



# 深度遗传算法驱动的超宽带透明隐身超表面设计

赵纪伟, 朱珮莹, 鲁焕\*, 郑斌, 陈红胜\*

浙江大学信息与电子工程学院, 浙江省电磁智能感控与先进电子集成重点实验室, 杭州 310027

\* 联系人, E-mail: [luhuan123@zju.edu.cn](mailto:luhuan123@zju.edu.cn); [hansomchen@zju.edu.cn](mailto:hansomchen@zju.edu.cn)

2025-11-29 收稿, 2026-01-19 修回, 2026-01-19 接受, 2026-01-20 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1404704, 2022YFA1405201)、国家自然科学基金(62475228, U25A20520)、国家万人计划青年拔尖人才项目、中央高校基本科研业务费专项资金(226-2024-00125)、浙江省重点研发计划(2024C01160)和金华市科技计划(2024-1-077, 2026-1-026)资助

**摘要** 电磁隐身技术是信息功能材料领域的关键方向之一, 对提升复杂环境下的电磁兼容性与信息防护能力具有重要意义。面向宽频段电磁散射抑制、器件薄型化、光学透明以及宽入射角稳健性等多重需求, 传统吸波材料一方面受限于材料本征的光学不透明性, 另一方面受Rozanov厚度-带宽极限约束, 难以同时满足现代透明电子设备对可见光通透性与微波隐身性的双重要求。为此, 本文提出了一种深度学习与遗传算法融合的智能设计方法——深度遗传算法(deep genetic algorithm, DGA), 并基于该算法设计了一种基于氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)的超宽带透明吸波隐身超表面。在 DGA 中, 前向预测网络以数据驱动方式作为全波电磁仿真的替代评估模型, 从而显著提升结构评估与优化迭代效率; 遗传算法在高维参数空间内进行约束优化, 在满足总厚度限制的同时提升器件在不同入射角下的带宽稳定性。实验结果表明, 所制备样品实现了覆盖S波段高频段至Ka波段(3.5~35 GHz)的超宽带吸收, 相对带宽高达163%, 同时保持60%以上的光学透光率, 且在0°~50°的入射角范围内保持了稳定的全极化宽带隐身响应。本研究为“光学透明—电磁隐身”功能一体化表面的实现提供了全新技术路径与器件原型, 在透明电子、车载隐身窗口及建筑电磁兼容等领域具有应用潜力。

**关键词** 深度遗传算法, 透明超表面, 超宽带隐身, 深度学习, 遗传算法

电磁隐身技术通过调控目标散射场以降低其雷达可探测性, 在电磁兼容与信息防护领域具有重要的应用价值<sup>[1,2]</sup>。早期薄层吸收体基于等效电路理论与电阻损耗机制, 为实现目标幅度调控提供了基础技术路径<sup>[3]</sup>, 但其在宽频带内实现低反射通常需要与工作波长相当的电厚度, 难以满足现代电子器件轻薄化与集成化的发展需求<sup>[4~6]</sup>。超表面作为一种亚波长尺度的二维人工结构, 具备对电磁波振幅、相位、极化等多自由度调控能力, 借助多谐振模式耦合与表面阻抗匹配设计<sup>[7~12]</sup>, 可在薄层条件下实现近乎完美的电磁波吸收或低反射传输, 为发展高性能薄层隐身技术提供了新途径<sup>[13~17]</sup>。然而, 传统超表面多采用金属图案或不

透明衬底, 导致其在可见光波段透射率极低且视觉不透明, 限制了其在光学透明需求场景中的应用, 例如隐身视窗、传感器保护窗、电磁兼容窗口、隐身雷达罩以及显示设备保护层等<sup>[18~21]</sup>。

针对光学透明与微波/毫米波隐身兼容的应用需求, 以氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)为代表的透明导电材料为实现此类器件提供了材料基础<sup>[22~25]</sup>。此类器件的设计需协同优化光学透射率与电磁隐身性能, 涉及薄膜方阻、单元结构与多层干涉效应的耦合设计, 实现在厚度、带宽、入射角、极化态及可见光透射率等多重指标间的折中平衡, 属于典型的多目标优化问题<sup>[26]</sup>。从物理本质看, 薄层宽带吸波体还面临“厚度—

**引用格式:** 赵纪伟, 朱珮莹, 鲁焕, 等. 深度遗传算法驱动的超宽带透明隐身超表面设计. 科学通报, 2026, 71: 6951–6962

Zhao J, Zhu P, Lu H, et al. Deep genetic algorithm-driven design of ultra-wideband transparent stealth metasurfaces (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 6951–6962, doi: [10.1360/CSB-2025-5843](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5843)

带宽”权衡等固有限制,需在目标频带内同时满足阻抗匹配与相位条件<sup>[27~30]</sup>。此外,传统设计方法严重依赖参数扫描与全波仿真,随着性能要求扩展至宽频带、大角度鲁棒性、极化不敏感及高透光性等复杂目标,高维参数空间带来的计算复杂度使基于枚举的优化策略难以有效应对<sup>[31]</sup>。数据驱动的智能设计方法为解决上述挑战提供了新思路。深度学习(deep learning, DL)能够通过大量样本数据,建立“结构—响应”之间的高精度非线性关联,作为高效的前向预测代理模型,快速估计多频点散射参数;结合遗传算法(genetic algorithm, GA)等全局优化方法,可在多约束条件下进行逆向设计,显著提升设计效率并降低计算成本<sup>[32~37]</sup>。

针对上述挑战,本文提出了一种深度学习与遗传算法融合的深度遗传算法(deep genetic algorithm, DGA)用于实现透明吸波隐身超表面的高效设计。通过构建包含多种单元结构及其电磁响应的大型数据集,训练了具备毫秒级多频点响应预测能力的前向神经网络模型。在此基础上,以宽带低反射为核心目标,兼顾入射角鲁棒性与总厚度约束,利用遗传算法在高维参数空间内进行全局优化,以搜索满足综合性能指标的最优结构参数。基于该方法,设计并制备了一种ITO基超宽带透明吸波隐身器件。实验结果表明,该器件在保

持约60%平均可见光透射率的同时,在S至Ka频段内实现了连续超过30 GHz的有效吸波带宽(以吸收率 $\geq 90\%$ 为准则),并在 $0^\circ\sim 50^\circ$ 入射角范围内表现出良好的角度稳定性。该结果验证了智能设计方法在复杂电磁器件开发中的有效性与可靠性,为未来实现“微波—红外—可见光”一体化隐身超表面的工程实现提供了可行的技术路径<sup>[38]</sup>。

## 1 超宽带透明隐身超表面的智能设计

图1展示了透明隐身超表面的应用场景,以及所提基于深度遗传算法的智能设计框架。系统在概念上整合了功能目标、层状结构与算法求解三个层面,形成从应用需求到器件结构的端到端生成流程。图1(a)展示了面向车载与建筑场景的应用构想。透明超表面覆盖于外形表面,在可见光波段保持透明特性,在微波波段则通过表面阻抗调控与多谐振耦合抑制散射,从而实现电磁兼容与隐身功能,且不影响光学透过性需求。图1(b)为单元层状结构示意图,ITO透明导电层与聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)构成单层结构,每一层ITO具备不同的单元结构,整个单元结构由三层ITO-PET结构层与ITO-PET反射层组成,每个相邻层之间有一定的间隔(等效为空气)。顶层ITO

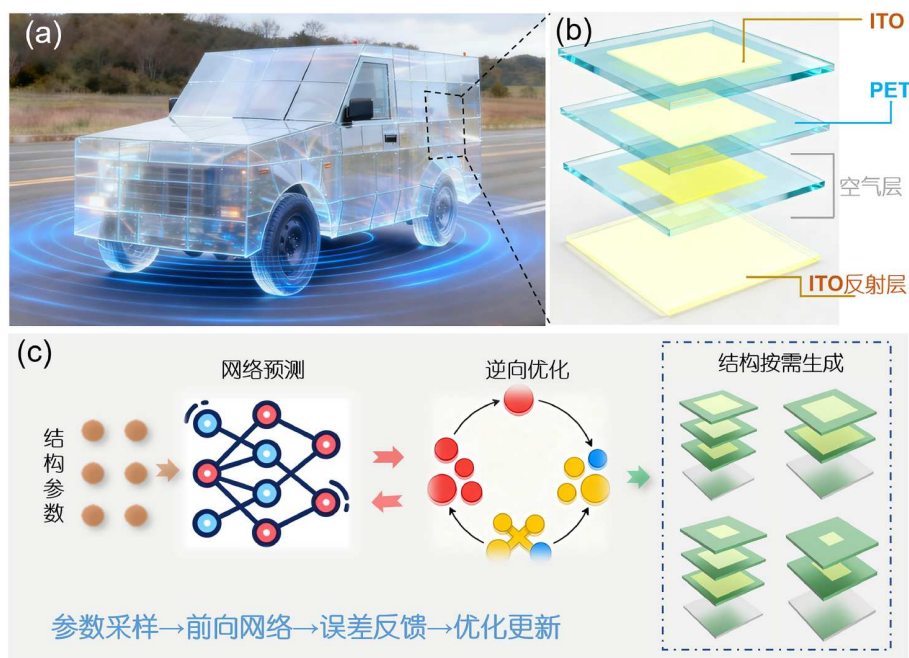


**图 1** 透明隐身超表面设计概念与流程。(a) 兼顾可见光通透与微波散射抑制的应用场景示意。(b) 单元层状结构。(c) 智能逆向设计架构  
**Figure 1** Design concept and process of the transparent stealth metasurface. (a) Schematic of the application scenario balancing visible light transparency and microwave scattering suppression. (b) Layered structure of the unit cell. (c) Intelligent inverse design framework

通过几何参数与方阻的协同设计,实现对电磁响应的精细调控,同时维持高可见光透过率;PET层提供机械支撑与电绝缘;空气间隔层用于调节等效电厚度与相位条件;底部ITO反射层则抑制微波透射,并与上层结构协同实现阻抗渐变匹配与电磁能量损耗.各层协同作用使器件在宽频带内获得稳定的低反射响应.

图1(c)展示了智能逆向设计架构DGA.通过结构参数采样构建“结构—频谱”对应数据集后,构建前向预测网络模型,从而快速输出多频点电磁响应.在目标函数引导下,遗传算法在高维参数空间中完成选择、交叉与变异操作,与前向网络形成闭环迭代,直至满足预设收敛条件.该闭环框架将需求定义、快速预测及全局优化整合为一体化流程,显著降低对大规模全波仿真的依赖,为超宽带透明隐身超表面的工程化实现提供了可靠的技术路径.

在逆向设计过程中,超表面单元通常包含几何尺寸、材料属性、层数以及方阻等多种可调参数,这些

变量与目标电磁响应之间呈现强非线性与多重耦合关系.若完全依赖全波电磁仿真在高维参数空间中进行枚举式扫描,计算量将随维度与约束条件急剧增长,难以满足多目标协同的工程需求.为此,本研究构建了一种深度遗传算法框架DGA:通过深度学习建立高效的前向替代模型,并利用遗传算法执行目标导向的全局搜索,在满足性能与厚度约束的前提下显著缩短设计周期.整体架构如图2所示,包括前向预测网络与逆向优化两部分.前向预测阶段采用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)学习“结构参数-频率响应”之间的非线性映射关系,如图2(a)所示.输入向量包含周期尺寸、各层厚度、ITO方阻及特征环宽等关键参数.网络通过卷积层、池化层与扁平化层提取结构特征,再经由多层全连接层完成从输入到输出的映射,最终得到多个频率采样点上的反射幅度谱.经数据集训练后,该模型可在毫秒量级完成多频点响应预测,为后续优化提供快速且稳定的性能评估.

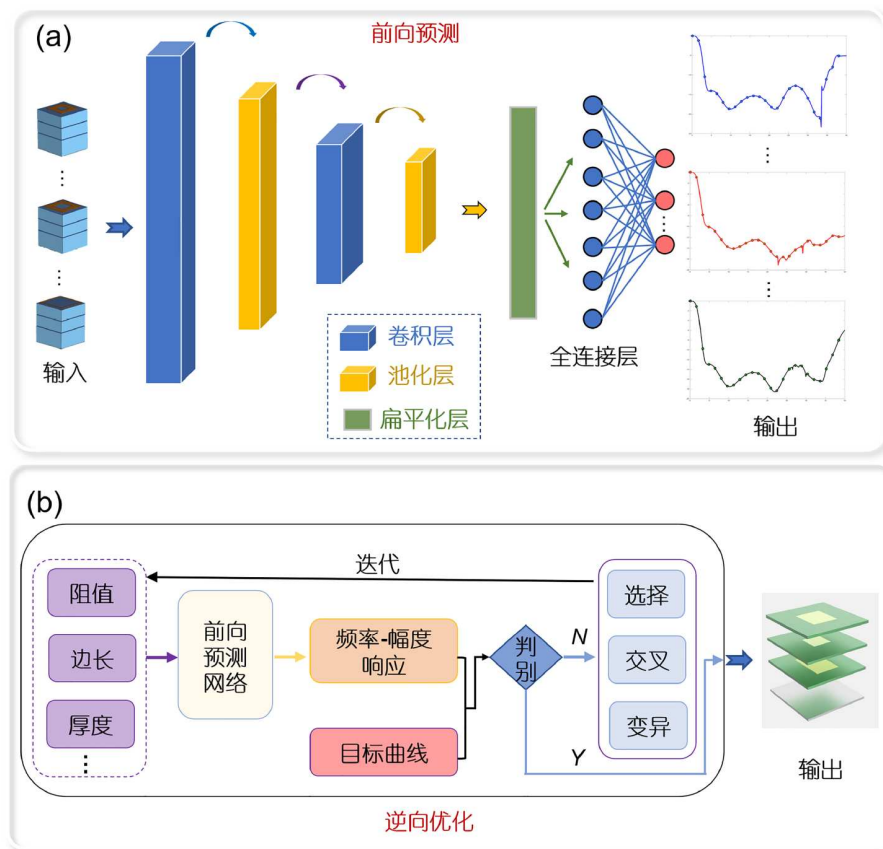


图2 前向预测与逆向优化框架. (a) 前向预测网络结构. (b) 基于遗传算法的逆向搜索流程

Figure 2 Forward prediction and inverse optimization framework. (a) Architecture of the forward prediction network. (b) Inverse search process based on the genetic algorithm

在逆向优化阶段,引入GA作为全局搜索器,并与前向预测网络形成闭环耦合,流程如图2(b)所示.随机生成满足边界约束的初始种群,每个个体对应一组结构参数向量;将其输入预训练完成的卷积神经网络,获取相应的反射谱.根据目标曲线定义适应度函数,算法依据适应度值执行选择、交叉与变异等操作,并采用精英保留策略以避免最优个体丢失;优化过程中达到最大迭代次数,或连续若干代适应度提升低于设定阈值时终止.依托“前向预测—逆向优化”的闭环迭代机制,该混合智能框架可在高维设计空间中实现目标导向型结构的快速、可靠生成.

为验证前向预测网络在透明隐身超表面设计中的有效性与泛化能力,本研究基于大规模仿真样本构建了训练与测试数据集,并对其收敛特性与预测精度进行了系统评估.在数据集构建阶段,结合CST Microwave Studio与MATLAB进行联合仿真以生成测试数据.针对影响目标性能的关键参数,明确各参数的取值范围与约束条件:结构边长的连续变化区间为2~10 mm;方阻选取实际加工中的常用离散阻值,具体包括10、50、80、100、130、200、250、400共8个可选值;结构厚度包含 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 三个维度,每个厚度参数的连续取值范围均为0~10 mm,且按0.2 mm步长进行离散化划分;方环的特征环宽根据边长同步确定范围.基于上述参数设定,数据采样的实施流程如下:首先将所有参数(结构边长、方阻、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ )作为独立输入维度,对连续型参数(结构边长、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ )按预设样本总量进行等概率分层,对离散型参数(方阻)则以其8个可选阻值作为天然分层;随后从每个参数的每一层中随机抽取且仅抽取一个样本点,避免出现样本在单一参数维度上的聚集或空白;最后在满足几何约束(结构边长<周期—最小线宽)的前提下,将各维度样本进行随机配对,形成完整的高维参数样本集.

通过该采样方式,无需遍历所有参数组合(尤其是厚度参数的多步长组合会产生海量冗余数据),即可用少量样本实现对整个参数空间的均匀覆盖,既保证了样本的代表性与多样性,又大幅减少了CST全波仿真的计算量与时间成本.生成的参数样本集经MATLAB与CST的联合仿真调用,最终输出对应的电磁响应数据,为后续模型训练与性能分析提供了高质量的数据支撑.

数据集包含10000组单元结构及其对应的电磁响应数据;输入参数包括单元结构边长、每个ITO层的方

阻、各层厚度及几何特征参数,输出为2~40 GHz频段内626个采样点的反射幅度谱.样本按70%、15%和15%的比例划分为训练集、验证集和测试集;所有输入参数均经过区间归一化处理,以消除量纲差异并加速网络训练.

网络以均方误差(mean squared error, MSE)作为损失函数,网络包含3个卷积层(卷积核数量分别为16、32、64)、2个全连接层(神经元数分别为512和256),采用带动量的随机梯度下降法(Stochastic Gradient Descent with Momentum, SGDM)进行优化,初始学习率设为 $6.5 \times 10^{-4}$ ,动量因子为0.9;训练过程中引入分段式学习率衰减与梯度裁剪策略,以提升收敛稳定性.损失函数随训练轮次的变化如图3(a)所示,训练损失与验证损失同步下降并最终趋于稳定,未见明显过拟合现象.

图3(b~e)展示了测试集中若干随机样本的预测反射谱与全波仿真结果对比.可以看出,预测曲线与仿真真值在全频段内高度吻合,皮尔逊相关系数 $R$ 均大于0.95,表明前向网络能够准确捕捉多谐振耦合作用下的复杂频谱特征,并在毫秒级时间内完成多频点响应预测,具备作为逆向优化阶段高效替代模型的可靠性.

为使透明隐身超表面在宽频带及多入射角条件下均能保持低反射特性,本文构建了以反射抑制为核心、同时兼顾厚度约束的多目标优化函数.该器件采用吸收型背板结构,在工作频段内透射可忽略,因此其隐身性能可由反射系数表征,吸收率定义为

$$A(f) = 1 - |S_{11}(f)|^2 - |S_{21}(f)|^2 \approx 1 - |S_{11}(f)|^2, \quad (1)$$

其中,  $S_{11}(f)$ 表示反射幅度,此时定义 $S_{11,\text{dB}}(f) = 20 \log_{10} |S_{11}(f)|$ .有效带宽的判据设定为吸收率 $A \geq 0.9$ ,即等效于 $|S_{11,\text{dB}}(f)| \leq -10 \text{ dB}$ .带内性能统计采用功率域平均方式,角度稳健性则在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 入射范围内进行评估.器件总厚度被限制在10 mm以内,以兼顾结构轻薄化与工艺可行性.目标函数由全频段逐点限制与分频段平均限制两部分构成:在3.5~35 GHz宽频带范围内,要求每个频点的反射幅度均低于-10 dB;在S、C、X-Ku和K-Ka等子频段内,则分别设定差异化的功率域平均反射门限.上述反射阈值与厚度、角度约束共同构成遗传算法的多目标约束体系,实现对宽带、低反射、薄型化及宽角度稳健性的协同优化.各频段的具体阈值要求与统计口径汇总于表1.

基于所构建的目标体系优化得到的最优结构参数

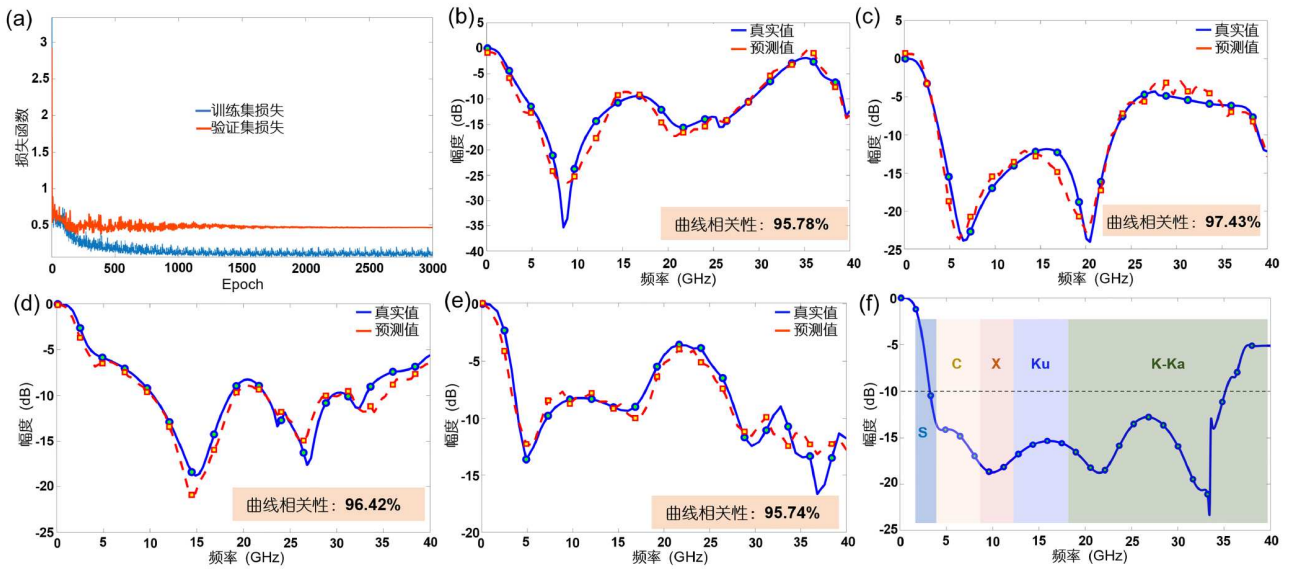


**图 3** 前向预测网络的训练与评估。(a) 训练与验证损失曲线。(b-e) 随机样本的预测谱与仿真真值对比。(f) 最优单元的反射幅度响应验证  
**Figure 3** Training and evaluation of the forward prediction network. (a) Training and validation loss curves. (b-e) Comparison between predicted spectra and simulated ground truth for random samples. (f) Verification of the reflection amplitude response of the optimal unit cell

**表 1** 优化技术指标与统计口径

**Table 1** Optimization technical metrics and statistical criteria

| 频段     | 频率范围(GHz) | 统计口径  | 阈值要求                                |
|--------|-----------|-------|-------------------------------------|
| 全带     | 3.5~35    | 逐点    | 反射幅度 $\leq -10$ dB/吸收率 $\geq 0.9$   |
| S波段    | 2~4       | 功率域平均 | 反射幅度 $\leq -5$ dB/吸收率 $\geq 0.684$  |
| C波段    | 4~8       | 功率域平均 | 反射幅度 $\leq -0$ dB/吸收率 $\geq 0.9$    |
| X-Ku波段 | 8~18      | 功率域平均 | 反射幅度 $\leq -15$ dB/吸收率 $\geq 0.968$ |
| K-Ka波段 | 18~40     | 功率域平均 | 反射幅度 $\leq -10$ dB/吸收率 $\geq 0.9$   |

为：单元周期 $p=8.5$  mm；三层介质间隔厚度分别为 $h_1=h_2=2.8$  mm,  $h_3=4.0$  mm(仿真中介质层设为空气等效)；三层ITO的方阻依次为130、200、50  $\Omega/\text{sq}$ ，对应方环的特征环宽分别为 $d_{1-2}=1.53$  mm、 $d_{3-4}=2.06$  mm、 $d_{5-6}=1.62$  mm。底部采用低方阻ITO背层以有效抑制透射，三层ITO结构通过阻抗渐变与多谐振协同作用，实现了宽频带内的低反射特性。

为验证“设计—优化—验证”闭环中替代模型的可靠性，采用商业电磁仿真软件CST Studio Suite 2024对该最优结构进行全波仿真验证。如图3(f)所示，仿真结果与前向预测谱在全频段内基本一致，误差被控制在预设阈值范围内，表明前向网络在优化阶段具备良好的预测可信度。按功率域平均统计，该结构在2~40 GHz范围内各标准波段的平均反射幅度分别为：S波段-8.348 dB，C波段-14.84 dB，X波段-18.19 dB，Ku

波段-15.88 dB，K波段-16.102 dB，Ka波段-12.33 dB，均满足表1所规定的阈值要求，为后续斜入射性能评估与样品制备提供了可复现的参数依据。

基于混合智能设计框架优化获得的最优单元结构如图4所示。该单元由三层具有不同方阻的ITO导电层构成，层间以空气间隔实现电磁耦合调控；底部设置低方阻ITO反射层( $R_s \approx 1 \Omega/\text{sq}$ )，共同构成吸收型堆叠结构。器件总厚度为9.6 mm，满足轻薄化与制造可行性要求。图4(a)展示了单元的三维结构示意图，上、中、下三层ITO通过几何尺寸与方阻的差异化设计，在频域上形成分布式谐振，并与底部反射层协同作用，实现宽频带内的低反射特性。图4(c-e)分别为三层ITO图案的俯视图，每层均采用方环构型以增强等效电感并扩展谐振覆盖范围；其特征环宽分别由参数 $d_{1-2}$ 、 $d_{3-4}$ 、 $d_{5-6}$ 控制，对应各层外/内边长的差值。三层结构的差异化设

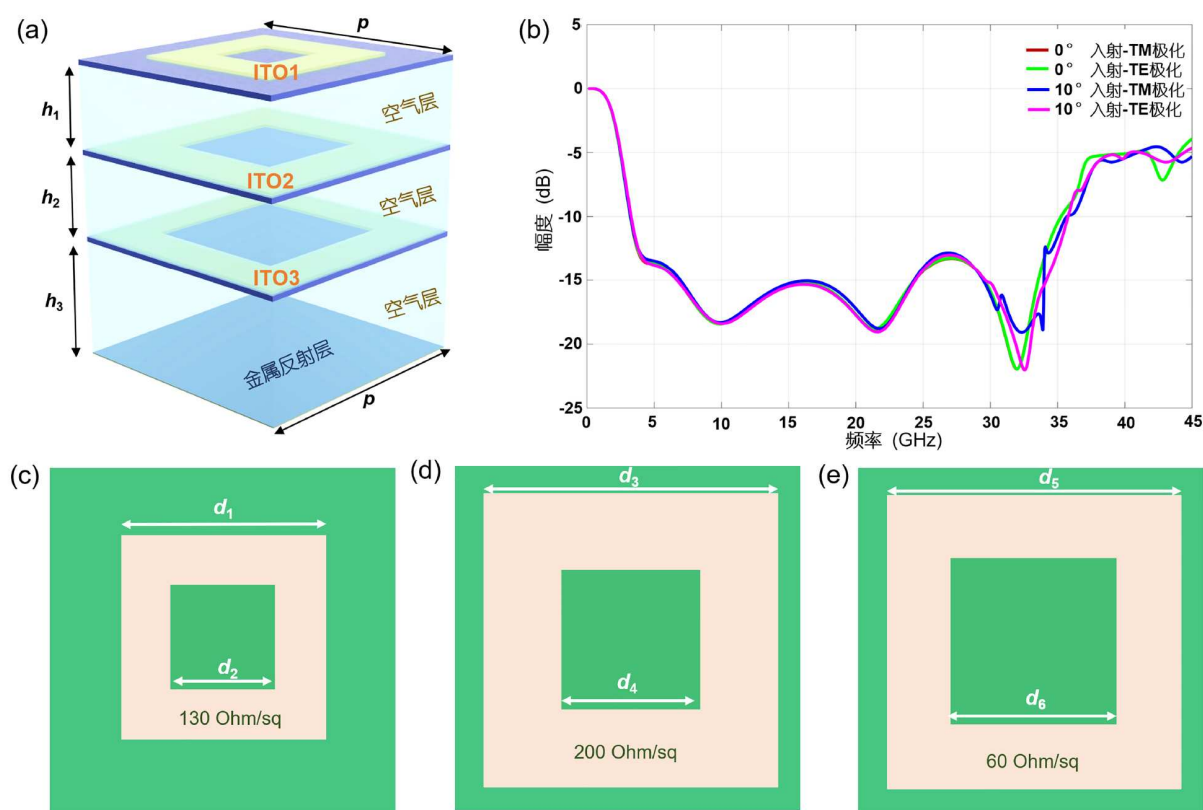


图4 优化所得单元结构. (a) 三维结构图. (b) TE和TM极化下幅度-频率响应. (c~e) 上、中、下三层ITO图案的俯视图

**Figure 4** Optimized unit cell. (a) Three-dimensional schematic. (b) Amplitude-frequency response under TE and TM polarizations. (c~e) Top view of the upper, middle, and lower layers of ITO patterns

计在多个频点处激发耦合吸收峰, 从而实现逐级能量耗散与阻抗渐变匹配. 同时, 得益于单元设计的全对称性, 该结构表现出良好的极化不敏感性(图4(b)). 具体而言, 在 $0^\circ$ 入射条件下, 得益于单元结构的 $C_4$ 旋转对称性, 垂直入射下TE与TM极化响应完全简并; 在 $10^\circ$ 斜入射条件下, 蓝色实线(TM极化)与粉色实线(TE极化)亦呈现高度一致的响应特性. 两种入射情形下的反射幅度均满足预设性能指标, 表明该结构具备良好的全极化兼容性与斜入射稳定性.

电磁机理分析表明, 该结构的宽带低反射性能主要源于三个方面: 其一, 阻抗渐变结构实现了从自由空间到反射层的平滑过渡, 有效抑制了界面反射; 其二, 多层ITO的方阻与几何参数差异引入了多组分布式谐振, 吸收峰在频谱上连续分布, 共同拓展了低反射带宽; 其三, 空气层厚度的调节优化了层间耦合相位关系, 使多层谐振的合成效应对入射角变化保持稳定. 这种多层次的阻抗调控与损耗协同机制, 使结构在S至Ka波段

内均能维持高吸收率与低反射性能. 综上所述, 通过在几何参数、方阻与层间相位构成的高维参数空间中进行联合优化, 所设计结构成功兼顾了可见光通透性与微波隐身功能, 为后续样品制备与实验验证提供了稳定可靠的结构基础.

表2从计算效率、性能及实现复杂度等多个维度, 对DGA方法与传统优化算法(参数扫描、遗传算法)展开全面对比. 结果表明, 所提出的DGA算法在智能化设计与优化领域具备显著优越性.

为评估器件在实际入射条件下的角度稳健性, 基于全波仿真对比了入射角分别为 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $50^\circ$ 时的反射幅度与吸收率, 结果如图5所示. 在垂直入射情况下(图5(a)), 主吸收带覆盖3.238~35.252 GHz, 有效带宽为32.014 GHz. 当入射角增大至 $20^\circ$ (图5(b)), 吸收频带扩展为3.355~37.312 GHz, 有效带宽提升至33.957 GHz. 入射角为 $40^\circ$ 时(图5(c)), 低频边缘略有上移, 而高频端进一步外展, 覆盖范围达5.209~42.196 GHz, 有效带宽

表 2 方法对比

Table 2 Comparison of methods

| 对比维度     | 参数扫描               | 单一遗传算法              | DGA                    |
|----------|--------------------|---------------------|------------------------|
| 核心原理     | 遍历所有可能参数组合         | 模拟生物进化, 进行启发式全局搜索   | DL前向预测+GA智能优化          |
| 单次性能评估耗时 | 分钟~小时级(每次仿真)       | 分钟~小时级(每次仿真)        | 毫秒~秒级(模型前向计算)          |
| 优化总时长    | 极长(随参数数量指数增长)      | 长(受仿真速度严重限制)        | 短(GA可在高效评估下快速收敛)       |
| 实现复杂度    | 低(概念简单)            | 中高(需脚本耦合仿真与算法)      | 中高(需结合DL训练与GA优化)       |
| 人工干预需求   | 高(手动设置参数范围与步长)     | 中高(需监控优化过程, 处理仿真异常) | 低(全自动优化循环, 无需干预)       |
| 全局收敛能力   | 可得全局最优, 但维度灾难导致不可行 | 中等(受代数/种群影响)        | 强(支持大规模种群和迭代, 全局搜索能力强) |
| 搜索效率     | 极低(存在大量冗余计算)       | 低(大量时间浪费在等待仿真上)     | 高(将快速预测与高效搜索结合)        |
| 适用场景     | 参数较少的简单设计          | 参数较少、仿真较快的简单优化      | 多参数、高维、复杂系统的逆向设计       |

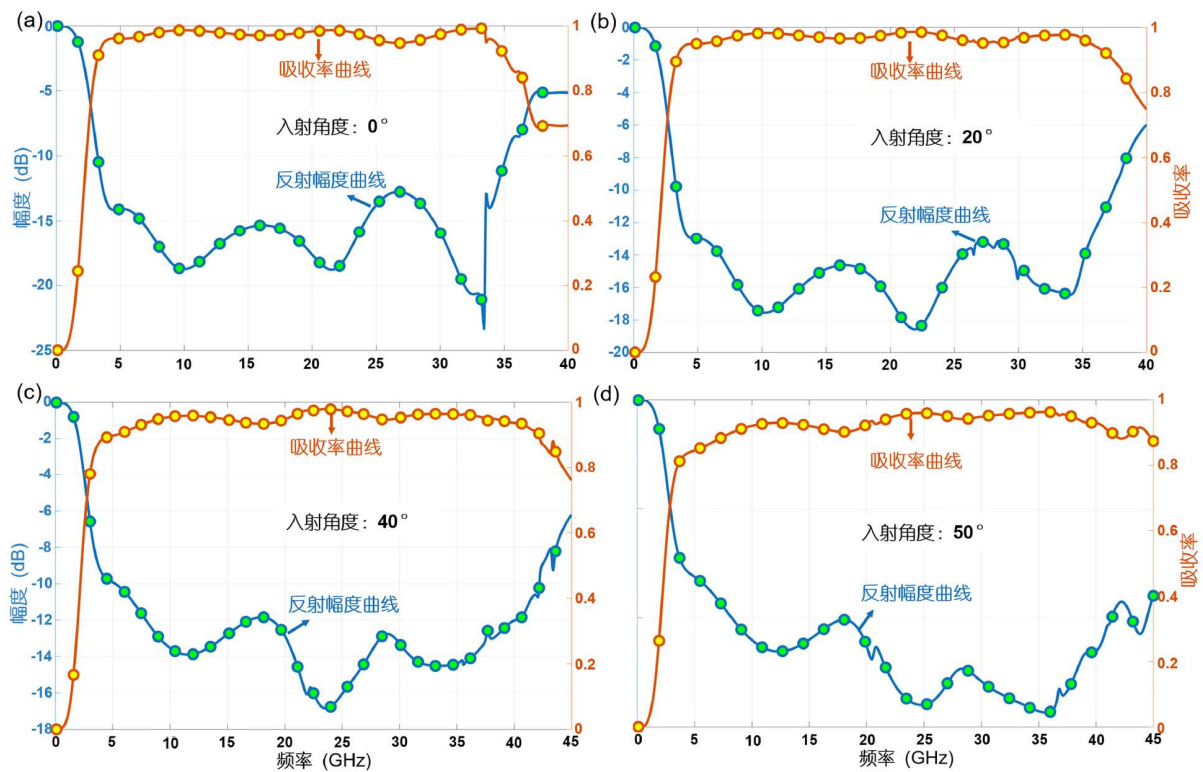


图 5 不同入射角下的宽带吸收性能仿真结果. (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 50°

Figure 5 Simulated broadband absorption performance under different incident angles. (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 50°

为36.987 GHz. 当入射角为50°(图5(d)), 主吸收带连续覆盖8.200~41.374 GHz, 有效带宽为33.174 GHz. 整体趋势表明: 随着入射角增大, 法向相位累积减少/等效法向电厚度减小导致低频端上移, 高频端在多谐振耦合作用下持续扩展, 使得整体有效带宽未出现明显压缩, 表现出良好的角度稳健性.

从机理上分析, 三层ITO的方阻梯度与几何差异在

多个频点引入分布式谐振, 空气间隔层提供可调相位延迟, 使结构界面等效阻抗在不同入射角下仍能与自由空间保持良好的匹配. 与单层或双层结构相比, 多层耦合机制可在较大入射角范围内维持较低的反射峰, 并平滑连接相邻吸收峰, 从而保障宽频吸收性能在斜入射条件下的稳定性. 上述仿真结果整体满足表1所设定的目标约束, 并与表2中的优化参数相互印证, 为后

续实验阶段的归一化反射率测量与有效带宽统计提供了明确的评估依据。

## 2 实验平台搭建与隐身性能验证

图6中的系统呈现了宽带透明超表面的电磁性能测试装置、样品实物及光学透光性表征结果,为器件性能的实验验证提供了完整的可视化支撑。其中,图6(a)为基于微波暗室的电磁反射性能测试平台,该平台采用弓形架测量系统以实现宽角度入射条件下的反射谱精准采集。弓形架上集成62个固定接收天线(双列)与1个高精度移动发射天线,可灵活配置收发模式、极化状态(TE/TM极化)等核心测试参数。实验中,透明超表面样品被固定于暗室标准测试位,移动天线作为发射端沿弓形轨迹扫描,固定天线阵列按 $6^\circ$ 间隔分布以接收散射信号,发射天线的机械移动精度达 $1^\circ$ ,确保角度测试数据的可靠性。

图6(b)为所设计透明超表面的实物照片,从图中可直观观察到器件的光学透明特性,透过样品能清晰辨识后方环境细节,印证了其在光学透明场景下的应用潜力。图6(c)为样品在可见光波段(400~760 nm)的透光率测试曲线,采用紫外-可见分光光度计对样品不同区域进行多点测试,结果显示器件的平均透光率达60.32%,满足透明电子器件的实用化要求。上述实验装

置与表征结果,为宽带透明超表面“电磁隐身—光学透明”双重性能的验证提供了扎实的实验依据。

图7展示了样品在入射角分别为 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $50^\circ$ 时的实测归一化吸收率。图中,蓝色虚线表示电磁仿真曲线,橙色实线为实测结果,灰色虚线为90%吸收率参考线。结果表明,在各入射角条件下,样品均呈现出覆盖多个标准波段的宽带高吸收响应,整体满足工程中对超宽带隐身的实际需求。如图7(a)所示,在垂直入射条件下,主吸收带覆盖3.270~40.000 GHz,有效带宽约36.730 GHz,基本符合预设指标。当入射角度增大到 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $50^\circ$ 时,实验结果如图7(b~d)所示,可以看出,样品在较宽的范围内保持90%以上吸收率。从图7的仿真与实测结果对比可知,二者反射率曲线存在一定差异,主要影响因素包括:ITO薄膜方阻的工艺允差、多层结构装配中的层厚偏差( $\pm 0.2$  mm),以及测试环境中的多径反射效应。此外,为便于样品支撑,并兼顾机械强度与低介电损耗,实验选用穿孔亚克力板作为支撑骨架。然而,亚克力板自身的相对介电常数及残余基板面积仍会引入一定误差。这些非理想因素的叠加,使得部分频点的实测吸收率略低于仿真值,但整体隐身性能仍符合设计预期。

总体而言,随着入射角从 $0^\circ$ 增大到 $50^\circ$ ,样品的实测有效吸收带宽始终保持在32 GHz以上,仅表现为低频

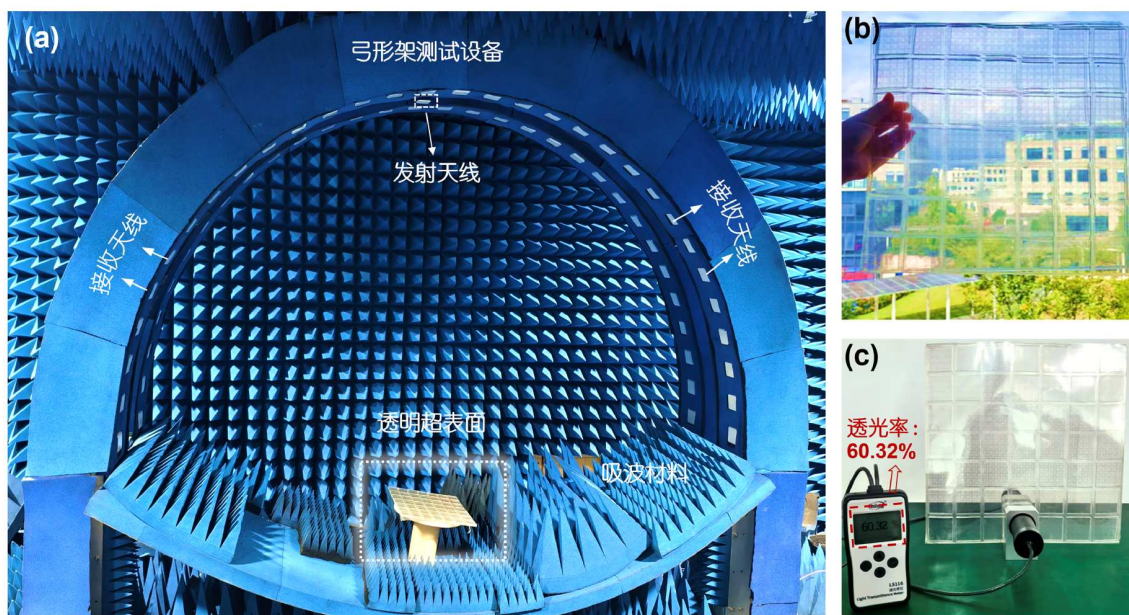


图6 实验装置与测试场景。(a) 弓形架测量平台。(b) 透明超表面样品实物图。(c) 可见光透光率测试结果

Figure 6 Experimental setup and testing scenarios. (a) Arch-shaped measurement platform. (b) Photograph of the transparent metasurface sample. (c) Measured visible light transmittance results

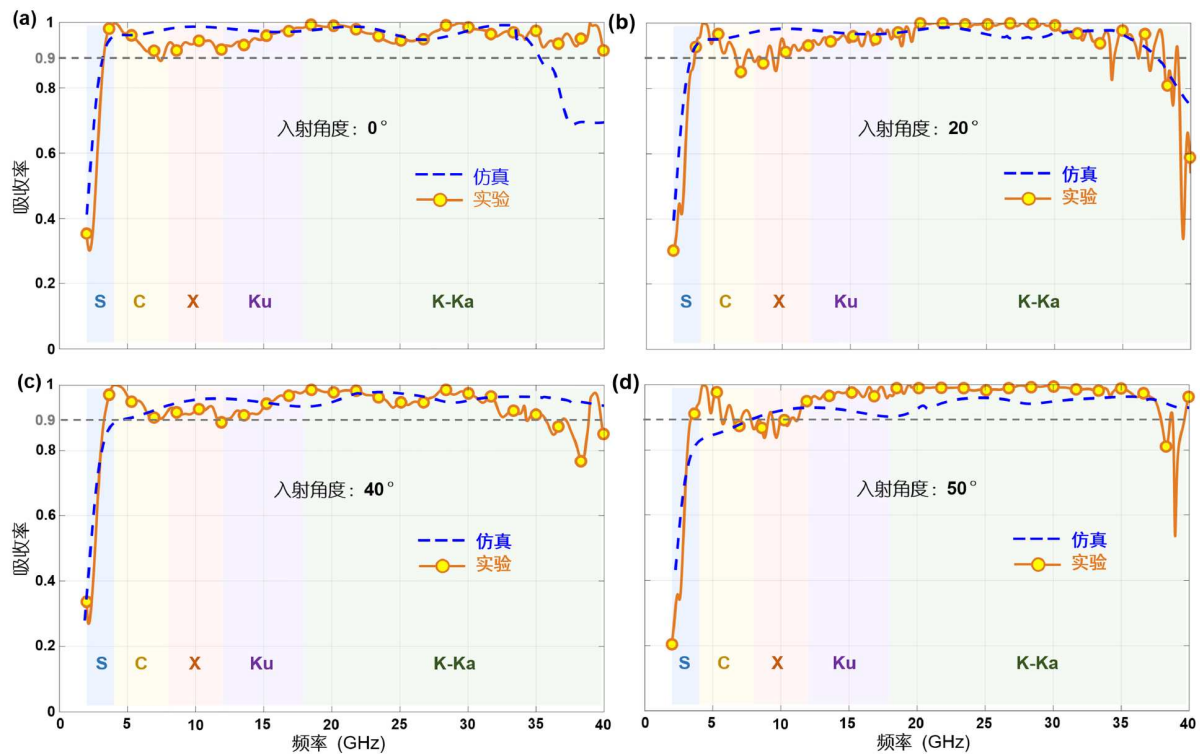


图7 不同入射角下的宽带吸收性能实测结果。(a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 50°

Figure 7 Measured broadband absorption performance under different incident angles. (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 50°

边缘略有抬升和高频段轻微起伏, 未出现明显带宽压缩, 显示出良好的宽角度稳健性。与表1所列技术指标进行对比可以看出, 在0°入射条件下, 实测主吸收带基本覆盖设定的3.5~35 GHz目标工作频段, 仅在极少数窄带频点附近吸收率略有低于门限。进一步对3.5~35 GHz全频段进行功率域平均统计, 得到平均吸收率约为0.93。结合仿真结果分析, 实测平均吸收水平相较优化结果虽存在一定裕量收缩, 但总体上仍满足优化阶段设定的多频段综合指标。带内响应的小幅波动主要来源于ITO方阻与层厚的工艺公差、样品装配平整度偏差以及测试环境中的残余多径反射等非理想因素。实测结果的整体趋势与前向预测及全波仿真结果保持良好一致, 验证了本文所构建的混合智能设计框架在实际制备与测试条件下的可靠性与鲁棒性。

### 3 结论

本研究针对可见光透明与超宽带微波隐身的工程需求, 提出并实现了一种基于ITO的透明吸波隐身超表

面。为解决传统设计方法在高维参数空间中效率低下的问题, 构建了一种深度学习与遗传算法融合的深度遗传算法。该算法利用一维卷积与全连接网络混合构建的前向替代模型, 精准学习了“结构参数—频谱响应”间的复杂非线性映射, 以数据驱动方式大幅减少了耗时的全波电磁仿真调用, 实现了毫秒级的宽带性能快速评估; 进而结合遗传算法的全局搜索能力, 在满足总厚度与角度稳健性等多重约束下, 高效完成了目标导向的逆向设计。实验验证结果表明, 制备的样品在S-Ka波段内形成了连续的低反射吸收带, 在0°、20°、40°和50°等多种入射角下, 实现了覆盖S至Ka波段(3.5~35 GHz)的超宽带吸收, 相对带宽高达163%, 具备优异的宽带性能和角度稳定性。同时, 样品在可见光波段的平均透过率超过60%, 具备了良好的光学透明性。这项作为隐身视窗、传感器保护窗、电磁兼容窗口、隐身雷达罩等兼具“光学透明”与超宽带隐身需求的应用场景, 提供了一条高效且可复用的工程化实现路径。

## 参考文献

- 1 Orasugh J T, Ray S S. Functional and structural facts of effective electromagnetic interference shielding materials: a review. *ACS Omega*, 2023, 8: 8134–8158
- 2 Zecchi S, Cristoforo G, Bartoli M, et al. A comprehensive review of electromagnetic interference shielding composite materials. *Micromachines*, 2024, 15: 187
- 3 Fante R L, McCormack M T. Reflection properties of the Salisbury screen. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1988, 36: 1443–1454
- 4 Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2000, 48: 1230–1234
- 5 Fano R M. Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances. *J Franklin Institute*, 1950, 249: 57–83
- 6 Kerr A R. Some fundamental and practical limits on broadband matching to capacitive devices, and the implications for SIS mixer design. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2002, 43: 2–13
- 7 Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 207402
- 8 Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications. *Rep Prog Phys*, 2016, 79: 076401
- 9 Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible. *Phys Rep*, 2016, 634: 1–72
- 10 Zhu R, Liu D, Lu H, et al. High-efficiency Pancharatnam–Berry metasurface-based surface plasma coupler. *Adv Photonics Res*, 2024, 5: 2300315
- 11 Liu C, Li Y, Huang F, et al. Dual non-diffractive beam generation via spin-and-frequency multiplexed all-dielectric metasurfaces. *PIER*, 2024, 181: 21–33
- 12 Tian J, Cao W. Reconfigurable flexible metasurfaces: from fundamentals towards biomedical applications. *PhotonIX*, 2024, 5: 2
- 13 Munk B A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. New York: Wiley, 2005
- 14 Holloway C L, Kuester E F. Generalized sheet transition conditions for a metascreen—A fishnet metasurface. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, 66: 2414–2427
- 15 Zheng B, Lu H, Qian C, et al. Revealing the transformation invariance of full-parameter omnidirectional invisibility cloaks. *Electromag Sci*, 2023, 1: 1–7
- 16 Wang D, Cui X, Liu D, et al. Multi-characteristic integrated ultra-wideband frequency selective rasorber. *PIER*, 2024, 179: 49–59
- 17 He Z, Wang H, Cui Z, et al. Reflectionless refraction via one-dimensional ghost polaritons in planar junctions of hyperbolic metasurfaces. *PIER*, 2024, 181: 1–8
- 18 Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater*, 2014, 13: 139–150
- 19 Dorrah A H, Capasso F. Tunable structured light with flat optics. *Science*, 2022, 376: eabi6860
- 20 Zhou W, Zhu S, Zhang Z, et al. Time-varying metasurface driven broadband radar jamming and deceptions. *Opt Express*, 2024, 32: 17911–17921
- 21 Sun S, Gou Y, Cui T J, et al. High-security nondeterministic encryption communication based on spin-space-frequency multiplexing metasurface. *PhotonIX*, 2024, 5: 38
- 22 Patel J, Sharpe R K, Quijada M A, et al. A review of transparent conducting films (TCFs): prospective ITO and AZO deposition methods and applications. *Nanomaterials*, 2024, 14: 2013
- 23 Kim M J. A study on optimal indium tin oxide thickness as transparent conductive electrodes for near-ultraviolet light-emitting diodes. *Materials*, 2023, 16: 4718
- 24 Zhou Z, Chen K, Zhao J, et al. Metasurface Salisbury screen: achieving ultra-wideband microwave absorption. *Opt Express*, 2017, 25: 30241–30252
- 25 Zhu P, Lu H, Han H, et al. An optically transparent transmissive metasurface for user-defined broadband electromagnetic illusion generation. *Small Struct*, 2025, 6: e202500351
- 26 Huang M, Zheng B, Li R, et al. Evolutionary games-assisted synchronization metasurface for simultaneous multisource invisibility cloaking. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2401909
- 27 Wen J, Ren Q, Peng R, et al. Ultrabroadband saline-based metamaterial absorber with near theoretical absorption bandwidth limit. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, 21: 1388–1392
- 28 Liu D, Tan Y, Khoram E, et al. Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures. *ACS Photonics*, 2018, 5: 1365–1369
- 29 Zhang J, Li W, Kang Y, et al. Design of absorption-scattering integrated multi-layer metasurfaces for large-angle anomalous reflection. *PIER*, 2025, 183: 21–32
- 30 Lu H, Luo C, Pei Z, et al. FlexSARcloak: a flexible SAR cloak driven by task-oriented learning. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 17: 2139–2147
- 31 Qiu H, Fang L, Xi R, et al. Wideband high gain lens antenna based on deep learning assisted near-zero refractive index metamaterial. *PIER*, 2025, 182: 13–25
- 32 Ma W, Liu Z, Kudyshev Z A, et al. Deep learning for the design of photonic structures. *Nat Photonics*, 2021, 15: 77–90

- 33 Ge J, Zhang C, Zhang Y, et al. Transparent bilayer ITO metasurface with bidirectional and coherently controlled microwave absorption. [Adv Opt Mater](#), 2023, 11: 2301268
- 34 Lu H, Zhao J, Zhu P, et al. Neural network-assisted metasurface design for broadband remote invisibility. [Adv Funct Mater](#), 2025, 35: 2506085
- 35 Wang X, Xi R, Hou X, et al. Spatiotemporal encoding metasurface based on BPSO-GA optimization method. [PIER](#), 2025, 183: 67–79
- 36 Lu H, Zhao J, Zheng B, et al. Eye accommodation-inspired neuro-metasurface focusing. [Nat Commun](#), 2023, 14: 3301
- 37 Zhao J, Zhu P, Wen Z, et al. Adaptive transparent cloaking tunnel enabled by Meta-Reinforcement-Learning Metasurfaces. [Photonix](#), 2026, 7: 2
- 38 Kwon H, D’Aguanno G, Alù A. Optically transparent, broadband and omnidirectional microwave absorber based on graphene-SiO<sub>2</sub> metasurfaces. [Opt Express](#), 2024, 32: 41974–41983

Summary for “深度遗传算法驱动的超宽带透明隐身超表面设计”

# Deep genetic algorithm-driven design of ultra-wideband transparent stealth metasurfaces

Jiwei Zhao, Peixuan Zhu, Huan Lu<sup>\*</sup>, Bin Zheng & Hongsheng Chen<sup>\*</sup>

Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Electromagnetic Control and Advanced Electronic Integration, College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

<sup>\*</sup> Corresponding authors, E-mail: [luhuan123@zju.edu.cn](mailto:luhuan123@zju.edu.cn); [hansomchen@zju.edu.cn](mailto:hansomchen@zju.edu.cn)

Electromagnetic (EM) invisibility achieved via reflection and scattering suppression is becoming a key enabling function for optically transparent platforms, including transparent electronics, vehicle glazing, and smart-building windows. Unlike conventional low-observability coatings, transparent EM-stealth surfaces must satisfy a tightly coupled set of requirements: broadband low reflection over microwave-to-millimeter-wave frequency bands; a thin, lightweight form factor suitable for integration; high visible transmittance; and stable performance under oblique incidence and varying polarizations. Meeting these requirements simultaneously remains difficult. Traditional microwave absorbers are typically optically opaque, whereas transparent absorber designs must still contend with the thickness–bandwidth trade-off and the strong coupling among multilayer spacing, sheet resistance, and geometry. As a result, the design space is high-dimensional and highly nonconvex; brute-force sweeps or trial-and-error full-wave optimization quickly become impractical when wideband, wide-angle, and optical constraints are imposed simultaneously.

To overcome these barriers, we propose an intelligent inverse-design framework that integrates deep learning with a genetic algorithm (GA), termed the deep genetic algorithm (DGA). The central strategy is to accelerate optimization without sacrificing physical fidelity by coupling (i) a data-driven forward surrogate model that rapidly predicts broadband EM responses with (ii) a global evolutionary search that can enforce multiple constraints and navigate complex, multimodal landscapes. We first generate a large-scale dataset through automated full-wave simulations (CST) driven by external scripting, covering key design degrees of freedom for transparent multilayer absorbers, including unit-cell periodicity, multilayer air-gap thicknesses, ring-pattern feature parameters, and the sheet resistances of multiple indium tin oxide (ITO) layers. A forward-prediction network (convolutional feature extraction followed by regression layers) is then trained to learn the nonlinear “structure-to-spectrum” mapping and to output the multi-frequency reflection response with millisecond-level inference latency. This surrogate does not replace physics; rather, it replaces repeated full-wave evaluations inside the optimization loop, thereby enabling efficient exploration of the design space.

On this basis, DGA performs constrained inverse design using GA operations (selection, crossover, mutation, and elitism). The objective formulation targets ultra-wideband low reflection (equivalently, high absorption for a backed absorber with negligible transmission) while enforcing practical fabrication constraints, especially total thickness and angular robustness. To avoid designs that merely satisfy a narrowband criterion, we combine pointwise broadband reflection constraints with band-wise statistical constraints across standard sub-bands, which encourages consistently low reflection across the full target spectrum and improves robustness under oblique incidence.

Using DGA, we design and fabricate an ITO-based, optically transparent absorbing metasurface composed of patterned ITO/PET films separated by air gaps and backed by a low-sheet-resistance ITO reflective layer. The optimized architecture employs three patterned ITO layers with differentiated sheet resistances and geometries to create distributed, coupled resonances that overlap across the frequency band, while the air gaps tune interlayer coupling and phase accumulation to realize broadband impedance matching. The unit cell exhibits rotational symmetry, supporting polarization-insensitive responses under both normal and oblique incidence.

Experiments validate both the design methodology and the device performance. The fabricated sample maintains an average visible transmittance above 60%, confirming practical optical transparency. EM measurements demonstrate ultra-wideband absorption from 3.5 to 35 GHz (upper S band to Ka band) with a fractional bandwidth of 163% under the  $\geq 90\%$  absorption criterion, while maintaining stable, polarization-insensitive performance over incident angles from  $0^\circ$  to  $50^\circ$ . Minor deviations between simulation and measurement are attributable to manufacturing tolerances in ITO sheet resistance, assembly-induced spacing errors, and residual perturbations from the measurement support structure.

Overall, DGA offers a scalable and practical pathway for designing optically transparent, ultra-wideband, and wide-angle EM-stealth metasurfaces under realistic constraints, and the demonstrated prototype supports integrated “optical transparency–EM stealth” functional surfaces for transparent electronics protection, stealth/EMC windows, and building-integrated EMC applications.

**deep genetic algorithm, transparent metasurface, ultra-wideband invisibility, deep learning, genetic algorithm**

doi: [10.1360/CSB-2025-5843](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5843)