

基于粒子群结构寻优的电磁隐身微网格超表面

涂建军¹, 马 丁²

(1. 海军研究院, 上海 200235; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200283)

摘 要: 针对电磁隐身超表面设计中寻求精确单元反射相位时存在的难点, 提出一种将单元金属贴片区域网格化分割, 并通过粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 自动寻优的设计方法, 可自动生成符合预设反射相频特性的金属贴片图案. 该方法将方形超表面单元的金属贴片区域划分为 $N \times N$ 网格 (N 为偶数, 根据 N 和全对称条件可得到其中的自由网格数 n), 再用 PSO 对其自由网格的贴片编码进行训练, 直至对应的贴片单元所构建的平面周期结构可实现预期反射相频特性 (包括目标频率的反射相位精度及其邻域频段上相频曲线的平坦度). 作为案例, 在厘米波段和太赫兹波段, 将寻优获得的反射相位相差约 90° 的 4 种单元, 分别以 90° 和 180° 的相位梯度构建 1 bit 和 2 bit 超表面, 全波仿真结果显示其在中心频率附近均可以得到 -10 dB 以上的 RCS 削减效果. 验证了该方法可自动设计出具备特定反射相位的单元, 并且跨频段适用, 其所构建的超表面在获得特定频率雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 削减效果的同时, 可兼顾有效削减的频段宽度.

关键词: 电磁隐身; 超表面; 反射相位; 贴片单元; 粒子群算法

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2021YFA0715501)

中图分类号: TN925; V218; TJ765.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)11-3262-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220519

Electromagnetic Stealth Micro-Grid Metasurface Based on Particle Swarm Structure Optimization

TU Jian-jun¹, MA Ding²

(1. Naval Research Academy, Shanghai 200235, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200283, China)

Abstract: A new design method of metasurface's unit cell for getting preset reflection phase-frequency characteristics is proposed, in which the metal patch area of the cells are splitted into small grids, whose patches schemes are trained by particle swarm optimization (PSO) algorithm. This is an effective solution to resolve the problem in the design of unit cells' reflection phase of electromagnetic stealth metasurface, in which the metal patch area of a square unit cell is splitted into $N \times N$ grids (N is an even number, the free grids number n can be derived by N and full symmetric condition), and the code string of the free grids' patch is trained by PSO, until the expected reflection phase-frequency characteristics (including the reflection phase's accuracy at target frequency and the flatness of phase-frequency curve in the neighborhood frequency band) obtain from the planar periodic structure constructed by the optimal unit cells. Taken as examples, in the centimeter band and terahertz band, four unit cells with a reflection phase difference of about 90° are given by PSO, and the 1-bit and 2-bit metasurfaces are constructed with phase gradients of 90° and 180° respectively, whose -10 dB RCS reduction effect near the target frequency are verified. It is verified that the unit cell with specific reflection phase can be designed automatically by this method, which is also universally applicable to different frequency bands, and the RCS reduction effect on a specific frequency and the bandwidth with satisfied reduction effect can both be obtained.

Key words: electromagnetic stealth; metasurface; reflection phase; patch elements; particle swarm optimization

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2021YFA0715501)

1 引言

超表面在许多领域都受到了高度关注^[1],其中隐身领域的应用潜力非常可观^[2-4],而在电磁隐身领域的发展尤为突出^[5-12].目前,电磁隐身超表面有三个发展方向:一是吸波超表面^[13-16],二是回波调控超表面^[17-19],三是漫反射超表面^[18,20,21].相比另外两种超表面,漫反射电磁隐身超表面具备如下三方面优势:

- (1)更加契合驻相法的原理^[22],能够适应曲面^[8,9];
- (2)是三种机理中有效带宽最大的^[10,23];
- (3)对入射方向和极化的约束较低^[10,24,25].

因此,漫反射成为设计电磁隐身超表面最高效的途径,即将入射波能量分散成多方向反射,使主方向的回波能量大幅削弱,从而削弱超表面所覆盖物体的 RCS (Radar Cross Section).为达到此目的,需要将固定相位差的若干种贴片单元(元组)按一定规则循环交错排在介质层上.根据基于广义斯涅尔定律的相位梯度异常反射理论^[26],回波波束可被分散到其他方向,与镜面反射方向偏离,从而显著削弱单站 RCS,实现隐身效果.

可见,通过这种技术途径建立隐身超表面的关键问题是设计具备特定反射相位的贴片单元阵列.设计反射相位差为 180° 的两种贴片单元是最直接的途径之一,而用理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)和人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)两种单元构成超表面是最简单的方案^[27].但是,该方案所实现的 RCS 有效削减(10 dB)频段过窄,从而限制该方案的适用范围^[27].为了拓宽 RCS 有效削减的频段,通常会用呈稳定梯度的多个相位的贴片单元构建超表面,即需要在单元电介质尺寸规格固定的情况下,通过贴片图案设计,精确建立多种特定反射相位的贴片单元阵列.然而,在介质尺寸固定的前提下,仅通过调整贴片图案来实现这种精确设计是非常困难的,原因如下:

(1)贴片图案本身代表复杂的分布参数,并附加与电介质、底面金属,以及与其他贴片单元的耦合作用,使对超表面电磁散射特性的设计非常困难;

(2)即使通过微调贴片图案的尺寸参数,进行大量尝试而达到了预期的反射相位,也难以在一个较宽的频段上实现若干种贴片单元相位梯度的稳定(本文“相位梯度”特指构成超表面的一组单元之间的反射相位差,通常随频率移动发生变化).这种稳定性,正是实现宽频段 RCS 削减的重要前提.

针对问题(1),目前的商用电磁仿真软件已具备一些简单的参数寻优功能,但仅能起到对已有贴片图案的尺寸进行优化的作用,而无法自动生成具备预期电磁散射特性的超表面单元,这正是设计过程的“盲区”;而针对问题(2),尚未见相关文献提出针对性的方法.

上述的讨论说明,要通过“正向”或“先验”的途径设计隐身超表面所需特定相位特性的贴片单元是非常困难的,而通过“逆向”或“经验”的途径进行设计,具有相当的盲目性,难以提出广泛适用的方法.因此,目前该领域的文献基本是直接给出针对具体需求的方案,而不具备普遍指导意义.

为突破这种窘境,本文提出一种类似“数码迷彩”的设计思想,即将贴片图案区域分割为类似“像素”的网格.根据这些网格是否敷贴金属片,可以形成千变万化的贴片图案,而我们又可以通过机器学习算法对这些组合进行寻优,达到预期的电磁散射特性.考虑到粒子群算法是一种无监督的寻优算法,在缺乏先验知识的情况下仍然可以有较好的优化效果,因此,我们提出一种基于粒子群算法的微网格超表面结构寻优方法.

2 基于粒子群算法的微网格超表面结构寻优方法

2.1 原理

给定超表面介质层的材料、厚度(H_s),以及超表面单元和金属贴片区域的长宽尺寸,示意图如图1(a)所示(以常用的正方形超表面单元为例).其中,单元的边长为 W_c ,金属贴片区域 P 边缘与单元边缘的距离为 W_b ,区域 P 被平均分割为 $N \times N$ 网格,各网格是否需要覆以金属贴片,则是优化算法的寻优对象.对于在隐身超表面中常用的全对称金属贴片图案结构,图1(a)贴片区域中的自由网格数为10(以 $N=8$ 为例),如图1(b)所示.当这10个网格的贴片方案确定时,整个超表面单元的金属贴片图案即被确定.以图2为例,贴片图案的编码即为“1011010001”,其中1和0对应自由网格是否覆以金属贴片.

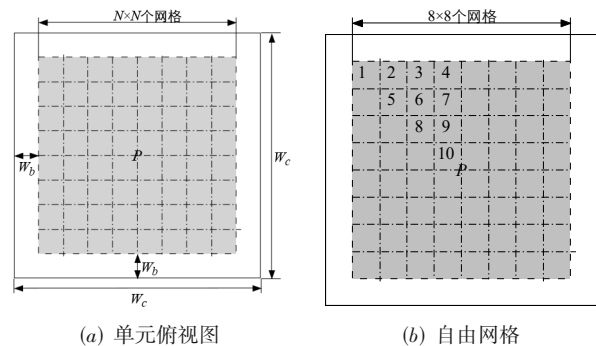


图1 微网格超表面单元俯视图及其贴片区域自由网格

2.2 优化目标

寻优对象为 $N \times N$ 网格区域中的金属贴片图案编码,寻优依据为该编码所对应贴片单元(由金属贴片图案层、介质层和金属底面构成)构成的无限大平面周期

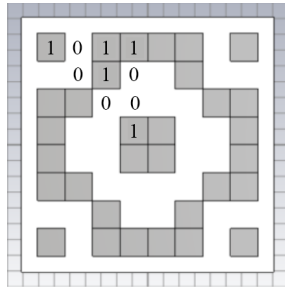


图2 编码“1011010001”的贴片单元图案

结构在中心频率 f_0 处的反射相位及其在 f_0 邻域 $[f_{low}, f_{high}]$ 内的变化率. 根据大量仿真发现, 在 $[f_{low}, f_{high}]$ 中反射相位-频率变化率越小 (相位-频率曲线越平坦), 在该频段 (甚至更宽的频段) 上得到反射相位差相对稳定的若干类贴片单元的可能性越大.

因此, 可将寻优目标函数设置为

$$F = \alpha \times \frac{|P_i - P_0|}{P_m} + (1 - \alpha) \times \frac{k_i}{k_m} \quad (1)$$

其中, P_i 为第 i 次迭代得到的 f_0 处反射相位; P_0 为目标反射相位; k_i 为第 i 次迭代得到的反射相位曲线在 $[f_{low}, f_{high}]$ 中的最大斜率绝对值; $\alpha \in [0, 1]$ 为权重系数, 代表对相位准确度和相位曲线平坦性二者的偏好; 有

$$P_m = \max(P_1, P_2, \dots, P_i), k_m = \max(k_1, k_2, \dots, k_i) \quad (2)$$

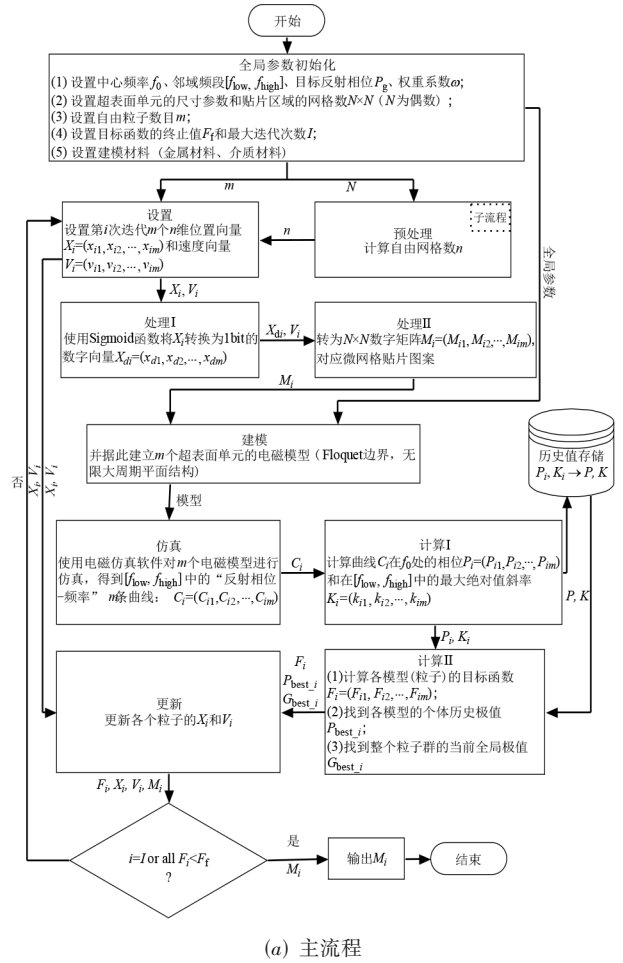
可见, 随着迭代的不断进行, P_m 和 k_m 不断增大, 对 F 函数优化的“压力”也随之加大, 从而起到加速寻优进程的作用, 同时也产生一定程度的归一化作用 (由于斜率可以达到无穷, 所以无法使用一般的归一化方法).

2.3 运行流程

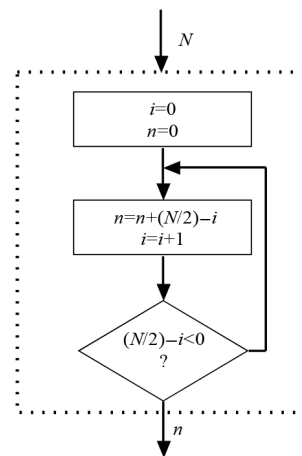
使用编程语言与电磁仿真软件结合的办法, 以图3所示的流程编写程序, 图3(a)为主流程图, 图3(b)为推导自由网格数 n 的子流程图. 图3(a)中, 一次迭代包括“设置→处理 (I, II)→建模→仿真→计算 (I, II)→更新”八个环节, 粒子群由 m 个粒子组成, 每个粒子的位置和速度均为 n 维向量 (与自由网格数一致), 在第 i 次迭代中分别用 \mathbf{X}_i 和 \mathbf{V}_i 表示, 更新算法如下:

$$\begin{cases} v_{i+1,j} = \omega \cdot v_{i,j} + (1 - \omega) [r_{1,i}(p_{best_{i,j}} - x_{i,j}) + r_{2,i}(g_{best_{i,j}} - x_{i,j})] \\ x_{i+1,j} = x_{i,j} + v_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

其中, i 为迭代次数; $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 表示粒子群中的第 j 个粒子; $v_{i,j}, x_{i,j}, p_{best_{i,j}}, g_{best_{i,j}}$ 表示第 j 个粒子在第 i 次迭代时的速度、位置、当前全体位置极值、历史全体位置极值, 分别为矩阵 $\mathbf{V}_i, \mathbf{X}_i, \mathbf{P}_{best_i}, \mathbf{G}_{best_i}$ 的第 j 行 (每行 n 个元素, 对应 n 个自由网格); $\omega \in (0, 1)$ 为权重系数, 表示对当前速度与当前极值之间的偏好; $r_{k,i} \in (0, 0.5) (k = 1, 2)$ 为随机微调系数 (每次迭代中随机生成).



(a) 主流程



(b) 子流程

图3 粒子群结构寻优流程图

3 仿真实验

相较于现有的隐身超表面设计方法, 本文提出的方案对目标频段无特别的限制. 本节拟分别在厘米波段和太赫兹波段选取典型频段进行设计和仿真, 验证此设计方法的优势. 选择这两个波段的原因有 2 个:

(1)分别对应经典的雷达波段和新兴的高分辨率雷达波段,具有代表性;

(2)频段差异大,适合验证本文设计方法的广泛适用性.

3.1 厘米波段:中心频率 8 GHz

3.1.1 超表面单元贴片微网格图案寻优

使用厚度 $H_s=4.57$ mm 的 fr-4 材料作为电介质层,底面和贴片图案层为 PEC 材质,厚度均为 0.001 mm,正方形超表面单元的边长 $W_c=14$ mm,贴片区域为 10×10 网格(即 $N=10$),区域边缘与单元边缘距离为 $W_b=1$ mm.

拟设计 7~9 GHz 频段适用的电磁隐身超表面,故构建在中心频率 8.0 GHz 处反射相位相差为 90° 的 4 种超表面单元(假设选择 $170^\circ, 80^\circ, -10^\circ$ 和 -100° 这 4 种反射相位). 由于 $N=10$,故自由网格数和每个粒子的位置向量维数为 $n=15$,设定自由粒子数 $m=8$,最大迭代次数 $I=14$,目标函数终止值 $F_r=0.001$. 4 种超表面单元寻优过程的“目标函数值-迭代次数”关系图如图 4 所示.

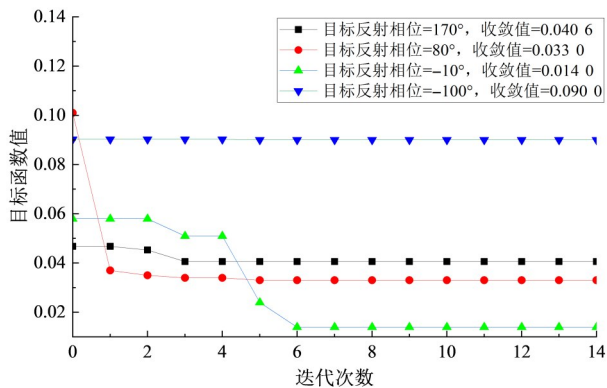


图 4 1 bit 电磁隐身微网格超表面目标函数迭代图

上述参数设置的依据如下:

(1) H_s :选择范围一般为 $\lambda_g/8\sim\lambda_g/4$, λ_g 为介质的波导波长(大尺寸电介质板中约等于工作波长).

(2) W_c :选择范围一般为 $\lambda_g/2\sim\lambda_g$.

(3) N :决定了寻优对象的全集规模,与寻优精度成正比,与计算量成反比,可根据实际情况设置. 经过试验,针对棋盘式电磁隐身超表面设计, 10×10 的分割粒度代表 32 768 种可能的贴片单元图案,能在设计效率和精度之间形成一个较好的平衡.

(4) W_b :选择范围一般为 $\lambda_g/20\sim\lambda_g/10$,可减少贴片单元阵列中个体之间的耦合效应.

(5) m 和 I :对于同一类问题,此二者之间既呈“此消彼长”的关系,又共同决定了寻优结果的质量,需要通过试验确定合适的数值. 经试验, $m=8$ 时,达到收敛所需的次数不超过 10,为留出一定裕度,设定 $I=14$,寻优获得的单元反射相位误差不超过 5%.

(6) F_r :设置为一个较小的正实数即可.

4 种超表面单元寻优过程分别通过 3 次、5 次、6 次和 6 次迭代收敛,达到收敛的建模次数分别为 24 次、40 次、48 次和 48 次. 得到的超表面单元结构、分别构建的平面周期结构“反射相位-频率”曲线图如图 5、图 6.

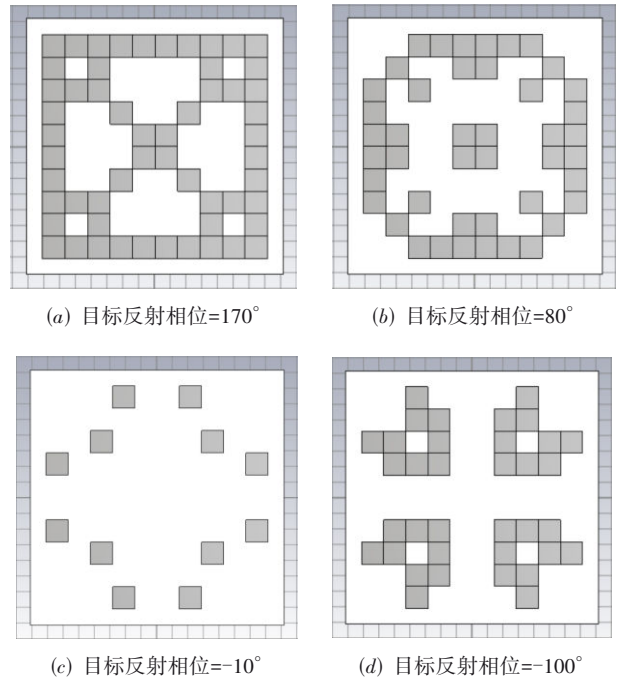


图 5 优化超表面单元结构

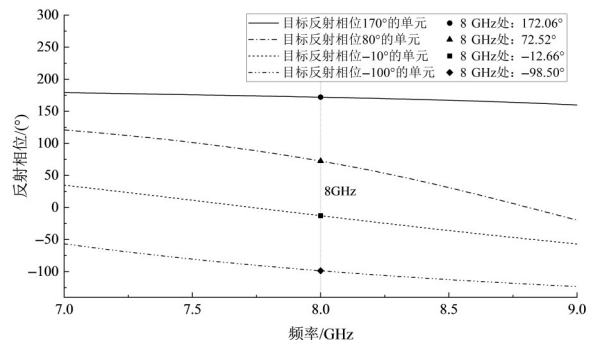


图 6 4 种优化超表面单元所构建平面周期结构的“反射相位-频率”曲线

由图 5 可以看出,4 种超表面单元金属贴片图案编码分别为“111110100100101”“001111001100001”“000100000100000”和“001000110010100”. 根据图 6, 4 条曲线中心频率实际反射相位与目标相位偏差分别为 1.1%, 4.15%, 1.5% 和 0.8% (以 180° 作为最大偏差).

3.1.2 1 bit 电磁隐身微网格超表面

根据图 6 可见,由图 5(a)和(c)这 2 种超表面单元分别构建的平面阵列在中心频率 8 GHz 的反射相位差为 184.72° ,反射相位差曲线如图 7,其处于可接受范围 ($143^\circ\sim 217^\circ$)的频段为 6.97~9.06 GHz,说明两者组成的

超表面在该频段出现较好 RCS 削减效果的可能性较大. 采用这两种单元构建两类“元组”棋盘式交错结构, 每一类元组由 8×8 个单元构成, 而整个超表面由 10×10 个元组构成, 故俯视图为 $1\ 120\ \text{mm}$ 的边长的正方形结构, 如图 8 所示.

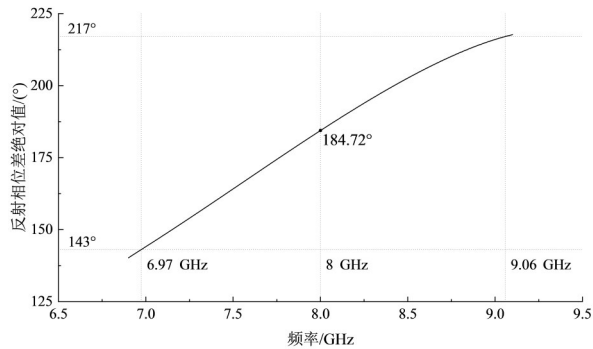


图 7 2 种优化超表面单元所分别构建平面周期结构之间的“反射相位差-频率”曲线(对应图 5(a)和(c))

图 8 所示的超表面与同尺寸 PEC 表面比较, 在更宽的频带上考察法向单站 RCS 情况, 如图 9 所示. 经多次仿真发现, 该结果对入射波的极化不敏感, 故在此仅展示水平极化的结果.

3.1.3 2 bit 电磁隐身微网格超表面

其他条件不变, 采用图 5 所示的四种超表面单元, 构建 4 类“元组”棋盘式交错结构, 每一类元组由 8×8 个单元构成, 4 类元组首尾循环相接, 横竖相邻元组中心频率上的反射相位差均约为 90° , 而整个超表面由 10×10 个元组构成, 故俯视图为 $1\ 120\ \text{mm}$ 边长的正方形结构, 如图 10 所示.

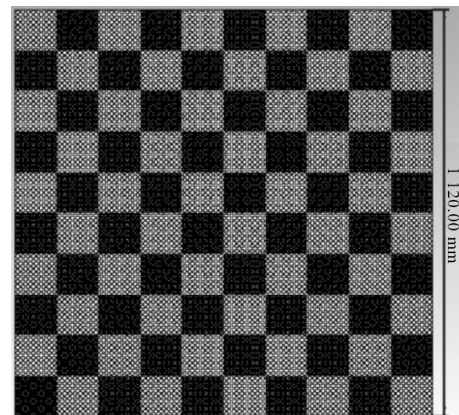
图 10(a) 所示超表面与同尺寸的 PEC 表面比较, 在更宽的频带上考察法向单站 RCS 情况, 关系如图 11 所示. 经多次仿真发现, 该结果对入射波的极化不敏感, 故在此仅展示水平极化的结果.

3.2 太赫兹波段: 中心频率 1.2 THz

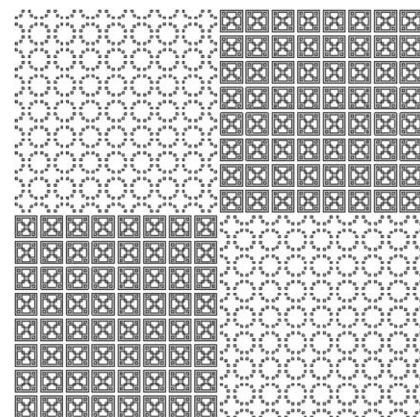
3.2.1 超表面单元贴片微网格图案寻优

依据第 3.1.1 节中提出的参数选择原则, 使用厚度 $H_s=30.14\ \mu\text{m}$ 的 fr-4 材料作电介质层, 底面层和贴片图案层为 PEC 材质, 厚度均为 $0.001\ \mu\text{m}$, 正方形超表面单元的边长 $W_s=120\ \mu\text{m}$, 贴片区域为 10×10 网格 (即 $N=10$), 区域边缘与单元边缘距离为 $W_b=10\ \mu\text{m}$.

拟设计 $1.1\ \text{THz} \sim 1.3\ \text{THz}$ 频段适用的电磁隐身超表面, 故构建在中心频率 $1.2\ \text{THz}$ 处反射相位相差为 90° 的 4 种超表面单元 (假设选择 135° , 45° , -45° 和 -135° 这 4 种反射相位). 由于 $N=10$, 故自由网格数和每个粒子的位置向量维数为 $n=15$, 仍设定自由粒子数 $m=8$, 最大迭代次数 $I=14$, 目标函数终止值 $F_f=0.001$. 4 种超表面单元寻优过程的“目标函数值-迭代次数”关系图如



(a) 全局结构



(b) 微观结构

图 8 1 bit 超表面俯视结构图

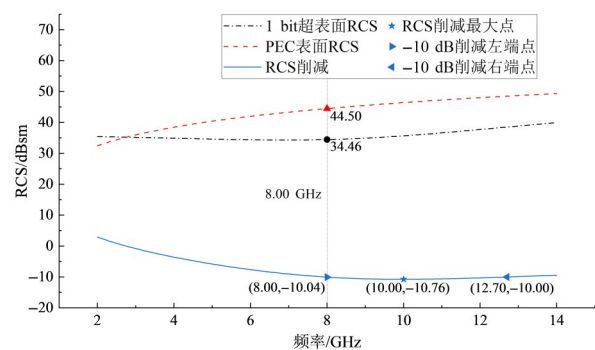


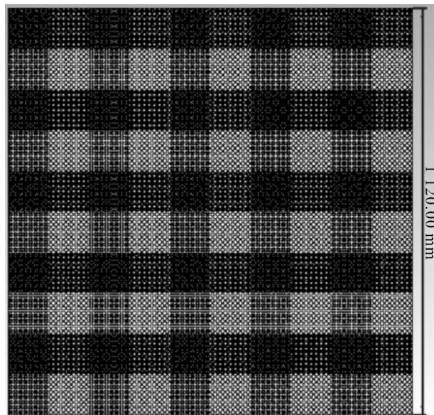
图 9 1 bit 超表面 RCS-频率关系曲线图

图 12 所示.

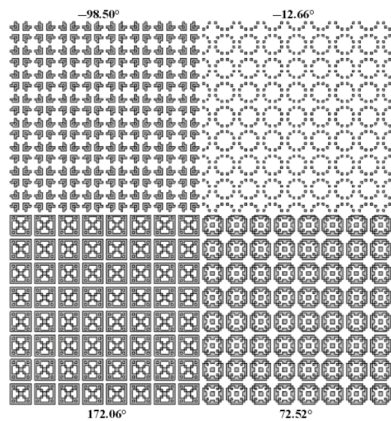
4 种超表面单元寻优过程分别通过 6 次、7 次、6 次和 6 次迭代收敛, 达到收敛的建模次数分别为 48 次、56 次、48 次和 48 次. 得到的超表面单元结构、分别构建的平面周期结构“反射相位-频率”曲线如图 13、图 14 所示.

3.2.2 1 bit 电磁隐身微网格超表面

根据图 14, 由图 13(a) 和 13(c) 这 2 种超表面单元分别构建的平面阵列在中心频率 $1.2\ \text{THz}$ 的反射相位



(a) 全局结构



(b) 微观结构

图 10 2 bit 超表面俯视结构图

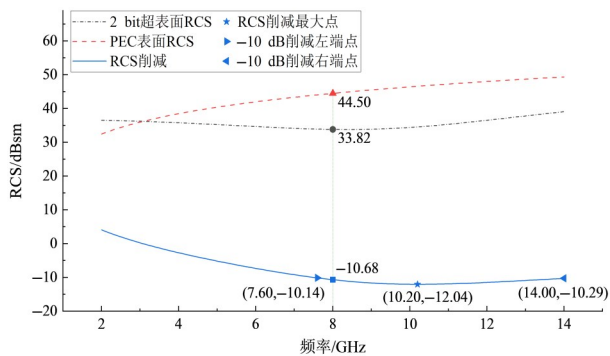


图 11 2 bit 超表面 RCS-频率关系曲线图

差为 173.49° , 反射相位差曲线如图 15, 其处于可接受范围 ($143^\circ \sim 217^\circ$) 的频段为 $0.82 \sim 1.33$ THz, 说明两者组成的超表面在该频段出现较好 RCS 削减效果的可能性较大. 采用 2 类“元组”棋盘式交错结构, 每一类元组由 6×6 个单元构成, 而整个超表面由 7×7 个元组构成, 故俯视图为 $5040 \mu\text{m}$ 的边长的正方形结构, 如图 16 所示.

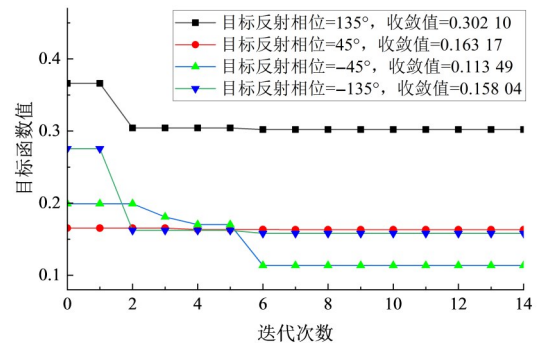
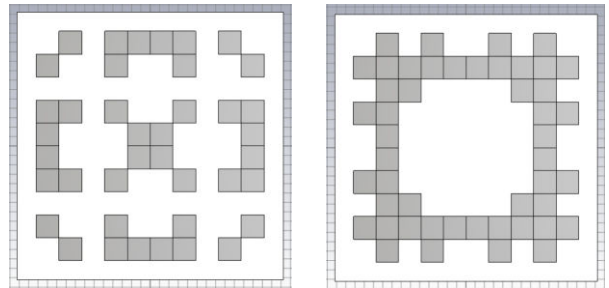
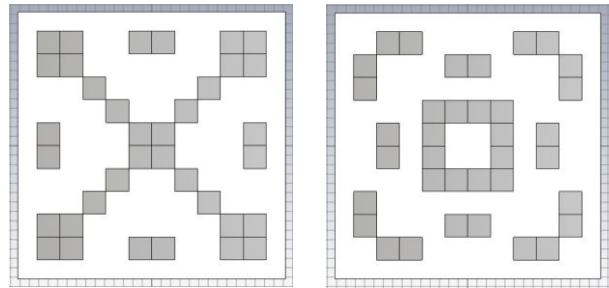


图 12 1 bit 电磁隐身微网格超表面目标函数迭代图



(a) 目标反射相位=135°

(b) 目标反射相位=45°



(c) 目标反射相位=-45°

(d) 目标反射相位=-135°

图 13 优化超表面单元结构

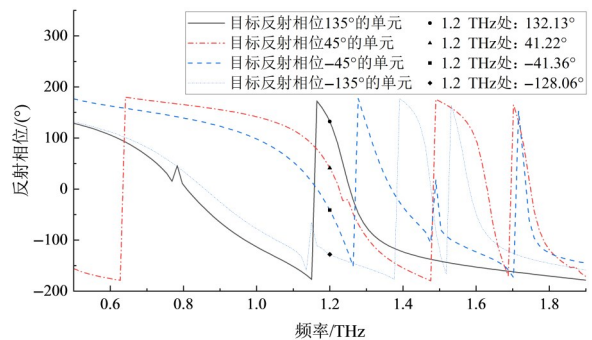


图 14 4 种优化超表面单元所分别构建平面周期结构的“反射相位-频率”曲线

图 16(a) 所示的超表面与同尺寸 PEC 表面比较, 在更宽的频带上考察法向单站 RCS 情况, 如图 17 所示. 经多次仿真发现, 该结果对入射波的极化不敏感, 故在

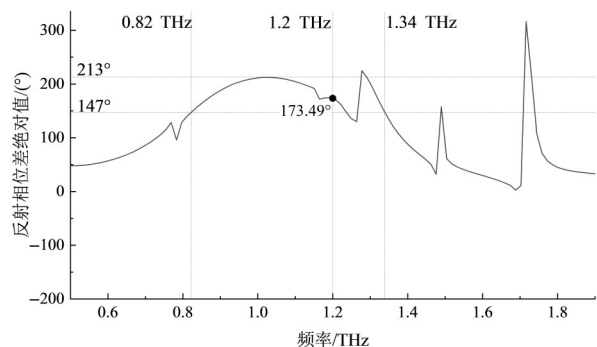


图15 135°和-45°两种优化超表面单元所分别构建平面周期结构的“反射相位差-频率”曲线(对应图13中的(a)和(c))

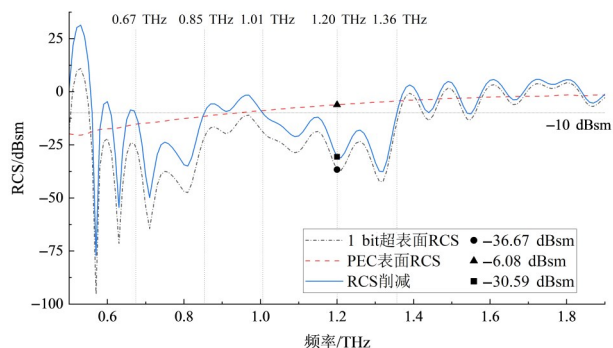
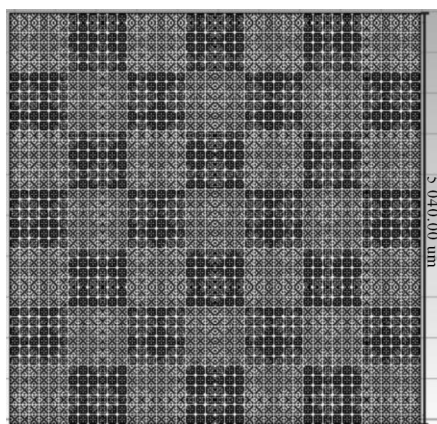


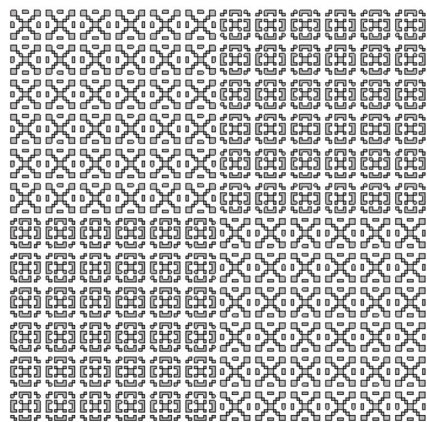
图17 1 bit超表面RCS-频率关系曲线图

个元组构成,故俯视图为5 040 μm边长的正方形结构,如图18所示.

图18(a)所示为超表面与同尺寸PEC表面比较,在更宽的频带上考察法向单站RCS情况,关系如图19所示.经多次仿真发现,该结果对入射波的极化不敏感,故在此仅展示水平极化的结果.



(a) 全局结构



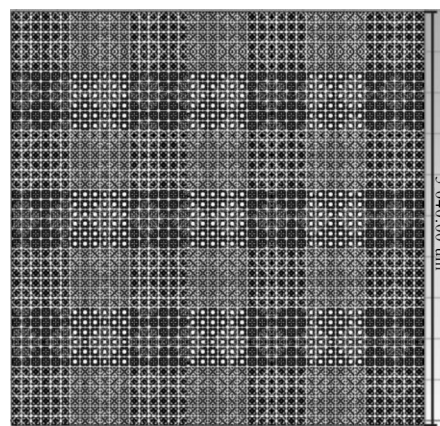
(b) 微观结构

图16 1 bit超表面俯视结构图

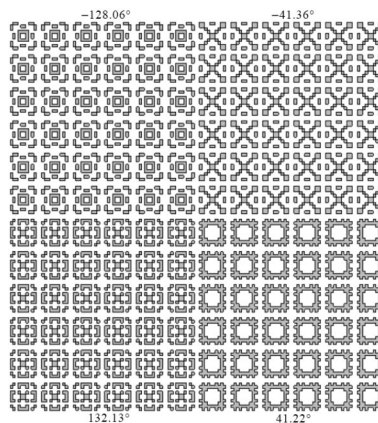
此仅展示水平极化的结果.

3.2.3 2 bit电磁隐身微网格超表面

其他条件不变,对于图13所对应的4种超表面单元,采用4类“元组”棋盘式交错结构,每一类元组由6×6个单元构成,4类元组首尾循环相接,横竖相邻元组中心频率上的反射相位均约为90°,而整个超表面由7×7



(a) 全局结构



(b) 微观结构

图18 2 bit超表面俯视结构图

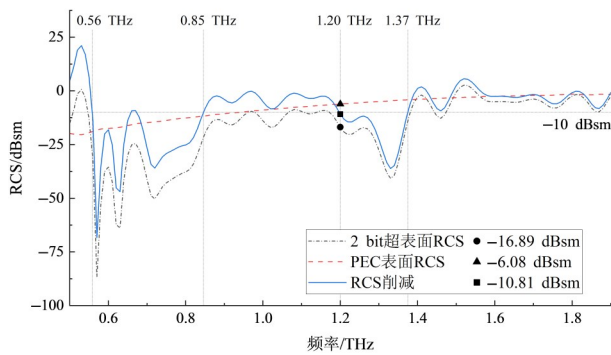


图 19 2 bit超表面 RCS-频率关系曲线图

3.3 仿真结果分析

基于 PSO 的超表面单元结构寻优方法,能较高效地寻找到目标中心频率处预设反射相位的单元结构,并可兼顾相位曲线斜率的控制,在此基础上提出的电磁隐身微网格超表面可在中心频率处附近实现令人满意的 RCS 削减效果(以-10 dB 为例)。

中心频率处的单元反射相位梯度准确性,及其附近频段上的相位梯度稳定性(保持不变或微弱变化的性质),共同影响超表面 RCS 削减的有效带宽.第 3.1 节中,4 种超表面单元在中心频率 8 GHz 处反射相位梯度约为 90° ,在 7~9 GHz 的频段内,相频曲线较平坦,相位梯度稳定性较好(见图 6),因此第 3.1 节中 2 bit 超表面的 RCS 削减性能优于 1 bit 超表面;然而,在第 3.2 节中,情况则恰好相反,无论中心频率处的 RCS 削减以及削减带宽为多少,2 bit 超表面均弱于 1 bit 超表面(对比图 17、图 19),这正是中心频率附近相位梯度稳定性较差导致的(对比图 15 和图 20,1 bit 超表面的两种单元反射相位差处于可接受范围 $143^\circ\sim 217^\circ$ 的频段为 0.8~1.3 THz,覆盖了预期频段,而 2 bit 超表面的 4 种单元之间本拟在 1.1~1.3 THz 上实现约 90° 的反射相位梯度,但 1.2 THz 附近实际相位梯度却较大偏离了 90° ,相位梯度的稳定带宽明显弱于前者)。

各仿真案例中,RCS 削减-10 dB 的频段的中点频率与目标中心频率均有一定偏差,主要原因在于寻优

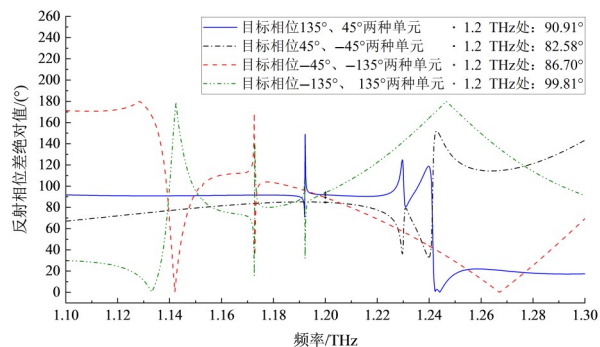


图 20 1.2 THz 附近 4 种超表面单元之间的反射相位差

所得各种超表面单元的实际反射相位与目标相位均有一定误差.另外,元组中单元个数的设定和元组之间的互耦效应,也会产生次要影响。

4 结论

通过前文的论述、建模和仿真可见:(1)本文提出的“基于粒子群结构寻优的电磁隐身微网格超表面”设计,是一套跨频段适用的统一方法,利用机器学习寻优,代替了建模中调试、验证、修正循环往复的烦琐过程,为电磁隐身超表面的设计提供极大便利,构建的超表面可以在预设中心频率附近获得预期的 RCS 削减效果;(2)通过在寻优机制中纳入对反射相位曲线斜率的控制,可提高获得稳定相位梯度的能力,以获得较宽的 RCS 有效削减频段;(3)通过 PSO 算法设计超表面单元的方法是高效且准确的,能够解决电磁隐身超表面设计中的关键难点之一——得到多种尺寸相同,而又具备不同预设相频特性的超表面单元。

实际上, H_s , W_c , N , W_b 等参数均可纳入粒子群寻优的范畴,可获得精度更高的反射相频特性,但同时意味着更高的计算资源需求,可根据需求采用.本文致力于提出贴片区域网格化的方案以及贴片区域微网格结构寻优设计方法,故将寻优的工作集中在微网格贴片图案上。

本文的设计方案是针对预设反射相位对单元贴片图案编码进行寻优.未来的研究中,拟继续探索给定中心频率和反射相位梯度(不设定目标反射相位)条件下,自动寻优以一次性获得一组微网格贴片单元,并同时满足下列条件:(1)中心频率反射相位梯度准确度高;(2)中心频率附近频带内反射相频曲线斜率低;(3)相位梯度稳定性,从而在提高设计效率的同时,扩大寻优范围并提高设计精度。

参考文献

- [1] JOY V, DILEEP A, ABHILASH P V, et al. Metasurfaces for stealth applications: A comprehensive review[J]. Journal of Electronic Materials, 2021, 50(6): 3129-3148.
- [2] 喻敏,周家行,张咏鸥,等.声学超表面在降低水下平板散射强度中的应用[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 76-80.
YU M, ZHOU J X, ZHANG Y O, et al. Application of acoustic metasurface in reducing sound scattering of a plate[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 76-80. (in Chinese)
- [3] LEE D, JANG Y, PARK J, et al. Underwater stealth metasurfaces composed of split-orifice-conduit hybrid resonators[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129: 105103.
- [4] YU G K, QIU Y P, LI Y, et al. Underwater acoustic stealth by a broadband 2-bit coding metasurface[J]. Physical Re-

- view Applied, 2021, 15(6): 064064.
- [5] ALI KHAN T, LI J X, CHEN J A, et al. Design of a low scattering metasurface for stealth applications[J]. Materials, 2019, 12(18): 3031.
- [6] WANG C X, CHEN M J, LEI H S, et al. Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 123: 19-27.
- [7] 吴杨慧, 王俊杰, 赖森锋, 等. 用于航空电磁防护和智能隐身的光学透明柔性宽带吸波器的试验研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(5): 70-74.
WU Y H, WANG J J, LAI S F, et al. Experimental study on optically transparent flexible broadband absorber for aviation electromagnetic protection and intelligent stealth[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(5): 70-74. (in Chinese)
- [8] TU J J, LI C. The design of the conformal electromagnetic stealth meta-surface for arbitrary NURBS curved surfaces [C]//2020 6th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON). Piscataway: IEEE, 2021: 1-4.
- [9] TU J J. The design of conformal and chaotic electromagnetic stealth metasurface for arbitrary NURBS curved surfaces[C]//2021 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMM). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [10] LIN B Q, HUANG W Z, YANG Y S, et al. A 2-bit pancharatnam-berry coding metasurface for ultra-wideband and polarization insensitive RCS reduction[J]. Plasmonics, 2022, 17(2): 893-900.
- [11] DONG G X, LI X P, LIU Y M, et al. A true polarization-independence metasurface for wideband RCS reduction[C]//2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [12] RAJABALIPANAH H, ABDOLALI A. Ultrabroadband monostatic/bistatic RCS reduction via high-entropy phase-encoded polarization conversion metasurfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1233-1237.
- [13] QUADER S, SAKIB Q, RIZWAN A M, et al. Graphene based ultra-broadband terahertz metamaterial absorber with dual-band tunability[J]. Journal of Optics, 2020, 22(9): 095104.
- [14] 孔静, 高鸿, 李岩, 等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9055-9063.
KONG J, GAO H, LI Y, et al. Research progress of electromagnetic shielding mechanism and lightweight and broadband wave-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9055-9063. (in Chinese)
- [15] JANG Y, YOO M, LIM S. Conformal metamaterial absorber for curved surface[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 24163.
- [16] CANET-FERRER J. Metamaterials and Metasurfaces [M]. Rijeka: IntechOpen, 2019.
- [17] SINGH K, AFZAL M U, LALBAKSH A, et al. Reflecting phase-gradient metasurface for radar cross section reduction[C]//2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE, 2022: 344-346.
- [18] AZIZI Y, SOLEIMANI M, SEDIGHY S H, et al. Low-cost, low-profile wide-band radar cross section reduction using dual-concentric phase gradient modulated surface [J]. Electronics, 2021, 10(13): 1552.
- [19] WU J N, ZHANG Y K, SU C, et al. Design of a wide-band random phase gradient metasurface by using line-shaped element[J]. Journal of Advanced Dielectrics, 2020, 10(6): 2050030.
- [20] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [21] CHEN W G, BALANIS C A, BIRTCHEER C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2636-2645.
- [22] JAKOB S. Waves, rays, and the method of stationary phase[J]. Optics Express, 2002, 10(16): 740-751.
- [23] JI K F, GAO J, CAO X Y, et al. Design of ultra-wideband low RCS reflecting screen based on phase gradient metasurface[J]. Radioengineering, 2021, 30(2): 314-322.
- [24] CHEN J, CHENG Q, ZHAO J, et al. Reduction of radar cross section based on a metasurface[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2014, 146: 71-76.
- [25] DONG G X, ZHU S T, HE Y C, et al. Radar cross section reduction metasurface based on random phase gradients [J]. Applied Physics B, 2018, 124(11): 222.
- [26] ZHANG J, MEI Z L, ZHANG W R, et al. An ultrathin directional carpet cloak based on generalized Snell's law [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(15): 151115.
- [27] PAQUAY M, IRIARTE J C, EDERRA I, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(12): 3630-3638.

作者简介



涂建军 男, 1984年8月出生, 江西南昌人。工学博士。现为海军研究院工程师。主要研究方向为电磁隐身、电磁兼容、电磁超材料。
E-mail: tujianjun1984@126.com



马丁 男, 1984年7月出生, 辽宁盘锦人。工学博士。现为中国科学院上海技术物理研究所副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为集成电路设计及可靠性、电磁超材料。
E-mail: mading@mail.sitp.ac.cn