

文章编号: 2096-1618(2024)01-0018-05

一种方向图可重构单极子天线设计

秦世川, 李荣强

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:提出一种新的方向图可重构单极子天线。该天线由一个矩形单极子和两组寄生条带组成,寄生带由类似于“2”和“5”字型的曲折条带组成,在左右两边寄生带中各加入一个PIN二极管。通过打开或关闭相应的PIN二极管,寄生带表面电流将发生变化,从而改变天线的方向图。天线可获得3种不同的可重构模式,包括一个双向模式($\pm X$ 方向)和两个定向模式($+X$ 方向或 $-X$ 方向)。结果表明,3种模式下天线的带宽分别为2.26~2.64 GHz, 2.12~2.64 GHz, 2.13~2.64 GHz,其重叠带宽为2.26~2.64 GHz,相对带宽为15.5%;3种模式下天线的带内最低辐射效率分别为90%, 91%, 91%,均能达到90%以上。测试的带宽分别为2.22~2.65 GHz, 2.12~2.59 GHz, 2.13~2.60 GHz,与仿真结果基本一致。所提出的天线具有小型化、高效率、结构简单等优点。

关键词:可重构天线;单极子;PIN二极管

中图分类号: TN713.5

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.01.004

0 引言

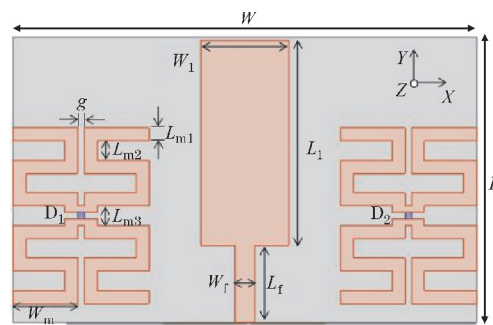
随着现代无线通信技术的进步与快速发展,天线是无线通信系统中非常重要的部分,无线通信向着多功能、大容量等方向发展,因此,对于天线的要求也越来越高。可重构天线减小了系统的体积和重量,使结构更加简化和紧凑,有利于集成到当前无线通信设备上。它是通过加载电子器件等方式改变天线电流的分布,使其具有多种工作模式^[1-3]。

改变天线辐射方向图的传统方法是利用相控阵天线技术,通过控制辐射元件的馈电相位改变相控阵天线的方向图^[4-6]。然而,相控阵天线设计过程复杂、成本高、重量大等缺点在很大程度上限制了其在通信系统中的应用。鉴于上述问题,深入研究方向图可重构天线具有重要的应用前景。目前实现方向图可重构天线有几种主要方法,如改变辐射器结构、切换馈电网络、切换连接状态及使用特殊材料^[7]。文献[8]通过利用具有4个PIN二极管开关的简单馈电网络, TM_{20} 和 TM_{21} 模式可以分别通过共模和差分馈电方案进一步激励,从而产生可切换的宽边和双向模式。文献[9]中的天线辐射方向图是通过调整磁偶极子的相位在两个正交平面中重新配置。文献[10-15]提出的方法都是采用PIN二极管,但是加入二极管个数较多,天线结构复杂。本文提出一款只需加入2个PIN二极管就能实现3种方向图可重构模式的天线,天线结构简单易制造,天线的带内辐射效率均达到90%及以上。

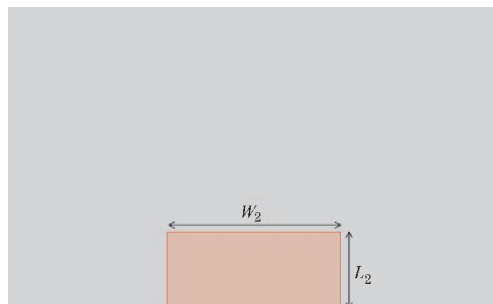
1 天线设计

1.1 天线结构

方向图可重构天线的仿真模型见图1。自上而下依次是天线顶层、介质层、天线底层。如图1(a)所示,天线顶层由一个矩形单极子和两组对称放置在系统两侧的寄生曲折带组成。在寄生条左右两边各插入一个PIN二极管,放置在缝隙中。通过改变二极管的偏置



(a) 天线顶层



(b) 天线底层

图1 天线仿真模型图

收稿日期: 2023-02-25

基金项目: 四川省科技厅重点研发资助项目(2022YFS0033)

电压,两组寄生带表面电流发生变化,因此可以重新配置天线的辐射模式。天线的底层是矩形金属地,如图 1 (b)所示。该天线使用的介质基板材料是相对介电常数为4.4,损耗角正切为0.02的玻璃纤维环氧树脂(FR4),厚度 H 为1.6 mm。优化后的天线参数如表 1 所示。

表 1 可重构天线结构参数数值表			
参数		单位:mm	
参数	取值	参数	取值
W	71.5	W_m	10
L	44	L_{m1}	2
W_2	25	L_{m2}	3
L_2	11	L_f	12
W_1	13.5	g	1
L_1	31.5	L_{m3}	3
W_f	2.98	H	1.6

1.2 方向图可重构原理与二极管等效理论

方向图可重构原理是通过改变天线辐射片的电流分布来实现。文中,天线由辐射片和寄生片组成。通过在天线的寄生贴片之间加入微波开关(PIN 二极管)的方式改变天线上电流的分布,实现可重构的天线方向图。PIN 二极管等效理论描述为:二极管具有断开时呈高阻抗状态和导通时呈低阻抗状态的特性。当二极管断开时,它的等效电路模型类似于一个电容和一个电阻的并联;当二极管导通时,其等效电路模型则近似为一个小电阻。利用这一等效理论,将二极管安放在寄生贴片之间,通过切换二极管的断开和导通状态,便能实现天线方向图的可重构。本文利用方向图可重构原理和 PIN 二极管的等效原理,在两组寄生条带中插入两个 PIN 二极管来实现天线的 3 种方向图可重构模式。

天线中使用的 PIN 二极管型号为英飞凌生产的 BAR50-02V,导通时,二极管相当于3 Ω 的电阻,断开时,二极管等效为由0.15 pF电容和5 k Ω 电阻组成的并联电路。不需要添加额外的电容器,因为没有直流电流流入诸如矢量网络分析仪之类的输出设备。通过改变直流电源 V1 和 V2 的电压来切换 PIN 二极管的通断状态,可以实现可重构模式。

为实现方向图可重构天线,通过控制 2 个 PIN 二极管的开关状态,使电流发生变化,最终实现方向图可重构。从图 1 天线结构模型中可以看到 2 个 PIN 二极管,分别由 D_1 、 D_2 表示。天线一共有 3 种模式,模式 1 为二极管 D_1 和 D_2 都断开;模式 2 为二极管 D_1 导通, D_2 断开;模式 3 为二极管 D_1 断开, D_2 导通。在高频电磁仿真软件中通过设置集总 RLC 边界条件模拟二极管的状态变化。

1.3 参数分析

为使天线达到最佳阻抗匹配及辐射性能,需对天

线的一些关键参数 W_m 、 g 进行研究。当分析某个参数对天线性能影响的时候,只改变该参数,而保持其余参数不变。文中只对模式 2 进行参数分析。

分析寄生带宽度 W_m 和缝隙 g 对模式 2 天线 S_{11} 的影响(图 2)。由图 2 可以看出,寄生带宽度 W_m 主要影响天线的反射系数和阻抗匹配,随着 W_m 的增大,谐振频率处 S_{11} 降低,带宽增大。由于所设计天线的目标频段为无线网络通信技术2.45 GHz频段中,因此选择 $W_m=10$ mm。分析缝隙 g 对天线 S_{11} 的影响,如图 3 所示,随着 g 的增大,谐振频率处 S_{11} 降低,带宽增大,因此选择 $g=1$ mm。

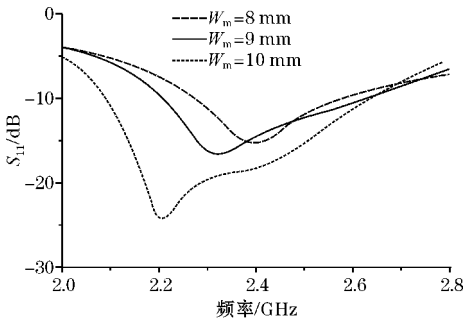


图 2 W_m 对天线 S_{11} 的影响

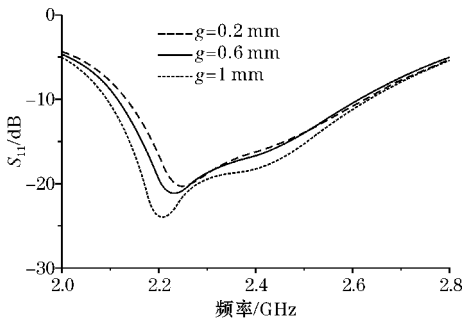


图 3 g 对天线 S_{11} 的影响

分析参数 W_m 和 g 对模式 2 的 XOY 面辐射方向图的影响,从图 4、图 5 看,参数 W_m 和 g 对天线辐射有较强的影响,随着 W_m 的增大,天线的最大辐射方向由双向变为指向+X方向;随着 g 的减小,天线的最大辐射方向指向+X方向的同时,后瓣不断减小。实际上,当 $W_m=10$ mm, $g=1$ mm时,天线的辐射方向图将具有很好的定向性。

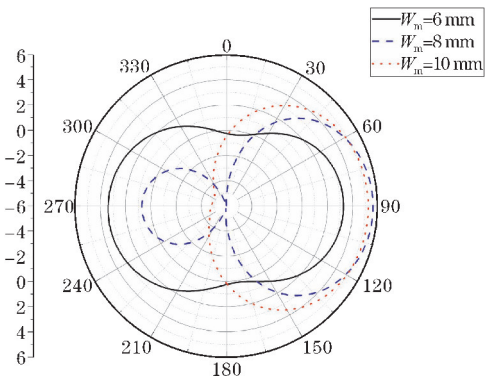


图 4 W_m 对辐射方向图的影响

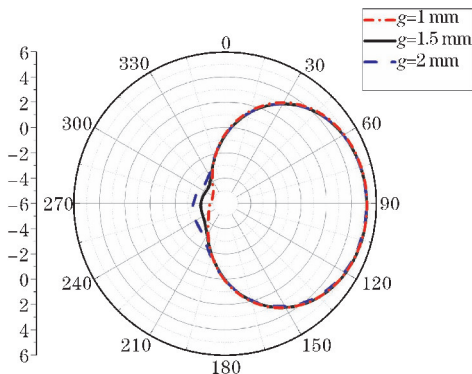


图 5 g 对辐射方向图的影响

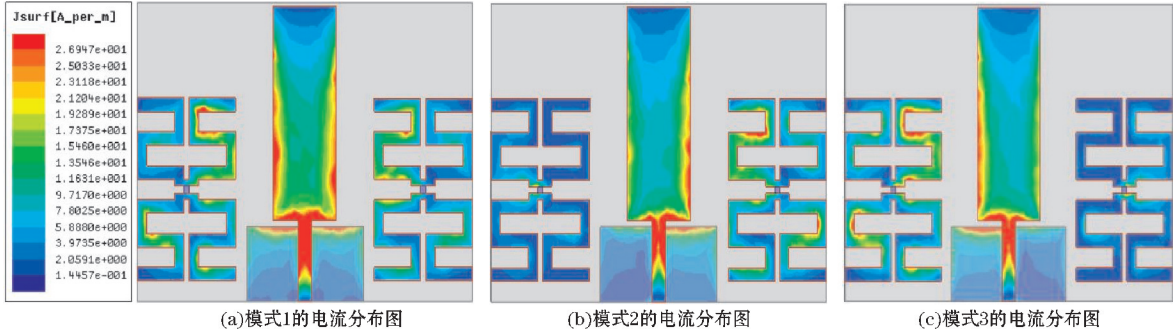


图 6 表面电流分布图

由图 7 可以看出,模式 1 的工作频率为 2.45 GHz,仿真带宽为 2.26 ~ 2.64 GHz,测试带宽为 2.22 ~ 2.65 GHz,测试带宽比仿真稍宽。图 8 为天线在 2.45 GHz 频率下 XOY 面的方向图,可以看出,天线的方向图为双向模式,天线的辐射方向指向 $\pm X$ 方向。天线的带内辐射效率为 90% ~ 98%,如图 9 所示。

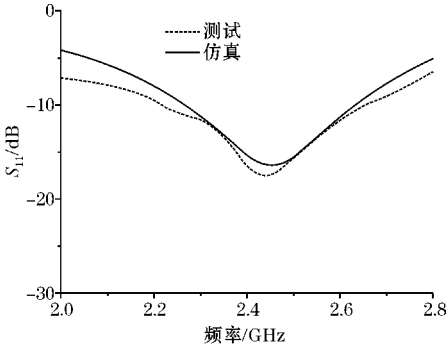


图 7 模式 1 的天线 S_{11} 图

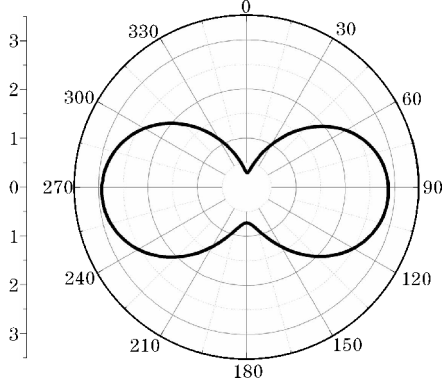


图 8 模式 1 的天线 XOY 面方向图

2 天线结果与讨论

2.1 反射系数与辐射方向图

为进一步说明天线的工作机制,给出 3 种模式下的电流分布。频率在 2.45 GHz 的表面电流分布图如图 6 所示。在模式 1 中,PIN 二极管都断开,电流对称分布在寄生带的左右两条带上,因此产生双向图案。而在模式 2 和 3 中,寄生带的电流分布分别偏向右边和左边。不同的电流分布将导致不同的方向图。

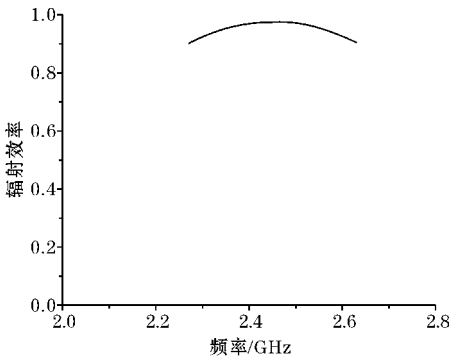


图 9 模式 1 的辐射效率图

在模式 2 中,PIN 二极管 D_1 导通, D_2 断开,电流主要集中在右侧的寄生带上,而左侧的寄生带上的电流很弱,如图 6(b) 所示。由图 10 可以看出,模式 2 的仿真带宽为 2.12 ~ 2.64 GHz,测试带宽为 2.12 ~ 2.59 GHz。测试与仿真结果相似,但是谐振点发生变化,原因是仿真把二极管当成等效电路。导通时,二极

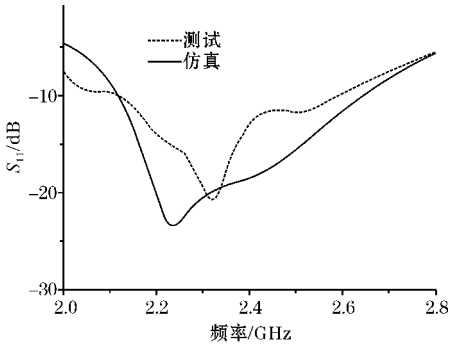


图 10 模式 2 的天线 S_{11} 图

管相当于 $3\ \Omega$ 的电阻,断开时,二极管等效为由 $0.15\ \text{pF}$ 电容和 $5\ \text{k}\Omega$ 电阻组成的并联电路。测试时,需要通电导致谐振点右移。图 11 为天线在 $2.45\ \text{GHz}$ 频率下 XOY 面的方向图,可以看出,天线的方向图为定向模式,天线的最大辐射方向指向 $+X$ 方向。天线的带内辐射效率为 $91\% \sim 99\%$,如图 12 所示。

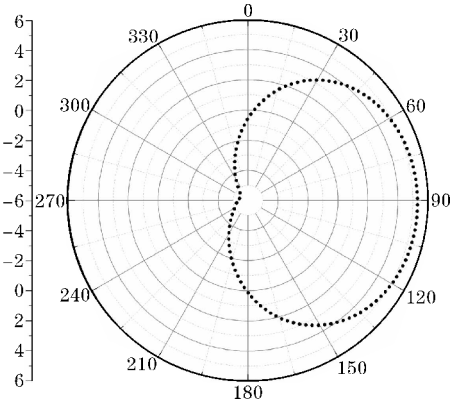


图 11 模式 2 的天线 XOY 面方向图

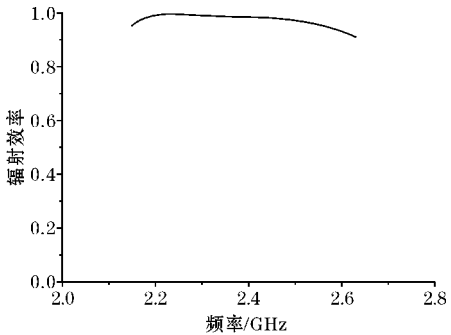


图 12 模式 2 的辐射效率图

在模式 3 中,PIN 二极管 D_1 断开, D_2 导通,电流主要集中在左侧的寄生带上,而右侧的寄生带上的电流很弱,如图 6(c) 所示。由图 13 可以看出,模式 3 的仿真带

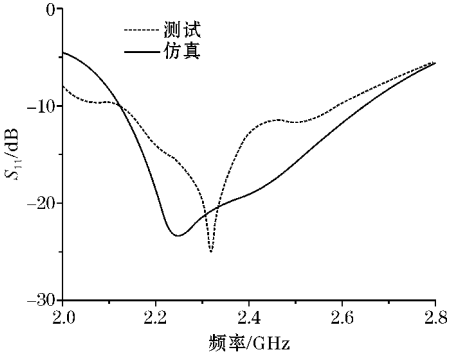


图 13 模式 3 的天线 S_{11} 图

宽为 $2.13 \sim 2.64\ \text{GHz}$,测试带宽为 $2.13 \sim 2.60\ \text{GHz}$,测试带宽与仿真结果相似,但是谐振点也发生变化,原因与模式 2 相似。图 14 为天线在 $2.45\ \text{GHz}$ 频率下 XOY 面的方向图,可以看出,天线的方向图为定向模式,天线的最大辐射方向指向 $-X$ 方向。天线的带内辐射效率为 $91\% \sim 99\%$,如图 15 所示。

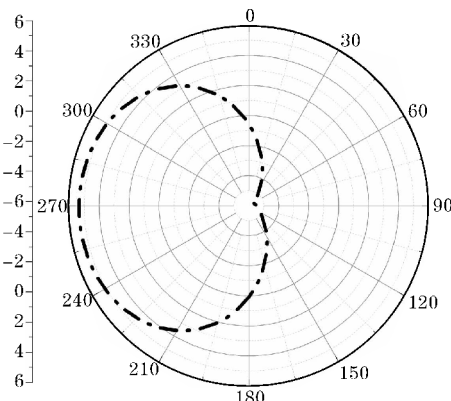


图 14 模式 3 的天线 XOY 面方向图

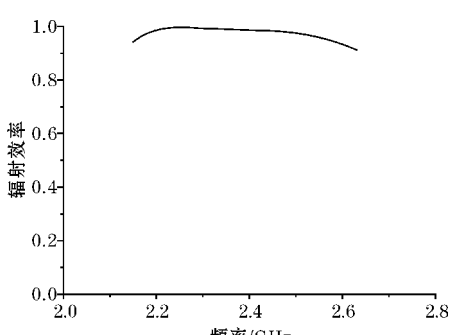


图 15 模式 3 的辐射效率图

可见,3 种模式的工作频率 $2.45\ \text{GHz}$,重叠带宽为 $2.26 \sim 2.64\ \text{GHz}$ 。模式 1、模式 2 和模式 3 仿真的峰值增益分别为 $2.93\ \text{dBi}$ 、 $5.33\ \text{dBi}$ 和 $5.36\ \text{dBi}$ 。在带宽为 $2.26 \sim 2.64\ \text{GHz}$ 时,天线的 3 种模式的最低辐射效率分别为 90% 、 91% 、 91% ,均大于 90% 。

2.2 天线性能比较

表 2 给出了本文所提出的可重构天线与其他同类天线性能的比较。本文天线尺寸更小;天线的辐射效率在 3 种模式下均能达到 90% 以上,比同类型天线具有更高的辐射效率。此外,天线只使用了两个二极管,个数比同类天线少,因而结构更简单。

表 2 天线性能比较

对比文献	频率/GHz	尺寸/mm	辐射效率/%	二极管个数	模式	增益/dBi
[5]	3.65	75×70	87	6	7	6.5
[6]	2.45	75×75	60	4	4	4.11
[7]	2.4	98×94	—	8	5	5.56,7.03,6.60,6.48,5.32
[8]	2.45	200×106	81.2,76.6	4	2	10.4,9.6
本文	2.45	71.5×44	90,91,91	2	3	2.93,5.33,5.36

3 结束语

本文提出一种小型化高效率方向图可重构天线,通过控制寄生条带上2个PIN二极管的导通和截止状态,天线可以实现3种不同波束指向的方向图重构模式。对3种模式下的天线性能进行分析,测试带宽与仿真结果基本一致。与现有的方向图可重构天线相比,提出的天线具有小型化、高效率、结构简单、波束切换易于实现、制作成本低等特点。提出的天线可以根据需要改变波束指向,从而提高通信效率,降低干扰。该天线适合应用于WALN通信系统及可穿戴体域网通信系统中。

致谢:感谢成都信息工程大学本科教学工程项目(JYJG2022062)对本文的资助

参考文献:

- [1] Zhang W, Li Y, Zhang Z, et al. A pattern-reconfigurable aircraft antenna with low wind drag [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4397–4405.
- [2] Hossain M I, Faruque M R I, Islam M T, et al. Design and analysis of coupled-resonator reconfigurable antenna [J]. Applied Physics A, 2016, 122(1): 1–4.
- [3] Patriotis M, Ayoub F N, Tawk Y, et al. A Four-Element Antenna Array System With 15 Reconfigurable Radiation Patterns [J]. IEEE Access, 2021, 9: 108579–108585.
- [4] Jin G, Li M, Liu D, et al. A simple four-beam reconfigurable antenna based on monopole [J]. IEEE Access, 2018, 6: 30309–30316.
- [5] Gaya S, Hussain R, Sharawi M S, et al. Pattern reconfigurable Yagi-Uda antenna with seven switchable beams for WiMAX application [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(3): 1329–1334.
- [6] Jin G, Li M, Liu D, et al. A simple planar pattern-reconfigurable antenna based on arc dipoles [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1664–1668.
- [7] 高畅. 频率和方向图可重构缝隙天线的研究与设计 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [8] Hong K D, Zhang X, Zhu L, et al. A High-Gain and Pattern-Reconfigurable Patch Antenna Under Operation of TM_{20} and TM_{21} Modes [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021, 2: 646–653.
- [9] Bai Y Y, Xiao S, Liu C, et al. Design of pattern reconfigurable antennas based on a two—element dipole array model [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4867–4871.
- [10] Li R, Yang H, Liu B, et al. Theory and realization of a pattern-reconfigurable antenna based on two dipoles [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(7): 1291–1295.
- [11] Ke Y H, Yang L L, Chen J X. Design of switchable dual-balun feeding structure for pattern-reconfigurable endfire antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(8): 1463–1467.
- [12] 张永亮, 蔡焱, 刘丽娜, 等. 一种基于超表面的方向图可重构天线 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 918–924.
- [13] Saurav K, Sarkar D, Srivastava K V. A dual-band reconfigurable Yagi-Uda antenna with diverse radiation patterns [J]. Applied Physics A, 2017, 123(7): 1–8.
- [14] Majid H A, Rahim M K A, Hamid M R, et al. Reconfigurable wideband to narrowband antenna using tunable EBG structure [J]. Applied Physics A, 2014, 117(2): 657–661.
- [15] Zhu H L, Cheung S W, Yuk T I. Mechanically pattern reconfigurable antenna using metasurface [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, 9(12): 1331–1336.

Design of a Pattern Reconfigurable Monopole Antenna

QIN Shichuan, LI Rongqiang

(College of Electronical Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In this paper, a novel pattern reconfigurable monopole antenna is presented. The antenna consists of a rectangular monopole and two sets of parasitic strips. The parasitic strips consist of zigzag strips similar to the “2” and “5”. Two PIN diodes are integrated into the left and right sides of the parasitic strips. By controlling the on/off states of the corresponding PIN diode, the parasitic strips’ surface current will change, thus changing the antenna pattern. The antenna can acquire three different reconfigurable modes, including a bidirectional mode ($\pm X$ direction) and two directional modes ($+X$ direction or $-X$ direction). The results show that the antenna bandwidths of the three reconfigurable modes are 2.26 ~ 2.64 GHz, 2.12 ~ 2.64 GHz, 2.13 ~ 2.64 GHz, respectively. The overlapping bandwidth is 2.26 ~ 2.64 GHz, representing a relative bandwidth of 15.5%. The minimum in-band radiation efficiency of the antenna in the three modes is 90%, 91% and 91% respectively, all of which can reach more than 90%. The measured bandwidths are 2.22 ~ 2.65 GHz, 2.12 ~ 2.59 GHz, and 2.13 ~ 2.60 GHz, respectively, which are basically consistent with the simulation results. The proposed antenna has the advantages of miniaturization, high efficiency and simple structure.

Keywords: reconfigurable antenna; monopole; PIN diode