

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202006043



小型方向图可重构四单元 缝隙天线的设计

曾 李, 涂 玲 英, 丰 励, 尹 龙 川, 曲 元 军

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 提出一种小型方向图可重构天线. 该天线是由 4 个缝隙单元组成的平面阵列, 单一的缝隙单元能产生定向辐射方向图, 且最大辐射方向是接近缝隙的开口端. 将 4 个 PIN 二极管集成在 4 个缝隙单元上, 通过 4 个二极管开关的导通与断开组合成不同的模式, 使天线在 xoy 平面上获得 8 个定向和多个全向的辐射方向图. 仿真结果表明: 该天线的定向最大增益为 2.90 dBi, 全向最大增益为 1.38 dBi, 半功率波束宽度平均值为 136° . 该天线是半径为 31 mm 的圆, 体积小, 制造成本低, 且满足无线通信频段 2.40~2.50 GHz, 适用于无线局域网(WLAN)等无线通信领域, 可以降低多径衰落的影响, 提高数据的传输速率.

关键词: 可重构天线; 方向图; PIN 二极管; 缝隙小型天线

中图分类号: TN 82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0391-07

Design of A Small Direction Pattern Reconfigurable Four-Element Slot Antenna

ZENG Li, TU Lingying, FENG Li,
YIN Longchuan, QU Yuanjun

(College of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: A small pattern reconfigurable antenna is proposed. The antenna is a planar array composed of four slot elements. A single slot element can produce a directional radiation pattern, and the maximum radiation direction is close to the opening end of the slot. Four PIN diodes are integrated into four slot elements, and different modes are formed by the ON-OFF combination of four diode switches. This method is able to generate eight directional and multiple omnidirectional radiation patterns in xoy plane. The simulation results show that the maximum directional gain of the antenna is 2.90 dBi and the maximum omnidirectional gain is 1.38 dBi and that the average value of half power beam width is 136° . The antenna is a circle with a radius of 31 mm. It is small in size and low in manufacturing cost. It satisfies the wireless communication frequency band 2.40-2.50 GHz. It is suitable for wireless communication fields such as wireless local area network (WLAN). It can reduce the influence of multipath fading and improve data transmission rate.

Keywords: reconfigurable antenna; direction pattern; PIN diode; slot small antenna

在数字无线通信系统中,多径效应^[1]会导致信号的衰落和相移,不仅影响信号传输质量,还会限制传输带宽和传输速率.方向图可重构天线可以针对不同的信号环境调整天线的方向图,在其干扰方向形成零陷,有用信号方向形成主波束,达到抑制干扰,提高传输速率的目的.传统的方向图可重构天线采用

收稿日期: 2020-06-24

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)

相控阵技术^[2],但其结构复杂、体积大、成本高.方向图可重构天线和相控阵天线相比,具有波束扫描角度大、波束指向改变简单、波束控制灵活、天线单元使用数目少、辐射效率高等优点.因此,方向图可重构天线具有重要研究价值.文献[3-4]提出一种缝隙有源频率选择表面(AFSS)的双频电子波束切换天线,通过切换频率选择表面(FSS)中 PIN 二极管,使其能在选定的角度将全向波束转换成定向波束. Su 等^[5]提出用二氧化钒(VO_2)作为印刷开关控制单极子天线的方向图和频率,但是该开关的处理需要复杂的制造工艺,进而导致更高的成本. Jin 等^[6]提出一种基于弧偶极子的平面方向图可重构天线,弧偶极子刻在天线底板,4 种辐射方向图通过 PIN 二极管进行切换,但该天线的辐射效率只有 60%. 文献[7-9]介绍了一种液态金属天线,在这种天线的微流体通道注入镓铟合金 EGaIn,当 EGaIn 受到足够使其穿越小柱的压力时,液态金属天线的长度会变长,进而改变液态金属天线的频率、辐射方向图和极化. Andy 等^[10]提出一种光开关可重构天线,该开关由高阻抗硅片构成,在红外激光的照射下可以改变电导,从而改变天线的方向图和频率. Zhang 等^[11]提出一种方向图可重构平面光控八木天线,利用 PIN 光电二极管改变辐射模式.

然而,上述文献设计的天线有的体积过大,有的操作复杂或成本较高. 针对以上问题,本文提出一种适用于无线局域网(WLAN)的 2.40~2.50 GHz 的方向图可重构四单元缝隙天线.

1 天线的结构与与设计

天线的缝隙单元结构,如图 1 所示. 图 1 中: t 是底层地面圆的直径; e 是介质基板超出底层圆的长度; L_s, L_{s1}, S 分别为底层 L 型缝隙中长缝隙的长度、短缝隙的长度、缝隙宽度; m 为短缝隙到圆正切时的距离; W_2 是顶层矩形贴片的宽度; W_s 是顶层矩形贴片的馈电宽度.

L 型缝隙单元由 $50\ \Omega$ 同轴线馈电,长缝隙长度 L_s 、距离 m 和矩形贴片宽度 W_2 影响天线的阻抗匹配能力,短缝隙长度 L_{s1} 影响天线的工作频率,改变这些参数使天线在频率 $f=2.45\ \text{GHz}$ 有良好的阻抗匹配. 在共振频率下,缝隙单元周围的感应电流分布,如图 1 白色箭头所示. 根据电流的流向可以分解为 I_1, I_2, I_3 ,因为 I_1 在缝隙的上端, I_2 在缝隙下端, I_1 略大于 I_2 且 I_1 和 I_2 的方向相反,因此, I_1 的辐射大部分被抵消,缝隙单元的辐射主要靠 I_3 . 故 L 型缝隙单元类似沿 X 轴定向的小偶极子,在 xoy 平面和 xoz 平面具有双向的方向图. 另外,设计底层接地平面的形状与尺寸,使缝隙单元在 xoy 平面上定向辐射,而且最大辐射方向是缝隙开口端的方向,考虑到 I_1 剩余部分的影响,缝隙单元在 xoy 平面上的最大辐射方向会往缝隙开口端上移 1 个夹角. 如前所述,缝隙单元在 xoy 平面上存在单一的方向辐射,将多个缝隙单元集成 1 个天线就存在多个方向辐射.

天线的正面、背面结构,分别如图 2,3 所示. 图 2 中: L_{B1} 为顶层辐射贴片的馈电长度; W_1 为馈电圆面的直径;D1~D4 为开关. 该天线是由 4 个缝隙天线结构对称组成的阵列,天线结构设计有 3 个要点:1) 缝隙单元的辐射部分要尽可能远离天线的馈电网络,以减少它们之间不必要的相互作用;2) 不同缝隙单元之间的距离应该远小于工作频率对应的波长,这样远场观测时才可以忽略缝隙单元之间的相位变化;3) 天线在实际制作测试过程中,缝隙单元之间的距离过小会引起互感耦合,从而影响天线的反射系数和方向图.

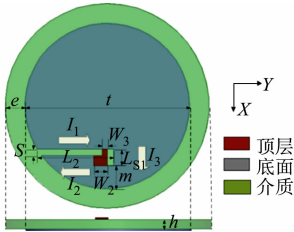


图 1 缝隙单元结构

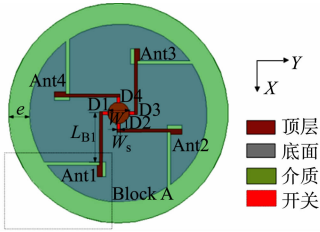


图 2 天线的正面结构

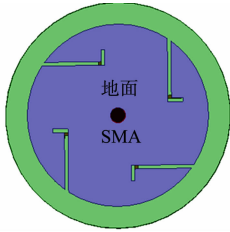


图 3 天线的背面结构

Fig. 1 Structure of slot element Fig. 2 Front structure of antenna Fig. 3 Back structure of antenna

天线结构中有 4 个开关,可以按照文献[12]的 4 个开关顺序组合表示不同的开关模式,例如,模式 1000 表示 D1 处于导通状态,其他开关处于关闭状态;模式 1100 表示 D1 和 D2 处于导通状态,其他开

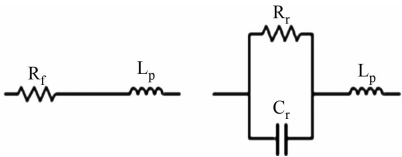
关处于关闭状态,依此类推.通过组合控制这些开关,可以得到 8 个定向和多个几乎全向的天线方向图.

使用高频结构仿真软件(HFSS)设计仿真时,为了获得较为精确的结果,选用 BAR50-02V 型二极管,PIN 二极管等效电路^[13]采用 HFSS 电阻电感电容集成(RLC)边界条件建模,用正向电阻 R_f 与引线电感 L_p 串联模拟 PIN 二极管的导通状态,反向并联电阻 R_r 和二极电容 C_r 并联再与引线电感 L_p 串联模拟 PIN 二极管的截止状态,PIN 二极管的等效电路图,如图 4 所示.具体参数如下:正向电阻为 $3\ \Omega$,反向并联电阻为 $5\ 000\ \Omega$,二极管电容为 $0.15\ \text{pF}$,引线电感为 $0.5\ \text{nH}$.

2 天线参数分析

采用 HFSS^[14]对天线建模仿真,天线介质基板采用环氧树脂玻璃纤维板(FR4).选择底层贴片的直径 $t=50\ \text{mm}$,当 $f=2.45\ \text{GHz}$ 时, $t=0.408\lambda_0$ (λ_0 为波长),则相邻缝隙单元之间的等效间距为 $17.3\ \text{mm}$,远小于 $2.45\ \text{GHz}$ 时的波长.仿真可以得到第 1 缝隙单元和第 2 缝隙单元之间的隔离度最大值为 $-23\ \text{dB}$,第 1 缝隙单元和第 3 缝隙单元之间的隔离度最大值为 $-25\ \text{dB}$,表明缝隙单元之间有较好的隔离度.表 1 为天线的详细参数.表 1 中: ϵ_r , h 分别为环氧树脂玻璃纤维板的相对介电常数和厚度.

因为天线是由 4 个缝隙单元组成的阵列,故只需分析缝隙单元参数对天线性能的影响^[15-16],可知,参数 W_2 , m , L_{s1} , L_s 对天线性能的影响最大.以开关模式 1000 为例,对天线在 $2.45\ \text{GHz}$ 的反射系数和方向图进行仿真分析.



(a) 正向导通 (b) 反向截止

图 4 PIN 二极管的等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of PIN diode

表 1 天线的详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of antenna

参数	数值	参数	数值	参数	数值
ϵ_r	4.4	W_1/mm	6.0	e/mm	6
h/mm	0.8	W_2/mm	1.5	m/mm	7
L_s/mm	16.5	W_s/mm	0.8	t/mm	50
L_{s1}/mm	4.2	L_{B1}/mm	14.2		

保持天线其他结构参数不变,设置参数 W_2 取值为 $1.25\sim1.75\ \text{mm}$,步进为 $0.25\ \text{mm}$,借助 HFSS 参数扫描功能对 W_2 进行仿真分析,不同 W_2 值对应的反射系数 S_{11} 和 xoy 面的方向图,如图 5 所示.由图 5 可知:方向图变化很小, W_2 主要影响反射系数 S_{11} ,随着 W_2 的增大,天线的阻抗匹配变差.

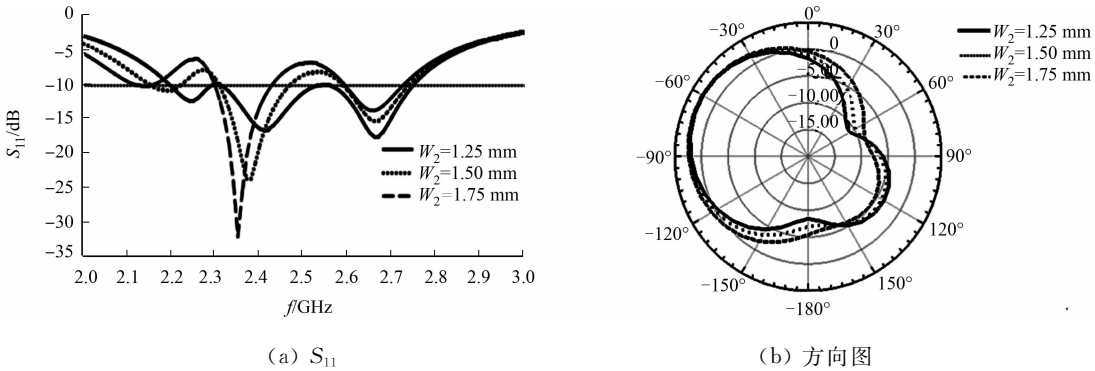


图 5 不同 W_2 值对应的 S_{11} 和方向图

Fig. 5 S_{11} and direction pattern corresponding to different W_2 values

保持天线其他结构参数不变,设置参数 m 取值为 $1.5\sim2.5\ \text{mm}$,步进为 $0.5\ \text{mm}$,借助 HFSS 参数扫描功能对参数 m 进行仿真分析,不同 m 值对应的反射系数 S_{11} 和 xoy 面方向图,如图 6 所示.由图 6 可知:方向图变化很小, m 参数主要影响反射系数 S_{11} ,随着 m 的增大,天线的阻抗匹配能力变好.

保持天线其他结构参数不变,设置参数 L_{s1} 取值为 $4.1\sim4.3\ \text{mm}$,步进为 $0.1\ \text{mm}$,借助 HFSS 参数扫描功能对 L_{s1} 进行仿真分析,不同 L_{s1} 值对应的 S_{11} 和 xoy 面方向图,如图 7 所示.由图 7 可知:方向图变化很小, L_{s1} 参数主要影响反射系数 S_{11} ,随着 L_{s1} 值的增大,工作频点向低频端移动.

保持天线其他结构参数不变,设置参数 L_s 取值为 $15\sim17\ \text{mm}$,步进为 $1\ \text{mm}$,借助 HFSS 参数扫描功能对参数 L_s 进行仿真分析,不同 L_s 值对应的 S_{11} 和 xoy 面方向图,如图 8 所示.由图 8 可知: L_s 参数不仅影响 S_{11} ,还影响方向图的辐射宽度,随着 L_s 值的增大,天线在 $2.40\ \text{GHz}$ 的阻抗匹配能力变差,而

且在方向图最大增益不变的情况下,辐射宽度增大.

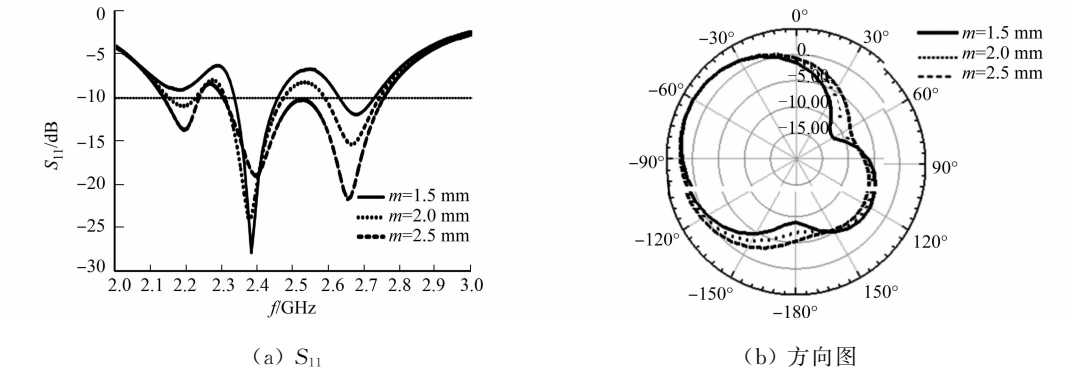


图 6 不同 m 值对应的 S_{11} 和方向图

Fig. 6 S_{11} and direction pattern corresponding to different m values

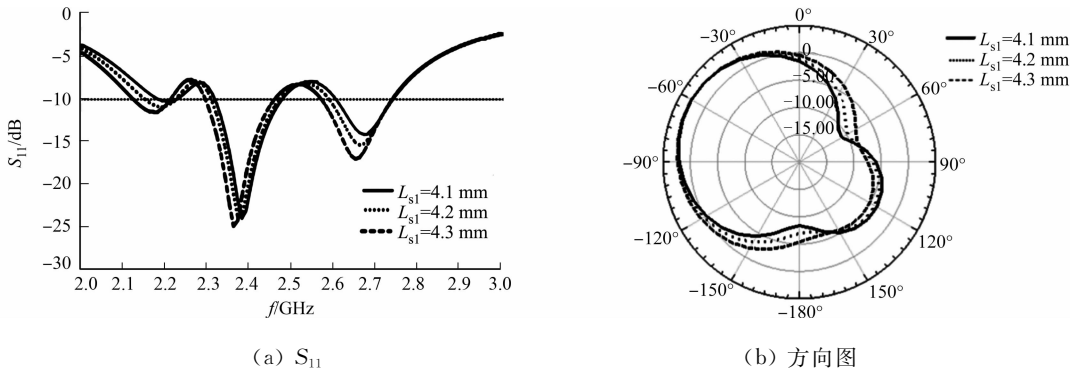


图 7 不同 L_{s1} 值对应的 S_{11} 和方向图

Fig. 7 S_{11} and direction pattern corresponding to different L_{s1} values

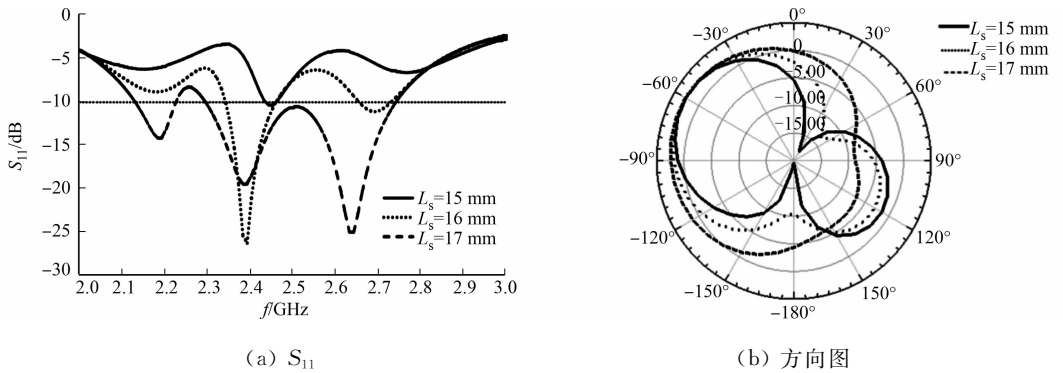


图 8 不同 L_s 值对应的 S_{11} 和方向图

Fig. 8 S_{11} and direction pattern corresponding to different L_s values

3 计算机仿真

采用 HFSS 对表 1 中的参数进行仿真,得到天线在不同模式下的回波损耗和方向图.当 $f = 2.45$ GHz 时,天线模式 1000 下的电流分布,如图 9 所示.图 9 中:天线左下侧 L 型缝隙单元周围的电流顺时针方向运行,因此,缝隙上、下两侧的电流值近似相等且方向相反,符合节 1 天线结构设计中

对图 1 缝隙单元辐射特性的分析. 天线在不同模式下的回波损耗仿真值,如图 10 所示.由图 10 可知:单一开关模式的天线回波损耗由于结构的对称,谐振频点在 2.40 GHz 不发生偏移;多开关模式的天线回波损

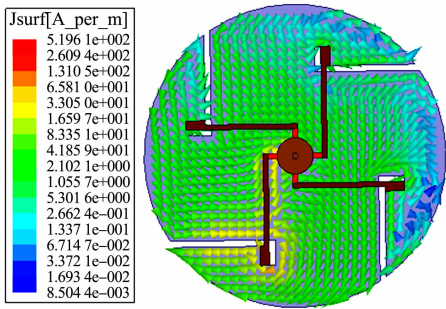


图 9 天线模式 1000 下的电流分布
Fig. 9 Current distribution under antenna mode 1000

耗谐振频点在 2.40~2.50 GHz 之间轻微偏移,但在 2.45~2.50 GHz 的带宽中,天线在不同模式下的回波损耗均小于-10 dB. 另外,天线设计的一些工作模式在 2.20,2.70 GHz 处谐振,这是天线的缝隙单元与馈电网络相互作用的结果,但该影响可以忽略,实际应用中可用带通滤波器抑制不必要的信号.

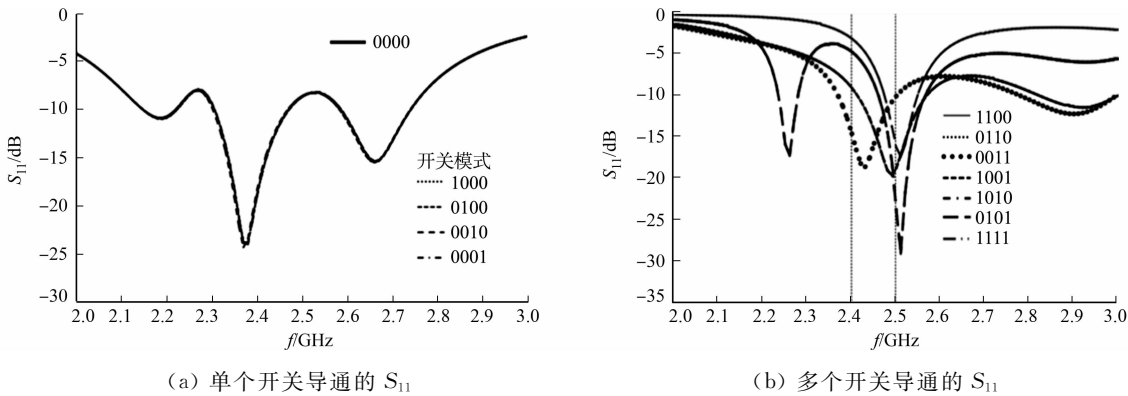


图 10 天线在不同模式下的回波损耗仿真值

Fig. 10 Simulation value of return loss of antenna in different modes

当 $f=2.45$ GHz 时,天线在不同模式下的方向图仿真结果,如图 11 所示. 天线的方向图特性,如表 2 所示. 表 2 中: W_{HPB} 为半功率波束宽度, W_{HPB} 的平均值为 136° . 由表 2 可知:增益方向有规律地变化. 天

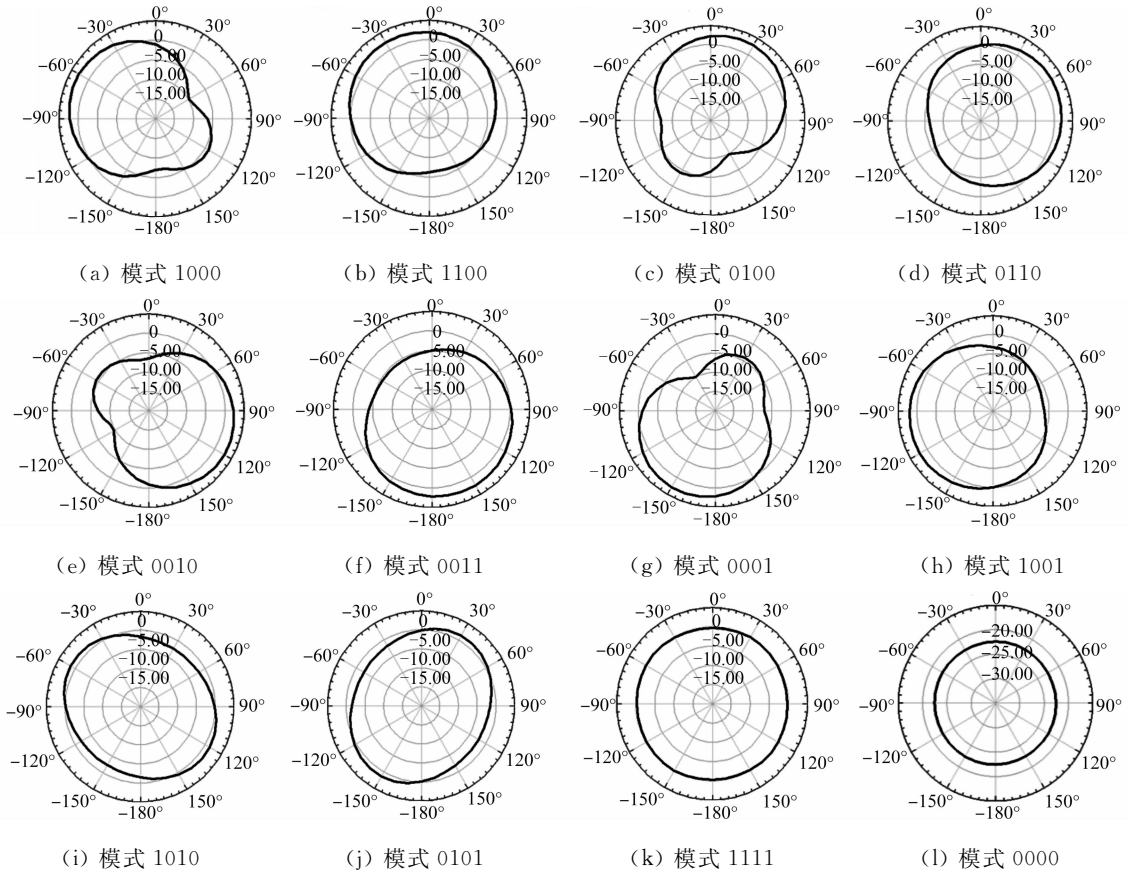


图 11 天线在不同模式下的方向图仿真结果

Fig. 11 Simulation results of antenna pattern in different modes

线 4 个缝隙单元的开口端布置分别朝向 $0^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}, 270^{\circ}$, 当其中一个开关导通时,天线辐射方向将沿 $(3n+1)\pi/6$ 移动, $n=0, 1, 2, 3$; 当两个相邻开关导通时,天线辐射方向沿 $(3n+2)\pi/6$ 移动, $n=0, 1, 2, 3$. 对于对角开关,天线方向图几乎全向,这是因为对角缝隙单元的方向图在平面上几乎是互补的. 表 2 最后一行列出了天线在平面上的最大增益值,两个相邻开关导通的天线最大增益约为 2.29 dBi,比单一开关导通的天线最大增益(2.90 dBi)少 0.61 dBi. 这是因为两个相邻的缝隙单元的电流会相互抵消一部分,没有抵消的部分正常辐射. 因此,该模式下天线的最大增益值减小,辐射宽度增加.

表 2 天线的方向图特性
Tab. 2 Antenna pattern characteristics

参数	开关模式											
	1000	1100	0100	0110	0010	0011	0001	1001	1010	0101	1111	0000
最大增益方向/(°)	300	330	30	60	120	160	210	240	—	—	—	—
$W_{\text{HPB}}/(\text{°})$	118	152	115	153	117	160	115	158	—	—	—	—
最大增益值/dBi	2.88	2.29	2.89	2.27	2.90	2.39	2.90	2.29	1.37	1.37	0.05	-22.44

当天线导通的开关数为 3 时,天线的方向图几乎全向. 天线在其他模式下的回波损耗和方向图仿真,如图 12 所示.

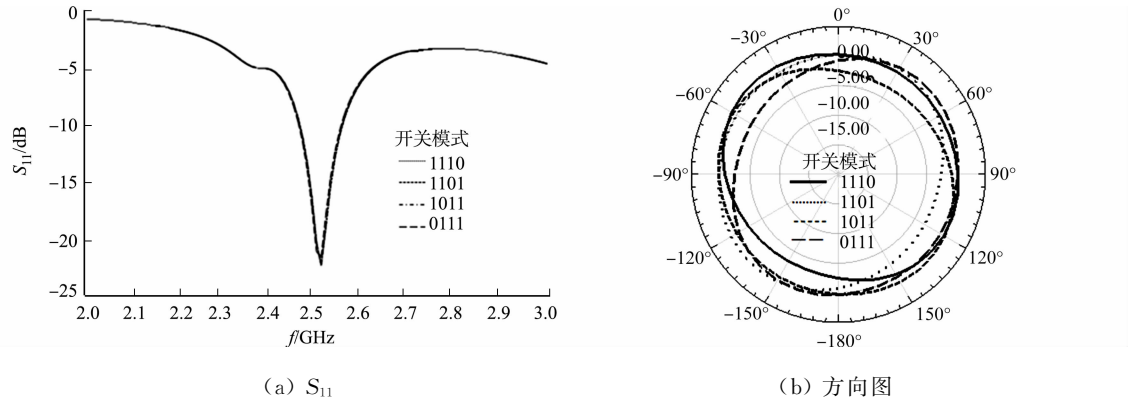


图 12 天线在其他模式下的回波损耗和方向图仿真
Fig. 12 Simulation of return loss and pattern of antenna in other modes

将这些几乎全向的模式与模式 1010,0101 及 1111 的比较,结果如表 3 所示. 由表 3 可知:3 个开关模式在性能方面与对角开关模式差异很小. 因此,从天线的整个系统能量考虑,这些模式在实际应用中都可以忽略.

表 3 天线全向方向图特性比较
Tab. 3 Comparison of characteristics of antenna omnidirectional pattern

参数	开关模式					
	1010	0101	1110	1101	1011	0111
最大增益值/dBi	1.37	1.37	1.18	1.16	1.16	1.13
最小增益值/dBi	-2.29	-2.28	-3.05	-3.04	-3.04	-2.94
差值/dBi	3.66	3.65	4.23	4.20	4.20	4.07

4 结束语

设计一种应用于无线通信系统的方向图可重构天线. 将多个定向辐射的缝隙单元合成一个天线,使用开关组合模式,在同一平面上按照目标方向位置选择不同辐射方向图. 仿真结果表明,所设计的天线在 xoy 平面上有 8 个定向和多个全向方向图,达到全方位面覆盖,该天线的定向最大增益为 2.90 dBi,全向最大增益为 1.38 dBi,半功率波束宽度的平均值为 136° ,且满足无线通信频段 2.40~2.50 GHz. 该天线体积小、制造成本低、平面结构简单且组装简易,可应用于 WLAN 等无线通信系统中,用以降低多径干扰.

参考文献:

[1] 袁子雄,王轶. 一种抗多径衰落接收机的实现方法[J]. 科技视界,2016(13):137-139. DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2016.13.085.

[2] PAL A,MEHTA A,LEWIS R,et al. Reconfigurable phased array antenna enabling a high gain wide angle beam scanning[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver:IEEE Press,2015:2207-2208. DOI:10.1109/APS.2015.7305492.

- [3] GU Chao, IZQUIERDO B S, GAO S, *et al.* Dual-band electronically beam-switched antenna using slot active frequency selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1393-1398. DOI: 10.1109/TAP.2016.2647578.
- [4] LI Jinxin, ZENG Qingsheng, LIU Ruizhi, *et al.* A compact dual-band beam-sweeping antenna based on active frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1542-1549. DOI: 10.1109/TAP.2017.2669719.
- [5] SU Zhen, VASEEM M, YANG Shuai, *et al.* Fully printed VO₂ switch based reconfigurable PIFA/T-shaped monopole antenna[C]//18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electro-magnetics, Waterloo: IEEE Press, 2018: 1-2. DOI: 10.1109/ANTEM.2018.8572855.
- [6] JIN Guiping, LI Miaolan, LIU Dan, *et al.* A simple planar pattern-reconfigurable antenna based on arc dipoles[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1664-1668. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2862624.
- [7] HA A, CHAE M H, KIM K. Beamwidth control of an impulse radiating antenna using a liquid metal reflector[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 571-575. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2894397.
- [8] 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(1): 50-53. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2773076.
- [9] HUANG Guanlong, LIANG Jiajun, ZHAO Luyu, *et al.* Package-in-dielectric liquid patch antenna based on liquid metal alloy[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(11): 2360-2364. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2932048.
- [10] ANDY A, ALIZADEH P, RAJAB K Z, *et al.* An optically-switched frequency reconfigurable antenna for cognitive radio applications[C]//10th European Conference on Antennas and Propagation. Davos: IEEE Press, 2016: 1-4. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481573.
- [11] 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.
- [12] 傅晓建, 石磊, 崔铁军. 太赫兹超材料及其成像应用研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 12-22. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000849.
- [13] 东晋雯, 任晓飞, 何绍林, 等. 一种基于 AFSS 的可重构天线设计[J/OL]. 电波科学学报. [2020-08-26]. DOI: 10.13443/j.cjors.2019123101.
- [14] 李明洋, 刘敏. HFSS 天线设计[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [15] 段增睿. 基于波束切换的方向图可重构天线技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [16] 帅亮, 丰励, 杨辉, 等. 方向图可重构印刷小型天线的设计与实现[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 806-811. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2019.04.016.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)