

文章编号: 2095-4980(2018)01-0105-05

## 一种宽频带缝隙型手机天线设计

肖霞<sup>1</sup>, 宗卫华<sup>\*1</sup>, 魏向阳<sup>2</sup>, 黄千媛<sup>1</sup>

(1.青岛大学 电子信息学院, 山东 青岛 266071; 2.歌尔声学, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 针对超薄多频带手机的需要, 提出一款新型印刷缝隙型手机天线。天线印刷在 0.8 mm 厚 FR-4 电路板上, 地面开有 2 个缝隙, 其中 1 个为矩形, 另外 1 个为矩形与圆形组合形式。馈电结构采用 50  $\Omega$  微带线与一圆形贴片、一矩形带线组合构成倒 L 状。馈电线的弯折部分在地上的投影落于缝隙的内部, 天线在电路板上占用的区域仅限于缝隙内部, 保持了天线的小型化。此结构缝隙天线能够达到宽带匹配, 测试的 -6 dB 带宽为 0.695~0.805 GHz, 1.5~3.2 GHz, 4~15 GHz, 能够覆盖 LTE700, DCS1800, PCS1900, UMTS, LTE2300, LTE2500, 全球定位系统(GPS), 无线局域网(WLAN) 以及超宽带通信(UWB)的高频段。

**关键词:** 手机天线; 缝隙天线; 宽频带天线; 多频带天线; 贴片天线

**中图分类号:** TN61

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201801.0105

## Design of wideband slot antenna for mobile phone applications

XIAO Xia<sup>1</sup>, ZONG Weihua<sup>\*1</sup>, WEI Xiangyang<sup>2</sup>, HUANG Qianyuan<sup>1</sup>

(1.School of Electronic and Information, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China;

2.GoerTech INC., Qingdao Shandong 266071, China)

**Abstract:** A novel printed slot antenna is presented to meet the requirement of low profile and multiband for a mobile phone. The antenna is printed on a 0.8 mm thick FR-4 substrate with two slots etched on the ground plane. One of the slots has a rectangular shape and the other has a hybrid shape composed of a rectangle and a circle. The antenna is fed by a 50  $\Omega$  microstrip connected to a circular patch and a rectangular strip, forming an inverted-L shape. The footprint of the folded portion of the feeding structure on the ground locates inside the slot region which results in a compact antenna size on the PCB board. The proposed antenna has a wideband impedance matching with measured -6 dB bandwidth of 0.695~0.805 GHz, 1.5~3.2 GHz, and 4~15 GHz covering LTE700, DCS1800, PCS1900, UMTS, LTE2300, LTE2500, Global Positioning System(GPS), Wireless Local Area Network(WLAN), and Ultra-Wideband(UWB) upper band.

**Keywords:** mobile phone antenna; slot antenna; wideband antenna; multiband antenna; patch antenna

智能手机具备通话、上网、导航等功能, 天线带宽需要覆盖移动通信网、WLAN、GPS 等多个频带。WLAN 的主要频带包括: 2.4~2.483 GHz, 5.15~5.35 GHz, 5.725~5.85 GHz。GPS 的频带为 1.565~1.585 GHz。移动通信网的主要频带包括: LTE700(0.698~0.787 GHz), GSM850(0.824~0.894 GHz), GSM900(0.88~0.96 GHz), DCS1800(1.71~1.88 GHz), PCS1900(1.85~1.99 GHz), UMTS(1.92~2.17 GHz), LTE2300(2.305~2.4 GHz), LTE2500(2.5~2.69 GHz)。第五代移动通信(the Fifth Generation, 5G)需要开拓新的频带, 700 MHz 以下的低频段以及 6 GHz 以上的高频段都可能被应用在 5G 中。UWB 由于具有宽的频带(3.1~4.8 GHz, 6.15~10.6 GHz), 也有可能应用在手机中。同时为了适应手机外观轻薄、内部电路复杂的设计环境, 手机天线还需要满足厚度薄、体积小、结构紧凑的小型化特性。因此小型化、宽带化、多频化是手机天线设计的热点问题。

常用的手机天线类型包括印刷缝隙型<sup>[1-10]</sup>、平面倒 F 型(Planar Inverted-F Antenna, PIFA)<sup>[11]</sup>、单极型。相对于其他 2 种天线, 印刷缝隙天线具有面积小、比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)低、天线性能受人脑与人

收稿日期: 2016-06-06; 修回日期: 2016-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501277; 61307050); 山东省高等学校科技计划资助项目(J14LN86)

\*通信作者: 宗卫华 email: weihuazong@126.com

手的影响小等优点<sup>[12]</sup>,但其结构复杂,设计难度大,带宽窄,因此相关的研究并不多,天线的种类比较少。目前已有的缝隙型手机天线大多采用矩形缝隙以及由多个矩形缝隙单元级联的折合结构<sup>[12-31]</sup>,很难进一步拓宽带宽,缩减尺寸,低频段不能覆盖 LTE700,高频段不易拓宽至 GPS,LTE2500 及以上频段。为了拓宽矩形缝隙天线的带宽<sup>[4-8]</sup>,采用集总参数匹配电路结合焊接金属条的方法,实现损耗降低,带宽增宽。但金属条垂直地面焊接,增加了天线的高度和体积。

本文设计了一款宽频带缝隙型手机天线,通过 HFSS 仿真软件对其进行电磁建模、仿真、优化及分析。在其仿真结果较理想的情况下做出实物,并利用网络分析仪测试实物的  $S_{11}$  曲线,将测试结果与仿真结果比较分析。该天线所在的电路板为  $115\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  的 FR4 介质基板,采用  $50\ \Omega$  微带线馈电。天线地上开有 2 条缝隙,分别为矩形缝隙以及矩形和圆形构成的组合缝隙,馈电部分由圆形和矩形贴片组合而成。

## 1 天线结构

本文设计了一款组合型宽频带手机天线,天线结构如图 1 所示。电路板采用相对介电常数  $\epsilon_r=4.4$ ,厚度为  $0.8\text{ mm}$  的 FR4 板,尺寸为  $115\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 。图 1(a)为天线地面结构图,地面上含有 2 条缝隙,分别是缝隙 1 和缝隙 2,其中缝隙 1 为矩形结构,缝隙 2 为矩形和圆形构成的组合结构。缝隙 1 的长度为  $L_2$ ,宽度为  $h_2$ ,距电路板上边缘的距离为  $t_1$ ;缝隙 2 的总长度为  $s$ ,其中矩形部分的宽度为  $h$ ,距电路板上边缘的距离为  $t_1$ , $O$  为圆形部分的圆心, $r_0$  为圆形的半径,圆心  $O$  距电路板左边缘和上边缘的距离分别为  $s-r_0$  和  $t_1+h/2$ 。图 1(b)

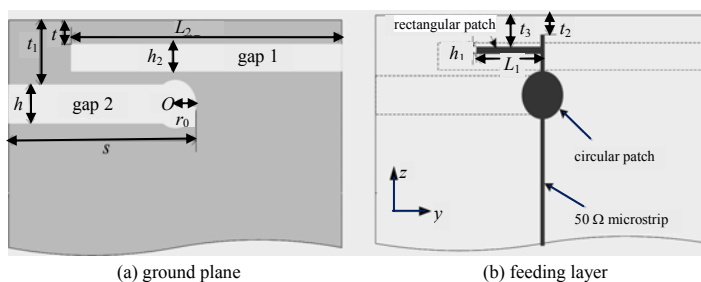


Fig.1 Antenna structure  
图 1 天线结构图

为天线馈电面,由  $50\ \Omega$  微带线与圆形贴片、矩形贴片构成折合形状,馈电点在电路板底部。矩形贴片的长度为  $L_1$ ,宽度为  $h_1$ ,距电路板上边缘的距离为  $t_3$ ,它在电路板上的投影区域落在缝隙 1 内部。圆形贴片在地面的投影区域正好是圆形缝隙的区域。 $50\ \Omega$  微带线穿过圆形贴片的圆心  $O$ ,其顶端距电路板上边缘的距离为  $t_2$ 。其中  $L_2=56\text{ mm}$ ,  $h_2=6\text{ mm}$ ,  $t_1=3\text{ mm}$ ,  $s=33\text{ mm}$ ,  $h=10\text{ mm}$ ,  $t_1=10.5\text{ mm}$ ,  $L_1=13\text{ mm}$ ,  $h_1=2\text{ mm}$ ,  $t_2=2\text{ mm}$ ,  $t_3=5\text{ mm}$ ,  $r_0=7\text{ mm}$ 。

## 2 天线尺寸优化

本节主要研究组合缝隙的总长度为  $s$ 、圆形区域的半径  $r_0$ 、矩形贴片的长度  $L_1$ ,以及微带线距离电路板上边缘的距离  $t_2$  这 4 个尺寸对天线性能的影响。

### 2.1 对缝隙 2 总长度 $s$ 的优化

令  $r_0=7\text{ mm}$ ,  $L_1=13\text{ mm}$ ,  $t_2=2\text{ mm}$ ,  $s$  依次取  $27\text{ mm}$ ,  $30\text{ mm}$ ,  $33\text{ mm}$  和  $36\text{ mm}$ ,仿真得到天线的  $S_{11}$  曲线图如图 2 所示。由图可见组合缝隙总长度  $s$  对天线带宽影响较大,随着  $s$  值增大,高频段左截止频率左移,带宽变宽,低频段谐振频率左移,带宽基本不变。综合考虑,当  $s=33\text{ mm}$  时,回波损耗低于  $-6\text{ dB}$  的天线带宽最理想,低频段为  $0.696\sim 0.808\text{ GHz}$ ,高频段为  $1.611\sim 3\text{ GHz}$ ,故取缝隙 2 总长度  $s$  为  $33\text{ mm}$ 。

### 2.2 对半径 $r_0$ 的优化

令  $s=33\text{ mm}$ ,  $L_1=13\text{ mm}$ ,  $t_1=2\text{ mm}$ ,  $r_0$  设为变量,依次取  $5\text{ mm}$ ,  $6\text{ mm}$ ,  $7\text{ mm}$  和  $8\text{ mm}$ ,仿真得到天线  $S_{11}$  曲线如图 3 所示。在低频段,随着  $r_0$  值的增大,谐振频率右移,带宽基本不变。在高频段,随着  $r_0$  值变大,谐振频率右移,左截止频率左移,带宽变宽。当  $r_0=7\text{ mm}$  时,回波损耗低于  $-6\text{ dB}$  的天线带宽最宽,低频段为  $0.696\sim 0.808\text{ GHz}$ ,高频段为  $1.61\sim 3\text{ GHz}$ ,故取半径  $r_0$  为  $7\text{ mm}$ 。

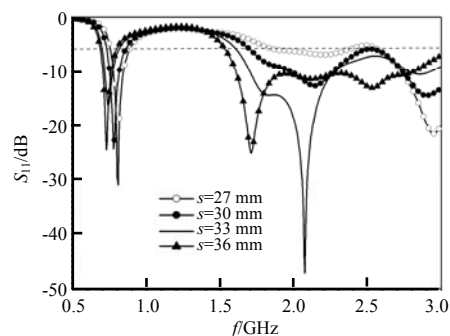


Fig.2 Return loss of different  $s$  values  
图 2 不同  $s$  值的回波损耗

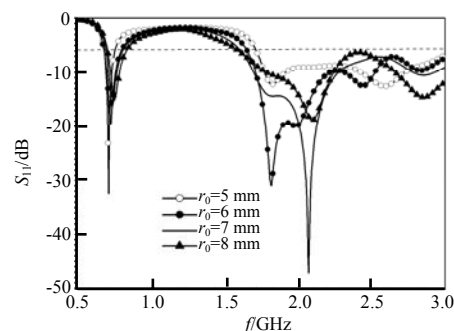


Fig.3 Return loss of different  $r_0$  values  
图 3 不同  $r_0$  值的回波损耗

### 2.3 对矩形贴片长度 $L_1$ 的优化

令  $s=33$  mm,  $r_0=7$  mm,  $t_2=2$  mm,  $L_1$  设为变量, 依次取 9 mm, 11 mm, 13 mm 和 15 mm, 仿真得到的天线  $S_{11}$  曲线如图 4 所示,  $L_1$  值对带宽影响较小, 在低频段随着  $L_1$  值增大, 谐振频率稍微左移, 在高频段随着  $L_1$  值增大, 谐振频率右移。综合考虑, 当  $L_1=13$  mm 时, 回波损耗低于  $-6$  dB 的天线带宽最宽, 低频段为 0.696~0.802 GHz, 高频段为 1.611~3 GHz, 故取矩形贴片长度  $L_1$  为 13 mm。

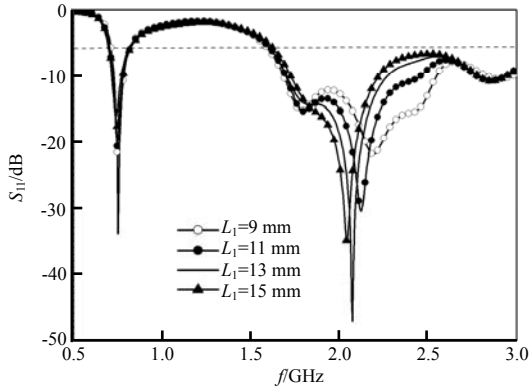


Fig.4 Return loss of different  $L_1$  values  
图 4 不同  $L_1$  值的回波损耗

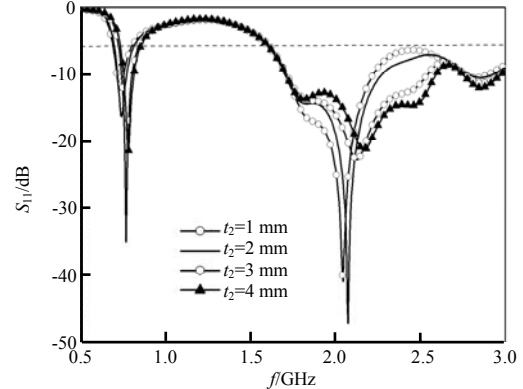


Fig.5 Return loss of different  $t_2$  values  
图 5 不同  $t_2$  值的回波损耗

### 2.4 对微带线距离电路板上边缘的距离 $t_2$ 的优化

令  $s=33$  mm,  $r_0=7$  mm,  $L_1=13$  mm,  $t_2$  设为变量, 依次取 1 mm, 2 mm, 3 mm 和 4 mm, 仿真得到天线  $S_{11}$  曲线如图 5 所示, 随着  $t_2$  值增大, 低频段和高频段谐振频率右移。当  $t_2=2$  mm 时, 回波损耗低于  $-6$  dB 的天线带宽最宽, 低频段为 0.696~0.802 GHz, 高频段为 1.611~3 GHz, 故取微带线距离电路板上边缘的距离  $t_2$  为 2 mm。

### 2.5 矩形缝隙手机天线的优化尺寸

经过对天线尺寸和位置的优化后, 最优值取为  $s=33$  mm,  $r_0=7$  mm,  $L_1=13$  mm,  $t_2=2$  mm。最优尺寸处的低频段  $-6$  dB 带宽为 0.696~0.808 GHz, 高频段为 1.611~3 GHz, 第一谐振频率为 0.74 GHz, 第二谐振频率为 2.07 GHz。

## 3 天线制作与测试

按照本设计的最优尺寸制作的天线实物如图 6 所示。利用网络分析仪测得天线的  $S_{11}$  曲线如图 7 所示。HFSS 仿真的带宽在低频段为 0.696~0.808 GHz, 高频段为 1.611~3 GHz。测试带宽在低频段为 0.695~0.805 GHz, 高频段为 1.5~3.2 GHz, 4~15 GHz。测试值与仿真值在 7 GHz 以下比较吻合, 在 7 GHz 以上测试值大于仿真值, 原因主要由天线加工、SMA 焊接、测试电缆引入的损耗引起。测试带宽能够覆盖 LTE700(0.698~0.787 GHz), DCS1800(1.71~1.88 GHz), PCS1900(1.85~1.99 GHz), UMTS(1.92~2.17 GHz), LTE2300(2.305~2.4 GHz), LTE2500(2.5~2.69 GHz), GPS(1.565~1.585 GHz), WLAN(2.4~2.483 GHz, 5.15~5.35 GHz, 5.725~5.85 GHz) 以及 UWB 的高频段 (6.15~10.6 GHz)。

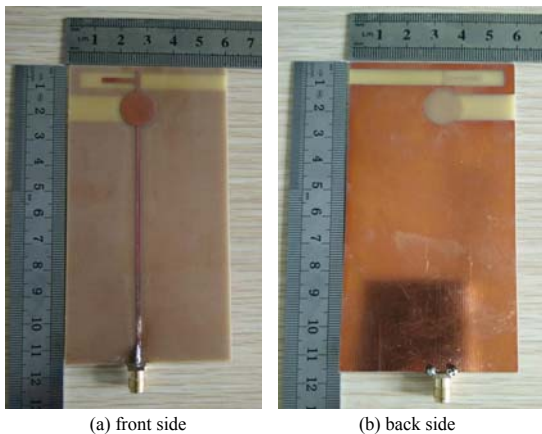


Fig.6 Photographs of the manufactured antenna  
图 6 天线实物图

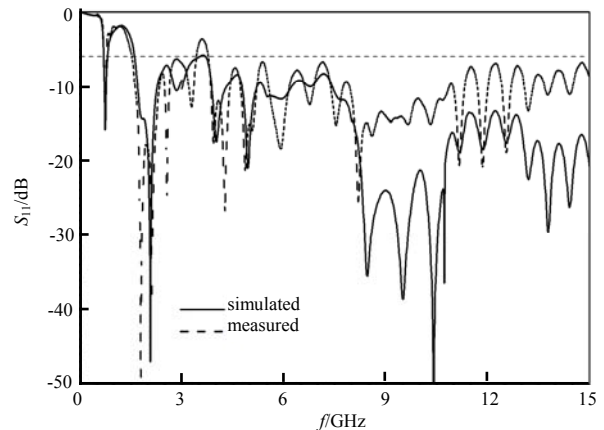


Fig.7 Measured and simulated return losses  
图 7 测试与仿真的回波损耗

在微波暗室中测试了天线的方向图,图 8 与图 9 分别给出了 0.787 GHz,1.181 GHz,2.4 GHz 以及 2.6 GHz 时的立体方向图与  $xoy$  面方向图,可见天线在  $xoy$  面具有全向辐射特性。测试的增益与效率如图 10 所示,可见在 -6 dB 频带内天线效率高于 55%,天线增益高于 2 dBi,天线性能满足实际应用的要求。

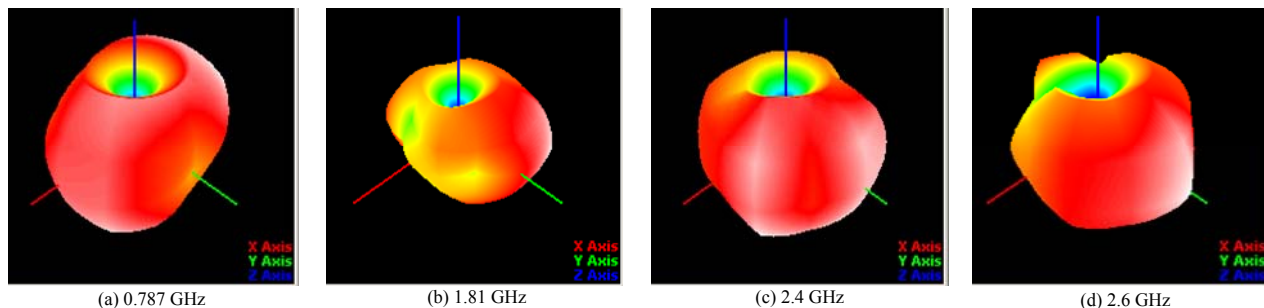


Fig.8 Measured 3D pattern  
图 8 测试的立体方向图

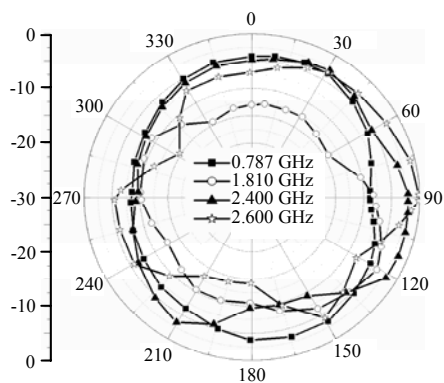


Fig.9 Measured  $xoy$ -plane pattern  
图 9 测试的  $xoy$  面方向图

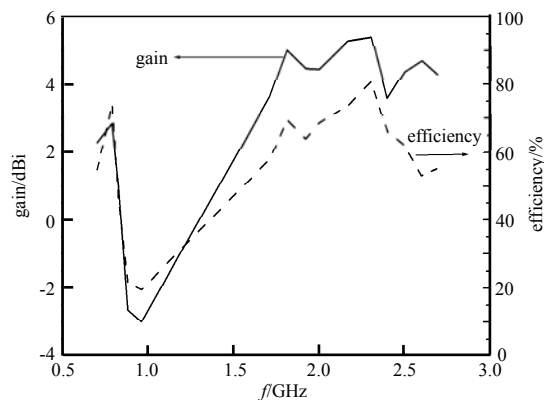


Fig.10 Measured gain and efficiency  
图 10 测试的增益与效率图

#### 4 结论

本文设计了一款宽频带缝隙型手机天线。天线含有 2 条缝隙,分别为矩形结构与矩形和圆形构成的组合结构,馈电部分由矩形贴片和圆形贴片组合而成。本文给出天线的尺寸优化,对天线进行了加工与测试,实测带宽与方向性满足手机天线的指标,在智能手机中有应用价值。

#### 参考文献:

- [1] LIN C I, WONG K L. Printed monopole slot antenna for internal multiband mobile phone antenna[J]. IEEE Trans. Antennas and Propag., 2007,55(12):3690–3697.
- [2] WU C H, WONG K L. Hexa-band internal printed slot antenna for mobile phone application[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2008,50(1):35–38.
- [3] WONG K L, LIN P W, CHANG C H. Simple printed monopole slot antenna for penta-band wireless wide area network operation in the mobile handset[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2011,53(6):1399–1404.
- [4] CHANG C H, WEI W C, MA P J, et al. Simple printed WWAN monopole slot antenna with parasitic shorted strips for slim mobile phone application[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2013,55(12):2835–2841.
- [5] ZUO S L, ZHANG Z Y, XIE J J. Design of dual-monopole slots antenna integrated with monopole strip for wireless wide area network mobile handset[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2014,8(3):194–199.
- [6] WONG K L, WU P R. Dual-wideband linear open slot antenna with two open ends for the LTE/WWAN smart phone[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,57(6):1269–1274.
- [7] WONG K L, WU P R. Low-profile dual-wideband dual-inverted-L open-slot antenna for the LTE/WWAN tablet device[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,57(8):1813–1818.
- [8] WONG K L, LI Y J. Low-profile open-slot antenna with three branch slots for triple-wideband LTE operation in the metal-framed smart phone[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,57(10):2231–2238.

- [9] ZONG W H, QU X Y, GUO Y X, et al. An ultra-wideband antenna for mobile handset applications[J]. Advanced Materials Research, 2012(383–390):4457–4460.
- [10] GUO Z, TIAN H, WANG T X, et al. Bandwidth enhancement of monopole UWB antenna with new slots and EBG structures[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2013, 12(4):1550–1553.
- [11] 侯佳琪, 郭庆功. 用于平板电脑的小型化 LTE/GSM/UMTS 多频段天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 12(4): 596–600. (HOU Jiaqi, GUO Qinggong. Multi-band miniaturized antenna employed in tablet computer for LTE/GSM/UMTS applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 12(4):596–600.)
- [12] ROWELL C, LAM E Y. Mobile-phone antenna design[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2012, 54(4):14–34.

## 作者简介:



肖 霞(1991–), 女, 山东省莱芜市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线设计. email:843565964@qq.com.

宗卫华(1975–), 女, 山东省蓬莱市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为天线设计.

魏向阳(1988–), 男, 河南省汝州市人, 硕士, 主要研究方向为射频电路设计.

黄千媛(1994–), 女, 陕西省宝鸡市人, 在读本科生, 主要研究方向为通信工程.

.....

(上接第 104 页)

- [9] DASTRANJ A, IMANI A, NASER-MOGHADDASI M. Printed wide-slot antenna for wideband applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(10):3097–3102.
- [10] YUAN H W, GONG S X, WANG X, et al. Wideband printed dipole antenna using a novel PBG structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(8):1862–1865.
- [11] CHANG M H, CHEN B Y. Microstrip-fed ring slot antenna design with wideband harmonic suppression[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(9):4828–4832.
- [12] CHOI S H, LRR H J, KIM J K. Harmonic suppression of microstrip patch antenna by 1D PBG cell[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Washington DC, USA:IEEE, 2005(1):754–757.
- [13] GHOSH C K. Harmonics suppression of microstrip antenna using open ended stubs[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(6):1340–1345.
- [14] MARIMUTHU J, BIALKOWSKI K S, ABBOSH A. Compact bandpass filter with sharp passband and wide harmonic suppression using miniaturized coupled structure loaded with stepped-impedance stubs[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(10):2505–2508.
- [15] SZE J Y, CHANG C C. Circularly polarized square slot antenna with a pair of inverted-L grounded strips[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7):149–151.

## 作者简介:



李 君(1992–), 女, 河南省濮阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波无线传输的工业应用. email:Jun1106ok@163.com.

刘一麟(1990–), 男, 兰州市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为无线能量传输与电磁兼容.

李 路(1993–), 女, 河南省安阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

杨 阳(1983–), 男, 重庆市人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微波测量、微波化学以及微波功率合成.

黄卡玛(1964–), 男, 重庆市人, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 973 计划首席科学家, 主要研究方向为微波能基础理论与创新应用.