

靳贵平, 邓楚虹, 曾广洁, 等. 共面波导差分馈电频率可重构天线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 343-349. DOI: 10.13443/j. cjors. 2018042501  
JIN G P, DENG C H, ZENG G J, et al. A CPW differentially-fed frequency reconfigurable antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2018, 33(3): 343-349. (in Chinese). DOI: 10.13443/j. cjors. 2018042501

## 共面波导差分馈电频率可重构天线

靳贵平 邓楚虹 曾广洁 黎森兰

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641)

**摘要** 提出了一种共面波导(coplanar waveguide, CPW)差分馈电频率可重构天线. 通过直流偏置电路来控制天线上四个PIN二极管的导通和断开模式, 天线可以工作在两种状态, 实现在2.02~2.89 GHz和3.27~3.66 GHz两个频段的重构, 阻抗带宽分别为35.4%和11.3%, 且天线辐射方向图受频率可重构的影响较小, 天线在两种状态下的平均增益分别可达3.18 dBi和3.61 dBi. 该天线充分利用共面波导天线结构简单和频带宽的优势, 实现了差分馈电技术与频率可重构技术的完美结合. 天线的实测结果与仿真结果非常接近, 可应用于WLAN的2.45 GHz和WiMAX的2.45 GHz、3.5 GHz两个频段.

**关键词** 差分馈电天线; 频率可重构; 共面波导; PIN二极管; 宽频带

**中图分类号** TN820

**文献标志码** A

**文章编号** 1005-0388(2018)03-0343-07

**DOI** 10.13443/j. cjors. 2018042501

## A CPW differentially-fed frequency reconfigurable antenna

JIN Guiping DENG Chuhong ZENG Guangjie LI Miaolan

(School of Electrical and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** A coplanar waveguide(CPW) differentially-fed frequency reconfigurable antenna is proposed. By designing a DC bias circuit to change the working states of the four PIN diodes, the differentially-fed frequency reconfigurable antenna can be reconfigured in two frequency bands, 2.02 to 2.89 GHz (35.4%) and 3.27 to 3.66 GHz (11.3%), and the performance of frequency reconfiguration barely has influence on the radiation patterns of the antenna, the average gain of the two states can achieve 3.18 dBi and 3.61 dBi, respectively. This antenna which combines the differential technology and frequency reconfigurable technology, has a compact CPW structure and uses wide bands, thus can be applied to the 2.45 GHz band of WLAN and two bands of WiMAX, 2.45 GHz and 3.50 GHz.

**Keywords** differentially-fed antenna; frequency reconfigurable; CPW; PIN diode; wide band

## 引言

目前无线通信市场对全集成射频前端产品的需求量越来越大, 集成射频前端的低噪声放大器等电路为了进一步抑制噪声, 通常采用差分结构. 差分天线与传统天线的区别在于差分天线有两个馈电端口, 在奇模信号激励下两个端口的激励信号幅度相

等、相位相差 $180^\circ$ , 能够激励起天线的辐射模式, 但是在偶模信号激励下两个端口的激励信号幅度相等、相位相同, 绝大部分的偶模功率将反馈到馈源, 无法激励起天线的辐射模式. 因此差分天线可以直接与射频前端电路连接, 从而避免巴伦等转换器件的使用, 同时也提升了系统的集成度. 近年来, 差分天线成为国际学者们的研究热点, 受到学术界的高

收稿日期: 2018-04-25

资助项目: 国家自然科学基金(61302057); 中央高校本科业务费(2014ZZ0041, 2011ZM0028)

联系人: 靳贵平 E-mail: gpjin@scut.edu.cn

度重视. 差分天线的分类有很多, 例如从馈电形式上分大致有共面波导馈电差分天线<sup>[1-3]</sup>、探针馈电差分天线<sup>[4]</sup>、孔径耦合差分天线<sup>[5]</sup>和临近耦合差分天线<sup>[6]</sup>.

一直以来, 人们对频谱资源的需求有增无减, 但由于可用的空间资源和频谱资源是有限的, 近年来不断涌现的各类无线电技术与应用使得原本就非常珍贵的频谱资源变得越来越紧缺, 于是大容量、超宽带、多功能逐渐成为各种综合通信系统发展的重要方向. 可重构天线的功能具有多样性, 一般情况下, 按天线实现的功能可分为频率可重构天线<sup>[7-11]</sup>、方向图可重构天线<sup>[12]</sup>、极化可重构天线<sup>[13]</sup>, 它们可以根据不同的通信场景切换到不同的工作模式, 通信对象更为专一, 这极大地提高了通信速率, 又由于一副天线兼具多副天线的功能, 天线数量众多的问题也因此得以解决, 整个通信系统的性能也不被制约. 综上所述, 可重构天线具有非常重要的实际应用价值, 必然是未来天线发展的方向.

频率可重构天线作为一种新型天线, 它具有多功能和易实现分集应用等优势, 与传统的只能一次实现单频或多频的天线相比, 频率可重构天线可以满足系统在不同环境下对不同通信频段的需求, 即更有针对性. 一般来说, 频率可重构天线性能的重构是通过改变天线表面的电流分布从而改变天线的谐振频点来实现的, 它可以在天线其他辐射特性基本保持不变的情况下, 使天线工作频率根据场景需求进行灵活切换, 这也相当于增加了工作带宽. 目前最常用的频率可重构技术手段是把开关器件加载在天线辐射单元或者馈电结构中, 其中微电子机械开关以及 PIN 二极管开关<sup>[14-18]</sup>等电子器件应用得最为广泛, 除此之外还有光控开关、变容二极管、GaAs FET 开关等可控元器件也可以加载在频率可重构天线中充当开关的作用, 通过控制开关器件的导通与断开来改变天线表面的电流路径, 进而使天线的工作频段得到重构. 目前来说, 频率可重构天线在一定程度上主要还是依赖于开关技术, 开关加载的位置及其偏置电路的设计都对天线的整体辐射性能有一定的影响, 所以在对天线进行设计的时候这些因素都需要考虑进去, 但是随着目前开关技术的不断发展和革新, 频率可重构天线必将会有更进一步的发展和更广泛的应用空间.

目前在天线研究领域里将差分馈电技术和频率可重构技术相结合的研究非常少, 文献[19]提出的一款差分频率可重构天线通过控制可变电容来实现

频率可重构, 但重构的频段还是比较窄. 因此, 差分频率可重构天线的研究是十分具有前沿性和探索性的, 尤其是在拓展带宽方面. 综合相关研究发现, 在设计差分馈电频率可重构天线时主要涉及的问题有:

1) 设计频率可重构天线的基本出发点是通过控制射频开关的导通与断开状态来引导天线辐射体表面的电流路径走向, 而差分天线的结构往往是对称的, 所以在设计天线馈电点位置和射频开关的位置时需要考虑天线结构的整体对称性.

2) 理想中的频率可重构天线可以在保持其他辐射特性稳定的情况下, 使天线的工作频率根据场景需求进行灵活切换, 这就要求在实现频率可重构的同时天线的其他特性, 比如方向图\极化方式等要比较接近或一样.

3) 由于要对天线进行频率可重构, 加开关或者加可变电容等方法都会改变天线辐射体的结构, 天线在不同的谐振情况下适用的匹配网络也会相对不一样, 若能在不同的频率谐振情况下使用同一匹配馈电网络是一大创新, 同时考虑开关是加载在辐射模块上还是馈电电路上.

综合以上讨论, 本文提出一款共面波导差分馈电频率可重构天线. 通过控制天线上 PIN 二极管的工作状态, 可以实现 WLAN 的 2.45 GHz 和 WiMAX 的 2.45 GHz、3.5 GHz 两个频段的重构, 且辐射方向图受频率可重构的影响较小. 该天线充分利用了共面波导天线结构简单和频带宽的优势, 实现共面波导差分馈电技术与频率可重构技术的完美结合.

## 1 共面波导差分馈电频率可重构天线设计

本文研究的共面波导差分馈电频率可重构天线的结构图如图 1 所示, 主要包括中心圆形单极子辐射单元、一对共面波导差分微带线、开有多条缝隙的地和加载在缝隙上的四个 PIN 二极管, 天线的整体结构完全对称. 该天线使用 FR4 高频介质基板, 其厚度为 0.8 mm, 相对介电常数为 4.4, 介质损耗角为 0.02, 天线的平面大小为 70 mm×70 mm; 天线中心的圆形单极子辐射单元和地全部在介质板的同一面, 两条中心微带线和与其紧邻的地构成一对差分共面微带线, 即共面波导, 天线则由这一对共面波导进行差分馈电; 地的四个角被切除, 地上所开缝隙的形状完全对称, 在 y 轴方向呈折线状, x 轴方向呈



电磁波在自由空间的波长;第二部分主要分布在矩形缝隙的末端,电流路径长度大约为 $(L_5 + 2L_4 + W_6)$ ,相当于 $0.44\lambda(3.50\text{ GHz})$ ;天线在 State 2 下的工作频带为 $3.18\sim 3.80\text{ GHz}$ ,可见集中在天线环形缝隙边缘的电流路径决定着天线工作频带的下边频,而分布在矩形缝隙末端的电流路径影响着天线工作频带的上边频。

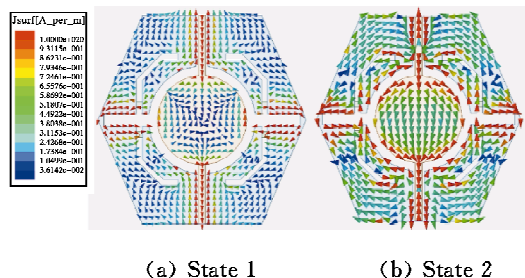


图 3 天线在两种工作状态下的电流分布图

Fig. 3 The electric current contribution of the antenna on two states

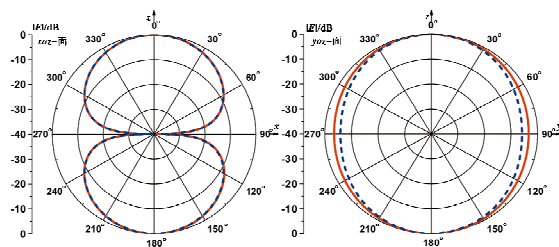
## 2.2 天线参数优化

图 4 给出了地上有无四个切角对天线辐射方向图影响的对比。由图中可知,地上有无四个切角对天线在  $xoz$  面的辐射方向图几乎没有影响,但对天线在 State 2 下  $yoze$  面的辐射方向图影响很大。天线的设计目标之一就是为在实现频率可重构功能的同时天线其他的性能也能保持稳定,为实现这一目标,对天线的结构进行多次改进,发现地上切去四个角能明显改善天线在 State 2 下  $yoze$  面的辐射方向图,使其与天线在 State 1 下的  $yoze$  面的辐射方向图相似。

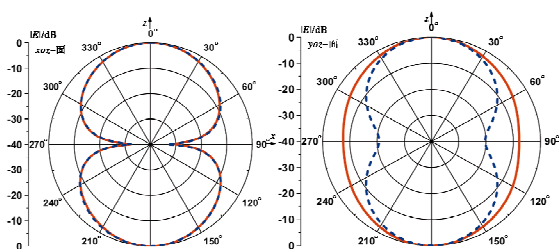
图 5 分析了环形缝隙外圆的半径  $R_1$  对天线差模反射系数的影响。从仿真结果可以看出, $R_1$  对天线在两种状态下的谐振频点都有较大的影响。在 State 1 下,随着  $R_1$  值的逐渐增大,谐振频点往高频方向移动。在 State 2 下, $R_1$  取值为  $18\text{ mm}$  时天线谐振在  $3.50\text{ GHz}$ ,且匹配良好;当  $R_1$  的值减小或增大时,天线的谐振频点都会向低频方向偏移,且谐振深度不够。

结合前面对天线电流路径的分析可知,在 State 1 下,因环形缝隙的耦合作用在缝隙两侧会产生耦合电流,其中在缝隙靠地一侧产生的电流决定着天线在 State 1 下的谐振频点,这与图 5(a)中对  $R_1$  进行参数分析的结论是一致的;在 State 2 下,电流主要集中于环形缝隙的边缘,其电流路径长度约为  $0.4$

$C_1, C_1$  为环形缝隙外圆的圆周长,而  $C_1$  的值由  $R_1$  决定,所以  $R_1$  影响着天线在 State 2 下的谐振频点。



(a) State 1; 2.45 GHz

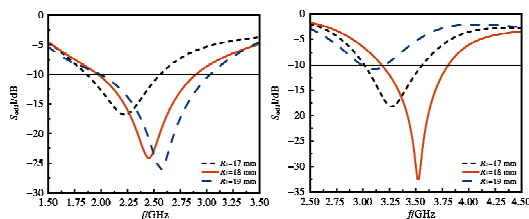


(b) State 2; 3.50 GHz

—— 地有切角  
- - - 地无切角

图 4 地的四个切角对天线辐射方向图的影响

Fig. 4 The impact of four cuts on the ground to the radiation patterns

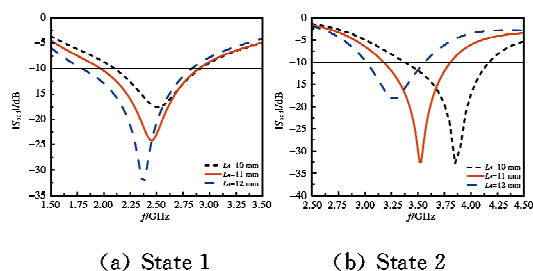


(a) State 1 (b) State 2

图 5  $R_1$  对天线  $|S_{\text{odd}}|$  参数的影响

Fig. 5 The influence of  $R_1$  to  $|S_{\text{odd}}|$

图 6 给出了  $L_4$  对天线  $|S_{\text{odd}}|$  参数的影响, $L_4$  是地上水平矩形缝隙末端的长度。从给出的参数优化仿真结果可以看出,天线在两种状态下的谐振频点都会随着  $L_4$  的增大而降低,尤其是在 State 2 下,谐振频点移动幅度更大。而由前面对天线电流路径的分析已知,在两种状态下天线在水平矩形缝隙的末端都有较强的电流分布。综合参数分析和天线电流路径分析可见, $L_4$  也是影响天线性能的关键参数之一,为使天线性能达到预期设计目标,选取  $L_4$  的最优值为  $11\text{ mm}$ 。



(a) State 1 (b) State 2

图6  $L_4$  对天线  $|S_{\text{odd}}|$  参数的影响

Fig. 6 The influence of  $L_4$  to  $|S_{\text{odd}}|$

### 3 天线仿真与测试结果

根据图1将天线加工成实物并进行测试,天线实物图如图7所示。

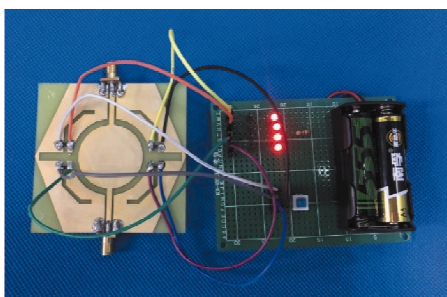
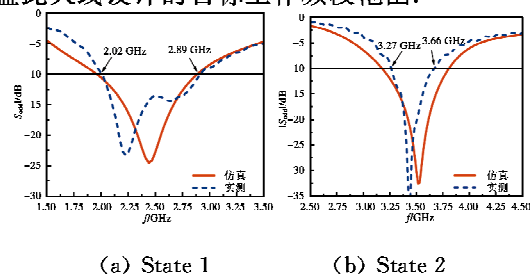


图7 天线实物图

Fig. 7 The prototype of the antenna

图8是仿真和实际测量的共面波导差分频率可重构天线的差模反射系数对比图。从图中可以看出:在State 1下实测的差模阻抗带宽为35.4%,可覆盖2.02~2.89 GHz频段;在State 2下实测的差模阻抗带宽为11.3%,可覆盖3.27~3.66 GHz频段。State 1下差模反射系数的实测结果与仿真结果比较吻合,而State 2下天线的工作带宽相对仿真结果有所变窄,这是由于天线在实际加工制作和测试过程中会产生误差,导致实测和仿真结果之间会有微小的差别,且稍有频偏,但由于频带够宽,还是可以覆盖此天线设计的目标工作频段范围。

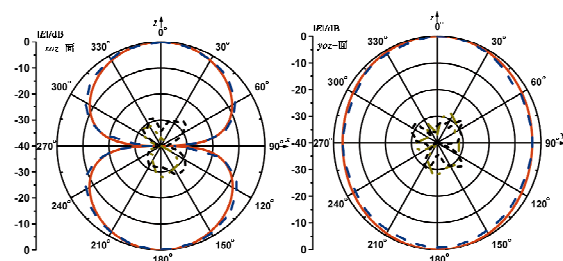


(a) State 1 (b) State 2

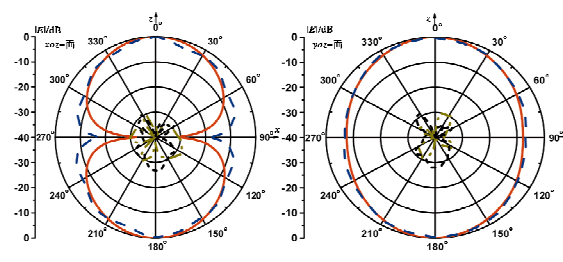
图8 天线  $|S_{\text{odd}}|$  参数仿真与实测结果

Fig. 8 Simulated and measured results of  $|S_{\text{odd}}|$

图9给出了共面波导差分馈电频率可重构天线归一化辐射方向图的实测与仿真结果的对比。图9(a)和(b)分别是天线在2.45 GHz和3.5 GHz的主极化和交叉极化的仿真和实测对比图,包括 $xoz$ 面和 $yo z$ 面。从图中可以看出:天线的实测与仿真结果还是比较吻合的,整体来说没有出现很大的波动;仅在3.5 GHz频点处,天线 $xoz$ 面辐射方向图的实测与仿真结果略有差别,这主要是由于天线在实物加工过程会存在些许误差,偏置电路、连接偏置电路的导线、实际测试时的操作误差等也会带来一定的影响。



(a) State 1; 2.45 GHz



(b) State 2; 3.5 GHz

— 仿真主极化  
- - - 仿真交叉极化  
- - - 实测主极化  
..... 实测交叉极化

图9 天线辐射方向图仿真与实测结果

Fig. 9 Simulated and measured results of radiation patterns

图10是天线增益的实测与仿真结果对比图。State 1下,天线仿真的平均增益约为3.28 dBi,实测的平均增益约为3.18 dBi; State 2下,天线仿真的平均增益约为3.90 dBi,实测的平均增益约为3.61 dBi。实测增益都略低于仿真增益,这主要是由天线实物焊接工艺的误差、直流偏置电路及SMA连接器等所带来的损耗引起的。

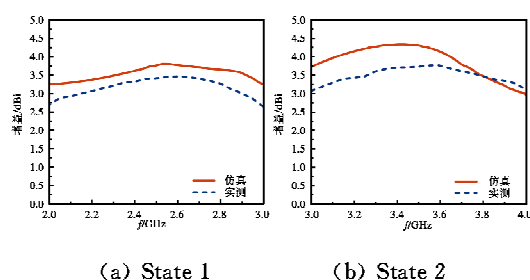


图 10 天线增益的仿真与实测结果

Fig. 10 Simulated and measured results of the gain

## 4 结 论

本文提出一种共面波导差分馈电频率可重构天线,通过控制直流偏置电路的通断来控制天线上四个 PIN 开关的导通与断开状态,实质上改变了天线表面的电流路径,使天线可以分别工作在以 2.45 GHz 和 3.50 GHz 为中心谐振频点的两个频段.该天线结构简单,重构的频段带宽较宽,实测结果显示开关全部导通状态下天线具有 35.4% 的阻抗带宽,覆盖 2.02~2.89 GHz 频段,在开关全部断开状态下天线的阻抗带宽为 11.3%,可覆盖 3.27~3.66 GHz 频段,且天线的辐射方向图受频率可重构的影响较小,天线在两种状态下的平均增益分别可达 3.18 dBi 和 3.61 dBi.

该天线采用共面波导差分馈电结构,充分利用了共面波导天线结构简单和宽频带的优势,文献[4]、[5]、[6]分别采用了探针、孔径耦合、临近耦合的差分馈电结构,仿真带宽分别只有 40 MHz、40/320 MHz、42/84 MHz,而该天线在两种状态下实测的带宽结果可分别达到 870 MHz 和 390 MHz,其带宽明显展宽.且天线合理地布局四个 PIN 二极管加载的位置,并构建对应的偏置电路,天线结构简单易加工,开关易控制,实现了差分馈电技术与频率可重构技术的结合.天线的实测结果与仿真结果非常接近,可应用于 WLAN 的 2.45 GHz 和 WiMAX 的 2.45 GHz、3.5 GHz 两个频段.天线很好地完成了对差分频率可重构天线的初步探索,其理论分析、仿真优化及实际测试都为今后的研究奠定了基础并提供了新的思路和方法.但差分频率可重构天线依然还有很大的进步空间,在今后的设计工作中还可以在天线的馈电结构、多频段重构、其他类型射频开关的选用、数量和加载位置等方向做进一步设计和优化.

## 参考文献

- [1] LU L, JIAO Y C, ZHANG L, et al. Single-layer differential CPW-fed UWB antenna with common-mode suppressed and band notched applications[C]//International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2016; 105-107.
- [2] TANG Z Y, LIAN R N, YIN Y Z. Differential-fed UWB patch antenna with triple band-notched characteristics[J]. Electronics letters, 2015, 51(22): 1728-1730.
- [3] TU Z H, LI W A, CHU Q X. Single-layer differential CPW-fed notch-band tapered-slot UWB antenna [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014, 13: 1296-1299.
- [4] FANG X S, LEUNG K W, LIM E H, et al. Compact differential rectangular dielectric resonator antenna [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2010, 9: 662-665.
- [5] WU H, ZHANG J, YAN L. Differential dual-band antenna-in-package with T-shaped slots[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2012, 11: 1146-1149.
- [6] HAN L P, ZHANG W M, ZUO J H, et al. Novel differential dual frequency antenna for wireless communication[C]//China-Japan Joint Microwave Conference, 2008; 154-156.
- [7] ROMPUTTAL A, PHONGCHAROENPANICH C. Frequency reconfigurable multiband antenna with embedded biasing network[J]. IET microwaves, antennas & propagation, 2017, 11(10): 1369-1378.
- [8] TAN L R, WU R X, POO Y. Magnetically reconfigurable SIW antenna with tunable frequencies and polarizations[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(6): 2772-2776.
- [9] WANG Y L, LIU Y, DU H L, et al. A frequency reconfigurable microstrip antenna based on (Ba, Sr) TiO<sub>3</sub> substrate[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(2): 770-775.
- [10] YOUNG M W, YONG S, BERNHARD J T. A miniaturized frequency reconfigurable antenna with single bias, dual varactor tuning[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(3): 946-951.
- [11] WANG Y L, LIU C H, SUN B, et al. Design of an instantaneous-wideband frequency reconfigurable microstrip antenna based on (Ba, Sr) TiO<sub>3</sub>/MgO composite thin films[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(12): 6472-6475.

- [12] LIZZI L, FERRERO F, RIBERO J M, et al. Differential pattern-reconfigurable antenna prototype for efficient wireless sensor networks[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (AP-SURSD), 2016: 1239-1240.
- [13] YANG X T, LIU X Y, LI B. A dual-band circularly polarized antenna with differential feeding for implanted bio-sensors[C]//IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2016: 197-199.
- [14] HASSAN S J, EQBAL Z B, VARMA R C, et al. Frequency reconfigurable square slot antenna for wireless applications[C]//TENCON IEEE Region 10 Conference, 2017: 2642-2647.
- [15] KUMAR J, BASU B, TALUKDAR F A. A monopole frequency reconfigurable antenna printed on multilayered substrate[C]//IEEE Asia Pacific Microwave Conference, 2017: 310-313.
- [16] BARUAH R, BHATTACHARYYA N S. A frequency reconfigurable antenna with consistent radiation characteristics[C]//International Conference on Innovations in Electronics, Signal Processing and Communication (IESC), 2017: 177-180.
- [17] RAHIM M K A, HAMID M R, SAMSURI N A. Frequency reconfigurable antenna for future wireless communication system[C]//European Microwave Conference (EuMC), 2016: 965-970.
- [18] SELVAM Y P, ELUMALAI L, ALSATH M G N. Novel frequency-and pattern-reconfigurable rhombic patch antenna with switchable polarization[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2017, 16: 1639-1642.
- [19] HUM S V, XIONG H Y. Analysis and design of a differentially-fed frequency agile microstrip patch antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58(10): 3122-3130.

### 作者简介

**靳贵平** (1976—),女,陕西人,华南理工大学电子与信息学院副教授,研究方向为通信理论与技术、无线通信、通信天线、认知无线电。

**邓楚虹** (1993—),女,湖南人,华南理工大学电子与信息学院硕士研究生,研究方向为现代通信理论与技术。

**曾广洁** (1994—),男,江西人,华南理工大学电子与信息学院硕士研究生,研究方向为现代通信理论与技术。

**黎淼兰** (1994—),女,广西人,华南理工大学电子与信息学院硕士研究生,研究方向为现代通信理论与技术。