文章编号:1673-9590(2024)01-0106-06

# 基于 MOEA/D 算法的三陷波超宽带天线设计

宋智[1],陈嘉懿[2],薛严冰[2],陈宝君[2]

(1. 大连交通大学 计算机与通信工程学院,辽宁 大连 116028;2. 大连交通大学 自动化与电气工程学院,辽宁 大连 116028)

**摘　要:**为实现超宽带通信中对 WIMAX(3.3 ~ 3.7 GHz)、WLAN(5.150 ~5.825 GHz)和 ITU(8.01 ~ 8.50 GHz)频段干扰的抑制,提出了一种基于 MOEA/D 算法优化设计的具有三陷波特性的超宽带天线。天线采用 T 形结构作为辐射贴片,通过改变贴片形状等方法实现在 3 ~ 12 GHz 的超宽带。在辐射贴片上刻蚀两个 U 形缝隙和在传输线两侧加载 C 形开口环,对天线进行陷波设计。利用 MOEA/D 算法对陷波结构的结构参数和加载位置进行优化,实现了在 3.31 ~ 3.69 GHz、5.25 ~ 6.13 GHz 和 8.01 ~ 8.51 GHz 频段的陷波效果,成功抑制了频段干扰。与传统扫频优化的设计方法相比,采用 MOEA/D 算法设计的天线在陷波频带内增益低至-19 dB,各陷波频带准确度误差均在 3.6%以下,提高了天线的设计效率,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**超宽带天线;MOEA/D 算法;多陷波

**文献标识码:**A　　**DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.018

陷波超宽带天线既可以满足 UWB(Ultra Wide Band)通信频段又具有消除干扰频段的优点,自 2002 年 FCC(美国联邦通信委员会)将 3.1 ~ 10.6 GHz 频段划定为民用频段后,如何实现陷波功能成为超宽带天线设计的研究热点之一[1]。

目前,超宽带天线实现陷波特性常用的方法有开槽技术[2-6]和加载寄生单元[7-11]两种。Trimukhe 等[12]采用多分支形的贴片结构,在传输线两侧加载两种 EBG( Electromagnetic Band Gap)结构,实现具有三带陷波特性的紧凑型超宽带天线。,Cao 等[13]采用加载寄生枝节和蚀刻缝隙的方法设计了 5 种阻带单元,实现了具有 5 种陷波频段的 UWB 天线。罗佳君等[14]采用刻蚀椭圆形开口谐振器和加载 4 种不同尺寸的 U 形短截线,使所设计的天线具有 5 种陷波。

上述研究中天线的设计方法均采用传统的参数扫描法,存在设计周期长、陷波精度低等缺点。针对这一问题,近年有学者提出采用智能优化算法进行天线的设计,Gurdeep 等[15]采用神经网络正向建模方法对射频器件进行建模与分析,用训练好的神经网络模型来近似或替代实际的射频器件,得到最接近目标值的网络输出值。南敬昌等[16]采用 DE(Differential Evolution)和 NMR(Naked Mole-Rat)算法的混合优化方法,实现了对 WIMAX、WLAN 和 X 波段的有害信号干扰。

采用智能优化算法可以提高天线设计效率,但在陷波频段精确度和天线多个性能指标同时达到最优效果等方面还需要提高。本文利用 MOEA/D(Multi Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition)算法对超宽带天线陷波结构的结构参数及加载位置进行优化,快速准确地实现在 WIMAX(3.3 ~ 3.7 GHz)、WLAN(5.150 ~ 5.825 GHz)和 ITU(8.01 ~ 8.50 GHz)频段陷波效果。与其他优化方法仅优化 $S$ 参数相比,本文的方法在确保天线 $S$ 参数达到需求的同时也考虑了陷波频段的增益效果。

**收稿日期:**2022-09-13

**基金项目:**辽宁省科技厅应用基础研究计划项目(2022JH2/101300267)

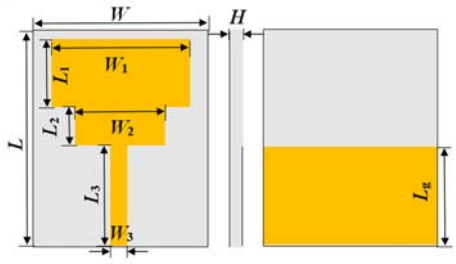
**第一作者:**宋智(1978—),女,副教授。E-mail:6291355@qq.com

**通信作者:**陈嘉懿(1998—),女,硕士研究生。E-mail:411823728@qq.com

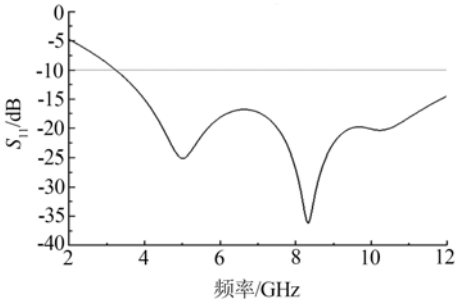
# 1　基于参数优化的三陷波超宽带天线设计

## 1.1　超宽带天线设计

本文提出的超宽带天线的正面、接地面结构见图 1(a)。将 T 形辐射贴片、微带馈电线和接地板印制在大小为 32.5 mm×26 mm×0.8 mm,相对介电常数 $\varepsilon_r$ 为 2.2 的 Rogers 5880 介质板上。其结构尺寸为:$W$ = 26 mm, $W_1$ = 20.5 mm, $W_2$ = 13 mm, $W_3$ = 2 mm, $L$ = 32.5 mm, $L_1$ = 10 mm, $L_2$ = 6 mm, $L_3$ = 15 mm, $L_g$ = 15 mm。图 1(b)为超宽带天线的 $S_{11}$ 曲线,可以看出天线在 3 ~ 12 GHz 频段的 $S_{11}$ 均小于−10 dB,通带范围覆盖 3.1 ~ 10.6 GHz 频段,达到了宽频带的目标。




(a) 结构图




(b) 天线 $S_{11}$ 曲线

**图 1　超宽带天线结构图及回波损耗−$S_{11}$ 曲线**

## 1.2　陷波结构设计

三陷波超宽带天线正面结构见图 2。在贴片上分别刻蚀两个不同尺寸的 U 形缝隙,在传输线两侧加载 C 形环,分别实现对 3.3 ~ 3.7 GHz、5.150 ~ 5.825 GHz、8.01 ~ 8.50 GHz 频带信号的抑制。

式(1)为 U 形缝隙与 WIMAX、WLAN 频段陷波中心频率之间的关系:

$$L_d = \frac{c}{f_{\text{notch}}\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \tag{1}$$

式中:$f_{\text{notch}}$ 为陷波中心频率;$c$ 为光速;$L_d$ 为 U 形缝隙总长度;$\varepsilon_r$ 为介质的相对介电常数。

利用该公式可计算出 U 形陷波结构初始长度分别为 34 和 22 mm。

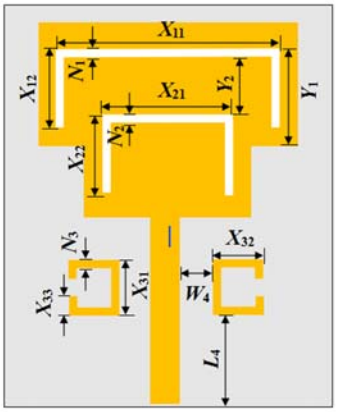



**图 2　三陷波超宽带天线正面结构**

式(2) ~式 (4)为 C 形环和 ITU 频段陷波中心频率之间的关系:

$$f_{\text{notch}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

$$L = \mu_0 l \tag{3}$$

$$C = \frac{2\varepsilon_0 l_s}{\pi}\ln\left(\frac{2l_s}{a}\right) \tag{4}$$

式中:$L$ 为无开口的三个边总长度为 $l$ 的等效电感;$\mu_0$为真空磁导率;$C$ 为开口环开口边长度与开口缝隙 $a$ 的等效电容;$\varepsilon_0$ 为真空中介电常数。

可计算出 C 形陷波结构的初始长度为 17 mm。

## 1.3　陷波结构对陷波频段效果影响

### 1.3.1　陷波结构参数对陷波频段效果的影响

图 3 为 U 形缝隙长度 $X_{11}$ 对 $S_{11}$ 参数的影响。进一步验证了 U 形缝隙长度对陷波中心频率的影响,中心频率随 U 形缝隙长度的增大向低频方向偏移。当 $X_{11}$ 从 17 mm 变化到 19 mm 时,陷波中心频率由 3.85 GHz 变为 3.1 GHz。$X_{11}$ = 18 mm 可以对 WLAN 频段实现抑制,可作为 $X_{11}$ 的初始参数。

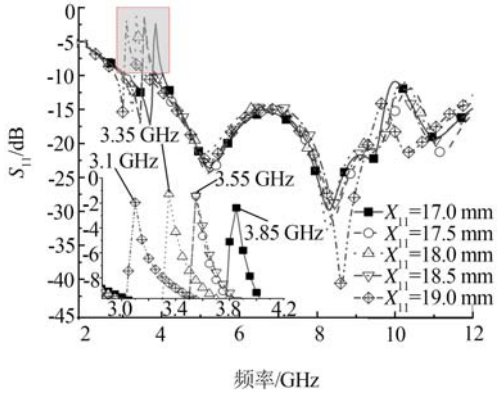
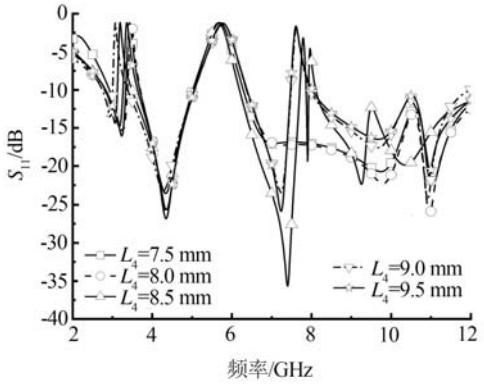


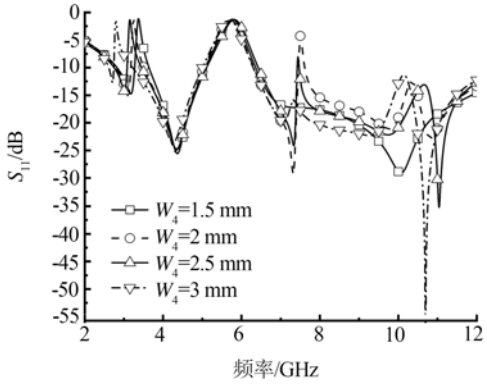

**图 3　U 形缝隙长度 $X_{11}$ 对 $S_{11}$ 参数的影响**

1.3.2 陷波结构加载位置对陷波频段效果的影响

图 4(a)为不同长度的 C 形环加载位置的横坐标 $L_4$ 对陷波频段的影响。当 $L_4$ 为 8.5、9 和 9.5 mm 时,C 形环可以实现在 ITU 频段的陷波效果,而当 $L_4$ 为 7.5 mm 和 8 mm 时,C 形环则不再产生陷波效果。同理如图 4(b)所示,当横坐标 $W_4$ 为 2 mm 或 2.5 mm 时,可产生陷波效果。当 $L_4$=9 mm,$W_4$=1.5 mm 时,在 ITU 频段陷波效果较好,可作为初始位置参数。




(a) $L_4$ 对 $S_{11}$ 参数的影响




(b) $W_4$ 对 $S_{11}$ 参数的影响

**图 4 不同长度的 C 形环加载位置的横纵坐标 $L_4$、$W_4$ 的 $S_{11}$ 曲线对比图**

根据陷波结构的尺寸和加载位置对陷波频段内的影响,将 $X_{11}$、$Y_1$、$X_{21}$、$Y_2$、$X_{31}$、$X_{32}$、$L_4$ 和 $W_4$ 作为优化参数,采用参数扫频的优化方式,对其进行仿真,得到优化后的结构参数分别为 18、9、10、5、4.6、4.6、9 和 1.5 mm。实现在 3.5 ~ 3.8 GHz、5.4 ~ 6.0 GHz 和 7.3 ~ 8.3 GHz 频段的陷波效果。

## 2 基于 MOEA/D 算法的三陷波超宽带天线设计

### 2.1 优化算法

MOEA/D 算法是将多目标优化问题分解为一系列单目标优化子问题,然后利用一定数量相邻问题的信息,采用进化算法对这些子问题同时进行优化[17]。由于分解操作,该方法在保持解的分布性方面有着很大优势,并且通过分析相邻问题的信息来优化,具有避免陷入局部最优的优点。

MOEA/D 算法在一次运行过程中同时优化 $N$ 个目标函数。对于第 $j$ 个子问题,其数学表达式为:

$$g^{te}(x \mid \lambda, z^*) = \max_{1 \leqslant i \leqslant m} \{\lambda \left| f_i(x) - z^* \right|\} \quad (5)$$

式中:$m$ 为种群规模;$z^* = (z_1^*, z_2^*, \cdots, z_m^*)$ 为参考点;$\lambda = (\lambda^1, \lambda^2, \cdots, \lambda^m)$ 为权重系数。

MOEA/D 算法的核心是通过对种群中的解进行进化,同时解决这些子问题。每一次迭代,种群都由迄今为止找到的针对每个子问题的最优解组成;子问题之间的“邻居关系”由它们的聚合系数向量之间的距离定义;两个邻居子问题的最优解应该十分接近;对每一个子问题进行优化时仅使用该子问题邻近的几个子问题的相关信息。

为提高设计效率、天线性能和陷波频带准确度,本文采用 MOEA/D 算法进行三陷波超宽带的设计。

### 2.2 算法实现步骤

本文结合 MOEA/D 算法与 HFSS 软件进行联合仿真。具体步骤如下:

(1)输入 MOEA/D 参数,设定 MOEA/D 的种群大小 $N$,邻居规模 $T$,迭代次数 $G$,权重向量 $B$ 等参数。

(2)初始化,计算欧式距离,随机产生初始种群,根据约束条件对初始种群进行筛选。

(3)计算目标函数,利用 Matlab 生成的 VBS 语言调用 HFSS 仿真软件,建模、仿真,计算目标函数。

(4)根据计算结果,判断是否满足迭代终止条件,若“是”,算法结束;若“否”,进行步骤(5)。

(5)生成新种群并更新领域,每个子问题在邻域内进行交叉变异生成新的种群,并根据约束条件对生成的新种群进行筛选后,返回步骤(3)。

### 2.3 目标函数

1.2 节确定影响天线陷波性能的重要参数是陷波结构的尺寸和加载位置,所以将 $X_{11}$、$Y_1$、$X_{21}$、$Y_2$、$X_{31}$、$X_{32}$、$L_4$、$W_4$ 作为优化参数 $X_c$,取值范围为:

$$X_c = [X_{11}, Y_1, X_{21}, Y_2, X_{31}, X_{32}, L_4, W_4,] = \begin{cases} [16, 8, 10, 4, 0.5, 0.5, 6, 1]_{\min} \\ [20, 9.5, 12, 6.5, 7, 7, 10, 3]_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

陷波天线重要的性能指标是回波损耗和增益,将其作为 MOEA/D 算法优化的两个目标函数,表达式如式(7),式(8):

$$F_1 = \begin{cases} & 3.3\ \text{GHz} \leqslant f \leqslant 3.7\ \text{GHz} \\ S_{11} \geqslant -10, & 5.15\ \text{GHz} \leqslant f \leqslant 5.825\ \text{GHz} \\ & 8.01\ \text{GHz} \leqslant f \leqslant 8.5\ \text{GHz} \\ S_{11} < -10, & \text{else} \end{cases} \tag{7}$$

$$F_2 = 0.3G_1 + 0.4G_2 + 0.3G_3 \tag{8}$$

式中:$F_1$ 是 $S_{11}$ 参数,在陷波范围内 $S_{11}$ 参数应大于等于-10 dB,通常其他范围内 $S_{11}$ 参数应小于-10 dB,认为该天线符合多陷波的要求。$F_2$ 是增益参数,根据 HFSS 软件仿真得到陷波中心频率的增益值,为了使陷波频带内增益下降明显,$F_2$ 绝对值应越大越好。

MOEA/D 算法采用实数编码,将初始种群设置为 100,最大迭代次数为 20。采用 Intel Core i5-7200 CPU 进行运算,经过 1 943 次仿真,耗时约 259 h,获得帕累托解集。与传统的参数扫频法进行对比,参数扫频方法需要对 8 个参数依次进行扫频,随机性大,同时依赖于各参数扫频结果的分析,完成时间约为 480 h,约为 MOEA/D 算法计算时间的 1.85 倍。

综合考虑陷波超宽带天线设计需求,确定优化后天线结构尺寸见表 1。

**表 1　天线结构参数优化前后对比**　　mm

| 参数 | 优化前 | 优化后 | 参数 | 优化前 | 优化后 |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_{11}$ | 18 | 19.42 | $X_{31}$ | 4.6 | 3.94 |
| $Y_1$ | 9 | 8.54 | $X_{32}$ | 4.6 | 4.16 |
| $X_{21}$ | 10 | 10.3 | $L_4$ | 9 | 9.03 |
| $Y_2$ | 5 | 5.79 | $W_4$ | 1.5 | 1.62 |

## 3　仿真结果分析

### 3.1　$S_{11}$ 参数

图 5 为通过参数扫描和 MOEA/D 算法优化后的 $S_{11}$ 参数对比图。表 2 列出了 2 种不同方法实现的三陷波天线的陷波频带范围,并对比了陷波范围准确度的相对误差。根据相对误差式(9)计算得出利用参数扫描的方式陷波频带误差最大为 5.6%,而利用 MOEA/D 算法的陷波频带误差最小为 0.06%,3 个频带误差均低于 3.6%。显然利用 MOEA/D 算法能够有效地降低陷波频带的误差,实现较为精准的陷波特性。

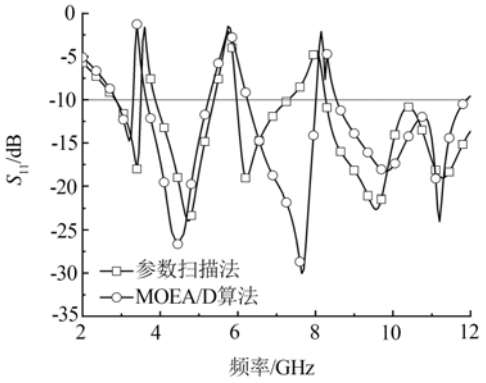



**图 5　2 种方法设计天线的 $S_{11}$ 仿真对比**

**表 2　天线陷波频段精准度对比**

| 设计方法 | 3.3 ~ 3.7 GHz | | 5.15 ~ 5.825 GHz | | 8.01 ~ 8.5 GHz | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 仿真值/GHz | 误差值/% | 仿真值/GHz | 误差值/% | 仿真值/GHz | 误差值/% |
| 参数扫描 | 3.5~3.8 | 4.38 | 5.4~6.0 | 3.93 | 7.3~8.3 | 5.6 |
| MOEA/D 算法 | 3.31~3.69 | 0.29 | 5.25~6.13 | 3.59 | 8.01~8.51 | 0.06 |

相对误差 = | 测量值 - 真实值 | / 真实值 (9)

当陷波频段发生变化时,采用 MOEA/D 算法只需要改变目标函数频段的选取即可,不再需要改变结构进行大量的仿真扫频操作,可以提高设计效率。

### 3.2　增益

图 6 为 2 种方法设计的天线增益曲线对比图。相比于传统方法,利用 MOEA/D 算法设计的天线的增益在陷波处下降趋势更为明显,均达到-10 dB 以下,最低达到了-19 dB,这说明采用 MOEA/D 算法设计的天线增益优于传统方法。

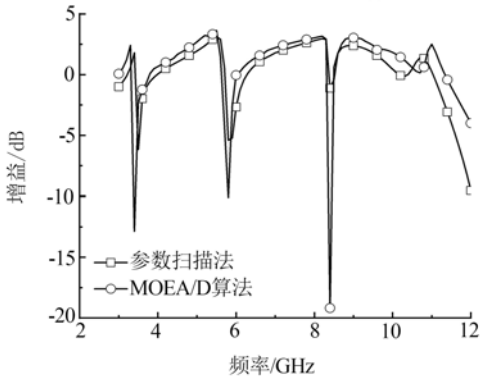



**图 6　2 种方法设计的天线增益对比**

### 3.3 辐射特性

图 7 给出了 3.5、5.5、8.25 GHz 处天线的远近场分布。天线在 3 个频段处的 E 面辐射方向图均呈现 8 字形,近似偶极子,具有很好的方向性;在 H 面辐射方向图近似为等辐全向且具有对称性,有良好的全向性,虽在 8.25 GHz 处辐射强度有减弱但仍满足超宽带天线的通信要求。

将本文通过 MOEA/D 算法设计的三陷波超宽带天线在贴片大小、增益、陷波频带准确度等方面的性能与其他文献进行对比,见表 3。可知,本文采用 MOEA/D 优化算法设计的天线陷波频带误差小于传统参数扫描方法,与文献[12-16]列举的优化算法相比,在减小天线陷波频带误差的同时,也考虑了陷波频段增益的效果。

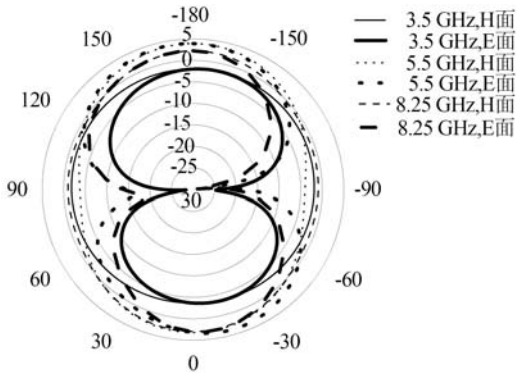



**图 7 3.5、5.5 和 8.25 GHz 频点的远近场方向图**

**表 3 天线性能对比**

| 文献 | 目标陷波频段 | 陷波频段/GHz | 陷波频带误差/% | 贴片大小/$mm^2$ | 陷波处增益/dB | 应用方法 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [12] | WIMAX | 3.3 ~ 4.0 | 4.05 | 24 × 24 | -2.5 | 参数扫描 |
| | WLAN | 5.1 ~ 5.8 | 0.7 | | -2.1 | |
| | ITU | 7.2~7.8 | 0.67 | | -1.0 | |
| [13] | WLAN | 2.08~2.87 | 14.43 | 31 × 35 | -6.5 | 参数扫描 |
| | WIMAX | 3.20~3.82 | 3.14 | | -5.8 | |
| | INST | 4.35~4.83 | 1.98 | | -6.0 | |
| | X-band | 6.98~7.73 | 1.99 | | -8.9 | |
| | ITU | 7.91~8.66 | 1.57 | | -3.0 | |
| [15] | WIMAX | 3.20~3.75 | 2.19 | 20 × 28 | — | DE 和 NMR |
| | WLAN | 5.05~5.79 | 1.27 | | | |
| | X 波 | 7.88~8.75 | 1.36 | | | |
| [16] | WIMAX | 3.23~3.70 | 1.06 | 31 × 18 | — | ALO-LMBP 神经网络 |
| | ITU | 8.01~8.66 | 0.94 | | | |
| 本文 | WIMAX | 3.31~3.69 | 0.29 | 32.5 × 26 | -12.5 | MOEA/D |
| | WLAN | 5.25 ~ 6.13 | 3.59 | | -10.8 | |
| | ITU | 8.01 ~ 8.51 | 0.06 | | -19.0 | |

## 4 结论

本文设计了一款三陷波超宽带天线,利用 MOEA/D 算法优化陷波结构(刻蚀的 U 形缝隙和加载的 C 形开口环)的结构参数和加载位置,实现了在 WIMAX、WLAN、ITU 频段较为精确的陷波效果,其陷波频段误差最低为 0.06%。相比于其他方法,本文采用的方法设计周期短,天线性能更加优异,陷波频段误差均小于 3.6%,陷波处增益均在-10 dB 以下。通过改变目标函数,本方法可应用在其他天线设计中,有效地提高了设计效率,为设计高效高性能的天线提供了一种新方法。

**参考文献:**

[1]郑博仁. 小型化超宽带天线的研究与设计[D]. 成都:西南交通大学,2021.

[2]李顺利,马俊杰,侯守坡. 一种双面超宽带双陷波天线[J]. 山东工业技术,2021(5):89-92.

[3]王友保,郑大鹏,刘振. 一种紧凑型超宽带双陷波天线的设计[J]. 电子元件与材料,2021,40(1):99-104.

[4]RASHID M A, SHAH S M, MAJID H A, et al. A highly miniaturized ultra-wide band antenna with a triple-band notch for wearable applications[J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering,2022,11(1):74-81.

[5]AL-DWAIRI M O. A planar UWB semicircular-shaped monopole antenna with quadruple band notch for

WIMAX, ARN, WLAN and X-Band[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE),2020,10(1):908-918.

[6]GAO G, HU B, YANG C, et al. Design of a dual band-notched UWB antenna and improvement of the 5.5 GHz WLAN notched characteristic[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications,2019,33(14):1-12.

[7]ELKORANY A S, MOHAMED H A, ELSHARKAWY Z F. Simple ultra-wide band antenna with double band rejection capability using double inclined elliptical split ring resonators[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing,2021,108:59-67.

[8]ANEES A, NIAMAT H, JAEMIN L, et al. Triple rectangular notch UWB antenna using EBG and SRR[J]. IEEE Access,2021,9:2508-2515.

[9]DJALAL Z K, ZAHRA M F. Compact diamond-shaped UWB antenna with WLAN/WIMAX band-notched using a single CSRR[J]. Telecommunications and Radio Engineering,2021,80(8):1-11.

[10]史道玲,朱益志,王静.一种简洁的三陷波超宽带天线设计[J].太原学院学报(自然科学版),2021,39(1):40-43.

[11]南敬昌,李文佳,高明明.具有双陷波特性的六边形分形超宽带缝隙天线[J].微波学报,2021,37(2):42-48.

[12]TRIMUKHE M A, HOGADE B G. Compact ultra-wide band antenna with triple band notch characteristics using EBG structures[J]. Progress In Electromagnetics Research C,2019,93:65-77.

[13]CAO X, XIA Y, WU L, et al. The design of a compact quintuple band-notched UWB antenna[J]. Progress In Electromagnetics Research C,2019,97:241-253.

[14]罗佳君,李良荣.五陷波超宽带天线的研究与设计[J].微波学报,2020,36(6):84-88.

[15]GURDEEP S, URVINDER S. Triple band-notched UWB antenna design using a novel hybrid optimization technique based on DE and NMR algorithms[J]. Expert Systems With Applications,2021,184:115299.

[16]南敬昌,曹馨元,高明明,等. 一种基于 ALO-LMBP 神经网络的双陷波特性超宽带天线逆向建模研究方法[C]//2021 年全国微波毫米波会议论文集(上册).南京:[s.n.],2021:382-384.

[17]丁大维. 基于 MOEA/D 的优化技术及其在天线优化设计中的应用[D].合肥:中国科学技术大学,2015.

# Design of Ultra-Wide Band Antenna with Triple Band Notch Based on MOEA/D Algorithm

SONG Zhi[1], CHEN Jiayi[2], XUE Yanbing[2], CHEN Baojun[2]

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract**: In order to suppress interference in WIMAX (3.3-3.7 GHz), WLAN (5.150-5.825 GHz) and ITU (8.01-8.50 GHz) bands in ultra-wide band communication, an ultra-wide band antenna with three notch characteristics optimized based on MOEA/D algorithm is proposed. The antenna adopts a T-shaped structure as a radiating patch and realizes 3-12 GHz ultra-wide band by changing the shape of the patch. Two U-shaped slots are etched on the radiating patch, and C-shaped open rings are loaded on both sides of the transmission line to design the notch of the antenna. MOEA/D algorithm is used to optimize the structural parameters and loading positions of the notch structure, achieving notch effects in the frequency bands of 3.31-3.69 GHz, 5.25-6.13 GHz and 8.01-8.51 GHz with successfully suppressed band interference. Compared with the traditional design method of frequency sweep optimization, the antenna designed by MOEA/D algorithm has a gain as low as -19 dB in the notch band, and the accuracy error of each notch frequency band is less than 3.6%, which improves the design efficiency of the antenna and has certain engineering application value.

**Keywords**: ultra-wide band antenna; MOEA/D algorithm; multiple notches