

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106230

应用于 WLAN/WiMAX 的小型化 三频带单极子天线设计

刘庆 王世豪 颜锦奎

(上海大学通信与信息工程学院 上海 200444)

摘要:设计了一种应用于无线局域网(WLAN)和全球微波互联接入(WiMAX)的新型紧凑型三频段单极子天线。基于传统单极子天线,通过调整天线结构即加载缝隙和添加枝节来产生3个谐振模式。天线印刷在相对介电常数为4.4的FR4介质板上并采用共面波导(CPW)方式进行馈电。其尺寸仅为25 mm×18 mm×1 mm,在此小尺寸下天线能产生3个不同谐振频带,并可以完全覆盖WLAN(2.4~2.48 GHz)、(5.55~5.825 GHz)和WiMAX(3.4~3.6 GHz)这3个频段。使用电磁仿真软件HFSS对天线进行设计和仿真,并对天线进行了进一步的加工和测量,且实测结果与仿真结果基本吻合。测试结果还表明天线具有良好的全向辐射性能,最大增益为3.8 dBi,满足WLAN/WiMAX无线应用需求。

关键词:小体积;三频段;开槽;WLAN/WiMAX

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of miniaturization and tri-band monopole antenna for WLAN/WiMAX applications

Liu Qing Wang Shihao Yan Jinkui

(School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: We have proposed a novel printed antenna with characteristics of miniaturization and triple-band, which is expected to be employed in wireless local area networks (WLAN) and worldwide interoperability for microwave access (WiMAX). Based on a conventional monopole antenna, the proposed antenna can operate in three different resonant modes by loading branches and slots into the antenna body. The antenna body is printed on the FR4 with relative permittivity of 4.4 and the dimension of only 25 mm×18 mm×1 mm, which is fed by CPW. With three distinct resonance modes, the impedance bandwidth of the designed antenna can fully cover three desired bands of WLAN (2.4~2.48 GHz), (5.55~5.825 GHz) and WiMAX (3.4~3.6 GHz). The antenna was designed and simulated by HFSS and a corresponding experimental prototype has been fabricated and tested. Good agreement between the simulation and measurement is obtained, and measured results also presents that the antenna has good omnidirectional radiation with peak realized gain of 3.8 dBi, which can meet the requirements of WLAN/WiMAX wireless application.

Keywords: miniaturization; tri-band; slot; WLAN/WiMAX

0 引 言

近年来,随着无线通信的飞速发展,通信容量和信息传输速率不断提高,对终端设备的要求越来越高。无线通信设备要求高度集成化和良好的便携性,所以天线小型化和多频段的需求越来越强烈。微带天线因其易小型化和多频段,在天线设计领域应用广泛。在频段工作方面,无线局域网(WLAN)和全球微波互联接入(WiMAX)两个频段越

来越受到人们的关注。当前,美国联邦通信委员会(FCC)对WLAN的工作频段主要集中在2.4、5.2和5.8 GHz频段,而对WiMAX的工作频段则主要集中在2.5、3.5和5.5 GHz频段^[1]。

为了应对小型化要求,人们尝试设计不同类型的天线:有倒F天线^[2],单极子天线^[3-4]和环形天线^[5-6]。文献[2]设计了一种工作与2.45 GHz的印刷倒F天线,带宽为160 MHz增益为2.92 dBi。文献[3]提出一款柔性双频单

收稿日期:2021-03-30

极子天线,厚度为 0.25 mm 可弯曲不同角度实现低剖面有良好的环境适应性。

目前,实现多频带和小型化天线的方式有很多,比如开枝节开槽法^[7-10]、多重和折叠分支和寄生贴片法^[11-12]或使用可重构天线^[13-16]等。天线被设计出不同的形状,在文献中设计了多种类型的天线来实现多频功能和应用。文献[7]介绍了一种 Y 型单极子环形天线,通过在曲折矩形结构内加载一对 L 型对称枝节来实现多频特性,然而天线的尺寸还不够紧凑。文献[8]介绍了一种类似于耳朵形状的三频带天线,实现了 2.38~2.78 GHz 和 3.28~3.76 GHz 和 4.96~5.96 GHz 的 3 个频带带宽,可是在天线尺寸方面依然存在需改进的空间。文献[9]设计了一款共面波导馈电的三频圆极化开缝天线,天线在 C 型金属贴片基础上添加勾状枝节实现三频特性,但是天线尺寸偏大。文献[10]介绍了一种共面波导馈电的双频天线,由 L 型缝隙和 T 型谐振器组成,但是天线只有两个谐振频段。文献[11]针对当前印刷天线存在尺寸偏大,增益不足等缺陷采用结构合成法结合了传统倒 F 天线和蛇形单极子印刷天线的设计经验,提出了一种新的双频印刷天线设计方案。文献[12]介绍了一种基于共面波导馈电的包含两个矩形寄生单元的天线结构,但此天线工作频带只有两个。文献[13]介绍了可重构天线的分类和总结,可重构天线旨在使天线能够根据实际需求实时的重构天线的特性,以适应高速发展的通信技术。文献[14]利用 MATLAB 对可重构天线进行建模,将遗传算法和矩量法相结合,对可重构天线性能进行搜索寻优,提供了一种新的思路。文献[15]和[16]分别提出了基于频率可重构的超宽带天线和基于共面波导馈电的超宽带天线的设计方法,然而两者的天线尺寸仍然偏大。文献[17]则基于宽带天线的设计探讨了一种四单元的阵列天线,以此阐述了宽带天线的实际应用。

本文设计了一种基于共面波导(CPW)馈电的应用于 WLAN(2.4~2.48 GHz)、(5.55~5.825 GHz) 和 WiMAX(3.4~3.6 GHz)三频段的小型化三频带单极子天线。天线由类似 T 型的单极子构成,通过加载枝节调节开槽尺寸实现天线小型化和多频谐振特性。天线的 -10 dB 阻抗带宽为 2.4~2.48 GHz、3.32~3.6 GHz 以及 5.55~5.95 GHz,工作频段几乎覆盖了 WLAN/WiMAX 的所有工作带宽。整体而言,设计的天线具有结构简单,尺寸小巧,制作成本低的优点。后文给出的结果表明仿真和实测结果具有较高的吻合度,在工作频段内辐射性能表现良好,说明天线在概念设计与实际应用方面均有很高的价值,其结果也表明在工作频段内辐射性能表现良好,能满足 WLAN/WiMAX 相关无线应用需求。

1 天线结构与设计

为了更好地阐述天线的设计原理或优化过程,在全波

仿真软件 HFSS 15.0 中,本文给出了天线的设计过程,即对不同结构下的天线体进行了仿真分析,如图 1 所示。首先,结构 1 为共面波导馈电的单极子天线结构,根据单极子天线的 1/4 波长谐振原理,此结构可在频率点 5 GHz 附近处产生谐振,但此时只有一个谐振带宽,不能完全满足设计要求。所以,为了扩宽天线工作带宽,在结构 1 的基础上引入 T 型单极子结构形成结构 2。此天线结构不仅在 3 GHz 附近处增加了谐振,而且优化了整个天线的阻抗适配。此时的天线的带宽虽有拓宽,但其覆盖范围却不能完全覆盖所需要的 WLAN/WiMAX 所需要的频段,所以天线结构仍需进一步优化。于是,在结构 2 的基础上,在其右侧引入弯折的微带线,并对 T 型单极子和参考地引入进行开槽处理,便形成了最后的天线设计结构,如图 1 中的结构 3 所示。

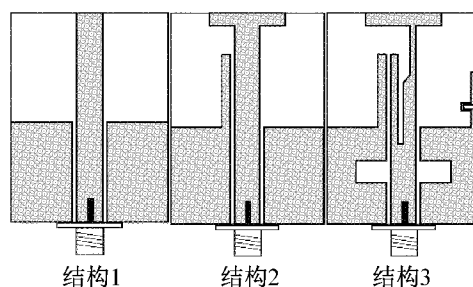


图 1 天线结构的设计演变过程

图 2 为本文最终提出的天线结构示意图。在此天线设计中,参量 L_2 和 L_6 的长度对谐振特性具有调频的作用,其中 L_2 表示最后的天线结构中左侧贴片的高度,而 L_6 则表示其右侧贴片的整体高度,调节 L_2 和 L_6 的长度可以实现对天线的中频和高频两个谐振模式谐振频点位置的调节。设计过程中,通过仿真软件参数扫描的方式对该两个参数进行了最优化取值。最终优化后的尺寸为 18 mm×25 mm×1 mm,共面波导馈线宽度 W_f 为 3.5 mm,间隔距离 G 为 0.3 mm,以此数值算得的馈线端输入阻抗最接近 50 Ω 。其他详细如表 1 所示。可以看出天线的结构简单易制作,它由单极子天线、辐射贴片、介质层和参考地组成,是典型的印刷天线形式,制造成本也非常低。其中,介质基板选择相对介电常数为 4.4、损耗角正切值为 0.02 的 FR4 常规材料。

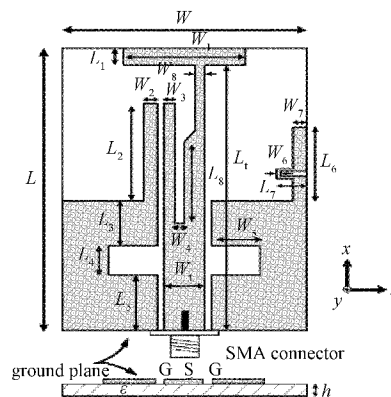


图 2 天线结构

表1 天线的结构参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
W	18	L	25	W_1	1.5
L_1	9	W_2	1	L_2	8.5
W_3	0.8	L_3	4	W_4	0.7
L_4	2.5	W_5	3.5	L_5	5
W_6	0.3	L_6	6.5	W_7	1
L_7	2.2	W_8	0.7	L_8	7
W_f	3	L_f	23.5	h	1

3种结构的天线回波损耗仿真结果如图3所示,可以看出通过地板开槽与修改 L_2 和 L_6 的长度让天线得到了良好的宽频特性。此天线可以完全覆盖WiFi和WiMAX频段,而且3个频段的相对带宽宽度较大。

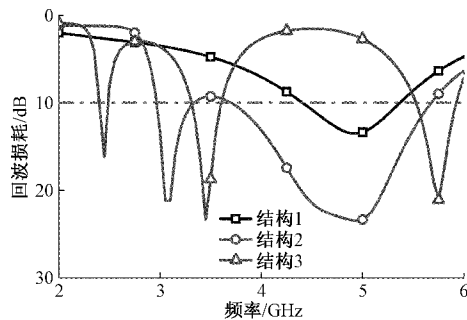
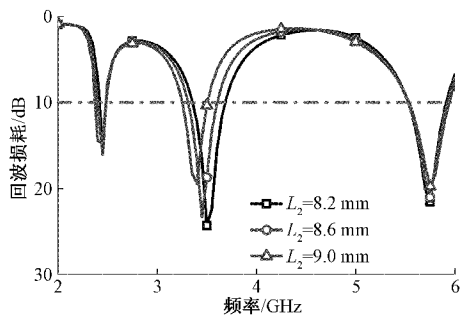


图3 不同结构天线回波损耗仿真结果

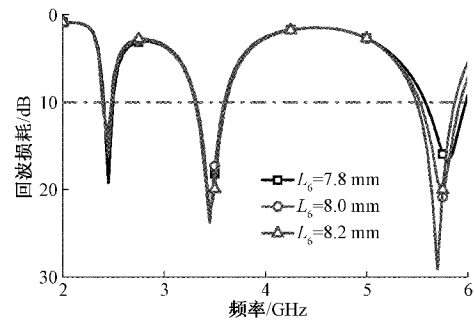
图4和5分别给出了参数 L_2 和 L_6 对天线回波损耗的影响。参数 L_2 的变化主要对天线的中频谐振模式(天线的第2个谐振模式)产生了影响,且随着 L_2 的增大而向低频移动;而参数 L_6 主要调节天线在高频谐振模式(天线的第3个谐振模式),随着 L_6 的增大亦向低频移动。

图4 参数 L_2 变化对天线回波损耗的影响

2 天线的仿真和测试结果分析

本文采用了电磁仿真软件HFSS 15.0来进行天线的仿真设计。对于天线的测量则是通过使用矢量网络分析仪和微波暗室来获取相应的S参数、二维辐射方向图、辐射效率和辐射增益值。

为了说明天线的激励机制,图6所示为天线在3个谐

图5 参数 L_6 的变化对回波损耗的影响

振点2.4、3.5和5.8 GHz处的表面电流分布图,通过分析各自的电流分布可以论证天线的谐振原理。由图可看到在2.4 GHz时天线的面电流密度主要集中在左侧贴片中,这表明天线的低频特性由左侧微带贴片产生;在3.5 GHz时的面电流密度主要集中在T型单极子上,表明此结构产生中频谐振;在5.8 GHz时电流主要集中在右侧凸出的微带贴片的矩形小开槽处,表明此结构激励出了天线的高频谐振模式。基于上述的低频和高频两个谐振模式,也印证了天线参数变量即引入的两个枝节的长度 L_2 和 L_6 对天线中频和高频谐振产生的影响。

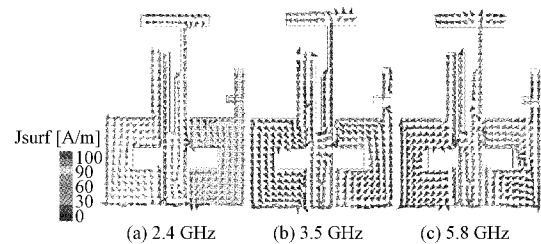


图6 天线在不同谐振频率下的面电流密度矢量分布图

为了验证天线的设计理论及其相关仿真结果的正确性,本文对提出的天线结构进行了加工组装,制作的天线实物图照片如图7所示,并对其进行了测量,结果如图8~10所示。首先,通过型号为N5227的矢量网络分析仪测试了天线的回波损耗,回波损耗是S参数中的 S_{11} 的相反数,为正数;而 S_{11} 则为天线的输入端的反射系数,其反映了天线的阻抗匹配及其输入功率(损耗功率)的情况。天线回波损耗的仿真和实测的结果对比如图8所示,可以看到天线的仿真和实测结果吻合度较好,且它们的-10 dB实测带宽为2.40~2.48 GHz、3.32~3.6 GHz和5.55~5.95 GHz,能覆盖所需的WLAN和WiMAX所在的频段。

其次,图9所示为天线在3个谐振频点处的二维辐射方向图。从图中可以看出仿真结果和测试结果具有较好的吻合性,且天线在E面和H面上均具有良好的全向辐射特性,从辐射方向图也可论证得出每一个谐振模式均为1/4波长的单极子谐振模式,也表征出了典型的单极子天线全向的辐射特性。

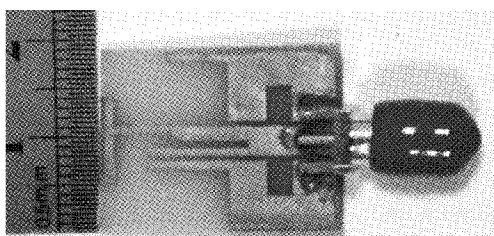


图7 加工的天线实物图

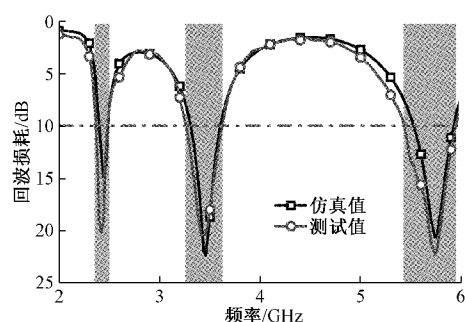


图8 仿真与实际测量的回波损耗

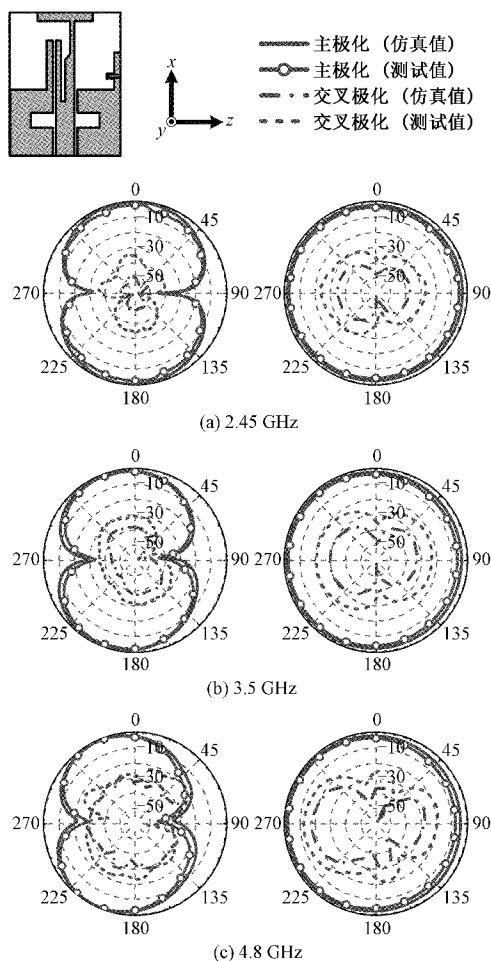


图9 天线的方向图

最后,经暗室测得的天线在各工作频段内的增益和辐射效率结果如图10所示。从图中可以看出,天线的增益值一般随着频率的升高而变大,且整体变化范围在2~4 dBi之间,在各谐振点处的峰值增益值分别为2.4、2.81和3.94 dBi。天线辐射效率的范围值在58%~78%之间,表现出了良好的电磁辐射能力,以上测试结果表明此天线可以满足实际应用环境下的要求。

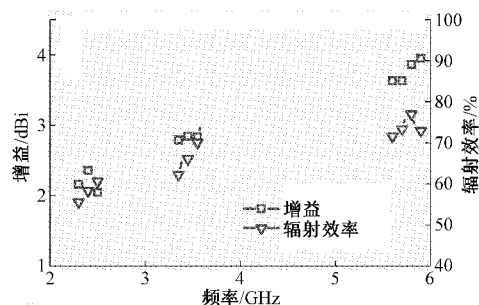


图10 天线增益测量

为了显示本文所设计天线在设计和性能上的综合优势,根据上一段落的仿真和测试结果的描述和讨论,从工作频带和体积两个重要方面将本文的天线设计与已发表的文献中天线设计进行相对性能对比。性能对比如表2所示,相较于文献[7-9]而言,本文的天线具有更小的体积;而相较于文献[10-12]而言,本文的天线则具有三谐振模态的多频带覆盖特性。本文所提出的天线结构在权衡工作频带和体积两个重要参数指标的情况下,具有综合性能上的相对优势,具有综合性能上的相对优势,可以应用于日益要求小型化、多频带、低成本的现代无线通信系统中。

表2 本文与其他文献天线参数对比

参考文献	尺寸/mm ³	带宽/GHz	增益/dBi
		2.33~2.76	
文献[7]	23×36.5×0.8	3.05~3.88	2.53~2.82
		5.57~5.88	
文献[8]	18×37×1	2.38~2.78	2.13~3.51
		3.28~3.76	4.96~5.96
文献[9]	50×50×0.8	2.17~2.47	1.50~5.30
		3.46~3.76	4.17~6.00
文献[10]	30×35×1.6	2.38~3.38	2.03~3.04
		5.17~5.90	
文献[11]	13.6×9.3	2.27~2.65	2.44~2.74
		5.15~5.73	
文献[12]	63×75×1.6	1.81~3.83	1.50~2.50
		2.40~2.48	
本文	18×25×1	3.32~3.60	2.40~3.94
		5.55~5.95	

3 结 论

本文提出了一种应用于 WLAN/WiMAX 的无线通信的小型化三频段天线,通过加载缝隙和添加辐射枝节实现了三频带谐振特性且在体积上实现了并且在体积上实现了小型化的设计目的。天线测量结果与仿真结果基本吻合。天线具有较宽的工作带宽在各个谐振频带下具有良好的全向辐射特性且最大增益为 3.8 dBi,可以用于实际的无线通信应用中。另外,从天线进阶优化的角度来看,本文仍可对天线的辐射体进行微调以优化 3 个谐振模式对应的阻抗带宽特性,从而覆盖更多的通信频段。

参考文献

- [1] 刘涛. 应用于 WLAN/WiMAX 的共面波导馈电多频段小型化天线设计[D]. 合肥:安徽大学,2020.
- [2] 严冬,汪朋,李帅永,等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (10): 2372-2380.
- [3] 戴柯寒,马宵宵,桑磊. 一种高可靠性柔性双频单极子天线设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020, 43(11):1513-1516.
- [4] 王玲,张文梅,韩丽萍. 用于 ISM 频段的双频单极子天线[J]. 测试技术学报,2019,33(4):282-285.
- [5] 丘荣文,袁家德. 一种小型化定向辐射 RFID 阅读器天线设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(1):39-43.
- [6] HAJ-AHMED M A I, ABEDELAZEEZ M K. Design of a multi-band loop antenna for wireless communications: Simulation and analysis[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2011, 23(1): 67-73.
- [7] LIU P, ZOU Y, XIE B, et al. Compact CPW-fed tri-band printed antenna with meandering split-ring slot for WLAN/WiMAX applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012 (11): 1242-1244.
- [8] ZHAI H, MA Z H, HAN Y, et al. A compact printed antenna for triple-band WLAN/WiMAX applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12): 65-68.
- [9] 李玲玲,冯仝源,邱培熠. 一种适用于 WLAN 和 WiMAX 的三频圆极化开缝天线[J]. 应用科技,2020, 47(1):31-36.
- [10] 汤雪彬. 应用于 WLAN/WiMAX 的 CPW 馈电双频天线设计[J]. 电子元件与材料,2016,35(8): 65-68.
- [11] 严冬,程亚军,汪朋,等. 基于结构合成法的微型化双频 WLAN 印刷天线设计[J]. 仪器仪表学报,2016,37(6): 1421-1432.
- [12] SAINI R K, DWARI S, MANDAL M K. CPW-fed dual-band dual-sense circularly polarized monopole antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2017(16): 2497-2500.
- [13] 田雨波,谭冠南. 可重构天线研究综述[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2012,26(3):271-277.
- [14] 陈国虎,雷雪,陈紫阳,等. 矩形环可重构天线的建模和仿真研究[J]. 信息工程大学学报,2014, 15(1): 57-61.
- [15] 陈立波,谢亚楠,谭子苗,等. 频率可重构超宽带天线[J]. 电子测量技术,2015,38(1):7-11.
- [16] 李迎松,杨晓冬,刘乘源,等. 共勉波导馈电的超宽带天线研究[J]. 电子测量与仪器学报,2010, 24(9): 819-821.
- [17] 邱玲,姚振东,刘语嫣. 宽带微带天线阵的研究与设计[J]. 电子测量技术,2016,39(9):26-30.

作者简介

刘庆,硕士研究生,主要研究方向为微波介质测量。

E-mail:908776030@qq.com

王世豪,硕士研究生,主要研究方向为材料的介电常量测量。

E-mail:1046914852@qq.com

颜锦奎,副教授,主要研究方向为微波介质测量、射频电路技术等。

E-mail:1137386187@qq.com