

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201904016



# 方向图可重构印刷小型天线的 设计与实现

帅亮, 丰励, 杨辉, 彭庭康, 曾李, 尹龙川

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 提出一种简单结构紧凑的方向图可重构天线. 该天线由 3 条微带线和介质基板组成, 微带线印在基板的顶部. 将 PIN 二极管集成在左、右两侧的微带线上, 通过二极管开关的导通和断开, 使天线在  $yo\alpha$  平面获得 2 种定向与全向的辐射方向图. 对天线进行仿真、制作和测试. 实验结果表明: 阻抗带宽可达 14.7%, 定向最小增益 1.2 dBi, 全向最小增益 1.7 dBi; 该天线在 2.19~2.54 GHz 频段上有较好的定向性和全向性, 适用于抗干扰能力要求较高的无线通信系统.

**关键词:** 可重构天线; 印刷小型天线; PIN 二极管; 方向图

**中图分类号:** TN 82      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0806-06

## Design and Implementation of Printed Small Antenna With Direction Pattern Reconfigurable

SHUAI Liang, FENG Li, YANG Hui,  
PENG Tingkang, ZENG Li, YIN Longchuan

(College of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** A simple compact planar pattern reconfigurable antenna is proposed. The antenna consists of three microstrip lines and dielectric substrates, the microstrip are printed on the top layers of the substrate, respectively. PIN diodes are integrated on the microstrip lines on the left and right sides so that the antenna can obtain two directional and omnidirectional radiative direction patterns in the  $yo\alpha$  plane by switching the ON/OFF states of the diodes. The antenna is simulated, fabricated and measured. Experimental results indicate that the antenna achieves a impedance bandwidth of 14.7%. The measured orientation minimum gain is 1.2 dBi and the measured omnidirectional minimum gain is 1.7 dBi. The antenna has good directivity and omnidirectionality in 2.19-2.54 GHz band, which is suitable for wireless communication systems with high anti-interference capability requirements.

**Keywords:** reconfigurable antenna; printed small antenna; PIN diode; direction pattern

相控阵天线是传统的方向图控制方法<sup>[1-2]</sup>. 然而, 相控阵天线设计过程复杂、成本高、质量大等缺点限制了相控阵天线在通信系统中的应用. 方向图可重构天线最大的优点是可以用一个天线实时控制辐射方向. 因此, 深入研究方向图可重构天线具有重要的应用价值. Zhang 等<sup>[3]</sup>基于八木天线工作原理, 提出一种方向图可重构天线, 该天线能够实现方向图定向辐射. Boukarkar 等<sup>[4]</sup>提出一种机械控制频率

收稿日期: 2019-04-09

通信作者: 丰励(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事微波遥感及射频电路的研究. E-mail: 28051533@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41601399)

与方向图可重构贴片天线,通过改变 2 个可调短路螺钉的位置,实现频率与方向图可重构. Singh 等<sup>[5]</sup>提出一种方向图和极化可重构螺旋天线,通过计算机可以机械制动液态金属,该天线能够产生 4 种方向图. 文献[6]中的天线通过在相应的天线臂上填充无毒液态金属镓锡合金,实现 5 种方向图. Li 等<sup>[7]</sup>提出一种方向图可重构天线阵,每个天线单元由两层组成,通过在每层上切换 PIN 二极管开关状态,可以提供 4 种辐射方向图. Row 等<sup>[8]</sup>通过使用一个四扇区阵列来实现设计,但是,天线的供电网络电路太复杂. 然而,上述文献设计的天线结构体积过大,且辐射类型单一. 针对以上问题,本文提出一种方向图可重构天线,该天线的中心工作频率为 2.4 GHz,通过切换 PIN 二极管开关状态,可以产生 2 种定向方向图与全向方向图;通过合理调整天线结构的参数,可满足较高的性能要求. 与上述方向图可重构天线相比,该天线能够减小系统的质量与成本,而且定向辐射可以抑制噪声,节约能量和提高系统安全性<sup>[9-10]</sup>,同时全向辐射增加了该天线的应用范围.

### 1 可重构天线结构与设计

受八木天线<sup>[9-11]</sup>的启发,文中所提天线的结构,如图 1 所示. 图 1 中: $a, b$  分别为介质板的长度、宽度; $l$  为主辐射贴片 1 个臂长度; $l_2$  为单个寄生贴片臂上 PIN 二极管开关的距离; $l_3, w_2$  分别为寄生贴片长度和宽度; $w$  为主辐射贴片宽度; $g$  为主辐射贴片 2 个臂之间的距离; $D_1 \sim D_4$  为开关.

制作出的天线实物,如图 2 所示. 天线总体尺寸为 55 mm×40 mm×1.63 mm. 天线顶层由中心的“|”型贴片和围绕其左右两侧对称的“|”型寄生贴片组成. 中心的“|”型贴片作为主辐射单元,背面接 50 Ω 同轴线馈电. 2 个对称的“|”型结构与主辐射贴片的距离相等,分别通过 2 个 PIN 二极管来截断其结构,开关大小为  $w_2 \times w_2$ . 由于 PIN 二极管开关集成在两侧对称的寄生贴片上,所以,导通与截止开关的状态不会影响天线的固有工作频点,这也是可重构天线须解决的难题之一.

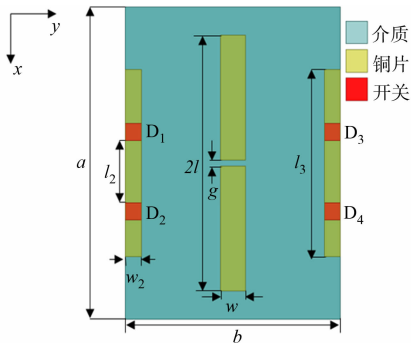


图 1 天线的结构

Fig. 1 Structure of antenna

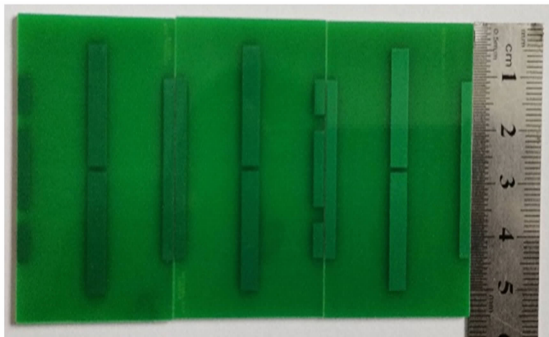


图 2 天线实物图

Fig. 2 Material object of antenna

天线介质基板采用的是环氧树脂玻璃纤维板(FR4),其相对介电常数  $\epsilon_r = 4.4$ ,厚度为  $h$ ,整体大小为  $a \times b$ . 对于工作频率  $f = 2.4$  GHz 的贴片天线,可以根据介质内的导波波长  $\lambda_c$  设计出高效率辐射贴片的长度. 天线辐射贴片的长度一般取  $\lambda_c/2$ ,其表达式<sup>[12-14]</sup>为

$$\lambda_c = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_e}}. \tag{1}$$

考虑到边缘缩短效应,实际的主辐射单元长度应为

$$l = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L. \tag{2}$$

式(1),(2)中: $c$  是光速; $\epsilon_e$  是有效介电常数,  $\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \times \frac{h}{w}\right)^{-1/2}$ ;  $\Delta L$  是等效辐射缝隙长度,  $\Delta L = 0.412h \times \frac{(\epsilon_e + 0.3)(w/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(w/h + 0.8)}$ .

使用高频结构仿真软件(HFSS)设计仿真时,利用材质为铜的贴片模拟 PIN 二极管的导通状态,用缝隙模拟 PIN 二极管的截止状态. 天线一共有 3 种工作状态:状态 1 为  $D_1$  和  $D_2$  开关导通,  $D_3$  和  $D_4$  开关截止;状态 2 为  $D_1$  和  $D_2$  开关截止,  $D_3$  和  $D_4$  开关导通;状态 3 为  $D_1, D_2, D_3$  和  $D_4$  开关都导通. 3 种

工作状态下的天线等效模型,如图 3 所示.当其中同一侧 2 个 PIN 二极管处于导通状态,而另一侧二极管处于断开状态时,其中一侧寄生贴片作为导向器,另一侧寄生贴片作为反射器.

当  $f=2.4\text{ GHz}$  时,天线在 3 种工作状态下的电流分布,如图 4 所示.由图 4 可知:电流主要分布在同轴线馈电的驱动偶极子上(主辐射贴片);另外,具有缝隙的偶极子(寄生贴片)将辐射能量反射到激发的对侧方向.由于两侧偶极子之间的反射和导向,辐射方向性相对稳定.天线结构具有对称性,在不同的工作条件下,天线方向图的最大波束可以形状不变地偏转一定的角度扫描,因此,可以在垂直面( $yoz$  面)上实现 2 个定向方向图与全向方向图的重构.

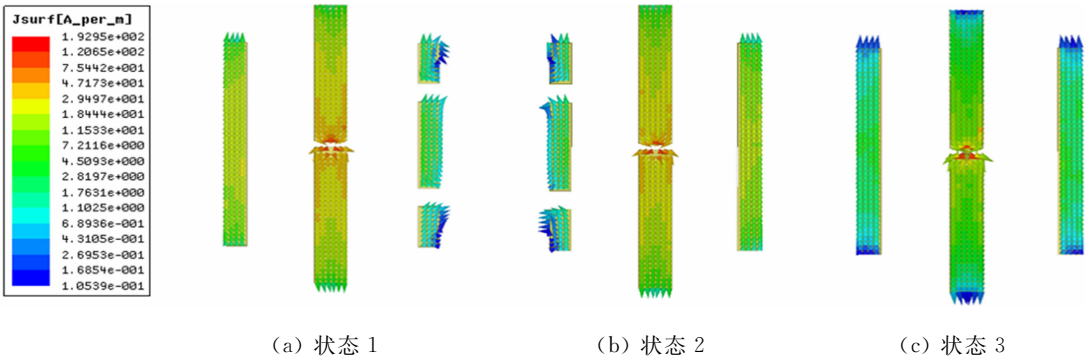


图 4 天线在 3 种工作状态下的电流分布  
Fig. 4 Current distribution of antenna in three operating states

2 参数优化对天线性能的影响

2.1 参数的优化

研究各项参数对天线性能的影响.以状态 1 为例,对天线的重要参数进行优化.天线的优化参数,如表 1 所示.

表 1 天线的优化参数  
Tab. 1 Optimized parameters of antenna

参数	$a$	$b$	$l$	$l_2$	$l_3$	$w$	$w_2$	$g$	$h$
尺寸	55	40	22.5	14	33	4.6	3	1	1.63

2.2 主辐射贴片的长度

保持天线其他结构参数不变,设置主辐射贴片长度  $l$  为 20~25 mm,步进为 2.5 mm,借助 HFSS 参数扫描功能对天线主辐射贴片长度进行仿真分析,不同  $l$  值对应的输入反射系数  $S_{11}$ ,如图 5 所示.

由图 5 可知:主辐射贴片长度  $l$  主要影响  $S_{11}$  的谐振频点,当  $l$  增大到 25.0 mm 时, $S_{11}$  的谐振频点为 2.2 GHz;当  $l$  减小到 20.0 mm 时, $S_{11}$  的谐振频点移到 2.7 GHz.由于天线所设计谐振频点为 2.4 GHz,因此,当  $l=22.5\text{ mm}$  时,满足设计要求的工作频点.

2.3 寄生贴片长度

保持天线其他结构参数不变,设置寄生贴片长度  $l_3$  为 30~36 mm,步进为 3 mm,借助 HFSS 参数

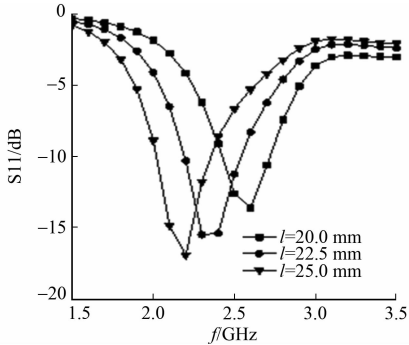


图 5 不同  $l$  值对应的  $S_{11}$   
Fig. 5  $S_{11}$  against different values of  $l$

扫描功能对天线寄生贴片长度进行仿真分析. 不同  $l_3$  值对应的方向图和 S11, 如图 6 所示. 图 6 中:  $G$  为增益值. 由图 6 可知:  $l_3$  值的变化对天线的辐射方向性能和输入反射系数 S11 都有一定的影响, 需要对比找到最优值; 当  $l_3 = 33\text{ mm}$  时, 天线的辐射方向性能与 S11 都较好.

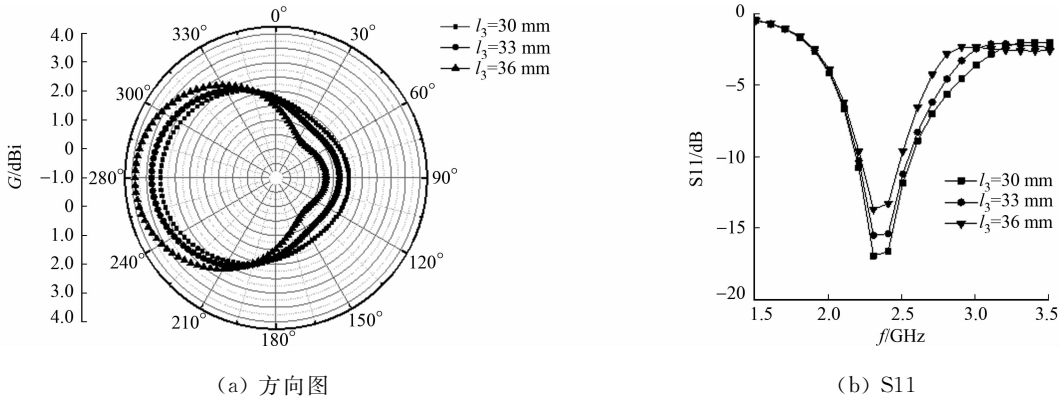


图 6 不同  $l_3$  值对应的方向图和 S11  
Fig. 6 Direction pattern and S11 against different values of  $l_3$

2.4 寄生贴片宽度

保持天线其他结构参数不变, 设置寄生贴片宽度  $w_2$  为 1~5 mm, 步进为 2 mm, 借助 HFSS 参数扫描功能对天线寄生贴片宽度进行仿真分析. 不同  $w_2$  值对应的方向图和 S11, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 当  $w_2$  增加时,  $yo z$  面方向图的最大增益值增大, 但是,  $w_2$  的增大会引起阻抗匹配变差, S11 曲线上移; 当  $w_2 = 3\text{ mm}$  时, 阻抗匹配能力与辐射能力都较好.

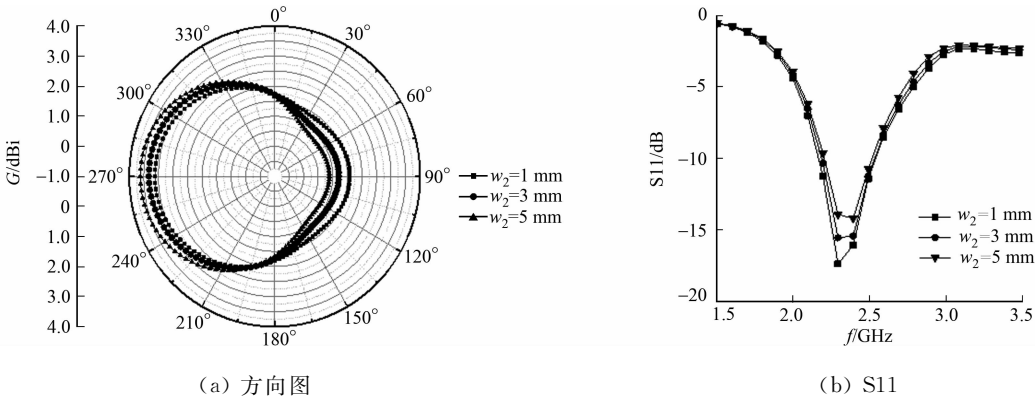


图 7 不同  $w_2$  值对应的方向图和 S11  
Fig. 7 Direction pattern and S11 against different values of  $w_2$

3 实验仿真与测试分析

利用 HFSS 对优化后的天线进行仿真, 得到天线在 3 种工作状态下的回波损耗、方向图和效率. 在实际测试中, 选用 KEYSIGHT 公司的 PNA Network Analyzer N5225B 型网络分析仪 (10 MHz~50 GHz) 测试天线的相应参数, 并与仿真结果进行对比.

天线在 3 种工作状态下的回波损耗仿真值和测试值, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 天线的仿真和测试反射系数在 3 种工作状态下都能较好地吻合; 在 3 种工作状态下, 仿真阻抗带宽覆盖 2.1~2.6 GHz; 测试阻抗带宽达到 14.7%, 覆盖 3 个工作状态下的 2.19~2.54 GHz, 可以满足整个 Bluetooth (2.400~2.484 GHz) 和 WLAN802.11b/g (2.400~2.484 GHz) 等无线通信系统工作频段; 同时, 当改变开关的状态时, 天线的谐振频点没有发生变化.

垂直面 ( $yo z$  面) 中, 天线在 3 种工作状态下的仿真与测试方向图, 如图 9 所示. 由图 9 可知: 天线在工作频点 2.4 GHz 下实现了方向图可重构, 可重构能力在  $\pm y$  方向上实现; 2 个定向方向的辐射图案可以保持一致; 测得的定向最小增益为 1.2 dBi, 全向最小增益为 1.7 dBi, 在一定范围内具有相对稳定性,

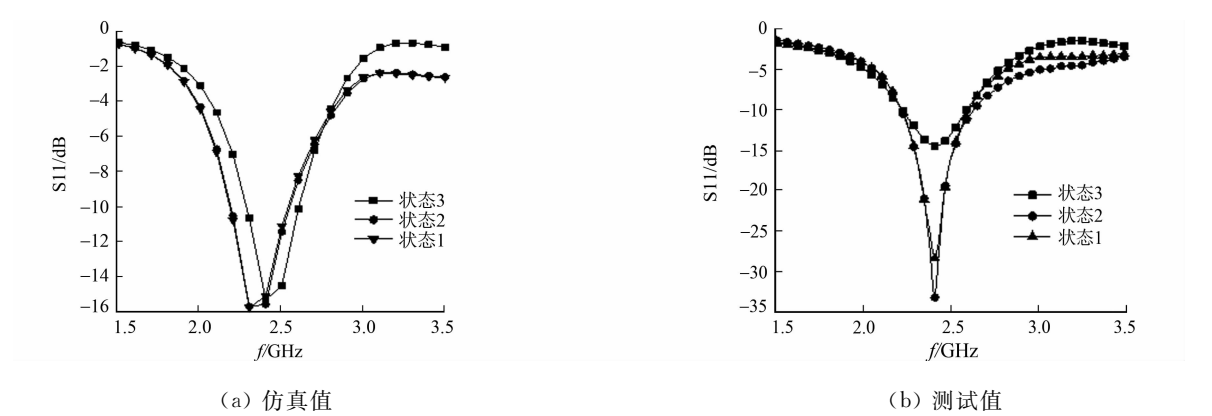


图 8 天线在 3 种工作状态下的回波损耗仿真值和测试值

Fig. 8 Simulation and measurement of return loss of antenna in three operating states

因此,提出的天线可以应用于需要在不同方向上具有相同辐射能力的通信系统中。

天线在 3 种工作状态下的仿真效率  $\eta_s$  和测试效率  $\eta_m$ ,如图 10 所示.由图 10 可知:天线在工作频段内的辐射效率可以达到 60% 以上,仿真与测试的效率损失主要是由焊接、制造工艺、同轴线和 SMA 连接头造成的。

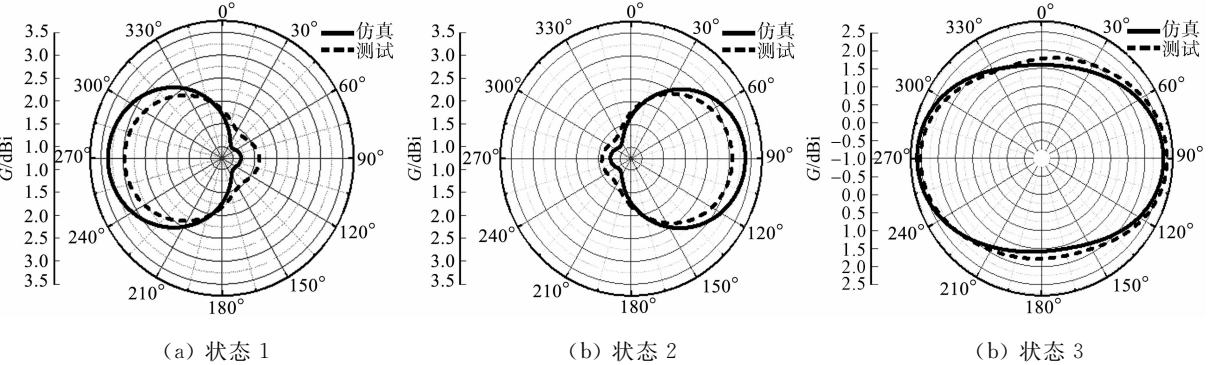


图 9 天线在 3 种工作状态下的仿真与测试方向图

Fig. 9 Simulated and measured direction patterns of antenna in three operating states

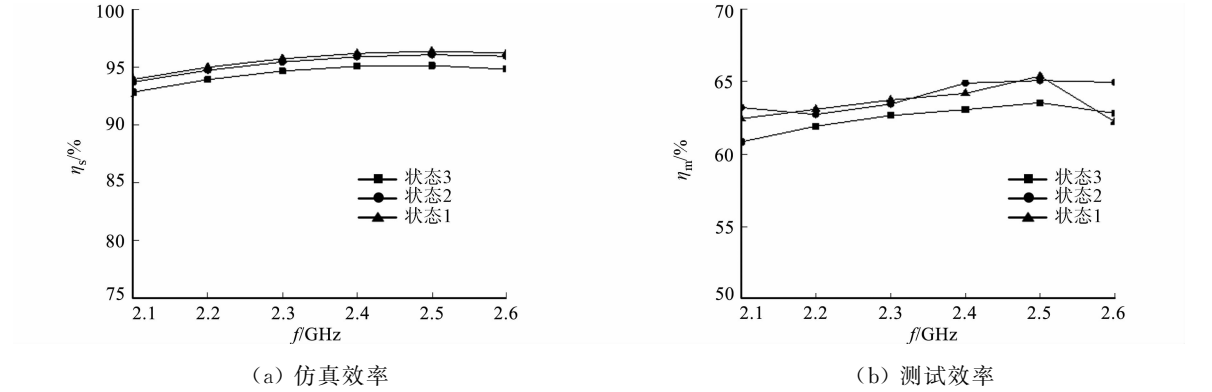


图 10 天线在 3 种工作状态下的仿真效率和测试效率

Fig. 10 Simulated and measured efficiency of antenna in three operating states

4 结束语

设计一种应用于无线通信系统小型可重构天线.采用 PIN 二极管开关,在  $yo z$  平面实现 2 个定向和全向方向图重新配置.实验结果表明:该天线工作在 2.4 GHz 频段,阻抗带宽为 14.7%,方向图可重构是在  $y$  方向上实现的.在实际应用中,可以根据目标的具体位置来切换选择辐射方向图,既可以有效地降低噪声的干扰,提高系统的安全性,也可以节约能量.在 Bluetooth 和 WLAN 等无线通信系统中具有一定的应用价值。

## 参考文献:

- [1] LI Wenxing,ZHAO Yueming. A pattern reconfigurable patch antenna for wide-angle scanning phased array[C]//IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES). Honolulu:IEEE Press,2016:1-2. DOI:10.1109/ROPACES.2016.7465428.
- [2] CHENG Y F,DING Xiao,SHAO Wei,*et al.* Planar wide-angle scanning phased array with pattern-reconfigurable windmill-shaped loop elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(2):932-936. DOI:10.1109/TAP.2016.2632736.
- [3] ZHANG Yuwei,LIN Shu,YU Shang,*et al.* Design and analysis of optically controlled pattern reconfigurable planar Yagi-Uda antenna[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation,2018,12(13):2053-2059. DOI:10.1049/iet-map.2018.5204.
- [4] BOUKARKAR A,LIN Xianqi,JIANG Yuan,*et al.* Compact mechanically frequency and pattern reconfigurable patch antenna[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation,2018,12(11):1864-1869. DOI:10.1049/iet-map.2017.0917.
- [5] SINGH S,JIM T,ZHOU Hengyi,*et al.* A pattern and polarization reconfigurable liquid metal helical antenna[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston:IEEE Press,2018:857-858. DOI:10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608957.
- [6] ZHANG G B,GOUGH R C,MOOREFIELD M R,*et al.* A liquid-metal polarization-pattern-reconfigurable dipole antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2018,17:50-53. DOI:10.1109/LAWP.2017.2773076.
- [7] LI Hui,LAU B K,HE S. Design of closely packed pattern reconfigurable antenna array for MIMO terminals[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(9):4891-4896. DOI:10.1109/TAP.2017.2730249.
- [8] ROW J S, TSAI C W. Pattern reconfigurable antenna array with circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(4):1525-1530. DOI:10.1109/TAP.2016.2522467.
- [9] 汤炜,孙平. 准八木天线的小型化和宽带化研究[J]. 科技视界,2018(11):19-21. DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2018.11.007.
- [10] 袁陶,李继岚,张昕. 一种新型微带准八木天线的设计[J]. 电子世界,2016(12):143-144. DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2016.12.115.
- [11] AWAIS M,HAMZA M,KHAN W T. A compact ultra-wideband single element planar Yagi antenna[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston:IEEE Press,2018:1939-1940. DOI:10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608258.
- [12] 黄文静,孙俊,杨唐钢. 一种应用于 WiFi 频段的高增益新型微带准八木天线[J]. 通信技术,2018,51(10):2521-2528. DOI:10.3969/j.issn.1002-0802.2018.10.041.
- [13] 李明洋,刘敏. HFSS 天线设计[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2014.
- [14] 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):7-11,20. DOI:10.3969/j.issn.1002-7300.2015.01.002.
- [15] GE Lei,LUK K M,CHEN Shichuang. 360-degree beam-steering reconfigurable wideband substrate integrated waveguide horn antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(12):5005-5011. DOI:10.1109/TAP.2016.2617820.
- [16] LIN Wei,WONG H,ZIOLKOWSKI R W. Wideband pattern-reconfigurable antenna with switchable broadside and conical beams[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2017,16:2638-2641. DOI:10.1109/LAWP.2017.2738101.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)