

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.12.014

一种新型平面结构的双陷波超宽带天线设计*

朱晓明^{1,2,**}, 杨晓冬¹, 陈 彭¹

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江工程学院 电气与信息工程学院, 哈尔滨 150050)

摘 要: 为了避免现存的一些窄带通信系统对超宽带天线的干扰, 提出了一种具有双陷波特性的超宽带天线结构。由于采用了渐变式阶梯阻抗匹配结构作为超宽带基础天线的馈电, 使天线具有了宽阻抗匹配能力。通过在基础天线背面附加双偏 T 寄生单元和在辐射贴片上开窗的联合方法, 实现了超宽带天线的双陷波特性的。天线电流分布结果可以完全反映出在陷波频率下两种方法的谐振抑制作用, 而且实验结果表明该结构的对 WLAN(5.15 ~ 5.825 GHz) 和 WiMAX(3.4 ~ 3.69 GHz) 频段的信号起到了有效的抑制作用, 同时在工作频段内表现出较好的全向辐射特性。

关键词: 超宽带天线; 陷波; 渐变式阶梯阻抗匹配; 偏 T 形寄生单元; 开窗

中图分类号: TN823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)12-1614-06

Design of a Dual Band-notched UWB Antenna with Novel Planar Structure

ZHU Xiao-ming^{1,2}, YANG Xiao-dong¹, CHEN Peng¹

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: To avoid interference from existing narrowband communication systems, an ultra wideband (UWB) antenna with dual band-notched function is proposed. The modified base antenna structure has a wide impedance matching characteristic because of gradual stepped impedance feeder. The proposed antenna realizes dual band-notched function for UWB antenna by combining two biased T-shaped parasitic elements in the rear side with a window aperture on the radiation patch. The antenna current distributions reflect resonant suppression of the two methods. Besides, the experimental results demonstrate that the proposed antenna prevents signal interference from WLAN (5.15 ~ 5.825 GHz) and WiMAX (3.4 ~ 3.69 GHz) effectively. However it has better omnidirectional radiation patterns in working frequencies.

Key words: UWB antenna; notched band; gradual stepped impedance matching; biased T-shaped parasitic element; window operation

1 引言

2002 年, 美国联邦通信委员会 (FCC) 正式允许将超宽带 (UWB) 技术应用于民用领域, 并指定了 3.1 ~ 10.6 GHz 作为 UWB 的工作频段^[1], 由此可以

全部覆盖频段范围的 UWB 天线成为一种新颖的天线类型。然而在 UWB 频段内同时伴随着许多窄带无线通信系统, 如 IEEE 802.11b/g/n 标准下 WLAN 工作频段 2.4 ~ 2.483 5 GHz, IEEE 802.11a 标准下

* 收稿日期: 2013-08-15; 修回日期: 2013-11-05 Received date: 2013-08-15; Revised date: 2013-11-05

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (ZD201115); 黑龙江工程学院青年科学基金项目 (2013QJ09)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (ZD201115); Youth Science Foundation of Heilongjiang Institute of Technology (2013QJ09)

** 通讯作者: zhuxiaoming213@163.com Corresponding author: zhuxiaoming213@163.com

WLAN 工作频段 5.15 ~ 5.825 GHz, WiMAX 工作频段 2.5 ~ 2.69 GHz、3.4 ~ 3.69 GHz、5.25 ~ 5.850 GHz, 以及用于卫星通信的 C 频段 3.7 ~ 4.2 GHz 和 X 频段 7.25 ~ 7.75 GHz、7.9 ~ 8.4 GHz 等。为避免 UWB 系统与这些窄带无线通信系统的干扰,可在天线装置前端引入带阻滤波器,但是在系统的体积、复杂度和阻抗匹配等方面都会引入不同程度的问题,因此直接在 UWB 天线的基础上设计出具有陷波特性的天线结构显得尤为重要。目前常用的陷波方法是在微带辐射贴片或接地板的适当位置处开不同形状的缝隙,如 U 形缝隙、L 形缝隙、弧形缝隙等^[2-5],引起特定频段的谐振,改变 UWB 天线的辐射特性。还有在较大的凹槽内添加小的谐振器^[6],或是在贴片附近放置寄生单元^[7]等方法,以实现在特定频段内具有滤波的功能。这些天线通常采用同一种陷波实现方法,利用贴片上不同的缝隙形状实现多频带的抑制功能,因此对天线的尺寸有一定的限制。

本文将两种超宽带天线的陷波抑制方法相结合,提出了一种具有双陷波特性的 UWB 天线结构,为了更加有效地实现超宽带天线的设计,采用基于共面波导(CPW)结构的改进印刷单极子天线为基础模型,通过辐射贴片开窗方法和添加附加寄生单元方法实现了两个频段的陷波功能,可以有效减小天线的平面尺寸。

2 UWB 基础天线的设计

UWB 天线结构如图 1 所示,介质基片厚度 h 为 1.6 mm,相对介电常数 ϵ_r 为 4.4,损耗正切 $\tan\delta$ 为 0.02,介质基片的有效介电常数为

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W}\right)^{-1/2} \tag{1}$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)^{-1/2} \tag{2}$$

式中, c 是光速, f_r 是谐振频率,天线宽度 W 的选取要小于上式计算结果,否则会产生高次模,从而引起场的畸变。天线长度 L 选取约为

$$L \approx \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} \tag{3}$$

通过式(1) ~ (3),选取天线的尺寸为 12 mm×22 mm,该尺寸小于目前所设计的具有陷波功能的 UWB 天线^[8-11]。基础天线采用 CPW 馈电方式,导带与接地面均位于同一平面,这样的结构实现简单而且更适合于构成微波和毫米波的混合集成电路。

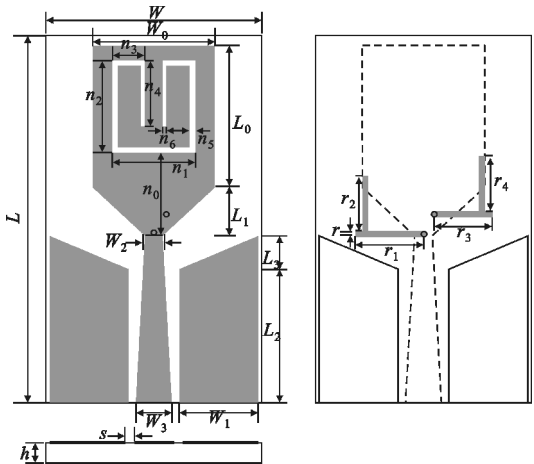


图 1 双陷波 UWB 天线模型
Fig. 1 Geometry of the UWB antenna with two notched bands

由于 UWB 天线频段覆盖范围较宽,使得阻抗匹配问题显得尤为重要,为了满足微带馈线 50 Ω 的阻抗匹配特性,阶梯阻抗微带馈线结构可以在一定程度上满足要求,其中阶梯级数越多,就会在越多的频率点上实现阻抗匹配,从而拓宽频段范围,但是过多的阶梯级数会使得变换器的总长度增加,尺寸会过大,结构设计也就更加困难,目前多采用的是一或二级的阶梯结构^[12]。

本文提出了渐变导带的 CPW 馈电结构,在某种程度上相当于多阶梯阻抗匹配结构,这样就实现了 UWB 天线在宽频带下的阻抗匹配,使得天线的输入阻抗随着频率的变化波动很小。UWB 天线的辐射贴片为矩形,通过对矩形贴片形状的改变,减小了直角弯折处电流的不连续性,展宽天线的频带范围。通过改变 L_1 参数,可见天线频宽变化情况如图 2 所示。经过模型优化设计,最终确定基础天线模型参数如下: $W_0=7$ mm, $W_1=4.8$ mm, $W_2=1.1$ mm, $W_3=1.8$ mm, $L_0=8.5$ mm, $L_1=3$ mm, $L_2=8$ mm, $L_3=1.8$ mm。

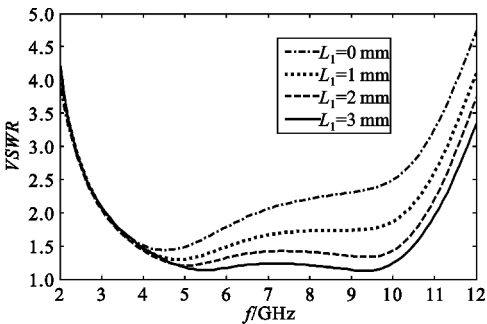


图 2 参数 L_1 对基础天线驻波比的影响
Fig. 2 VSWR of the base antenna with different L_1

3 UWB 天线陷波特性的设计

为了避免 WLAN 和 WiMAX 窄带通信系统对 UWB 信号的潜在影响,必须能够抑制这些频段的干扰信号,在上述基础天线模型之上,通过在天线背面附加寄生单元和在辐射贴片上开窗的混合方法,本文提出了具有双陷波特性的 UWB 天线结构,结构如图 1 所示。

3.1 附加寄生单元结构

根据天线的场结构分析,在天线背面附加了两个近似 T 形的寄生单元,文中定义为偏 T 形结构,通过两个圆柱探针将辐射贴片与寄生单元相连接,实现了天线对 5.15 ~ 5.825 GHz 频段内的其他信号的抑制。偏 T 形寄生单元长度 l_{n1} 与陷波频率 f_{n1} 关系如下所示:

$$f_{n1} = \frac{c}{4l_{n1}\sqrt{\epsilon_e}} \tag{4}$$

在天线的实际设计中有效介电常数 ϵ_e 可简化为

$$\epsilon_e \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tag{5}$$

UWB 基础天线平面尺寸较小,结构较紧凑,因此必须将寄生单元弯折才能达到陷波频率对尺寸的要求。双偏 T 形寄生单元长度近似相等:

$$l_{n1} \approx r_1 + r_2 \approx r_3 + r_4 \tag{6}$$

对 r_1 和 r_3 优化如图 3 所示,当寄生单元结构为双 L 形时($r_1=3.5\text{ mm}$ 、 $r_3=3\text{ mm}$),虽然具有了陷波功能,但陷波中心频率处 VSWR 仅有 3.34,陷波效果较差;当采用偏 T 结构时,寄生单元表面的电流值增大,VSWR 提高,陷波能力加强。对 r_2 和 r_4 优化结果如图 4 所示。

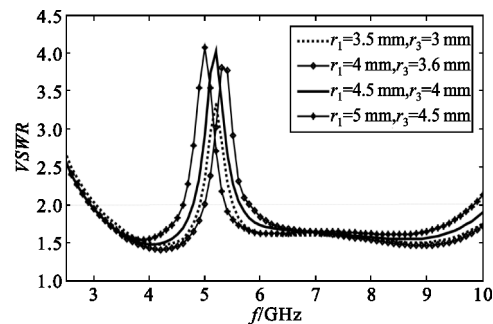


图 3 参数 r_1 和 r_3 对陷波天线驻波比的影响
Fig. 3 VSWR of the band-notched antenna with different r_1 and r_3

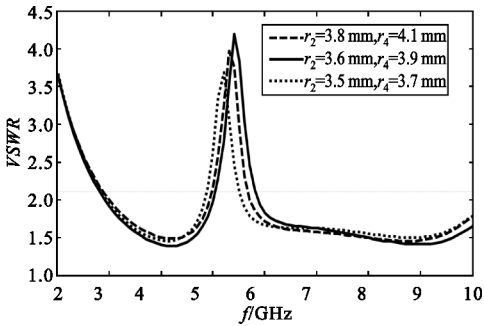


图 4 参数 r_2 和 r_4 对陷波天线驻波比的影响
Fig. 4 VSWR of the band-notched antenna with different r_2 and r_4

从上述寄生单元的尺寸优化分析可见,增加 r_1 和 r_3 的长度使得所对应设计的陷波中心频率减小,因为公式(4)表明寄生单元尺寸与陷波中心频率成反比关系;在寄生单元总体尺寸 l_{n1} 不变的前提下,长度 r_2 和 r_4 在一定程度上决定了天线陷波能力的强弱,尺寸的增加或减少都会使得 VSWR 的数值减小,降低天线的陷波能力。寄生单元之所以采用两个偏 T 结构是因为两者在陷波频段内可以产生共同谐振的作用,增加了陷波中心频率所对应的 VSWR,大大提高了单一寄生单元的陷波能力。

3.2 辐射贴片开窗结构

为了在 3.4 ~ 3.69 GHz 频段再产生第二个陷波,本文采用在辐射贴片上开窗的方法来产生陷波谐振点,开窗长度 l_{n2} 与陷波频率 f_{n2} 关系同理于公式(4)。

由于第二陷波中心频率相对较小,使得开窗长度 l_{n2} 较大,必须对其进行多处弯折处理才能在辐射贴片上起到陷波作用。为避免与第一陷波频段产生干扰,必须合理选择开窗位置。当 n_0 为 1 ~ 2 mm 时,在俯视结构上窗口与偏 T 形寄生单元相重合,会对第一陷波频段造成很大影响,使其失去原有频段的陷波特性。

因此,在窗口结构未发生重叠的允许范围内,对窗口与贴片底部距离 n_0 进行优化,结果如图 5 所示。随着 n_0 尺寸的增加,第二陷波频带(3.4 ~ 3.69 GHz)呈现稳定的特性,但对于第一陷波频段的影响较大,主要是因为天线尺寸较小,窗口的位置会对连接偏 T 形寄生单元的探针造成干扰,从而影响到第一陷波频段的中心频率以及陷波能力,所以窗口与寄生单元间要保持相对较远的距离。最终选择 n_0 为 5 mm,此时两陷波段相互影响较小,几乎保

持了在单陷波结构下的陷波特性和。

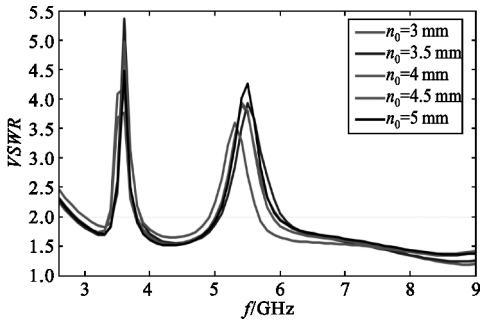


图 5 参数 n_0 对陷波天线驻波比的影响
Fig. 5 VSWR of the band-notched antenna with different n_0

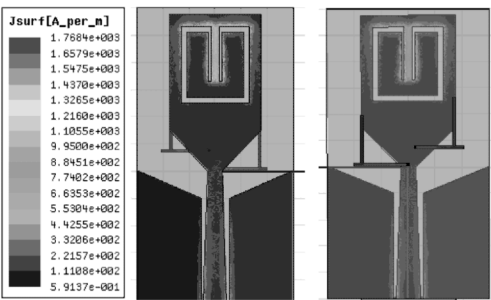
4 实验结果与分析

通过设计和优化寄生单元和开窗两种陷波结构,最终确定合理的陷波 UWB 天线模型尺寸,分别在 3.43 ~ 3.77 GHz 和 5.05 ~ 5.95 GHz 频段内使所设计天线具有了陷波特性和,实际制作天线如图 6 所示。

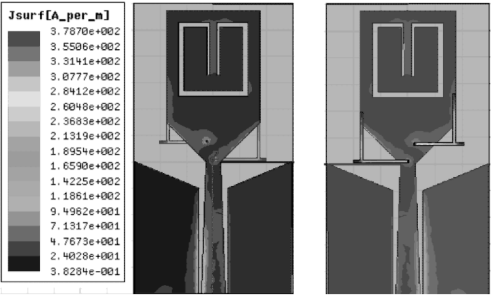


图 6 实际制作的陷波 UWB 天线
Fig. 6 Photo of the fabricated band-notched UWB antenna

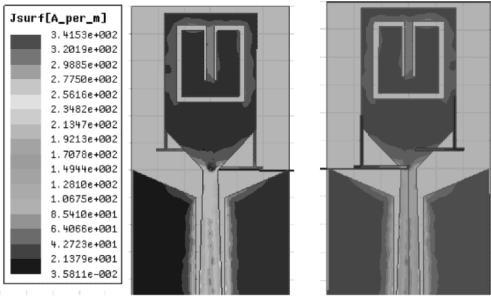
天线电流分布情况如图 7 所示,图(a)表示在第二陷波中心频率 3.6 GHz 下电流主要集中在正面辐射贴片所开窗口的周围;而图(b)表示在第一陷波中心频率 5.5 GHz 下的电流分布主要集中在天线背面的双偏 T 寄生单元结构上,说明在所设计的陷波结构上发生了谐振现象,实现了对其他信号的抑制作用;图(c)和图(d)的频率点选在天线工作频带范围内,其辐射贴片正面的窗口和背面的寄生单元处电流分布并不集中,电流主要集中在渐变导带附近,可见不同频率点下的电流分布情况证明了 UWB 天线两种陷波结构的正确性和工作频段下天线辐射的有效性。



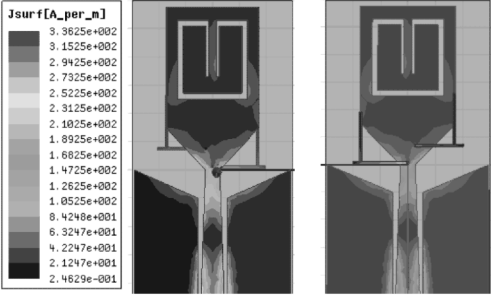
(a) $f=3.6$ GHz



(b) $f=5.5$ GHz



(c) $f=3$ GHz



(d) $f=8.5$ GHz

图 7 陷波超宽带天线的电流分布情况
Fig. 7 Current distributions of the dual band-notched antenna

该天线在工作频段 3 GHz、4.5 GHz、6.5 GHz、9 GHz 时的 E 面和 H 面的归一化方向图如图 8 所示,可见该天线 H 面具有良好的全向辐射的特性,E 面方向图近似偶极子天线的辐射特性,也近似接近于全向辐射特性。

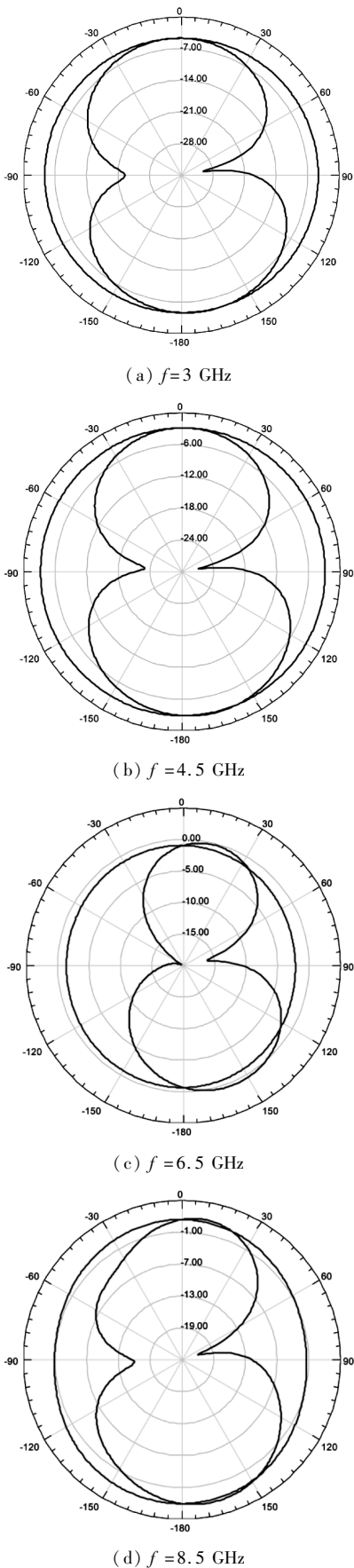


图 8 双陷波天线辐射方向图

Fig. 8 Radiation patterns of the dual band-notched antenna

使用安捷伦 E8362B 矢量网络分析仪对实验制作天线进行阻抗特性测试,测试与仿真的驻波比曲线对比如图 9 所示。测试结果与仿真结果基本吻合,主要是由于实际测试环境和 SMA 接头造成了两者的差异,但整体上可以体现出所设计的天线可以有效地抑制来自 WLAN 和 WiMAX 系统的干扰。

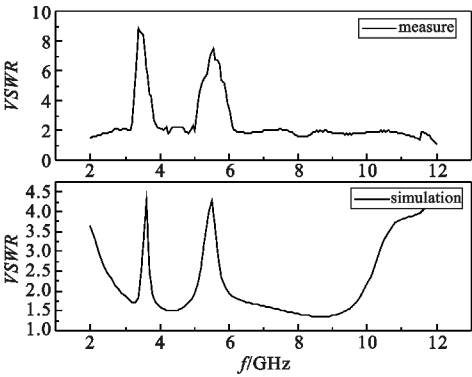


图 9 双陷波 UWB 天线的 VSWR 曲线对比图
Fig. 9 VSWR of the dual band-notched antenna between measurement and simulation

该双陷波天线的增益如图 10 所示,曲线中出现两段下降频段,表明在整个 UWB 频段内天线增益特性较好,但是在所设计的陷波频段下天线性能下降,不能起到辐射的作用,即是在特定频段下达到了陷波抑制的功能。

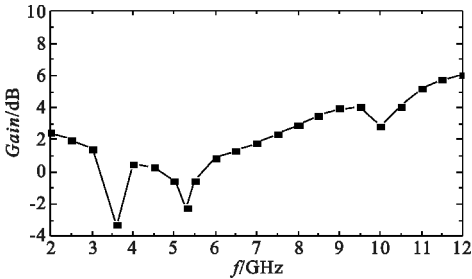


图 10 双陷波 UWB 天线的增益
Fig. 10 Gain of the dual band-notched antenna

5 结束语

本文提出了一种具有渐变阶梯结构的 UWB 基础天线模型,具有宽频带阻抗匹配特性,天线整体尺寸为 12 mm×22 mm×1.6 mm,通过双偏 T 寄生单元和开窗的混合方法,使该天线具有了陷波功能,通过仿真优化调整天线结构尺寸,最终实现了对 WLAN (5.15 ~ 5.825 GHz) 和 WiMAX (3.4 ~ 3.69 GHz) 窄带信号的抑制,天线表面的电流分布特性说明两

种陷波结构的有效性,同时在工作频段范围内天线辐射方向图体现了较好的全向性。制作天线的实测结果表明该天线在两个陷波频段内 VSWR 大于 2,而且增益曲线在此区间内呈现明显下降特性,说明该 UWB 天线可以有效避免 WLAN 和 WiMAX 的干扰信号,并且在超宽带频段内具有 2.8 ~ 6 dB 的增益特性。所设计的双陷波 UWB 天线具有尺寸小、结构简单、易于微波集成和实现等特点,但是在设计过程中,需要通过反复的参数优化才能最终确定天线尺寸,如何对天线参数进行全局、有效的优化方法将是进一步的研究方向。

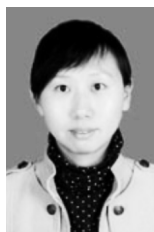
参考文献:

- [1] Federal Communications Commission (FCC). First report and order in the matter of revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems [R]. [S. l.]:ET-Docket, 2002: 98-153.
- [2] Habib M A, Bostanlostan A, Djaiz A, et al. Ultra wide-band CPW-FED aperture antenna with WLAN band rejection [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2010, 106: 17-31.
- [3] Su M, Liu Y A, Li S L, et al. A compact open slot antenna for UWB applications with band-notched characteristic [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2010, 24(14-15): 2001-2010.
- [4] Barbarino S, Consoli F. UWB circular slot antenna provided with an inverted-L notch filter for the 5 GHz WLAN band [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2010, 104: 1-13.
- [5] Dissanayake T, Esselle K P. Prediction of the notch frequency of slot loaded printed UWB antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 3320-3325.
- [6] 蔡云龙,冯正和. 双 F 结构的超宽带印刷椭圆槽陷波天线[J]. 清华大学学报(自然科学报), 2009, 49(7): 944-947.
CAI Yun-long, FENG Zheng-he. Ultrawide band printed elliptical slot band-notched antenna with dual-F slit [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(7): 944-947. (in Chinese)
- [7] Eshtiaghi R, Nourinia J, Ghobadi C. Electromagnetically coupled band-notched elliptical monopole antenna for

UWB applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(4): 1397-1402.

- [8] Wei Y-Q, Yin Y-Z, Xie L, et al. A novel band-notched antenna with self-similar flame slot used for 2.4GHz WLAN and UWB application[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(5-6): 693-701.
- [9] Zhang M, Zhou X, Guo J, et al. A novel ultra-wideband planar antenna with dual band-notched performance [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(1): 90-92.
- [10] Nilolaou S, Davidovic M, Nikolic M, et al. Triple notch UWB antenna controlled by three types of resonators [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Spokane, WA: IEEE, 2011: 178-1481.
- [11] CAO Hai-lin, YANG Li-sheng, CHEN Shu-yu, et al. The design of a novel ultra-wideband cup-shaped monopole antenna [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3): 328-331.
- [12] Nguyen D T, Hyun L D, Park H C. Very compact printed triple band-notched UWB antenna with quarter-wavelength slots [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11): 411-414.

作者简介:



朱晓明(1982—),女,黑龙江哈尔滨人,讲师,博士研究生,主要研究方向为超宽带天线的设计与优化;

ZHU Xiao-ming was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1982. She is now a lecturer and currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns design and optimization of UWB antenna.

Email: zhuxiaoming213@163.com

杨晓冬(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授、博士生导师,主要研究方向为电波传播与天线;

YANG Xiao-dong was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1962. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radio wave propagation and antenna.

陈彭(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,主要研究方向为阵列天线算法。

CHEN Peng was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1980. He is now a lecturer. His research concerns algorithm of antenna array.