



基于克里金代理模型的雷达/红外兼容隐身结构优化

吕美琴¹, 顾鹏飞^{2*}, 丁大志²

1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094

2. 南京理工大学微电子学院, 南京 210094

* 联系人, E-mail: pengfeigu@njjust.edu.cn

2025-11-29 收稿, 2026-03-01 修回, 2026-03-02 接受, 2026-03-03 网络版发表

国家自然科学基金(62431012, 62271256)和国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2024YFE0107800)资助

摘要 针对现代多频谱兼容隐身技术中多设计参数与多性能目标带来的复杂电磁优化挑战, 本文基于在线模型的机器学习辅助优化方法来实现超表面隐身结构的高效设计. 首先, 通过引入可靠的可变保真度模型进行初始采样, 有效降低全波仿真带来的计算成本. 在代理模型训练过程中, 自适应地选择训练策略来更新模型, 缓解因设计维数增加而引起的训练时间增长问题. 此外, 结合全局多目标优化的混合策略, 进一步提升算法在复杂解空间中的收敛性能. 基于上述方法, 我们成功设计并制备出一种雷达/红外兼容隐身的复合超表面. 该结构采用红外低发射层与雷达吸波层一体化架构, 通过在功能层表面印刷高阻碳浆图案并优化其尺寸, 在2.8~20 GHz频带内实现了高于90%的宽带高效吸收. 同时, 通过提高表面金属贴片占空比, 将结构在红外波段的发射率控制在约0.25的低水平. 实验结果表明, 所设计结构兼具优异的宽频雷达吸波性能与低红外发射率特征. 本研究验证了所提优化方法在雷达/红外兼容隐身设计中的高效性, 大幅缩短了优化训练时间, 为多频谱兼容隐身材料的设计提供了有效解决方案.

关键词 机器学习, 多目标优化, 雷达-红外兼容隐身, 超表面

随着现代信息技术的快速发展, 战场侦测手段已由单一模式向雷达、红外及可见光等多频谱协同探测方向演进, 对军事目标的隐身能力提出了更高要求. 在单一波段隐身技术日益成熟的背景下, 如何在复杂电磁环境中实现多频谱兼容隐身, 尤其是雷达与红外兼容隐身, 已成为当前研究的重点与难点^[1~3]. 雷达与红外隐身技术因探测机理不同, 对材料电磁特性的要求存在本质差异. 雷达探测属于主动探测方式, 依赖目标反射的回波信号进行识别, 因此雷达隐身要求材料具备高吸收、低反射特性, 通常通过结构设计及吸波材料实现. 而红外探测为被动接收目标自身热辐射, 其隐身关键在于抑制红外信号发射, 要求材料具有低发射率与高反射特性. 这种物理机制上的内在矛盾严重制约了雷达-红外兼容隐身材料的开发与性能优化.

为突破雷达与红外兼容隐身的性能瓶颈, 现有研究主要从材料与结构两个层面展开. 在材料层面, 复合涂料技术通过将氧化锌、三氧化二锑等半导体填料与树脂基体复合, 尝试通过调控填料粒径与涂层厚度实现电磁特性的平衡^[4,5]. 然而, 由于雷达波吸收与红外低发射在物理机制上存在本质矛盾, 此类方法在实现宽频兼容方面仍面临显著局限. 在结构设计层面, 超材料因其对电磁波的人为调控能力而展现出独特优势, 其可以通过亚波长结构设计在有限厚度内实现雷达与红外的协同调控. 屈绍波团队^[6]开发的光学透明超材料实现在横电波(transverse electric wave, TE)极化下6.28~12.29 GHz、横磁波(transverse magnetic wave, TM)极化下7.19~15.26 GHz的吸波率高于90%, 同时在3~14 μm 波段保持0.3的红外发射率; 段玉平团队^[7]采用铝

引用格式: 吕美琴, 顾鹏飞, 丁大志. 基于克里金代理模型的雷达/红外兼容隐身结构优化. 科学通报, 2026, 71: 6963–6971

Lv M, Gu P, Ding D. Optimization for radar-infrared compatible stealth structures with a kriging surrogate model (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 6963–6971, doi: 10.1360/CSB-2025-5846

箔红外隐身层与羰基铁粉雷达隐身层的叠层设计,在S波段(2.12~3.5 GHz)实现兼容隐身,红外发射率低于0.3;刘东青等人^[8]将Ag/Ge膜层与频率选择表面结合,实现在3~5 μm 和8~14 μm 波段的低发射率与X/Ku波段的高吸收特性。

现有研究多采用功能层分离的设计策略,虽在参数调控上较为灵活,但面临结构参数维数高以及电磁耦合等问题^[9~12]。传统依赖经验的优化方法难以在有限仿真成本下实现性能的全局最优。近年来,基于机器学习辅助优化的方法为复杂电磁器件的自动化设计提供了新途径。该类方法通过构建代理模型替代部分高成本全波仿真,有效降低了优化过程中的计算成本^[13~20]。传统机器学习辅助优化方法在处理中尺度多目标问题时,仍存在采样效率低、模型训练开销大以及收敛速度不足等问题。为解决上述问题,变保真度建模方法被提出,通过融合少量高保真数据与大量低保真数据,在保证模型精度的同时提升采样效率。此外,设计空间降维、多阶段优化框架以及结合全局探索与局部挖掘的混合策略,也被广泛应用于高维目标空间与复杂参数耦合带来的优化难题。在众多机器学习算法中,高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)算法能够提供预测不确定性和预筛选策略,广泛应用于在线代理模型。在线更新代理模型的优化框架中,每次样本更新都需要重新训练代理模型,而训练克里金模型的计算复杂度随着样本数量急剧增加,这使得高斯过程回归算法在应对高维数据时会遇到可扩展性瓶颈。

针对现有不足,本文提出一种高效的机器学习辅助混合优化框架,采用混合的高保真数据和低保真数据以缩短采样时间。在代理模型更新过程中,算法自适应选择重新训练机制,融合变保真度采样与混合优化策略,在控制计算资源消耗的同时有效提升模型更新效率与收敛性能。基于该方法实现的雷达-红外兼容隐身超表面在2.8~20 GHz频段内实现10 dB的雷达散射截面(radar cross section, RCS)缩减,并在3~14 μm 红外波段将平均发射率控制在0.25,验证了该方法在多频谱隐身协同设计中的可行性与效率,为拓宽兼容隐身带宽提供了新的解决方案。

1 兼容隐身结构设计及代理模型构建

1.1 雷达/红外兼容隐身结构设计

根据斯特藩-玻尔兹曼定律,红外隐身主要通过控

制目标表面发射率或温度以实现辐射抑制。由于目标在典型大气窗口(3~5 μm 与8~14 μm)内的热辐射通常强于背景,降低其红外发射率成为关键手段。依据基尔霍夫定律,红外隐身要求材料具有低吸收率,而雷达隐身则需高吸收率以增强电磁波耗散,二者在物理机制上存在本质矛盾,超材料为实现雷达/红外兼容隐身提供了可行路径。频率选择表面(frequency selective surface, FSS)由亚波长金属单元周期排布构成,其微米级间隙结构允许特定频段的电磁波透射,结合底层吸波材料可实现微波频段的高效吸收。同时,金属FSS在3~14 μm 红外波段具有本征低发射特性。基于不透明物体的基尔霍夫定律,FSS的等效红外发射率可以近似计算为:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_m f_m + \varepsilon_d f_d = \varepsilon_d - (\varepsilon_d - \varepsilon_m) f_m, \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_{\text{total}}$ 为FSS的等效发射率,和 ε_d 分别为光滑金属表面和介质基底的红外发射率, f_m 为金属贴片的面积占空比, f_d 为介质基底的面积占空比。FSS的红外发射率由金属单元的红外发射率、介质基底的红外发射率以及金属贴片的面积占空比共同决定。一般情况下,FSS通常采用金属材料制备,以获得较介质材料更低的红外发射率。根据式(1),金属占空比的增大可有效降低FSS的等效发射率。图1(a)展示了不同FSS周期单元在2~40 GHz频段内的透波特性,可观察到随着金属占空比提高,高频微波透射率逐渐下降,表明其在提升红外隐身性能的同时,会对雷达波段的电磁响应产生制约。因此,需通过合理的结构参数设计,在保持红外层的较高雷达透波性能的前提下兼顾低红外发射特性。

为实现雷达与红外的兼容隐身,本文将频率选择表面与微波吸收材料相结合,采用层级结构进行设计。其设计原理在于融合FSS的红外调控能力与吸波材料的宽带微波损耗机制,通过多层间的多次反射与透射效应引发电磁波相干相消,从而在拓宽吸收带宽的同时增强能量耗散。此外,通过优化顶层金属图案的占空比进一步提升表面对红外辐射的反射能力,降低整体红外发射率。设计的层级结构如图1(b)所示,该结构顶层为红外隐身层(infrared shielding layer, IRSL),采用金属型频率选择表面(metal frequency selective surface, MFSS)结构,将其印刷在0.127 mm厚的Rogers 5880($\varepsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$)介质基板上,以实现在红外波段的低发射特性;雷达吸波层由四层阻抗表面与金属地板共同构成,介质基板采用厚度为0.1 mm的FR-4

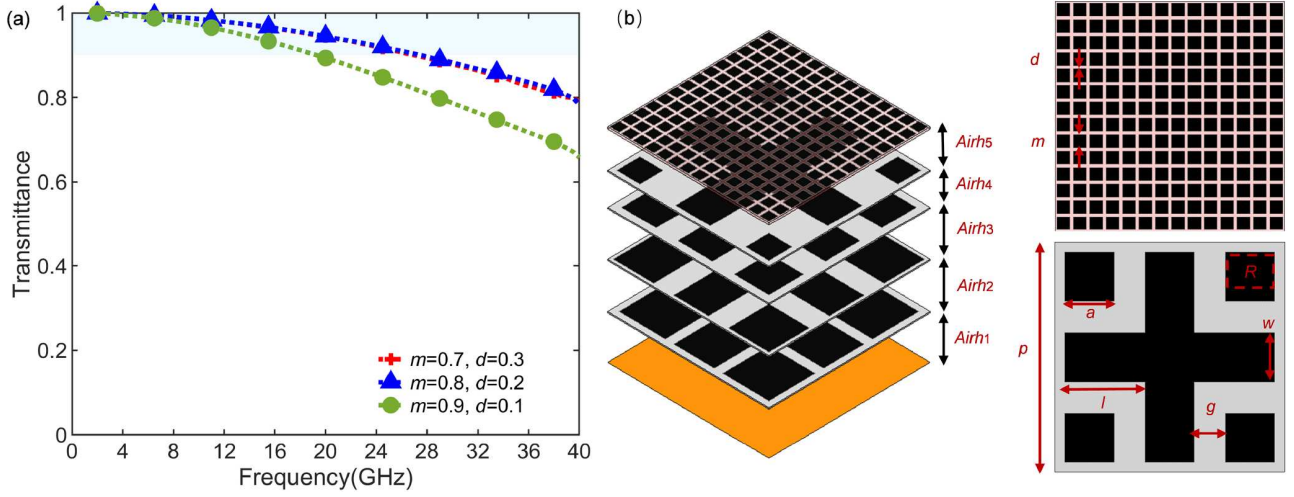


图1 (网络版彩色) (a) 不同周期的FSS结构对雷达波透过率的影响. (b) 雷达/红外兼容隐身单元结构示意图

Figure 1 (Color online) (a) The effect of FSS structures with different periods on microwave transmissivity. (b) Schematic diagram of a radar/infrared compatible stealth unit structure

($\epsilon_r = 4.4, \tan\delta = 0.02$), 每层图案的高阻碳浆的阻值经优化后确定.

1.2 克里金代理模型的构建

克里金(Kriging)代理模型是一种以变异函数理论为核心的地统计学方法,其本质是通过构建最优线性无偏估计器实现对空间依赖型变量的高精度预测.该方法假设样本数据在参数空间中连续分布,区域内变量之间存在空间相关性.通过解析样本数据的变异函数结构特征,克里金模型能够利用已知观测点的空间分布信息,对未知位置的变量值进行加权插值计算,从而对复杂非线性响应实现高精度插值预测.相较于径向基函数、响应面等传统代理模型,克里金方法在小样本条件下仍表现出优越的预测性能.一方面,模型通过可学习的空间相关核函数有效捕捉多参数间的耦合机制;另一方面,克里金不仅输出预测值,还能提供预测方差.

优化过程中使用协同克里金(co-Kriging)代理模型替代目标函数,模型结合高时间成本的采样数据和低成本的采样数据,能够保证获取的采样数据在精度范围内节约仿真时间.

本研究基于克里金代理模型进行优化,其流程如图2所示.首先,克里金代理模型的条件初始化与初始数据库的获取需明确设计变量、优化规范以及搜索空间范围.其次,使用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)在搜索空间内抽取 N_{low} 个数据点,将这些数据点组成的集合记为XL.用低保真模型UL对XL

中的每个数据点进行模拟计算,得到模拟值集合YL,即 $YL = UL(XL)$.从XL中选取NH个样本点,将这NH个样本点组成的集合记为XH.使用高保真模型UH对XH中的每个样本点进行模拟计算,得到高保真模拟结果集合YH,即 $YH = UH(XH)$,创建协同克里金模型并进行优化,得到新样本后评估置信区域的比值.当新样本超出克里金预测的置信区域时^[20],对低保真代理模型的超参数进行重新训练.从低保真代理模型中选取参数组合中最优的3组,通过高保真电磁模型进行仿真,若其中有一组参数组合的仿真结果满足预设条件,则退出循环;否则,更新数据集重新进行训练.

2 优化过程与结果分析

2.1 基于代理模型的优化设计

基于本文提出的雷达/红外兼容隐身超表面单元模型,我们将2~40 GHz设置为工作频段,通过CST Microwave Studio获取高保真与低保真仿真响应曲线构建数据库,以验证所提优化方法的有效性.该超表面单元结构如图1(b)所示,设置顶层红外隐身层中金属贴片的周期为0.9 mm,间隙为0.1 mm.雷达/红外兼容隐身单元在CST中的仿真耗时约15分钟,而仅雷达吸波层的仿真耗时约为5分钟.为便于代理模型快速构建,本文首先针对雷达吸波层开展优化设计.该吸波层共包含四层结构,每层设计变量分别为几何参数 a_i, w_i, g_i, l_i ($i=1,2,3,4$),以及空气层厚度 $Airh_i$ 和碳浆图案

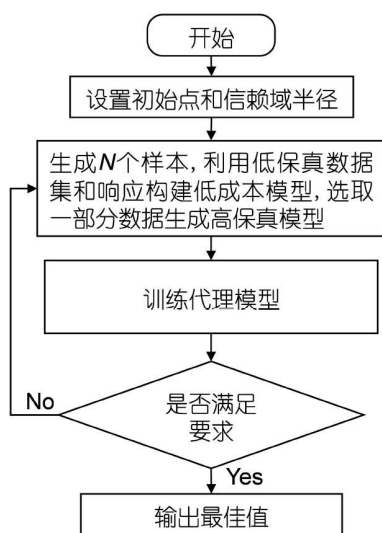


图2 算法的优化设计流程框图

Figure 2 Flowchart of the proposed optimization algorithm

阻值 R_i , 共计24个设计变量. 各变量的取值范围分别设置为: $a_i \in [3.5, 4.5]$, $w_i \in [3.5, 4.5]$, $g_i \in [0.2, 4]$, $l_i \in [11, 13.8]$, $Airh_i \in [2, 4.6]$, $R_i \in [40, 240]$. 优化目标设置为在2~40 GHz频带内反射系数 $|S_{11}|$ 低于-10 dB, 并在满足该性能前提下尽可能降低结构总厚度. 高保真 (high fidelity, HF) 仿真模型采用加密剖分策略, 重点捕捉谐振特性, 设置最大迭代次数为30, Threshold收敛阈值为0.01; 低保真 (low fidelity, LF) 仿真模型则减少自动加密网格, 最大迭代次数为5, Threshold收敛阈值为0.02. 典型HF与LF仿真曲线如图3所示, 其单次仿真时间分别约为5分钟与2分钟. 初始采样中将LF样本数NL设为120, HF样本数NH设为24. 在完成雷达吸波层的代理模型优化后, 进一步将红外隐身层叠加于结构顶层. 在该阶段优化中, 仅对吸波层与红外层间的空气层厚度进行调优, 从而显著提升整体优化效率.

2.2 计算结果与实验验证

基于上述代理模型优化设计后, 雷达/红外兼容隐身单元结构各个参数为mm, $[w_1, w_2, w_3, w_4] = [3, 3, 3, 3.5]$ mm, $[g_1, g_2, g_3, g_4] = [3.5, 4.5, 4.5, 4.5]$ mm, $[l_1, l_2, l_3, l_4] = [13.2, 12.8, 13.5, 13]$ mm, $[Airh_1, Airh_2, Airh_3, Airh_4] = [3.5, 3.7, 3.7, 2.6]$ mm, $[R_1, R_2, R_3, R_4] = [60, 80, 160, 240]$ Ω/sq . 表1给出了所提算法与CST中的两种不同内置优化器的性能比较, 可以看出所提算法能够获得更宽的带宽、更高的最大吸收率以及更少的

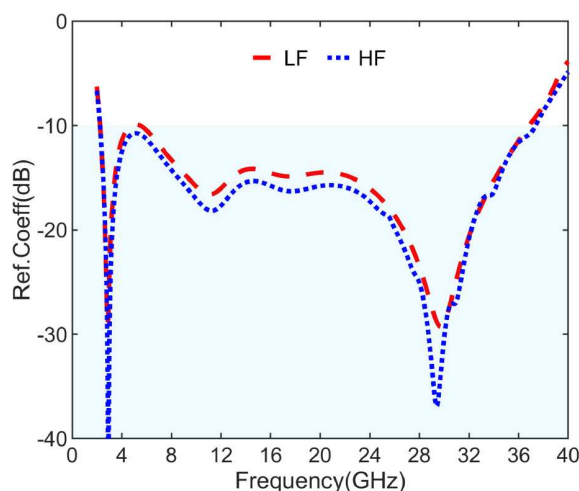


图3 (网络版彩色) 低保真度结果和高保真度结果的对比图

Figure 3 (Color online) Comparison of low-fidelity and high-fidelity results

表1 不同算法优化的雷达吸波结构性能对比结果

Table 1 Comparison results of the performance for radar absorbing structures optimized with different algorithms

算法	吸波频段(GHz)	最大吸波率(%)	仿真耗时(h)
遗传算法	2.9~36.5	94.15	66
粒子群算法	2.7~38.2	96.25	52
本文算法	2.2~37.5	99.99	11

仿真时间, 因此co-Kriging方法具有快速收敛和全局最优设计的能力. 图4(a)~(d)分别展示了基于代理模型优化的雷达吸波结构仿真响应曲线, 图4(e)~(h)为加载IRSL后的雷达/红外兼容结构的仿真响应曲线. 图4(a)~(d)分别给出了雷达吸波结构在TE与TM极化波以不同入射角照射下的吸收率和反射系数的变化. 仿真结果表明, 该结构在垂直入射时两种极化下的吸收性能基本一致, 能实现2.2~37.5 GHz频带内的有效吸波; 随着入射角增大, 吸收带整体向高频偏移, 吸收率有所下降. 在TE极化下, 入射角为30°时, 6 GHz处吸收性能略有恶化, 但整体吸收率仍高于85%; 在TM极化下, 即使入射角增至45°, 带内吸收率仍可保持在90%以上. 图4(e)~(h)进一步展示了加载IRSL后结构在不同极化与入射角下的吸收响应. 对比加载前后吸波系数, 可见加载IRSL之后吸波带宽变窄, 其90%吸波率的频带范围为2.1~22.5 GHz, 但低频波段的性能得到改善. 为分析加载IRSL后在低频波段的吸收增强机理, 我们对比了有无IRSL的结构在12.5 GHz时的表面电流分布, 如图5所示. 两种结构在12.5 GHz的电流分布均主要集中于

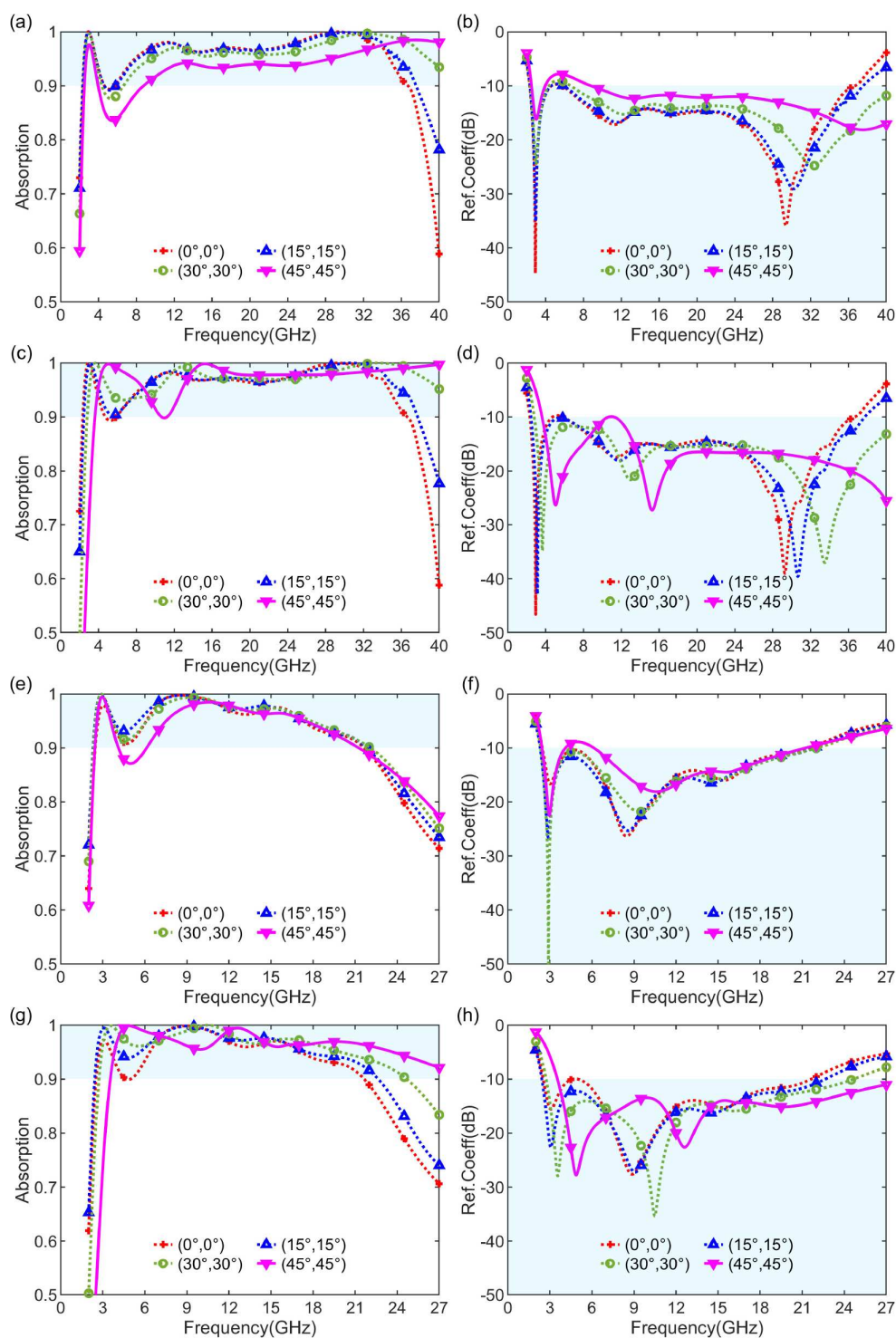


图 4 (网络版彩色)雷达吸波结构加载红外模块前后在不同入射角和极化波下的性能对比。(a, b) 雷达吸波结构的TE极化反射系数与吸波率。(c, d) 雷达吸波结构的TM极化反射系数与吸波率。(e, f) 加载红外模块后的TE极化反射系数与吸波率。(g, h) 加载红外模块后的TM极化反射系数与吸波率

Figure 4 (Color online) Performance comparison of the radar absorbing structure before and after integrating the infrared module under different incident angles and polarizations. (a, b) Reflection coefficient and absorption rate for TE polarization of the basic structure. (c, d) Reflection coefficient and absorption rate for TM polarization of the basic structure. (e, f) Reflection coefficient and absorption rate for TE polarization after integrating the infrared module. (g, h) Reflection coefficient and absorption rate for TM polarization after integrating the infrared module

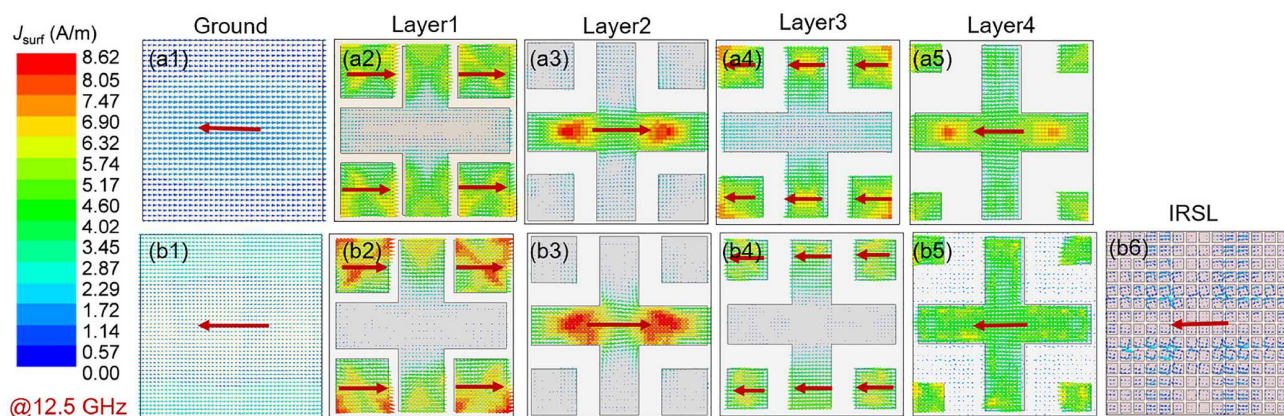


图5 (网络版彩色)加载IRSL前后两种结构在12.5 GHz的表面电流分布对比。(a1)~(a5)分别为未加载IRSL的雷达吸波结构各层的电流分布。(b1)~(b5)为加载IRSL后的雷达/红外兼容隐身结构各层的电流分布

Figure 5 (Color online) Comparison of surface current distributions at 12.5 GHz before and after loading the IRSL. (a1)~(a5) show the current distributions on each layer of the radar absorbing structure without the IRSL, whereas (b1)~(b5) present those of the radar/infrared compatible stealth structure with the IRSL

Layer1和Layer2, 且其方向均与金属地板反向, 可形成等效闭合环路, 表明两层谐振面均与金属地板激发了磁谐振。此外, 加载IRSL后的结构在Layer1和Layer2上的电流强度显著增强, 这意味着磁谐振更为强烈。因此, IRSL的引入有效增强了Layer1和Layer2与金属地板之间的磁谐振耦合强度。这种增强的耦合作用额外增加了电磁能量的损耗, 改善了该频点的吸波性能。经计算, 红外层金属占空比为81%, 其在8~14 μm 波段的等效红外发射率理论值约为0.237, 表明结构在保持宽带吸波性能的同时具备良好的红外隐身能力。

为验证优化结果, 图6(a)和(b)分别为280 mm $\times$ 280 mm的雷达吸波结构样件和雷达/红外兼容隐身结构样件。样品采用激光刻蚀与丝网印刷工艺在FR4基板上制备高阻碳浆结构, 每层结构方阻值的调控主要通过系统调节高阻碳浆中导电填料(石墨烯)的体积分数来实现。基于同一基础浆料(主要成分为石墨烯、环氧树脂、助剂与溶剂, 由深圳市盛田丰科技有限公司提供), 调整石墨烯与黏合剂的比例, 制备出四种不同配方的浆料, 分别对应目标方阻值60 Ω/sq 、80 Ω/sq 、160 Ω/sq 和240 Ω/sq 。所有浆料均采用相同的丝网印刷工艺(180目丝网, 180 $^{\circ}\text{C}$ 固化20分钟)依次制备在玻纤基板上, 固化后膜厚为10~15 μm 。使用四探针测试仪(SX1944型数字式四探针测试计, 苏州市百神科技有限公司)对各层膜进行多点测量, 实测方阻值与设计值的偏差稳定在 $\pm 10\%$ (若稳定实验可控制在5%)以内。该误差主要来源于印刷膜厚均匀性、固化过程微小波动及测试系统误

差, 在常规厚膜工艺允许范围内。吸波性能测试在微波暗室中进行, 采用Agilent N5224A矢量网络分析仪与六对线极化喇叭天线(频段划分为2~4 GHz、4~8 GHz、8~12 GHz、12~18 GHz、18~26.5 GHz、26.5~40 GHz), 将金属板作为RCS测量基准。图6(c)给出了雷达吸波结构在2~40 GHz频段内仿真与实测的RCS缩减结果对比图, 在图6(d)中给出了雷达/红外兼容隐身结构在2~27 GHz频段内仿真与实测的RCS缩减结果对比图。从图中可以看到雷达吸波结构和雷达/红外兼容隐身结构在2.2~37.5 GHz和2.8~22.5 GHz分别实现 ≥ 10 dB的RCS缩减, 但是两者在低频波段(3~6 GHz)的RCS实测缩减值比仿真结果高约1~3.5 dB, 能实现10 dB的RCS缩减的高频截止频点分别为33.7 GHz和20 GHz, 未能达到仿真所呈现的37.5 GHz和22.5 GHz。仿真谐振点与实际测试存在频偏和低频RCS缩减性能下降, 可能是因为制备过程中阻抗层方阻的实际值与仿真设定值之间存在 $\pm 10\%$ 的工艺偏差; 多层结构层间贴合与介电厚度在实测中的微小非均匀性; 作为支撑结构的泡沫厚度加工有误; 喇叭搭建角度有偏差。图6(e)给出了表层红外模块在2~40 GHz频段内的微波透射率测试结果, 其在2~20 GHz范围内具有高于90%的微波透射率, 允许该波段的微波高效透过且不影响雷达吸波结构。在高于20 GHz的频段, 其透射率显著下降, 从而限制了整个雷达/红外兼容隐身结构在高频端的吸收效能。上述分析的误差在可接受范围内, 且不影响本文所提方法在宽频吸波性能与红外低发射率性能的有效性验证。采用

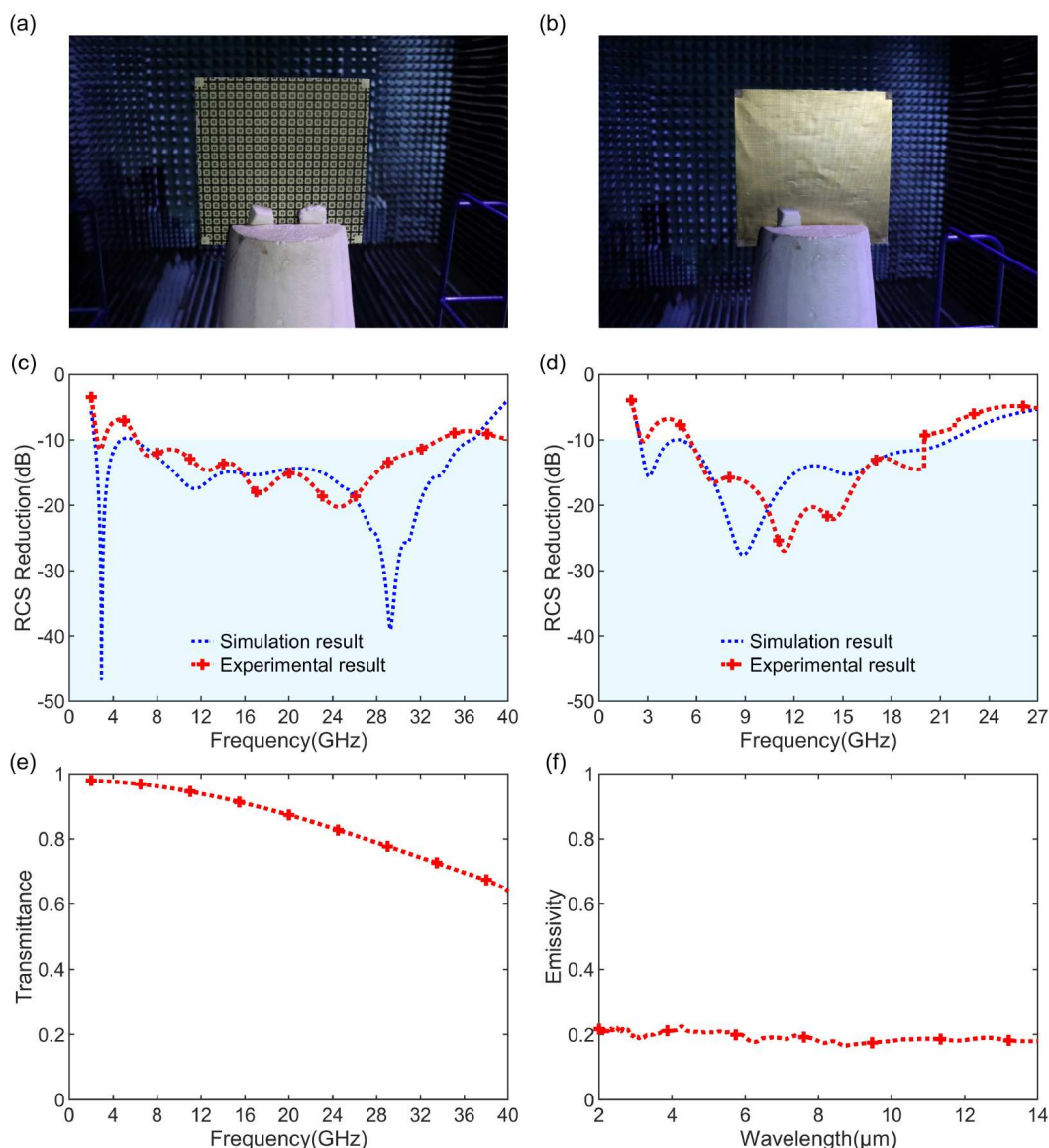


图6 (网络版彩色)雷达吸波结构加载红外模块前后的样件与性能测试结果。(a) 雷达吸波样件实物图。(b) 加载红外模块后的雷达/红外兼容隐身样件实物图。(c) 雷达吸波样件RCS缩减值的实测与仿真结果对比。(d) 雷达/红外兼容隐身样件RCS缩减值的实测与仿真结果对比。(e) IRSL模块的微波透射率测试结果。(f) 雷达/红外兼容隐身样件的红外发射率测试结果

Figure 6 (Color online) Sample photographs and measurement results of the radar absorbing structure before and after integrating the infrared module. (a) Photograph of the radar absorbing sample. (b) Photograph of the radar-infrared compatible stealth sample with the integrated infrared module. (c) Comparison of measured and simulated RCS reduction of the radar absorbing sample. (d) Comparison of measured and simulated RCS reduction of the radar-infrared compatible stealth sample. (e) Measured microwave transmittance of the IRSL module. (f) Measured the infrared emissivity of the radar-infrared compatible stealth sample

傅里叶变换红外光谱仪(布鲁克VERTEX 70)测量雷达/红外兼容隐身结构在3~14 μm 波段的红外发射率。在结构上选取五个不同位置进行测量,结果取平均以保障数据有效性,测试结果如图6(f)所示,所设计结构的平均红外发射率约0.25,与理论计算值有较好的一致性,证实其具备良好的红外隐身性能。

3 总结

本文将在线协同克里金模型辅助优化方法应用于雷达/红外兼容隐身超表面的高效设计。通过引入可变保真度模型降低计算成本,并采用自适应重训练策略与全局多目标优化方法,有效解决了多参数、多目标

下的电磁优化问题。基于该方法设计并制备出雷达/红外兼容隐身的超表面, 该结构在2.8~20 GHz频段内可以实现10 dB的RCS缩减, 同时在3~14 μm 的红外波段

内的红外平均发射率为0.25, 兼具优异的宽带雷达吸收与低红外可探测特性。所提出的方法为多频谱兼容隐身材料的结构设计提供了可靠且有效的解决方案。

参考文献

- Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar Cross Section. 2nd ed. Raleigh: SciTech Publishing, 2004
- Immordino M L, Dosio F, Cattell L. Stealth liposomes: review of the basic science, rationale, and clinical applications, existing and potential. *Int J Nanomed*, 2006, 1: 297–315
- Zhang C, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 143511
- Liu T, Meng Y, Ma H, et al. Extraordinary spoof surface plasmon polaritons excitation by linear and circular polarization conversions phase gradient metasurface. *J Phys D-Appl Phys*, 2019, 53: 045003
- Liu T, Meng Y, Ma H, et al. Obtaining single mode spoof surface plasmon polaritons under circular polarized incidence. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 115003
- Xu C, Wang B, Yan M, et al. An optical-transparent metamaterial for high-efficiency microwave absorption and low infrared emission. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 135109
- Duan Y, Wang M, Chen W, et al. Layered metamaterials with Sierpinski triangular fractal metasurface: compatible stealth for S-band radar and infrared. *Mater Today Phys*, 2023, 38: 101210
- Liu D Q, Cheng H F, Peng L, et al. Stealth material compatible with selective infrared radiation and radar wave absorption and preparation method (in Chinese). PRC Patent, CN110737035-A, 2020-01-31 [刘东青, 程海峰, 彭亮, 等. 一种选择性红外辐射与雷达吸波兼容的隐身材料及其制备方法. 中国专利, CN110737035-A, 2020-01-31]
- Wu Q, Wang H, Hong W. Multistage collaborative machine learning and its application to antenna modeling and optimization. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2020, 68: 3397–3409
- Liu B, Akinsolu M O, Song C, et al. An efficient method for complex antenna design based on a self adaptive surrogate model-assisted optimization technique. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2021, 69: 2302–2315
- Pan L, He C, Tian Y, et al. A classification-based surrogate-assisted evolutionary algorithm for expensive many-objective optimization. *IEEE Trans Evol Computat*, 2019, 23: 74–88
- Li M, Zhang Q J, Feng F, et al. Advanced mesh space mapping approach with fast coarse mesh models comprising sharpening structural processing and mesh deformation. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2024, 72: 1578–1590
- Liu Z X, Jin J, Chen L J, et al. Metamaterial absorber optimization method based on an artificial neural network surrogate. *Opt Express*, 2023, 31: 35594–35603
- Zhang Q, Liu C, Wan X, et al. Machine-learning designs of anisotropic digital coding metasurfaces. *Adved Theor Sims*, 2019, 2: 1800132
- Ye N, Lu Z. A novel double-layer kriging model-based reliability analysis framework for time-dependent structural system with stochastic process. *Probab Eng Mech*, 2025, 81: 103812
- Etman A S, Hameed M F O, Obayya S S A, et al. Optimization of ultrathin polarization insensitive metamaterial absorbers using trust region algorithm based on Co-kriging model. *Optical Mater*, 2024, 148: 114823
- Zhan D, Xing H. A fast kriging-assisted evolutionary algorithm based on incremental learning. *IEEE Trans Evol Computat*, 2021, 25: 941–955
- Jain P, Chhabra H, Chauhan U, et al. Multiband metamaterial absorber with absorption prediction by assisted machine learning. *Mater Chem Phys*, 2023, 307: 128180
- Patel S K, Parmar J, Katkar V. Ultra-broadband, wide-angle plus-shape slotted metamaterial solar absorber design with absorption forecasting using machine learning. *Sci Rep*, 2022, 12: 10166
- Li Y, Wu Y, Huang Z. An incremental Kriging method for sequential optimal experimental design. *Comput Model Eng Sci*, 2014, 97: 323–357

Summary for “基于克里金代理模型的雷达/红外兼容隐身结构优化”

Optimization for radar-infrared compatible stealth structures with a kriging surrogate model

Meiqin Lv¹, Pengfei Gu^{2*} & Dazhi Ding²

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

² School of Microelectronics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

* Corresponding author, E-mail: pengfeigu@njust.edu.cn

With the rapid development of modern information technology, battlefield detection has evolved from single-mode to multi-spectral collaboration, including radar, infrared, and visible light. This progression places higher demands on the stealth capabilities of military targets. Radar and infrared stealth technologies require fundamentally different electromagnetic properties due to their distinct detection mechanisms. Existing studies often adopt a design strategy based on the separation of functional layers. While this approach offers flexibility in parameter tuning, it faces challenges such as high-dimensional structural parameters and complex electromagnetic coupling effects. Traditional optimization methods relying on empirical expertise struggle to achieve global performance optima within constrained simulation budgets. In recent years, machine learning-assisted optimization has emerged as a promising pathway for the automated design of complex electromagnetic devices. By constructing surrogate models to replace a portion of costly full-wave simulations, such methods significantly reduce computational overhead during the optimization process. However, when applied to multi-objective problems, conventional machine learning-assisted approaches still suffer from limitations, including low sampling efficiency, high model training costs, and slow convergence.

To address the complex electromagnetic optimization challenges posed by multiple design parameters and multiple performance objectives in modern multispectral compatible stealth technology, this paper adopts an online model-based machine learning-assisted optimization approach to achieve efficient design of metasurface stealth structures. Firstly, by introducing a reliable variable-fidelity model for initial sampling, the computational burden of full-wave simulations is effectively reduced. During the training of the surrogate model, incremental learning or retraining strategies are adaptively selected to update the model. A co-Kriging surrogate model is used to replace the objective function. The model combines high-fidelity sampling data with low-fidelity sampling data, ensuring that the acquired sampling data saves simulation time while remaining within the accuracy range, alleviating the growth in training costs caused by increased design dimensions. In addition, by combining a hybrid strategy for global multi-objective optimization, the algorithm's convergence performance in complex solution spaces is further enhanced. Based on the above methodology, we successfully designed and fabricated a composite metasurface with radar-infrared compatible stealth. This structure adopts an integrated architecture of an infrared low-emissivity layer and a radar-absorbing layer. By printing high-resistance carbon paste patterns on the surface of the functional layers and optimizing their dimensions, the metasurface for radar can achieve over 90% broadband high-efficiency absorption from 2.2–37.5 GHz frequency band, while the metasurface for radar/infrared compatible stealth can achieve over 90% broadband high-efficiency absorption from 2.8 GHz to 20 GHz. At last, a metasurface for radar/infrared compatible stealth was designed and fabricated. The proposed structure achieves a 10 dB RCS reduction over the frequency range of 2.8–20 GHz, while maintaining an average infrared emissivity of 0.25 in the 3–14 μm wavelength band. It thus exhibits excellent broadband radar absorption and low infrared detectability. The presented approach offers a reliable and efficient solution for the structural design of multispectral stealth materials.

machine learning, multi-objective optimization, radar-infrared compatible stealth, metasurface

doi: [10.1360/CSB-2025-5846](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5846)