

文章编号: 2095-4980(2023)07-0921-07

一种小型宽带双极化 5G 基站天线

陈娅莉^a, 刘倩倩^a, 李山东^b, 宗卫华^{*b}

(青岛大学 a.电子信息学院; b.物理科学学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 设计了一种适用于 2G/3G/4G/5G 移动通信的小型宽带 $\pm 45^\circ$ 双极化基站天线。该天线由 2 对偶极子辐射片、2 条微带馈线和 1 块反射板组成, 辐射臂和微带馈线采用双面印刷工艺印刷在 0.8 mm 厚的 FR4 板, 并固定放置于开有圆形槽的反射板上。对天线实物进行加工测试, 测试结果表明, 端口 1 工作频段为 1.82~3.60 GHz, 端口 2 工作频段为 1.64~3.41 GHz; 工作频段内, 反射系数小于 -10 dB, 端口隔离度优于 18 dB; 交叉极化比在视轴方向大于 17 dB, $\pm 60^\circ$ 方向大于 15 dB; 半功率波束 65° 左右, 前后比优于 18 dB, 测试和仿真结果较吻合。所设计天线带宽宽, 尺寸小, 且制作工艺简单, 成本低廉, 适合批量生产, 应用于 5G 移动通信基站中。

关键词: 基站天线; 5G 天线; 双极化天线; 宽带天线; 小型天线

中图分类号: TN828.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021074

A miniaturized broadband dual-polarized antenna for 5G base station

CHEN Yali^a, LIU Qianqian^a, LI Shandong^b, ZONG Weihua^{*b}

(a.School of Electronic and Information; b.School of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China)

Abstract: A $\pm 45^\circ$ dual-polarized base station antenna with a small size and a broad bandwidth for 2G/3G/4G/5G mobile communication is proposed in this paper. The proposed antenna comprises two pairs of dipole radiation patches, two microstrip feedlines and a reflector. The radiation patches and microstrip feedlines are printed on a FR4 substrate with a thickness of 0.8 mm, using a process called double-sided printed circuit board. The reflector is grooved a circular slot and the antenna is fixed above it. The prototype of the proposed antenna is fabricated and measured. The results show that it has a bandwidth of 1.82~3.60 GHz(port1) and 1.64~3.41 GHz(port2) respectively, during which, the reflection coefficient is less than -10 dB, the port isolation is better than 18 dB, the cross polarization discrimination is better than 17 dB in the boresight direction, and better than 15 dB in $\pm 60^\circ$ directions, the half power beam width is approximately 65° and the front-to-rear ratio is better than 18 dB. With the advantages of wide bandwidth, small size, simple manufacturing process and low cost, the proposed antenna is suitable for mass production and is an excellent candidate for applications in 5G mobile communication base station.

Keywords: base station antenna; 5G antenna; dual-polarized antenna; broadband antenna; miniaturized antenna

5G New Ratio 是基于正交频分复用技术, 拥有全新空口的全球性 5G 标准, 可分为 sub-6 GHz 低频频段(0.45~6 GHz)和高频毫米波频段(24.25~52.6 GHz)。目前, 低频频段是 5G 移动通信的主流应用频段。不同国家的 5G 部署频段有所不同, 国内的先锋频段分别是 3.3~3.4 GHz(仅室内使用)、3.4~3.6 GHz 及 4.8~5.0 GHz^[1]。本文 5G 目标覆盖频段为 3.3~3.6 GHz。

目前网络建设对 5G 基站天线提出小型化、宽频带的要求, 对此, 国内外学者做了诸多研究。天线小型化方面, 可通过加载寄生单元^[2]或弯曲天线辐射结构^[3]减小天线的横面尺寸, 亦可通过引入电容耦合贴片、短路引脚^[4]或加载周期结构^[5]降低天线的剖面高度; 天线带宽方面, 文献[6-7]针对 n78 频段设计出了覆盖 3.3~3.8 GHz 的

收稿日期: 2021-02-23; 修回日期: 2021-06-08

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MF023)

*通信作者: 宗卫华 email:weihuazong@126.com

双极化偶极子天线；文献[8-9]设计出同时覆盖 3.3~3.8 GHz 和 4.8~5 GHz 的双极化偶极子天线；文献[10-11]设计出覆盖 5G 3 个常用频段同时覆盖了 3G/4G 常用频段的双极化磁电偶极子天线；文献[12]则通过不断增加金属寄生枝节，设计出完全覆盖 2G/3G/4G/5G 频段的单极化金属片天线。文献[6-9]覆盖带宽较窄，文献[10-12]虽拓宽了带宽，但天线单元结构较为复杂。

本文针对 5G 基站天线要求，设计出一款尺寸小，带宽宽的双极化双偶极子天线，并将制作成本纳入考虑范围。本文所设计天线可覆盖 5G 频段的 3.3~3.6 GHz，同时覆盖了 2G/3G/4G 常用频段 1.71~2.69 GHz。仿真结果表明，该天线两端口连续工作频段为 1.71~3.62 GHz。对天线实物进行了加工与测试，工作带宽稍有偏差，加工天线端口 1 工作频段为 1.82~3.60 GHz，端口 2 工作频段为 1.64~3.41 GHz，电路特性、辐射特性良好。

1 天线结构设计

天线结构如图 1 所示，该天线可分为辐射板和反射板 2 部分。辐射板为 FR4 板，其相对介电常数为 4.4，相对损耗正切值为 0.02，厚度为 0.8 mm；印刷有 2 对偶极子贴片和 2 条矩形微带线，偶极子贴片和微带线垂直放置，用于实现±45°双极化。偶极子贴片采用双面印刷，上下两面辐射贴片结构相似，均由 4 个六边形构成，每个大六边形内部开有小六边形缝隙结构，并沿小六边形缝隙一边延伸，有矩形长条贴片。不同的是，上层辐射片沿大六边形其中一边开有圆弧缝隙结构，是为避免微带线连接馈电口一端与其接触。矩形微带线一端连接馈电端口，另一端连接偶极子贴片，印刷在介质基板上方。为避免交叉，其中一条微带线部分印刷在介质基板下方，同样通过金属化通孔与其上方微带线部分连接。微带线连接馈电端口的一头开有直径

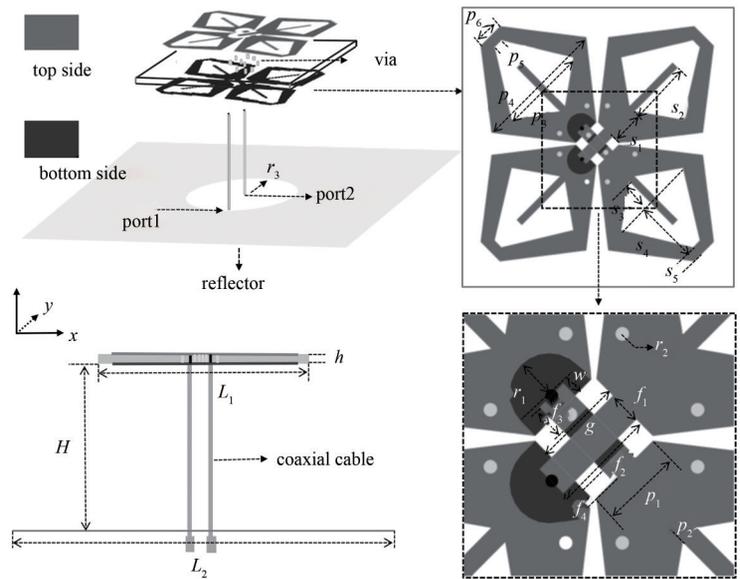


Fig.1 Configuration of the proposed antenna
图1 天线结构图

1 mm 的通孔，两端口通过同轴线馈电，同轴线内导体穿过通孔焊接在微带线处，外导体焊接在下方的六边形偶极子贴片上。反射板开有圆形槽，为方便制作，采用了质地较软、厚度同样为 0.8 mm 的 FR4 单面覆铜板，覆铜厚度 18 μm。辐射板和反射板在相同位置分别开有 4 个通孔，用以穿过双头尼龙支柱，再用配套螺母将辐射板固定在反射板上。传统偶极子天线设计中，偶极子一臂印刷在基板上方，另外一臂则印刷在基板下方。为拓宽工作带宽，本文天线采用了偶极子两臂均双面印刷的方式，利用金属化通孔进行短路连接。利用电磁仿真软件 HFSS(High Frequency Structure Simulator)15.0 对天线模型进行仿真优化，优化后的天线尺寸见表 1。

表 1 天线尺寸参数(单位:mm)

Table1 Dimensions of the proposed antenna(unit:mm)

parameter	L_1	L_2	H	h	g	w	f_1	f_2	f_3	f_4	p_1	p_2
value	55	100	28	0.8	6.5	1.5	2.5	7.75	2.5	1.25	6	1
parameter	p_3	p_4	p_5	p_6	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	r_1	r_2	r_3
value	18	27.7	2	5.7	6.75	12.8	6	13	1.2	3	0.5	16

2 天线分析

2.1 辐射臂分析

双偶极子天线具有带宽宽，方向图稳定等优势。为达到目标覆盖带宽，本文设计了一个六边形双偶极子天线，图 2 为该天线的设计过程。天线 I 为传统双偶极子天线结构，即偶极子一臂印刷在介质基板上层，另外一臂则印刷在介质基板下层；本文所设计天线受文献[13]启发，将偶极子单面印刷改为双面印刷，为避免微带线连接馈电口一端与上层辐射片接触，沿大六边形一边开有圆弧缝隙结构，利用 8 个金属化通孔将对应面短路连接，见天线 II。从图 3 可以看出，天线 II 相对于天线 I，反射系数明显降低，尤其在 3.0 GHz 附近，但其工作频带带宽

尚不能覆盖 3.3~3.6 GHz，需进一步拓宽工作带宽。在辐射臂内部引入小六边形缝隙结构可引入新的谐振点，构成天线 III(图 2(c))。由图 3 可见，新引入谐振频率较高(3.79 GHz)，且其反射系数为-6.9 dB。通过在内部开槽处增加矩形贴片并优化其尺寸，新引入谐振点频率有所降低，最终演变成本文所设计天线(图 2(d))。由优化过程可知，矩形贴片长度 p_2 对新引入谐振点影响较大，而宽度对其几乎无影响，图 4 为 p_2 对阻抗带宽的影响。为了使新引入谐振点在适当位置，最终选定 p_2 为 12.8 mm，宽度则因为结构的简洁性，选择了与内部六边形缝隙结构其中一边重合，为 1.5 mm。

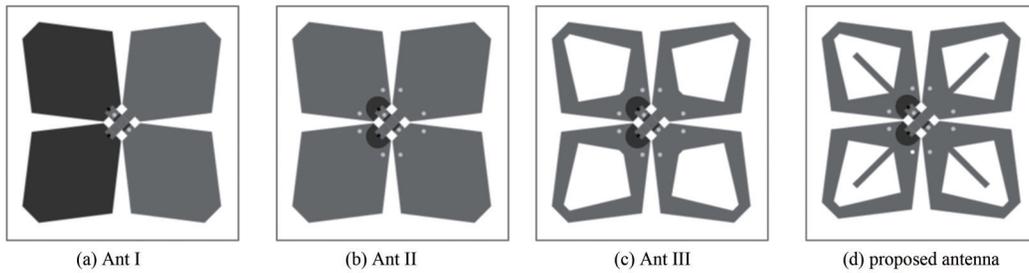


Fig.2 Evolution of the proposed antenna
图2 天线设计过程

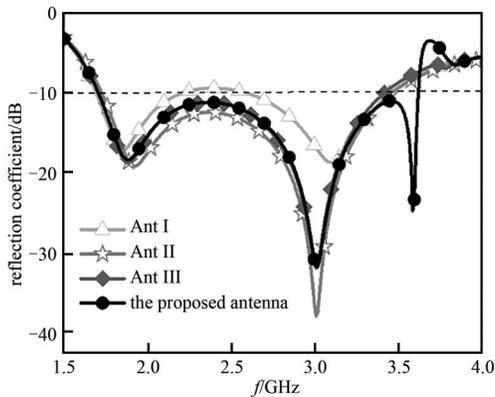


Fig.3 Reflection coefficient in cases of four antennas
图3 四种天线模型反射系数仿真曲线

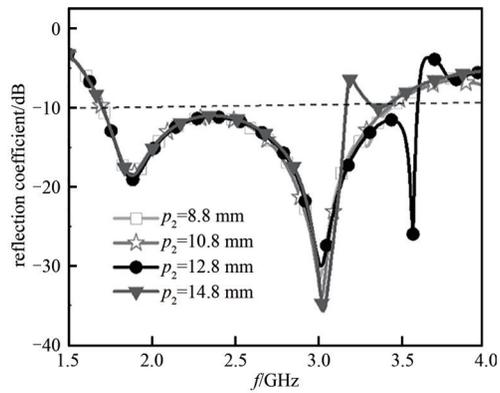


Fig.4 Effect of p_2 on impedance bandwidth
图4 矩形贴片长 p_2 对阻抗带宽影响

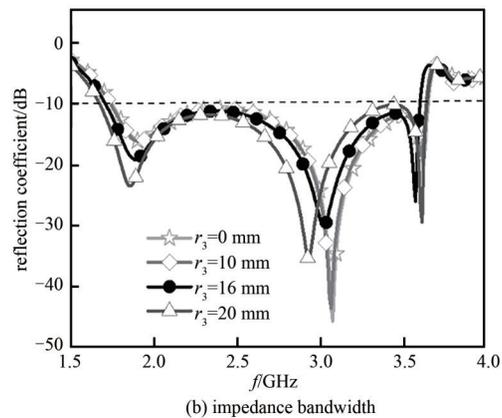
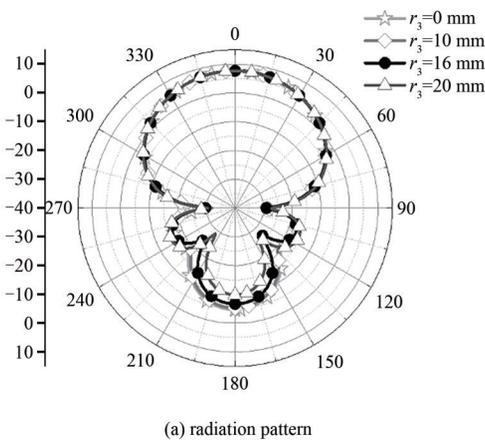


Fig.5 Effects of r_3 on the proposed antenna
图5 圆形槽半径 r_3 对天线影响

2.2 反射板分析

相对于常规反射板，本文天线使用的反射板蚀刻有圆形槽，图 5(a)为圆形槽半径 r_3 在 1.8 GHz 时对天线辐射方向图的影响，图 5(b)为其对天线阻抗带宽的影响。从图 5(a)可以看出，随着半径的增大，天线前后比有所提高，但改善天线前后比的同时会增大半功率波束宽度。由于现蜂窝组网通常为 3 扇区，每个扇区为 120° ，为避

免对相邻扇区的影响, 天线半功率波束理想值为 $65^\circ \pm 5^\circ$ 。开槽半径过大, 半功率波束宽度会超过理想值。权衡这 2 个辐射参数后, 开槽半径最终选择为 16 mm。从图 5(b)可以看出, 随着圆形槽半径增大, 3 个谐振点均不同程度向低频移动, 有利于拓宽低频处的工作带宽, 也可作为天线小型化的一种手段。

2.3 电流分布及工作原理

为了研究双极化天线的辐射机制, 利用 HFSS 15.0 仿真 2 个正交偶极子在 1.8 GHz、2.4 GHz、3.59 GHz 3 个频点处的电流分布, 如图 6 所示。黑色虚线箭头为偶极子总电流矢量合成方向, 所给电流分布图相位均为 0° , 其他相位电流分布相似。当激励端口 1 时, 总电流矢量合成方向为 $+45^\circ$, 此时主极化方向为 $+45^\circ$ 方向, -45° 方向六边环状偶极子电流矢量方向或呈环状, 远场辐射相互抵消; 或合成矢量沿主极化方向, 其作用可等效于谐振器, 有利于拓宽工作带宽。同理, 激励端口 2 时, 主极化方向为 -45° 方向。从图 6 可以看出: a) 1.8 GHz 时, 电流主要分布在辐射臂的整个六边形环上, 2 对偶极子耦合缝隙处最为集中, 而矩形条对其辐射性能无影响; b) 2.4 GHz 时, 电流集中在六边形环的前半部分及矩形条上, 耦合缝隙处电流强度大; c) 3.59 GHz 为矩形条引入的高频谐振频率, 电流分布在辐射臂上。与低频相比, 分布在矩形条和大六边形贴片内部开槽边缘上的电流强度明显增大, 而耦合缝隙处强度有所降低。由此可知, 在六边形贴片内部开槽并引入矩形条是激励高频谐振的关键所在。另外, 辐射贴片采用开槽六边形的紧凑结构, 能够引导电流围绕六边形边界分布, 在相同面积下, 此六边形结构可保持较长边界长度, 获得较长电流分布路径, 从而降低谐振频率, 实现天线的小型化。

3 天线测试

天线实物如图 7 所示, 图 8 为反射系数和隔离度仿真与实物测试对比图。仿真结果表明, 天线两端口在 1.71~3.62 GHz 频率范围内仿真所得反射系数小于 -10 dB, 端口隔离度在 2G/3G/4G 的常用频段大于 20 dB, 在 5G 常用频段大于 15 dB。从测试结果可得, 天线端口 1 的工作频段为 1.82~3.60 GHz, 其中, 2.27~2.60 GHz 和 2.95~3.21 GHz 反射系数略大于 -10 dB, 但分别小于 -9 dB 和 -8 dB; 端口 2 的工作频段为 1.64~3.41 GHz, 反射系数小于 -10 dB。与仿真结果对比, 测试所得工作带宽偏窄, 且谐振频率偏低(天线在制作过程中的尺寸误差、焊接同轴线时焊锡影响及同轴线自身损耗造成), 端口隔离度测试曲线与仿真结果基本吻合。由于天线结构具有对称性, 图 9、图 10 仅列出端口 1 的辐射特性, 端口 2 与之相似。图 9 为天线效率、增益仿真与测试曲线的对比, 可以看出, 天线仿真辐射效率大于 69%, 增益为 5.47~8.05 dBi; 实物测试辐射效率大于 62%, 增益为 5.42~6.99 dBi。图 10 为天线仿真和测试的方向图对比, 可以看出, 工作带宽内天线辐射性能较为稳定, 仿真所得交叉极化比在视轴方向大于 19 dB, $\pm 60^\circ$ 方向大于 17 dB,

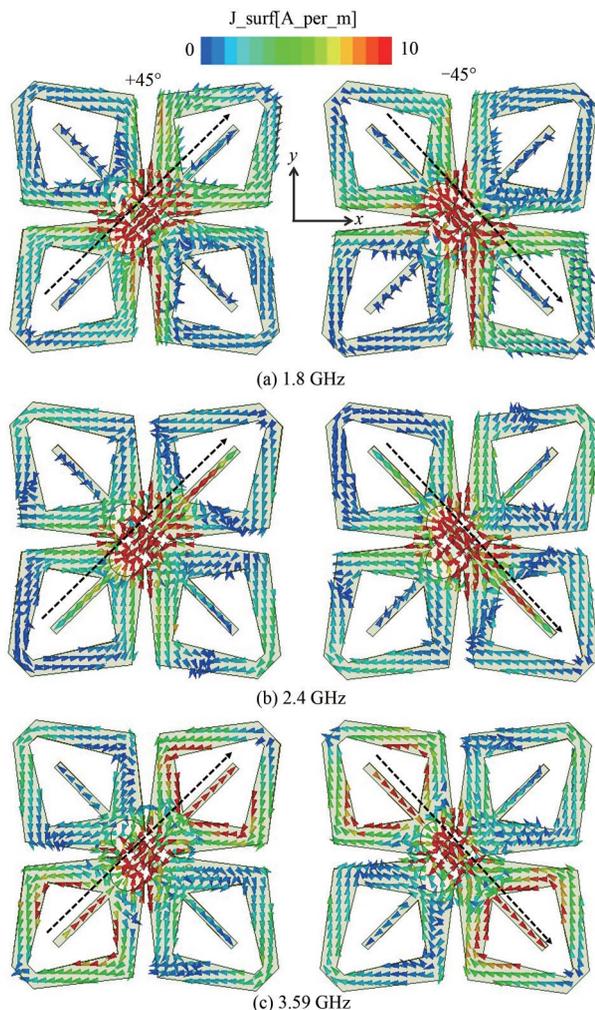


Fig.6 Electric current distributions of the proposed antenna
图 6 天线电流分布图

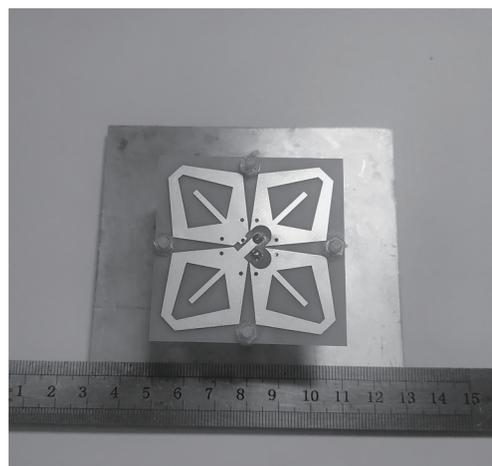


Fig.7 Photograph of the antenna
图 7 天线实物照片

半功率波束 67° 左右，前后比优于 14 dB；测试所得交叉极化比在视轴方向大于 17 dB， $\pm 60^\circ$ 方向大于 15 dB，半功率波束 65° 左右，前后比优于 18 dB。

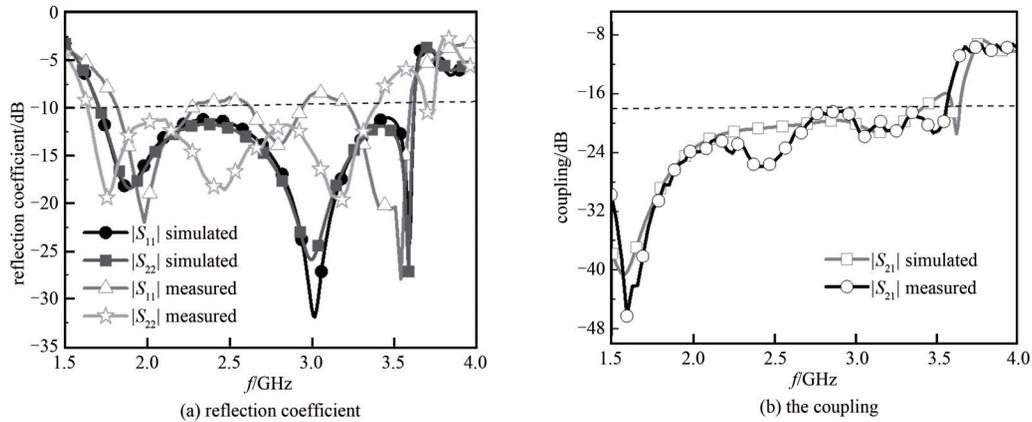


Fig.8 Simulated and measured S-parameters
图 8 仿真与测试 S 参数

表 2 为本天线与其他具有相似工作带宽的 5G 基站天线关键性能的对比。为便于比较尺寸，对辐射板和反射板的总体尺寸进行了归一化， λ 为最低工作频点的自由波长。从表中可以看出，本天线在尺寸方面具有明显优势。文献 [6]、文献 [15]、文献 [17] 中天线为差分馈电，尽管差分馈电可在一定程度上提升天线的电路特性、辐射特性，但同时会增加结构的复杂性，且差分馈电在商用基站天线中并不常见。文献 [14] 使用 TLT-8 板，文献 [15]、文献 [17] 使用罗杰斯板，它们的相对介电常数均比常见的 FR4 板低。通常低的介电常数对场的束缚更弱，印刷在其上的天线工作带宽相对更宽，但此种基板价格更贵，则生产成本更高。综上所述，本文所设计天线尺寸较小，频带较宽，且结构简单，成本低廉，辐射性能基本符合 5G 移动通信要求。

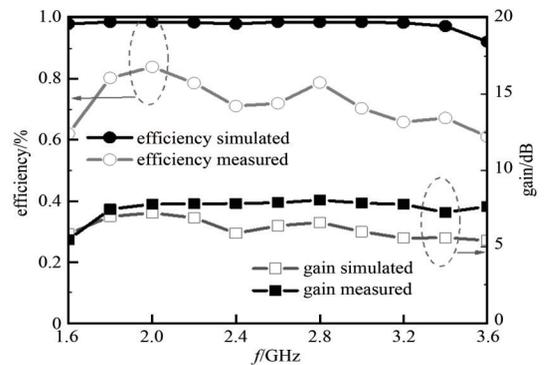


Fig.9 Gain and the efficiency
图 9 天线增益和工作效率

表 2 天线性能对比

Table 2 Comparison of the proposed antenna and references

Ref.	S_{11} /dB	BW/GHz	gain/dBi	element size(λ^3)
[6]	-15	1.84~3.60	6.0	0.83×0.83×0.23
[14]	-10	1.70~2.75	6.0±1.1	0.71×0.70×0.16
[15]	-14	1.71~2.69	8.1±0.4	0.80×0.80×0.26
[16]	-15	1.74~3.79	10.5	0.75×0.75×0.21
[17]	-10	1.76~3.78	7.5	0.83×0.83×0.21
[18]	-10	1.70~2.70	7.5±0.3	
		3.28~3.80	9.1±1.2	0.79×0.79×0.21
		4.75~5.18	9.1±1.2	
this work	-10	1.82~3.41	6.2±0.7	0.57×0.57×0.17

4 结论

本文基于基站天线小型化、宽带化的需求，设计了一款适用于 2G/3G/4G/5G 移动通信的双极化天线。该天线两端口仿真带宽为 1.71~3.62 GHz，可完全覆盖 2G/3G/4G 常用频段 1.71~2.69 GHz 和现 5G 常用频段 3.3~3.6 GHz；测试带宽稍窄，两端口分别工作在 1.82~3.60 GHz 和 1.64~3.41 GHz。工作频带内，端口隔离度优于 18 dB，平均增益 6.22 dBi，交叉极化比大于 17 dB，半功率波束 65° 左右，前后比优于 18 dB。本天线尺寸较小且结构简单，成本低廉，易于批量制作，符合现移动通信基站天线的市场需求。为了使本天线有更好的应用前景，下一步工

作是进一步降低其反射系数, 提高端口隔离度, 并考虑改进该天线, 使之覆盖 sub-6 GHz 高频部分。

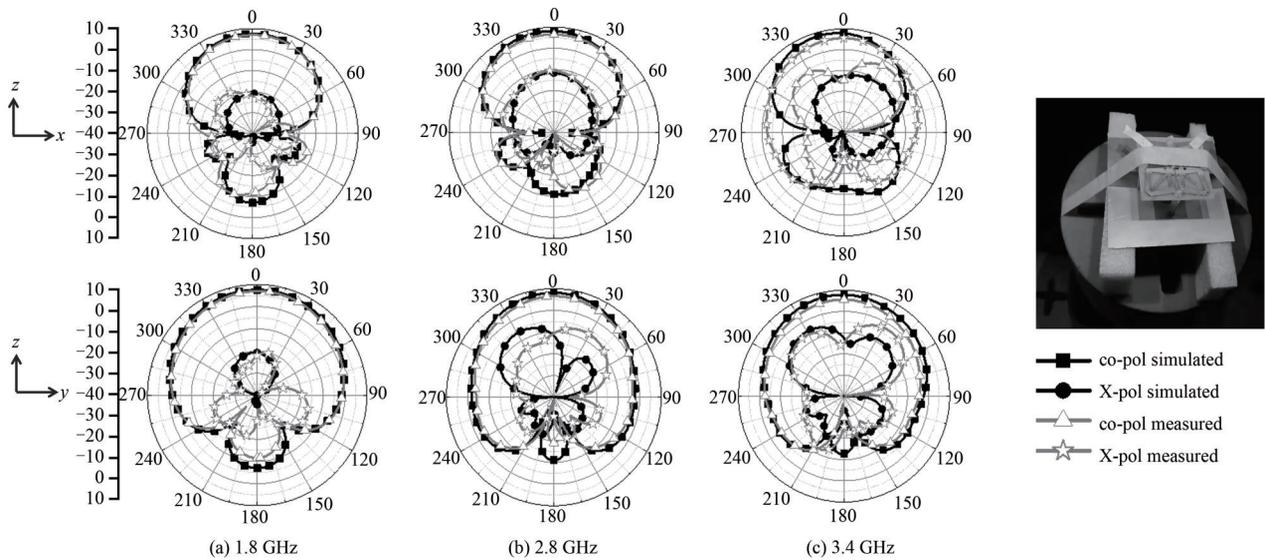


Fig.10 Simulated and measured radiation patterns of port1
图 10 端口 1 测试与仿真辐射方向图

参考文献:

- [1] WU Qi,LIANG Peiyu,CHEN Xiaoming. A broadband $\pm 45^\circ$ dual-polarized multiple-input multiple-output antenna for 5G base stations with extra decoupling elements[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2018, 3(1): 31-37. doi: 10.1007/s41650-018-0002-9.
- [2] LIU Ying,YI Hao,WANG Fuwei,et al. A novel miniaturized broadband dual-polarized dipole antenna for base station[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013,12(4):1335-1338. doi:10.1109/LAWP.2013.2285373.
- [3] CHEN Junjiang,LI Lan,CHEN Hua,et al. Design of miniaturized D-band dual-polarized dipole base station antenna based on coupling feeding[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020,30(4):e22107.1-11. doi: 10.1002/mmce.22107.
- [4] WEN Sichao,DONG Yuandan. A low-profile wideband antenna with monopole-like radiation characteristics for 4G/5G indoor micro base station application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2305-2309. doi: 10.1109/LAWP.2020.3030968.
- [5] LIU Qingchong,LIU Hui,HE Sailing. A dual-band dual-polarized antenna with AMC reflector for 5G base stations[C]// 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall. Xiamen, China: IEEE, 2019: 2305-2308. doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021300.
- [6] LUO Ning,HE Yejun,ZHANG Long,et al. A differential broadband dual-polarized base station antenna element for 4G and 5G applications[C]// 2019 Computing, Communications and IoT Applications. Shenzhen, China: IEEE, 2019:337-340. doi:10.1109/ComComAp46287.2019.9018766.
- [7] LI Mengting,CHEN Xiaoming,ZHANG Anxue,et al. Dual-polarized broadband base station antenna backed with dielectric cavity for 5G communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 2051-2055. doi: 10.1109/LAWP.2019.2937201.
- [8] HUA Qiang,HUANG Yi,ALIELDIN A,et al. A dual-band dual-polarized base station antenna using a novel feeding structure for 5G communications[J]. IEEE Access, 2020(8):63710-63717. doi:10.1109/ACCESS.2020.2984199.
- [9] TANG Hua,ZONG Xianzheng,NIE Zaiping. Broadband dual-polarized base station antenna for fifth-generation(5G) applications[J]. Sensors, 2018,18(8):2701-2710. doi:10.3390/s18082701.
- [10] 祝聪聪,王斌,廖晨阳,等. 面向 5G 微基站的双频双极化电磁偶极子天线设计[J]. 电波科学学报, 2020,35(5):769-775. (ZHU Congcong, WANG Bin, LIAO Chenyang, et al. Design of dual-band dual-polarized magneto-electric dipole antenna for 5G microcell base station[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020,35(5):769-775.) doi:10.13443/j.cjors.2019061901.

- [11] 何彬,陈星. 新型超宽带双极化电磁偶极子天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):1023–1026. (HE Bin,CHEN Xing. A novel ultra-wideband dual-polarized magneto-electric dipole antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):1023–1026.) doi:10.11805/TKYDA201906.1023.
- [12] HUA Qiang,HUANG Yi,SONG Chaoyun,et al. A novel compact quadruple-band indoor base station antenna for 2G/3G/4G/5G systems[J]. IEEE Access, 2019(7):151350–151358. doi:10.1109/ACCESS.2019.2947778.
- [13] TA S X,NGUYEN D M,NGUYEN K K,et al. A tri-polarized antenna with ultrawide operational bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(6):4386–4396. doi:10.1109/TAP.2020.2972626.
- [14] FENG Botao,CHUNG K L,LAI Jiexin,et al. A conformal magneto-electric dipole antenna with wide H-plane and band-notch radiation characteristics for Sub-6 GHz 5G base-station[J]. IEEE Access, 2019(7):17469–17479. doi:10.1109/ACCESS.2019.2896356.
- [15] FU Suidao,CAO Zhenxin,QUAN Xin,et al. A broadband dual-polarized notched-band antenna for 2/3/4/5G base station[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020,19(1):69–73. doi:10.1109/LAWP.2019.2953294.
- [16] TA S X,NGUYEN D M,NGUYEN K K,et al. Wideband differentially-fed dual-polarized antenna for existing and sub-6 GHz 5G communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020,19(12):2033–2037. doi:10.1109/LAWP.2020.3020858.
- [17] 罗秋强,陈昌明,夏佳明,等. 一种适用于 LTE 和 Sub-6 GHz 频段的宽带双极化基站天线[J]. 电子器件, 2020,43(2):327–331. (LUO Qiuqiang,CHEN Changming,XIA Jiaming,et al. A wideband dual-polarization base station antenna for LET and sub-6 GHz bands applications[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020,43(2):327–331.) doi:CNKI:SUN:DZQJ.0.2020-02-016.
- [18] ZHOU Gaonan,SUN Baohua,LIANG Qiuyan,et al. Triband dual-polarized shared-aperture antenna for 2G/3G/4G/5G base station applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(1):97–108. doi:10.1109/TAP.2020.3016406.

作者简介：

陈娅莉(1997-), 女, 硕士, 主要研究方向为天线设计 .email:chan_yali@163.com.

刘倩倩(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为天线设计.

李山东(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为磁性材料、微波材料与器件.

宗卫华(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为天线设计.

(上接第 920 页)

- [6] 王顶,刘智朋,赵颀轩. 基带成形滤波器的数字设计与实现[J]. 电子设计工程, 2012,20(13):95–97. (WANG Ding,LIU Zhipeng,ZHAO Yixuan. Digital design and realization of the baseband shaping filter[J]. Electronic Design Engineering, 2012,20(13):95–97.)

作者简介：

廖治宇(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字调制软硬件设计 .email:lzyhunger@126.com.

王 鹏(1983-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为数字信号处理、硬件电路设计.