

## 具有陷波特性的改进 Sierpinski 分形超宽带天线

胡章芳 胡银平\* 罗元 辛伟  
(重庆邮电大学光电工程学院 重庆 400065)

**摘要:** 为了避免 WLAN 窄带通信系统对超宽带通信系统的干扰, 该文提出一种具有陷波特性的改进 Sierpinski 分形超宽带天线。天线的辐射单元是改进的 4 阶 Sierpinski 分形结构, 通过采用共面波导馈电技术以及增加 Sierpinski 分形的迭代次数, 可有效展宽天线的带宽, 从而实现覆盖 UWB(3.1 ~ 10.6 GHz) 频段的宽频特性。在分形贴片上增加两个对称的 L 型开路枝节, 实现了 5.03 ~ 5.85 GHz 频段的双陷波特性, 能有效抑制 WLAN 频段对超宽带通信系统的干扰。天线的尺寸较小, 仿真和实测结果表明天线可广泛适用于各种 UWB 通信系统。

**关键词:** 超宽带天线; Sierpinski 分形; 陷波; 无线局域网

**中图分类号:** TN823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)06-1520-05

**DOI:** 10.11999/JEIT160738

## Modified Sierpinski Fractal UWB Antenna with Band-notched Characteristic

HU Zhangfang HU Yinping LUO Yuan XIN Wei

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** A modified Sierpinski fractal Ultra WideBand (UWB) antenna with band notch characteristic is proposed to refrain the interference from WLAN. The radiating path is the modified fourth order Sierpinski fractal structure. The bandwidth of the antenna is effectively expanded and can cover the bandwidth of UWB band (3.1~10.6 GHz) by using coplanar waveguide feed technology and increasing the number of iterations of Sierpinski fractal. The notch band characteristic in 5.03~5.85 GHz is realized by adding two symmetrical L-shaped stubs on the fractal path, which can effectively suppress the interference of WLAN. The antenna has a compact size, and the simulation and measurement results show that the antenna can be widely used in all kinds of UWB communication systems.

**Key words:** Ultra WideBand (UWB) antenna; Sierpinski fractal; Band-notched; WLAN

### 1 引言

超宽带(Ultra WideBand, UWB)技术以其高速率、低功耗、干扰小、分辨率高等优点在无线通信领域得到了快速发展。超宽带天线作为超宽带系统中重要组成部分也成了研究热点, 超宽带天线要求在极宽的带宽内(3.1 ~ 10.6 GHz)具有良好的辐射特性和时域特性。经典的超宽带天线设计方法有 Vivaldi 天线<sup>[1-3]</sup>和对数周期天线<sup>[4]</sup>等, Vivaldi 曲线具有连续渐变的结构, 可以获得较大的带宽, 但 Vivaldi 天线的尺寸都比较大。一些特殊形状的单极子天线采用合适的馈电方式也表现出超宽带的特

性, 如圆单极子天线<sup>[5]</sup>, 六边形单极子天线<sup>[6]</sup>。分形理论引入天线的设计是一种新颖的方法, 分形结构中存在多个不同电尺度的自相似结构, 可以实现天线多频谐振, 增加天线的工作频带以展宽天线的带宽, 而且分形结构具有空间填充性, 能有效缩减天线的尺寸<sup>[7-10]</sup>。文献[10]设计了一款以梯形单元为基础的环状超宽带分形天线, 其带宽覆盖了 4.2 ~ 17.5 GHz, 但是并不能完整地覆盖整个 UWB 工作频段。

然而在超宽带系统工作的频段内也包含了其它的窄带通信系统, 如 5.15 ~ 5.85 GHz 的 WLAN 通信系统。为了避免这些窄带通信系统对超宽带系统的干扰, 一种有效的方法就是设计具有陷波特性的超宽带天线, 使超宽带天线在需要抑制的频带内呈现较大的反射系数。具有陷波特性的超宽带天线可以通过多种方法来实现, 如在天线结构中增加寄生单元<sup>[11-13]</sup>, 或者在辐射贴片或者接地板上开槽<sup>[9,14]</sup>,

收稿日期: 2016-07-11; 改回日期: 2017-01-12; 网络出版: 2017-03-20

\*通信作者: 胡银平 hupcqupt@163.com

基金项目: 重庆市“121”科技支撑示范工程项目 (cstc2015jcyjB0241)

Foundation Item: Chongqing Science and Technology Commission (cstc2015jcyjB0241)

或者贴片上增加  $\lambda/4$  开路枝节都能实现天线表面电流的变化从而形成陷波特性的 [15,16]。引入滤波结构 [17,18] 也可以有效抑制干扰频段，文献[18]采用阶梯阻抗谐振器实现了多阻带超宽带天线，但是设计过程较为复杂，尺寸也比较大。

本文设计了一种改进型的 Sierpinski 分形超宽带天线，天线采用共面波导馈电技术，通过增加 Sierpinski 分形的迭代次数可实现了能覆盖 UWB 频段的超宽带特性。在分形贴片上引入两个对称的  $\lambda/4$  开路枝节，实现了在 5.03 ~ 5.85 GHz 频段的陷波特性的，能够有效抑制 WLAN 频段的干扰。天线的最终尺寸为 30 mm × 16 mm × 0.8 mm，同时天线在通带内具有良好的辐射特性及时域特性和稳定的增益。

### 2 分形结构的设计

分形结构的自相似特性和复杂性，使得把其应用于天线设计会呈现多频谱谐振的特征，如果各个谐振频点之间的阻抗很平缓，各个频段融合在一起便会呈现宽带的特性。本文设计的 Sierpinski 分形结构是在菱形贴片的基础上迭代形成，如图 1 所示，无限地叠加后便形成了理想的分形结构。结构中每一个精细结构都与整体呈相似状态，这种相似特征便是分形的自相似性。

其迭代过程可以由迭代函数系统 (Iterated Function System, IFS) 来描述，这种迭代过程是一系列的自仿射过程，设  $(x_0, y_0)$  是初始的点， $(x', y')$  是经过仿射变换后的点，则仿射过程可由式(1)表示。

$$w \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cos \theta & -b \sin \varphi \\ a \sin \theta & b \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \quad (1)$$

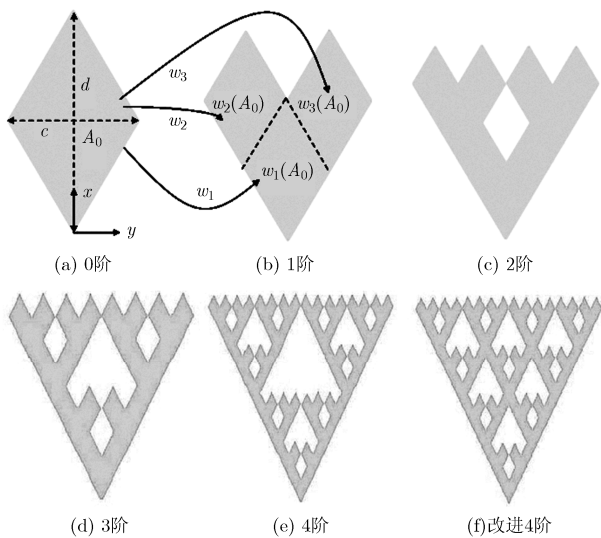


图 1 Sierpinski 分形的迭代过程

其中  $a, b$  是控制  $x$  方向和  $y$  方向比例变化的量； $\theta$  和  $\varphi$  是分别控制  $x$  轴向和  $y$  轴向旋转变化的量； $c, d$  是控制线性平移的量。本文的 Sierpinski 分形结构的迭代过程并不涉及旋转，只有  $x$  方向和  $y$  方向的缩放，所以  $\theta = \varphi = 0$ 。如图 1 所示，假设图形  $A_0$  两对角线分别为  $d$  和  $c$  的菱形结构， $w_1, w_2, w_3$  是自仿射变换，将这些自仿射变换应用到结构  $A_0$  上，得到  $w_1(A_0), w_2(A_0), w_3(A_0)$ ，则

$$w_1 \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$w_2 \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -c/2 \\ d/2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$w_3 \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c/2 \\ d/2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

将它们叠加就得到新的几何结构，可表示为

$$W(A_0) = \bigcup_{i=1}^3 w_i(A_0) \quad (5)$$

式中， $W$  为 Hutchinson 算子，将  $W$  重复应用于前一阶图形，便得到了迭代的分形结构，即用公式表示为  $A_n = W(A_{n-1})$ ， $A_n$  表示迭代了  $n$  次的分形结构。

### 3 天线的设计与分析

具有陷波特性的 Sierpinski 分形超宽带天线的整体结构如图 2 所示，经过仿真优化后，具体参数如表 1 所示。将改进的 4 阶 Sierpinski 分形结构印刷在尺寸为  $W \times L \times H$  mm<sup>3</sup> 的 FR4 介质板上，其介电常数  $\epsilon_r = 4.4$ ，正切损耗角  $\tan(\delta) = 0.02$ 。天线采用共面波导馈电的方式，接地板与辐射贴片在同一面上，接地板采用梯形结构，可有效地改善天线带内阻抗匹配特性。为了使天线在超宽带频带实现抑制 WLAN(5.15 ~ 5.85 GHz) 频段的干扰，在 Sierpinski 分形辐射贴片上增加两个对称的，宽度都为  $t_s$  的开路枝节，实现对 WLAN 频段的阻断。

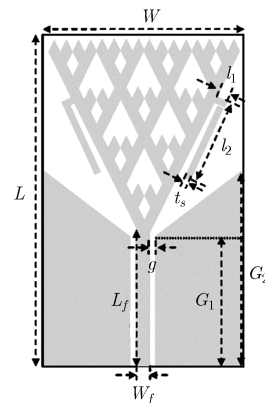


图 2 Sierpinski 分形天线的结构

表 1 天线的参数(mm)

$W$	$L$	$H$	$W_f$	$L_f$	$l_1$	$l_2$	$t_s$	$g$	$G_1$	$G_2$
16	30	0.8	1.5	13.5	0.5	8.1	0.2	0.45	12.8	17.6

为了研究分形迭代次数对天线性能的影响, 分别对 0 阶, 1 阶, 2 阶, 3 阶, 4 阶以及改进的 4 阶 Sierpinski 分形天线进行了仿真分析。图 3 显示了不同迭代次数的 Sierpinski 分形天线的  $S_{11}$  参数, 随着分形迭代次数的增加, 天线  $S_{11}$  小于  $-10$  dB 的工作频带逐渐展宽, 并且最低工作频率依次减小, 这得益于 Sierpinski 分形结构具有自相似性和空间填充性。对比 4 阶 Sierpinski 分形天线和改进型的 4 阶 Sierpinski 分形天线在工作频段内的  $S_{11}$  参数明显降低, 说明改进型的 Sierpinski 分形结构引入的单元可以改善天线带内阻抗匹配特性。研究发现, 共面波导的接地板结构对天线的匹配特性也有很大的影响, 为了研究接地板的结构对天线性能的影响, 在  $G_1 = 12.8$  mm 不变的情况下, 令  $G_2 = 12.8$  mm (即矩形接地板),  $G_2 = 15.2$  mm,  $G_2 = 17.6$  mm 进行仿真分析, 结果如图 4 所示。随着  $G_2$  的增大, 天线在带内的  $S_{11}$  得到降低, 说明采用梯形结构的接地板能够有效改善天线的阻抗匹配特性, 使天线获得良好的性能。

为了实现对 WLAN 频段的阻断, 引入了两个对

称的 L 型开路枝节, 其枝节的长度应为相应陷波中心频率对应波导波长的  $1/4$ , 天线在这一频率附近工作时, 表面电流大量集中在枝节附近, 造成阻抗失配, 从而形成陷波。陷波中心频率与枝节长度关系为

$$f_n = c / 4l\sqrt{(\epsilon_r + 1)} / 2 \quad (6)$$

式中,  $f_n$  为陷波中心频率,  $c$  为自由空间中的光速,  $l$  为开路枝节的总长度,  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数。图 5 和图 6 显示了 L 型开路枝节部分参数对天线陷波特性的影响, 图 5 显示了开路枝节的长度  $l_2$  对陷波频率的影响, 随着  $l_2$  的增大 5.5 GHz 处陷波的谐振频率逐渐减小。这意味着谐振枝节的尺寸增大, 电流路径增大, 其对应的陷波中心频率必然降低, 这与式(6)相吻合。图 6 显示了枝节的宽度  $t_s$  对陷波特性的影响, 开路枝节的宽度从 0.1 mm 增大到 0.3 mm 时, 其陷波的带宽逐渐展宽。由此可见, 陷波的中心频率可以由枝节的长度控制, 而陷波的带宽可由枝节的宽度来调节。

图 7 是 Sierpinski 分形超宽带天线的实物图, 天线的整体尺寸为  $30$  mm  $\times$   $16$  mm  $\times$   $0.8$  mm。将制作好的天线焊接在  $50 \Omega$  的 SMA 接头上, 连接矢量网络分析仪进行实测。图 8 给出了双陷波树状分形天线的回波损耗的仿真和实测图, 由于加工和焊接存在误差, 实测和仿真结果有一定的误差, 特别是开路枝节的尺寸对陷波影响很大, 加工误差导致陷波

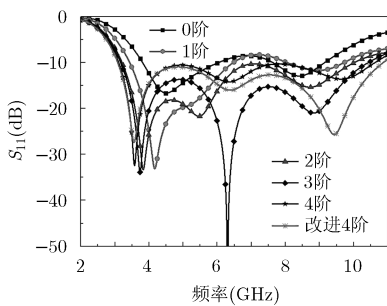


图 3 不同阶数的 Sierpinski 分形结构对天线  $S_{11}$  参数的影响

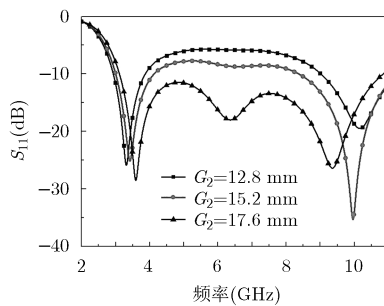


图 4 不同  $G_2$  对天线  $S_{11}$  参数的影响

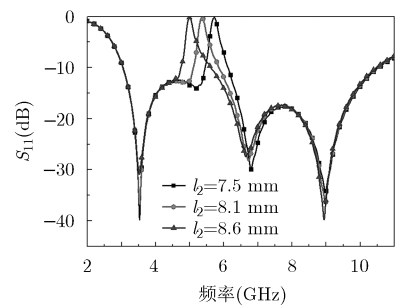


图 5 不同  $l_2$  对天线  $S_{11}$  参数的影响

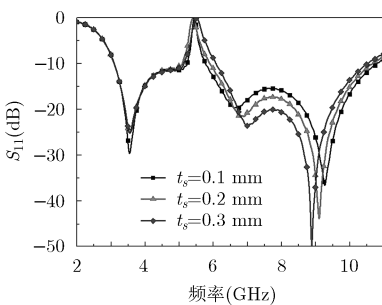


图 6 不同  $t_s$  对天线  $S_{11}$  参数的影响

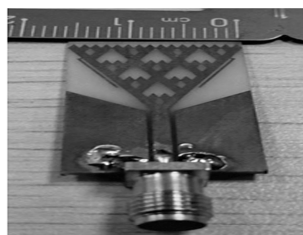


图 7 天线的实物图

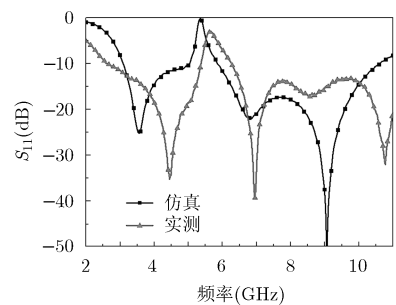


图 8 天线仿真和实测的  $S_{11}$  参数

频段的偏移(仿真的陷波频段 5.03 ~ 5.85 GHz, 实测的陷波频段为 5.35 ~ 6.26 GHz)。仿真和测试表明天线可覆盖超宽带 3.1 ~ 10.6 GHz 频段, 并在 WLAN 频段处形成陷波, 有效阻断了 WLAN 频段对超宽带通信系统的干扰。

图 9 显示了天线测试的方向图 (3.5 GHz, 7.5 GHz, 9.5 GHz), 天线在低频段的  $xoy$  面(E 面)和  $xoz$  (H 面)方向图具有良好的全向辐射特性, 在高频段  $xoy$  面呈蝴蝶状, 但仍然保持着良好的全向辐射能力。图 10 是天线仿真和测试的峰值增益, 天线的增益在工作频段内稳定在 2 ~ 4 dBi 左右, 而在陷波频段增益急剧下降, 这也证明了 L 型开路枝节具有良好的阻断特性。

为了评价天线的时域性能, 将两根相同的 Sierpinski 分形天线面对面相距 300 mm 放置(其距离要大于天线的远场距离), 讨论天线在工作频段的传输函数和群时延(group delay)。传输函数就是系统的传输系数  $S_{21}$ 。要求在工作频带内尽量平坦, 群延时是指不同频率分量在同一介质中传输时, 到达接收机的时间就会不同或者有相位差, 群延时越小, 信号失真就越小, 对应公式为

$$\tau = \frac{-d\varphi(\omega)}{d(\omega)} = \frac{-d\varphi(f)}{2\pi d(f)} \quad (7)$$

其中,  $\varphi(f)$  是辐射信号的相位。图 11 是天线测试的群时延和  $S_{21}$ , 可以看出天线的传输函数  $S_{21}$  在工作频段内稳定在 -30 dB 至 -45 dB 内, 而在陷波频段内出现了较大的波动。天线的群时延除了在陷波频段有较大的波动外, 在工作频段内的群时延稳定在 2 ns 内。这些测试结果表明天线在 UWB 频段内具有稳定的相位特性。

### 4 结论

本文设计了一款 CPW 馈电的改进 Sierpinski 分形超宽带天线, 将分形引入超宽带天线的设计, 利用分形结构的自相似性, 通过增加分形的迭代次数, 可以展宽天线的带宽。通过设计梯形结构的地板改善了天线在带内的阻抗匹配特性, 有效减小了天线的反射系数。在分形贴片上增加两个对称的 L 型开路枝节后, 实现了在 WLAN 频段的陷波特性, 有效阻断了 WLAN 频段对 UWB 频段的干扰。而且天线的各项测试表明, 除了在陷波频段内, 该天线具有良好的辐射特性及时域特性, 和稳定的增益。这些都表明天线可适用于各种 UWB 通信系统。

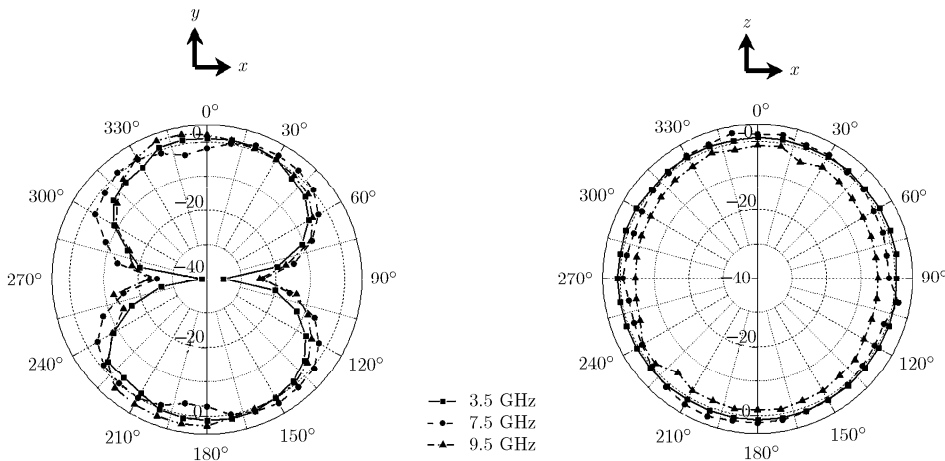


图 9 天线的远场方向图

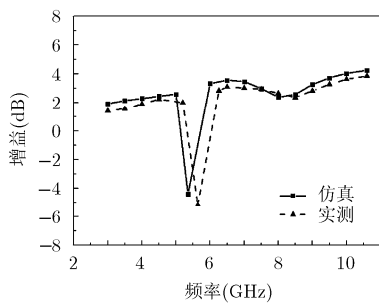


图 10 天线的峰值增益

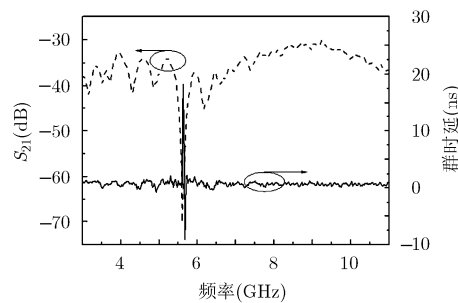


图 11 天线的群时延和传输函数  $S_{21}$

## 参考文献

- [1] WU Jiangniu, ZHAO Zhiqin, NIE Zaiping, *et al.* A printed UWB vivaldi antenna using stepped connection structure between slotline and tapered patches[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13(1): 698-701.
- [2] NASSAR I T and WELLER T M. A novel method for improving antipodal vivaldi antenna performance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3321-3324.
- [3] NATARAJAN R, GEORGE J V, Kanagasabai M, *et al.* A compact antipodal vivaldi antenna for UWB applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14(1): 1557-1560.
- [4] AMINI A, ORAZI H, and CHAYCHI ZADEH M A. Miniaturized UWB log-periodic square fractal antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 14(1): 1322-1325.
- [5] LIANG Jianxin, CHIAU C C, CHEN Xiaodong, *et al.* Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(11): 3500-3504.
- [6] 吴毅强, 张平平, 胡少文. 一种新型的具有带阻特性的超宽带天线[J]. *电子器件*, 2014, 37(1): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.01.001.
- WU Yiqiang, ZHANG Pingping, HU Shaowen, *et al.* A novel UWB micro-strip antenna with band-notched characteristics [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2014, 37(1): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.01.001.
- [7] WERNER D H and GANGULY S. An overview of fractal antenna engineering research[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, 45(1): 38-57.
- [8] DHAR S, PATRA K, GHATAK R, *et al.* A dielectric resonator-loaded Minkowski fractal-shaped slot loop heptaband antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1521-1529.
- [9] CHOUKIKER Y K and BEHERA S K. Modified Sierpinski square fractal antenna covering ultra-wide band application with band notch characteristics[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(8): 506-512.
- [10] 赵小莹, 臧洪明, 张功磊, 等. 一种新颖的树状分形超宽带天线[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 1008-1012. doi: 10.11999/JEIT140816.
- ZHAO Xiaoying, ZANG Hongming, ZHANG Gonglei, *et al.* A novel ultra-wideband fractal tree-shape antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 1008-1012. doi: 10.11999/JEIT140816.
- [11] LI Tong, ZHAI Huiqing, and LI Guihong. Compact UWB band-notched antenna design using interdigital capacitance loading loop resonator[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(1): 724-727.
- [12] OJAROUDI N and OJAROUDI M. Novel design of dual band-notched monopole antenna with bandwidth enhancement for UWB applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 698-701.
- [13] 董健, 胡国强, 徐曦. 一种可控三陷波超宽带天线设计与研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(9): 2276-2281. doi: 10.11999/JEIT141566.
- DONG Jian, HU Guoqiang, XU Xi, *et al.* Design and analysis of controllable tri-band-notched ultrawide band antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2276-2281. doi: 10.11999/JEIT141566.
- [14] GAO Peng, XIONG Ling, DAI Jianbo, *et al.* Compact printed wide-slot UWB antenna with 3.5/5.5 GHz dual band-notched characteristics[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(4): 983-986.
- [15] WENG Y F, CHEUNG S W, and YUK T I. Design of multiple band-notch using meander lines for compact ultra-wide band antennas[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(8): 908-914.
- [16] 吴爱婷, 官伯然. 一种具有三阻带特性的超宽带天线的设计与研究[J]. *微波学报*, 2015, 31(2): 15-19. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201502004.
- WU Aiting and GUAN Boran. Design and research of a compact CPW-fed UWB antenna with triple band-notched characteristic[J]. *Journal of Microwaves*, 2015, 31(2): 15-19. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201502004.
- [17] MA T G and TSAI J W. Band-rejected ultrawideband planar monopole antenna with high frequency selectivity and controllable bandwidth using inductively coupled resonator pairs[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(8): 2747-2752.
- [18] ZHANG Y, HONG W, and YU C. Design and implementation of planar ultra-wideband antennas with multiple notched bands based on stepped impedance resonators[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2009, 3(7): 1051-1059.
- 胡章芳: 女, 1969年生, 副教授, 研究方向为光电信息处理。
- 胡银平: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为分形超宽带天线设计。
- 罗元: 女, 1972年生, 教授, 研究方向为信号与信息处理、数字图像处理。
- 辛伟: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为分形多频天线设计。