的吸收率; 当 TE 和 TM 极化波的入射角度为 60° 时, 超材料吸波体的吸收率分别大于 80% 和 83%。总体而言, 该超材料吸波体表现出了宽角度的吸波特性, 可用于解决电磁干扰问题^[22]和隐身技术^[23]。

了一个难点。可通过优化超材料吸波体表层的金属块改变等效输入阻抗 Z_{eff} 进而调节 $Z_m(\omega)$, 使其实现与自由空间阻抗的匹配, 从而使超材料吸波体在 TE、TM 极化下都具备宽角度的吸波性能。吸波体表层金属的等效输入阻抗 Z_{eff} 可表示为

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}. \quad (14)$$

图 8 为超材料吸波体在 TE 极化波垂直入射下的等效输入阻抗曲线。可以发现: 在 10.0~13.3 GHz 频段内, Z_{eff} 的实部始终在 1 附近, 虚部在 $[-0.61, 0.56]$ 区间变化, 对应图 6 中带宽内吸收率先增后减的现象; 在 11.6~12.6 GHz 频段内, Z_{eff} 的实部和虚部分别接近于 1 和 0, 表明吸波体与自由空间实现了很好的阻抗匹配。

为了定性分析电磁波在超材料吸波体内部的衰减, 通过散射参数反演^[24]获得吸波体的等效电磁

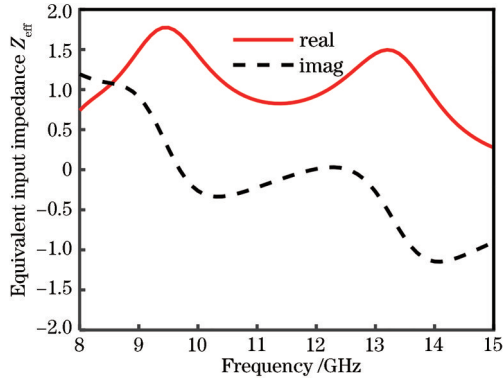


图 8 超材料吸波体的等效输入阻抗曲线

Fig. 8 Equivalent input impedance of the metamaterial absorber

参数。等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 可表示为

$$n = \frac{1}{kd} \arccos[(1 - S_{21}^2 - S_{11}^2)/S_{21}], \quad (15)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = n/Z_{\text{eff}}, \quad (16)$$

$$\mu_{\text{eff}} = nZ_{\text{eff}0} \quad (17)$$

超材料吸波体的等效介电常数和等效磁导率的变化曲线如图 9 所示。可以发现：超材料吸波体在 11.6~12.6 GHz 频段内的等效介电常数实部近似于 0, 虚部与实部比值的绝对值较大, 吸波体在该频段内具有很强的电损耗特性; 超材料吸波体在 9.4~13.3 GHz 频率范围内等效磁导率的虚部绝对值大于 1, 实部绝对值在 0 附近, 具有很强的磁损耗特性。这表明设计的吸波体同时满足阻抗匹配和损耗特性两个基本条件, 达到了带宽内高强度的吸波效果。

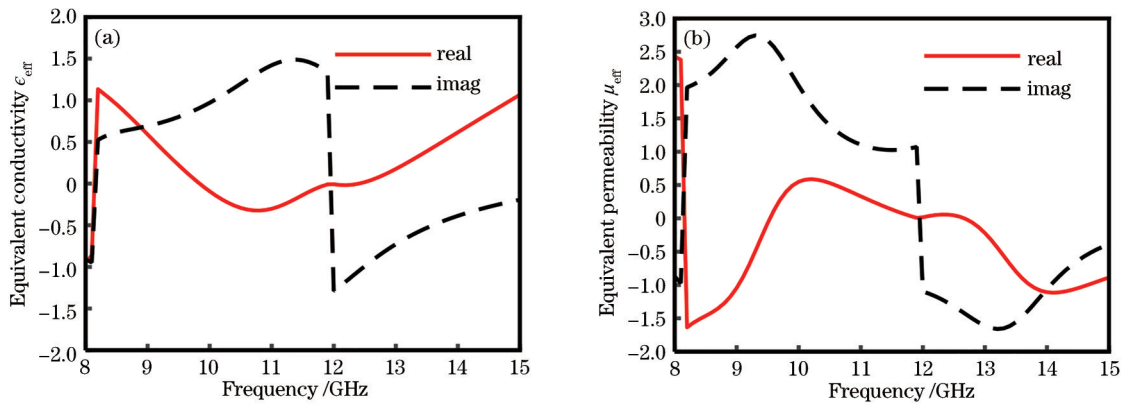


图 9 超材料吸波体的电磁参数。(a)等效介电常数;(b)等效磁导率

Fig. 9 Electromagnetic parameters of the metamaterial absorber. (a) Equivalent conductivity (b) equivalent permeability

4 综合对比

表 1 为设计的超材料吸波体与已有研究成果在吸波带宽和吸波角度方面的对比情况。可以发现, 其

他文献中设计的超材料吸波体在入射角为 30° 时吸波效果有明显恶化, 而本算法设计的超材料吸波体在 TE、TM 极化波入射角为 60° 时都能保持 80% 以上的吸波率, 在宽入射角吸收特性上有明显优势。

表 1 不同超材料吸波体的吸波性能

Table 1 Absorbing performance of different metamaterial absorbers

Reference	Algorithm	Bandwidth /GHz	Pattern layer	Absorptivity /%					
				TE-0°	TM-0°	TE-30°	TM-30°	TE-60°	TM-60°
Ref. [25]	artificial	7.57-14.57	2	≥ 90	≥ 90	> 90	$> 89\%$	> 88	> 65
Ref. [26]	artificial	5.94-11.92	1	≥ 90	≥ 90	> 69	$> 81\%$	—	—
Ref. [27]	artificial	7-12.1	1	≥ 90	≥ 90	> 90	$> 90\%$	> 45	> 45
Ref. [28]	artificial	8-16	1	≥ 85	≥ 85	> 85	$> 80\%$	> 68	> 68
Ours	EWBPSO	9.4-11.3	1	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 80	≥ 83

为了对比本算法与几种经典智能优化算法的寻优性能, 仿真参数采用相关文献中的常用值, 得到不同算法在迭代次数为 40、种群数为 30、重复执行算法 3 次中的最佳适应度值收敛曲线, 结果如图 10 所示。

可以发现, 相比其他算法, 本算法在收敛精度上有明显提升, 原因是本算法在 BPSO 算法中添加了动态权值和高斯误差, 有效改善了算法早熟以及后期易陷入局部最优的缺陷, 能更好地运用于吸波体的设计。

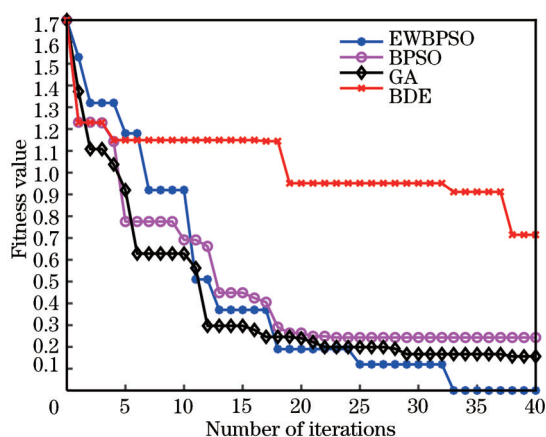


图 10 不同算法的收敛曲线

Fig. 10 Convergence curves of different algorithms

5 结 论

通过EWBPSO算法与电磁仿真软件相结合实现了宽角度、高吸收率超材料吸波体的设计。采用Fragment型离散结构的设计理念构造吸波体表层金属结构,通过优化超材料吸波体表层金属结构实现设计目标。设计的超材料吸波体在9.4~11.3 GHz频段内的吸收率大于90%,在TE、TM极化波60°斜入射下其带宽内的吸收率依然高于80%。通过分析超材料吸波体的等效阻抗和电磁参数,深入研究了其吸波机理。仿真结果表明,BPSO算法非常适合超材料吸波体的优化设计,添加高斯误差和动态权值可以有效改善算法后期易陷入局部最优的缺陷。相比已有的超材料吸波体,所设计的超材料吸波体具有较大的吸波角度和工作带宽,可应用于隐身技术和电磁兼容等领域。

参 考 文 献

[1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.

[2] Schalch J, Duan G W, Zhao X G, et al. Terahertz metamaterial perfect absorber with continuously tunable air spacer layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(6): 061113.

[3] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[4] Banadaki M D, Heidari A A, Nakhkash M. A metamaterial absorber with a new compact unit cell [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 205-208.

[5] 伍铁生, 王学玉, 张慧仙, 等. 一种多层Zr/SiO₂结构的超宽带完美吸波体[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0516001.

Wu T S, Wang X Y, Zhang H X, et al. Ultra-broadband perfect absorber based on multilayered Zr/SiO₂ film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0516001.

[6] 孙磊, 孙俊, 高晓梅, 等. 基于超材料的微波宽带完美吸波体设计[J]. *材料导报*, 2021, 35(12): 12014-12019.

Sun L, Sun J, Gao X M, et al. Design of microwave broadband perfect absorber based on metamaterial[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(12): 12014-12019.

[7] Huang X J, Yang H L, Wang D Q, et al. Calculations of a wideband metamaterial absorber using equivalent medium theory[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(32): 325101.

[8] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(4): 35-48.

[9] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.

[10] Arslanagić S, Hansen T V, Mortensen N A, et al. A review of the scattering-parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, 55(2): 91-106.

[11] 贾宇翔, 王甲富, 陈维, 等. 基于智能算法的超材料快速优化设计方法研究进展[J]. *雷达学报*, 2021, 10(2): 220-239.

Jia Y X, Wang J F, Chen W, et al. Research progress on rapid optimization design methods of metamaterials based on intelligent algorithms[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 220-239.

[12] Vial B, Hao Y. Topology optimized all-dielectric cloak: design, performances and modal picture of the invisibility effect[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23551-23560.

[13] Li Z G, Stan L, Czaplewski D A, et al. Broadband infrared binary-pattern metasurface absorbers with micro-genetic algorithm optimization[J]. *Optics Letters*, 2018, 44(1): 114-125.

[14] Tran M C, Pham V H, Ho T H, et al. Broadband microwave coding metamaterial absorbers[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 1810-1821.

[15] Yigit E, Duysak H. Determination of optimal layer

- sequence and thickness for broadband multilayer absorber design using double-stage artificial bee colony algorithm[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(8): 3306-3317.
- [16] Goudos S K. Design of microwave broadband absorbers using a self-adaptive differential evolution algorithm[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2009, 19(3): 364-372.
- [17] Qian Z, Xiang W, Shuo L, et al. Shaping electromagnetic waves using software-automatically-designed metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3588-3599.
- [18] Mouna H, Mekaladevi V, Devi M N. Design of microwave absorbers using improvised particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2018, 17(2): 188-200.
- [19] Pelluri R, Appasani B. Genetic algorithm optimized X-band absorber using metamaterials[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2017, 69: 59-64.
- [20] 黄利, 杜伟伟, 丁立新. 基于 Sigmoid 惯性权重自适应调整的粒子群优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(1): 32-34.
Huang L, Du W W, Ding L X. Particle swarm optimization algorithm based on adaptive Sigmoid inertia weight[J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(1): 32-34.
- [21] 艾兵, 董明刚. 基于高斯扰动和自然选择的改进粒子群优化算法[J]. *计算机应用*, 2016, 36(3): 687-691.
Ai B, Dong M G. Improved particle swarm optimization algorithm based on Gaussian disturbance and natural selection[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(3): 687-691.
- [22] Charoonsaeng P, Theeradejvanichkul T. A thin wideband radar absorber based on a dual-substrate FSS with quadruple hexagonal split rings for stealth aircraft application[C]//2019 International Workshop on Antenna Technology (IWAT), March, 3-6, 2019, Miami, FL, USA. New York: IEEE Press, 2019: 111-114.
- [23] Beeharry T, Yahiaoui R, Selemani K, et al. A dual layer broadband radar absorber to minimize electromagnetic interference in radomes[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 382.
- [24] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 71(3): 036617.
- [25] Lanang F F, Nur L O, Syihabuddin B, et al. Study on C-band electromagnetic wave absorber made of S-ring resonator[C]//2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), November 20-21, 2019, Yogyakarta, Indonesia. New York: IEEE Press, 2019: 11-14.
- [26] Ranjan P, Choubey A, Mahto S K, et al. A novel ultrathin wideband metamaterial absorber for X-band applications[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2019, 33(17): 2341-2353.
- [27] Nguyen T T, Lim S. Angle- and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(2): 021605.
- [28] Sen G, Islam S N, Banerjee A, et al. Broadband perfect metamaterial absorber on thin substrate for X-band and Ku-band applications[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2017, 73: 9-16.