

基于多模融合的宽带5G基站天线设计

刘建乐,张冰*

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

摘要:针对5G移动通信多频段的需求,本文设计了一款适用于5G基站应用的宽带双极化基站天线单元。该基站天线单元由两对加载了箭头形枝节的环形偶极子、两条Y形微带馈线与同轴馈线构成。利用多模融合的原理,通过加载箭头形枝节与偶极子臂形成强耦合,激励起高频谐振模式,进一步实现天线的宽带化。对天线实物进行加工测试,天线在3.4 GHz~5.1 GHz的工作频段内,端口反射系数 <-10 dB,端口隔离度优于21 dB,带内增益 (8.6 ± 0.8) dBi,实测半功率波束宽度为 $(67^\circ\pm 3^\circ)$,交叉极化鉴别率高于22 dB,测试结果与仿真吻合良好。所设计的宽带双极化基站天线覆盖3.4 GHz~3.8 GHz、4.4 GHz~5 GHz的双5G通信频段,有助于解决站址资源紧张的基站部署难题。

关键词:基站天线;高频谐振模式;宽带天线

中图分类号:TM931

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)05-1054-08

Design of 5G Broadband Base Station Antenna Based on Multimode Fusion

LIU Jianle, ZHANG Bing*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the multi-band requirements of fifth-generation (5G) mobile communications, this paper designs a broadband dual-polarized base station antenna suitable for 5G base station applications. The base station antenna consists of two pairs of loop dipoles loaded with arrow-shaped branches, two Y-shaped microstrip feedlines and coaxial feedlines. Using the principle of multimode fusion, the broadband performance of the antenna is achieved by loading arrow-shaped branches, which generate a strong coupling with the dipole arm and excites a high-frequency resonant mode. The antenna is fabricated and tested, and the measured results show that the antenna has a port reflection coefficient is less than -10 dB, the port isolation is better than 21 dB, the in-band gain is (8.6 ± 0.8) dBi, the half-power beamwidth is $67^\circ \pm 3^\circ$, and the cross-polarization discrimination is higher than 22 dB in the operating band of 3.4 GHz-5.1 GHz. The designed broadband dual-polarized base station antenna covers the dual 5G communication bands of 3.4 GHz-3.8 GHz and 4.4 GHz-5GHz, which can contribute to solve the deployment problem of base stations with tight site resources.

Key words: base station antenna; high-frequency resonant mode; broadband antenna

0 引言

随着5G通信技术的快速发展,多频段通信的需求不断增加,工业界需要支持数据传输速

率更高和频谱覆盖更广的通信系统^[1],而传统的单频窄带天线往往无法满足这些需求,宽带天线的设计成为一大研究热点。

在5G时代,不同频段的的天线被用于不同的

收稿日期:2023-08-05;接受日期:2023-08-15

基金项目:毫米波国家重点实验室开放课题(K202322)

作者简介:刘建乐(2002-),男,福建福州人,主要研究方向为天线设计、共口径天线去耦研究。E-mail:1366575208@qq.com

* 通信作者:张冰(ZHANG Bing),E-mail:bing.zhang@scu.edu.cn

引文格式:刘建乐,张冰.基于多模融合的宽带5G基站天线设计[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(5):1054-1061. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023121

通信服务,多个频带的共存、站址资源的紧张成为基站部署的挑战^[2-8]。在多频带共口径的基站场景下,为了尽可能减少基站中天线的数目,要求一个天线能够支持多个通信频段,即要求天线单元能够实现多频段通信的集成。

一种方案是在设计多频段天线,传统的多频段天线设计依赖于对谐振路径的精细设计^[9]、高低频天线嵌套放置^[10]等。但该方案不适用于小频比的场景,如5G通信频段3.4 GHz~3.8 GHz、4.4 GHz~4.8GHz,二者的频比仅1.27,其谐振路径长度相近,彼此之间的跨波段耦合将对天线的匹配与辐射性能产生严重恶化,制约了其在基站中的进一步应用。

另一种支持多频段天线的方案是宽带基站天线设计。但传统的宽带行波天线,如对数周期天线、等角螺旋天线,由于体积庞大,在采用多天线技术的基站中不易部署。Liu等^[10]利用磁电偶极子作为天线阵元,但由于其复杂的制造流程与较高的成本使其不适合在未来大规模基站天线中进行应用。Yang等^[11]和Lian等^[12]使用堆叠贴片天线的方式来展宽阻抗匹配带宽。Cui等^[13]和Bao等^[14]将两对环偶极子交叉放置,通过调整耦合臂之间的间距及切角长度,可实现天线的宽带化性能。Wu等^[15]和Yang等^[16]利用在天线上方加载寄生贴片将天线的阻抗带宽展宽。Huang等^[17]、Hua等^[18]和Li等^[19]提出了新型的馈电方式来优化天线的阻抗匹配性能。多模融合是一种通过激励起天线的多个模式并使之融合的宽带天线设计方案^[20-22]。Zeng等^[20]通过堆叠贴片与U形槽的方式激励起五个模式,利用特征模分析法对各个模式进行精细调控,实现了五个模式的融合,获得了74%的宽带阻抗匹配与3 dB增益带宽。Liu等^[21]将超表面的三个模式与馈电槽引入的模式进行融合,获得了79%的阻抗匹配带宽与77%的3 dB增益带宽。Hu等^[22]通过引入短路销钉与寄生贴片激励并控制三个模式的融合,实现了96%的宽带阻抗匹配特性与86%的3 dB轴比带宽。

本文基于多模融合的天线宽带化原理,通过对偶极子单元的电流特性进行调控,在不增加天线辐射口径的情况下,可以在相对较小的

天线辐射体上实现对双5G通信频段(3.4 GHz~3.8 GHz、4.4 GHz~5GHz)的覆盖,大大提高了基站的空间利用率,有利于缓解基站站址资源紧张的问题。

1 基本原理

基于多模融合的天线设计宽带化原理如图1所示。当一个天线辐射体能够激励起多个谐振模式(如图1(a)中的模式1、模式2、模式3),通过合理设计天线的结构和参数,可以使得这些谐振模式的工作频率彼此靠近,彼此的工作频带相互重叠,实现多模融合的效果,如图1(b)所示。这意味着天线在较宽的频带范围内都能够实现高效的信号传输和接收,以满足不同频段的通信需求,即实现宽带化设计。

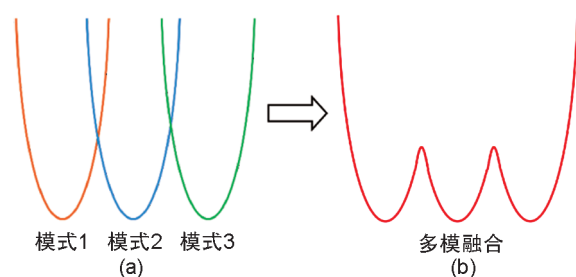


图1 基于多模融合的天线设计宽带化原理示意图
(a)天线激励起的多个模式;(b)多模融合

Fig. 1 Illustration of the mechanism of broadband antenna design based on multimode fusion

(a) Several excited modes of antenna; (b) multimode fusion

2 天线单元设计

2.1 天线结构

天线的结构如图2所示,整个天线由辐射单元、馈电巴伦、同轴线以及反射板组成。图2(a)给出了天线的辐射体结构,每个天线的辐射体由两对沿 $\pm 45^\circ$ 放置的环形偶极子组成,以实现双极化的辐射特性。所有的介质基板采用FR4板材,介电常数 $\epsilon_r=4.4$,损耗角正切 $\tan\delta=0.001$,厚度 $t_s=1$ mm。四个环形辐射器印制在介质基板的底面,两条Y形馈线印制在基板的顶面。为避免两条馈线的重叠,同时尽可能保证馈线天线结构的对称性,如图2(b)所示,对Y型馈线进行了“跳线”处理:其中一条馈线的中间部分印在基板的底面,并通过两个金属化通孔与印在介质基板顶部的其余部分

相连。每对偶极子由一对 $50\ \Omega$ 的 RG405 同轴电缆馈电,其外导体与偶极子的一个环单元相连,内导体通过一个未金属化的通孔与相应的 Y 形馈电线相连。

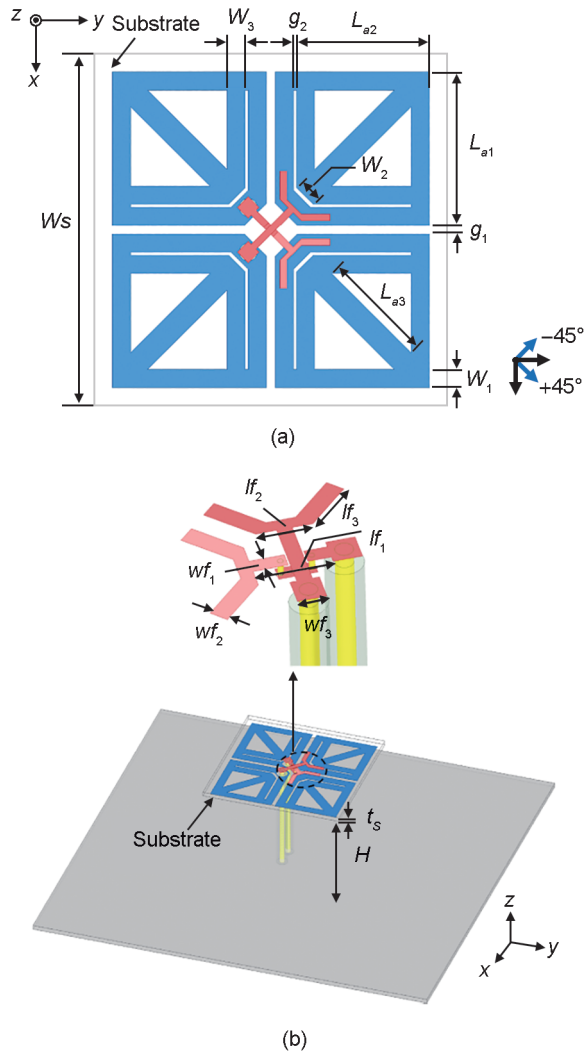


图2 所提出的宽带双极化基站天线结构
(a) 天线俯视图; (b) 天线与馈电结构的3D视图

Fig. 2 The structure of proposed broadband dual-polarized base station antenna structure

(a) top view of the antenna; (b) 3D view of the antenna and feeding structure

2.2 天线工作原理与设计

基于前文提到的基于多模融合的宽带化思想,天线单元的设计过程如图3所示。

天线1 (ant 1): 由普通方形贴片构成的辐射体。为了给改进的 Y 形馈线留出足够的空间用于焊接,在方形贴片的其中一个角上进行了切角处理。

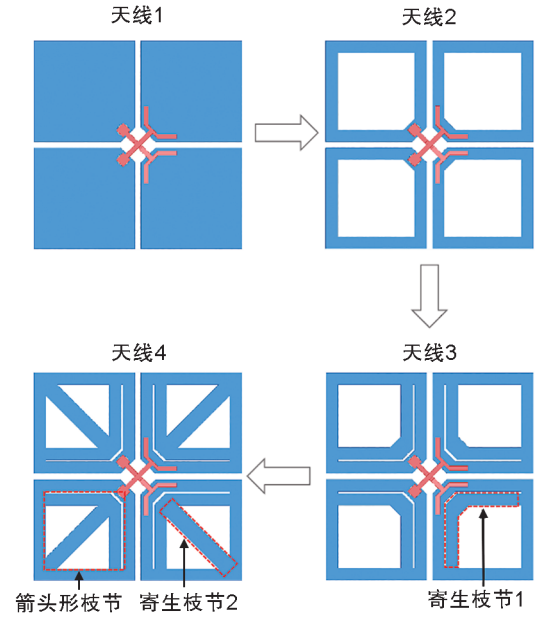


图3 所提出的天线的结构设计过程

Fig. 3 The design process of the proposed antenna

天线2 (ant 2): 由普通方环形贴片构成的辐射体。为了使天线小型化,在原贴片中挖去一个带切角的小方形贴片,以延长电流路径。同时,内外均进行切角处理后,可以留出更多的空间,便于将同轴电缆的外导体焊接到环形偶极子臂上。

天线3 (ant 3): 由嵌套双环单元构成的辐射体。为了在不增大天线口径的情况下实现天线的宽带性能,在天线上增加寄生枝节1,引入新的谐振模式。

天线4 (ant 4): 由加载箭头枝节的环形单元构成的辐射体。加载寄生枝节2与寄生枝节1构成箭头形枝节,进一步优化天线的阻抗匹配性能,即为本文提出的宽带基站天线的设计。

为了更好地展示多模融合实现宽带的原理,图4中比较了四个不同辐射体的 $|S_{11}|$ 。

天线的电尺寸和相邻元件两个环偶极子臂之间的耦合分别控制两个较低的谐振模式,分别称为:低频谐振模式(记作模式L)和中频谐振模式(记作模式M)。值得注意的是,本文所提出的天线单元设计中,天线3引入的寄生枝节1和外环臂之间的强耦合将激励起高频谐振模式(记作模式U)。其原理是强耦合通过改变环路上的电流分布来激发模式U。但从图4中可以看出,包含一个寄生枝节的天线3在高频段只引入一个很弱的谐振,端口的匹配性能

差,对展宽频带没有贡献。因此,天线4额外引入了寄生枝节2,与寄生枝节1一起构成了箭头形的寄生枝节加载,阻抗匹配性能得到了极大的优化,此时在高频段模式U被有效激励起来,天线的工作频带实现展宽。

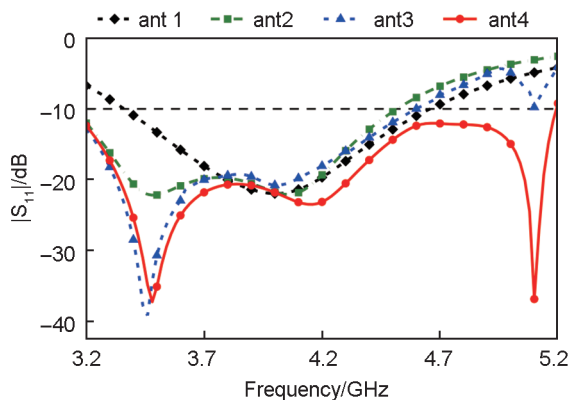


图4 不同结构的天线的 $|S_{11}|$ 参数对比

Fig. 4 The $|S_{11}|$ of antennas with different structures

本文设计的天线单元不仅通过多模融合实现宽带性能,还具有高滚降的滤波特性。如图5所示,当天线工作在模式U时,外部电流 J_{so} 和内部寄生电流 J_{si} 之间构成反向电流,因此其形成的辐射将在远场相消,产生辐射零点,即在模式U的上边带实现了边缘滚降和带外抑制特性。

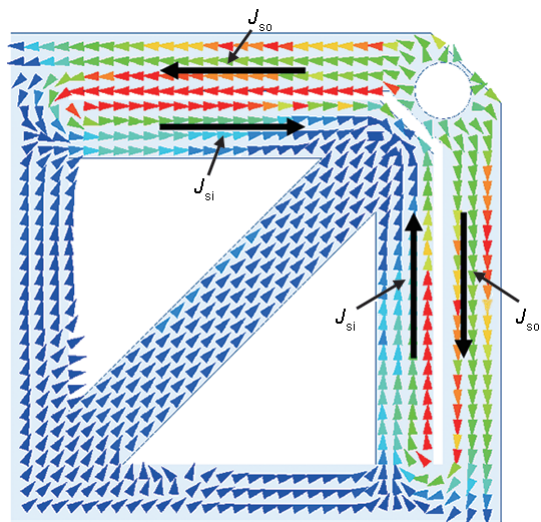


图5 当模式U被激励时内侧寄生枝节和外侧环上的电流分布

Fig. 5 The current distribution on the inner parasitic branch and outer ring when mode U is excited

2.3 天线设计参数分析

为了更好地理解多模融合的宽带化设计思想,图6给出了箭头形寄生枝节的部分关键参

数 g_2 、 W_2 和 W_3 对模式U的影响。

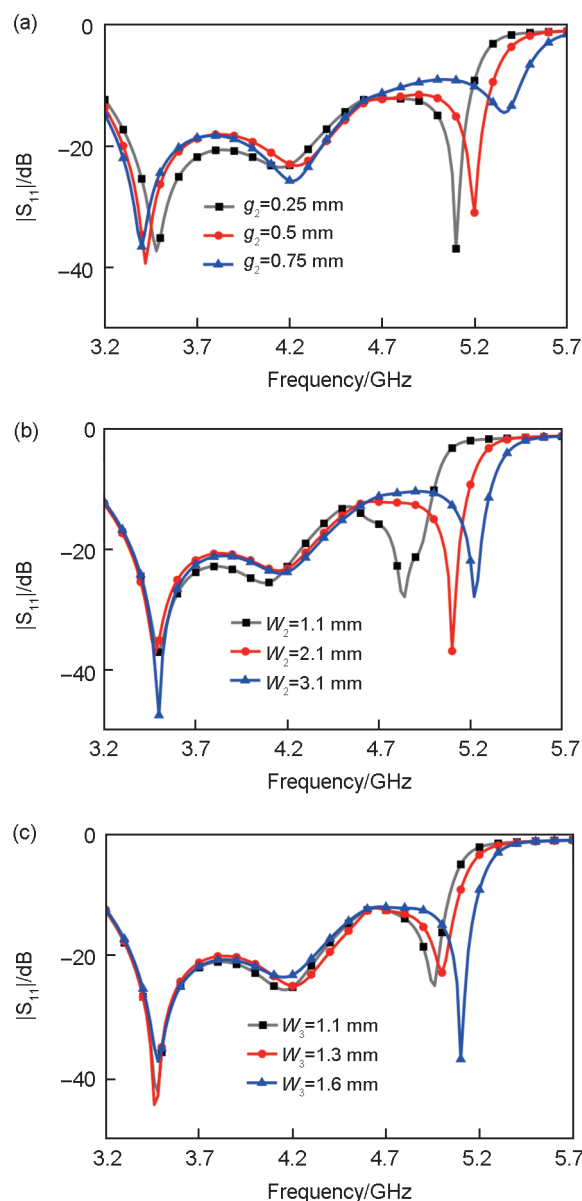


图6 参数取不同值时天线的 $|S_{11}|$

(a) 间隙宽度 g_2 ; (b) 内部枝节的切角宽度 W_2 ; (c) 寄生枝节1的宽度 W_3

Fig. 6 The $|S_{11}|$ of antenna for different parameters

(a) width of the gap g_2 ; (b) width of the tangent angle of the internal parasitic stubs W_2 ; (c) width of the parasitic stub 1 W_3

g_2 表示的是外环臂与内部寄生枝节之间的间隙宽度,对二者之间的耦合强度起决定性的作用。如图6(a)所示,随着 g_2 的增大,外环臂与内部寄生枝节的耦合减弱,模式U向高频移动。

W_2 是内部寄生枝节的切角宽度,对外环臂与内部寄生枝节之间的耦合路径的长度起主要影响。如图6(b)所示,当 W_2 从1.1 mm增大到

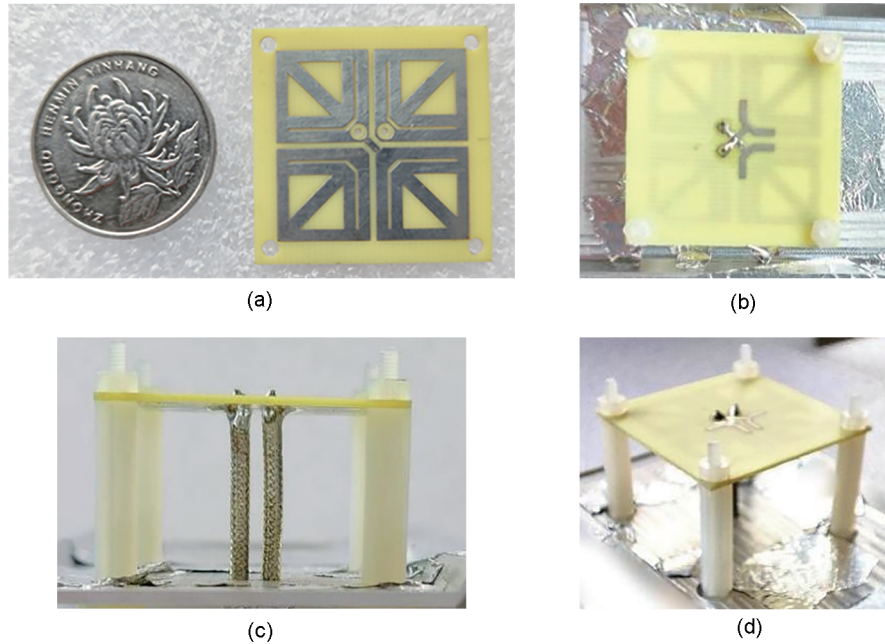


图7 天线实物图

(a) 天线单元背面; (b) 俯视图; (c) 侧视图; (d) 三维视图

Fig. 7 Photographs of antenna

(a) bottom view; (b) top view; (c) sideview; (d) 3D view

3.1 mm, 耦合路径长度减小, 模式 U 从 4.75 GHz 移动到 5.4 GHz。

W_3 表示的是内部寄生枝节 1 的宽度, 对内部耦合枝节的电流路径长度起主要影响。如图 6 (c) 所示, 当 W_3 增大, 寄生枝节的宽度增加, 内边缘电流路径缩短, 模式 U 向高频移动, 同时, 由于内部枝节变粗, 使得耦合电流的分布更均匀、变化更缓慢, 带来更好的阻抗匹配性能。

总的来看, 只需通过调整寄生枝节的一些关键参数, 可以很容易地获得模式 U 所需的谐振频率和匹配性能, 将模式 U 与模式 L、M 进行融合, 即可实现天线的宽带化设计。最终经过 Ansys HFSS 的优化, 确定了最终的天线主要参数, 如表 1 所示。

3 实验测量与结果分析

图 7 展示了天线单元辐射体以及焊接后的实物图, 利用矢量网络分析仪与微波暗室对天线的阻抗匹配特性、辐射特性进行了测试。

图 8 给出了天线的仿真和实测的散射参数对比, 测试结果表明在 3.4 GHz~5.1 GHz 的宽频带内实现 $|S_{11}| < -10$ dB, 表明所设计的天线可以支持双 5G 通信频段 (3.4 GHz~ 3.8 GHz 和 4.4 GHz~ 5 GHz), 并具有良好的阻抗匹配。

表1 优化后的天线结构参数(mm)

Table 1 The optimized parameters of proposed antenna

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm
L_{a1}	13	lf_1	4	g_1	0.8
L_{a2}	9.75	lf_2	2.6	g_2	0.25
L_{a3}	10.9	lf_3	3	W_s	30
W_1	1.5	wf_1	0.8	H	18
W_2	2.1	wf_2	0.8	t_s	1
W_3	1.6	wf_3	1.5		

表2 宽带双极化基站天线单元仿真与测试结果

Table 2 Simulated and measured results of the proposed broadband dual-polarized base station antenna

频率	Gain(仿真/实测)/dBi	HPBW(仿真/实测)/(°)	XPD(仿真/实测)/dB	FBR(仿真/实测)/dB
3.4 GHz	9.4/9.2	64/66	25/23	18.8/19
3.8 GHz	9.3/9.0	65/65	25/23	18/19
4.4 GHz	8.6/8.5	70/70	23/22	17.8/18
4.95 GHz	7.8/7.8	70/70	35/34	21.4/22.7

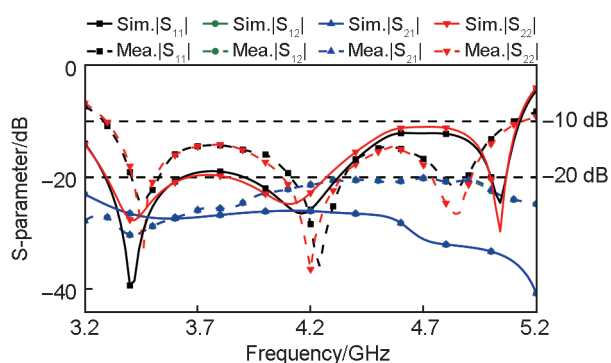


图8 天线测试结果与仿真结果

Fig. 8 Measured and simulated S-parameters of the proposed antenna

$|S_{11}|$ 与 $|S_{22}|$ 的不对称主要是由 $\pm 45^\circ$ 极化的Y形馈线结构的不对称以及焊接中的误差造成。表

2给出了 $+45^\circ$ 极化端口激励时,多个频点的增益(Gain)、半功率波瓣宽度(Half-Power Beam Width, HPBW)、交叉极化鉴别率(Cross-Polarization Discrimination, XPD)、前后比(Front to Back Ratio, FBR)的仿真与测试结果对比。在3.4 GHz~5.1GHz的宽频带内,实测增益为 $8.6 \text{ dBi} \pm 0.8 \text{ dBi}$,实测HPBW为 $67^\circ \pm 3^\circ$,交叉极化鉴别率均高于22 dB,端口隔离度高于20 dB,前后比高于18 dB,满足工程要求。

所设计的宽带基站天线的方向图如图9所示,由于天线结构的对称性,此处只给出 $+45^\circ$ 极化端口激励时的方向图。可以看出,天线在带内的方向图比较稳定,仿真与实测吻合良好。

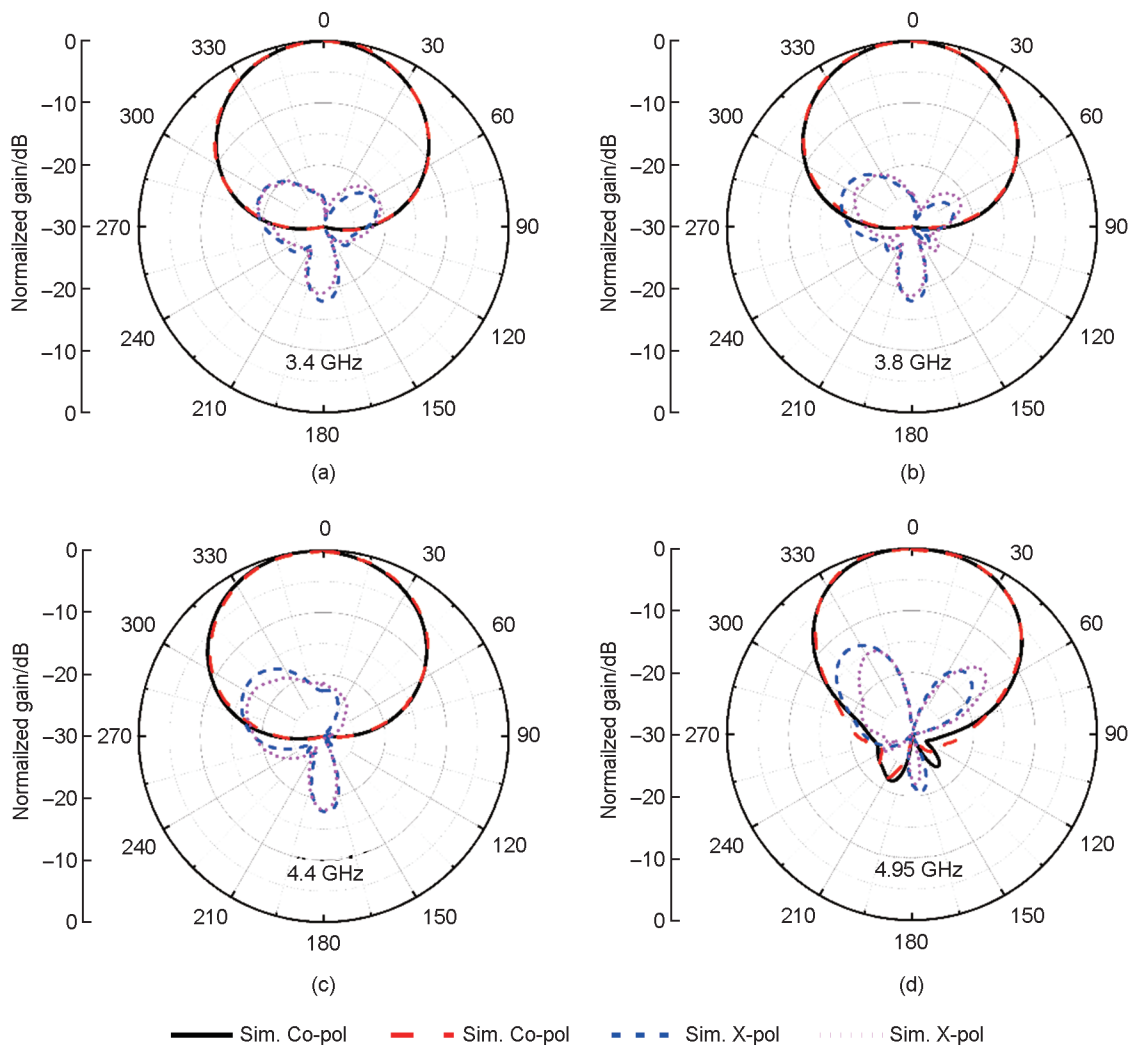


图9 当 $+45^\circ$ 极化端口激励时所提出的双极化天线的实测和仿真的辐射方向图

(a) 3.4 GHz; (b) 3.8 GHz; (c) 4.4 GHz; (d) 4.95 GHz

Fig. 9 Measured and simulated radiation patterns of the proposed dual-polarized antenna when $+45^\circ$ polarized port being excited (a) 3.4 GHz; (b) 3.8 GHz; (c) 4.4 GHz; (d) 4.95 GHz

表3 所提出的宽带双极化基站天线与现有研究工作对比

Table 3 Comparison of the proposed broadband dual-polarized base station antenna with previous works

文献	工作频带(相对带宽)	尺寸(λ_c^3)	交叉极化鉴别率/dB	极化隔离度/dB
[16]	1.39~2.8 GHz (67%)	0.46×0.46×0.35	19	30
[18]	1.69~2.77 GHz (41%)	0.44×0.44×0.24	19	22
[20]	3.2~3.9 GHz (20%)	0.37×0.37×0.17	28	40
本文	3.4~5.1 GHz (40%)	0.38×0.38×0.25	23	21

从表3可以看出,本文设计的宽带双极化基站天线在实现宽带化性能的同时,没有额外增加天线的口径尺寸与剖面高度,在设计紧凑的同时,满足了工程对于基站天线的各项性能指标。文献[15]在天线上方加载多层寄生结构,在拓宽带宽的同时,增加了天线的剖面高度,增加了制造、装配的难度。文献[17]在辐射体的外侧加载寄生枝节,使得辐射体的口径被扩大;文献[19]在天线下加载介质块,有效降低了天线的剖面高度,但带宽受限,仅有20%。综上所述,本文设计的宽带双极化基站天线在带宽、口面尺寸、剖面高度、制造装配难度等方面相比现有研究均表现出一定的优势,适合在大规模基站天线阵列中进行应用。

4 结论

本文基于多模融合的宽带化原理,在传统的双极化环偶极子天线的基础上加载箭头形寄生枝节激励起高次谐振模式,设计出一款具有高裙边滚降性能,覆盖3.4 GHz~5.1 GHz的宽带双极化基站天线,天线整体尺寸27 mm×27 mm×18 mm,并进行了加工、焊接、测试。实测结果表明,所设计的天线在不增加天线口面半径与剖面高度的情况下,在3.4 GHz~5.1 GHz的宽带范围内较好地满足了基站天线的设计指标,且具有交叉极化低与方向图稳定的辐射特性,验证了基于多模融合的宽带天线设计的可行性,为基站天线的宽带化设计提供了可行性方案。所设计的宽带基站天线具有支持双5G通信频带的特性,有望减少5G基站中的天线数量,缓解基站站址资源紧张的问题。边缘滚降特性与小口径显示出该天线适合作为高频天线单元,在Sub 6G的基站架构中具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, *et al.* What Will 5G Be?[J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2014, **32**(6): 1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [2] DA Y R, CHEN X M, KISHK A A. In-band Mutual Coupling Suppression in Dual-band Shared-aperture Base Station Arrays Using Dielectric Block Loading[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(10): 9270–9281. DOI: 10.1109/TAP.2022.3177496.
- [3] ZHU Y F, CHEN Y K, YANG S W. Integration of 5G Rectangular MIMO Antenna Array and GSM Antenna for Dual-band Base Station Applications[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 63175–63187. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984246.
- [4] HE D L, CHEN Y K, YANG S W. A Low-profile Triple-band Shared-aperture Antenna Array for 5G Base Station Applications[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(4): 2732–2739. DOI: 10.1109/TAP.2021.3137486.
- [5] CHANG Y L, CHU Q X. Suppression of Cross-band Coupling Interference in Tri-band Shared-aperture Base Station Antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(6): 4200–4214. DOI: 10.1109/TAP.2021.3138531.
- [6] CHANG Y L, CHU Q X. Broadband Dual-polarized Electromagnetic Transparent Antenna for Cross-band Scattering Suppression[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(7): 1452–1456. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3171434.
- [7] JIANG J, CHU Q X. Dual-Band Shared-Aperture Base Station Antenna Array Based on 3-D Chokes[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2023, **22**(4): 824–828. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3226254.
- [8] YUAN H, CHEN F C. A Mixed Decoupling Scheme Based on AMC and ADS for Dual-Polarized Antenna Array[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2023, **71**(7): 6150–6155. DOI: 10.1109/TAP.2023.3266060.
- [9] LI Y P, ZHAO Z P, TANG Z Y, *et al.* Differentially Fed, Dual-band Dual-polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, **68**(4): 3231–3236. DOI: 10.1109/TAP.2019.2957720.
- [10] LIU Y, WANG S H, LI N, *et al.* A Compact Dual-band Dual-polarized Antenna with Filtering Structures for

- Sub-6 GHz Base Station Applications[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, **17**(10): 1764–1768. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2864604.
- [11] YANG X J, GE L, WANG J P, *et al.* A Differentially Driven Dual-polarized High-gain Stacked Patch Antenna [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, **17**(7): 1181–1185. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2837116.
- [12] LIAN R N, WANG Z D, YIN Y Z, *et al.* Design of a Low-profile Dual-polarized Stepped Slot Antenna Array for Base Station[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2016, **15**: 362–365. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2446193.
- [13] CUI Y H, LI R L, FU H Z. A Broadband Dual-polarized Planar Antenna for 2G/3G/LTE Base Stations[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, **62**(9): 4836–4840. DOI: 10.1109/TAP.2014.2330596.
- [14] BAO Z D, NIE Z P, ZONG X Z. A Novel Broadband Dual-polarization Antenna Utilizing Strong Mutual Coupling[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, **62**(1): 450–454. DOI: 10.1109/TAP.2013.2287010.
- [15] WU L J, LI R L, QIN Y, *et al.* Bandwidth-enhanced Broadband Dual-polarized Antennas for 2G/3G/4G and IMT Services[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, **17**(9): 1702–1706. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2864185.
- [16] YANG S J, MA R, ZHANG X Y. Self-Decoupled Dual-Band Dual-Polarized Aperture-Shared Antenna Array [J] *IEEE Trans Antennas Propag*, **2022**, 70(6): 4890–4895. DOI: 10.1109/TAP.2021.3137531.
- [17] HUANG H, LIU Y, GONG S X. A Broadband Dual-polarized Base Station Antenna with Sturdy Construction[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, **16**: 665–668. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2598181.
- [18] HUA Q, HUANG Y, 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.
- [19] LI M T, CHEN X M, ZHANG A X, *et al.* Dual-polarized Broadband Base Station Antenna Backed with Dielectric Cavity for 5G Communications[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2019, **18**(10): 2051–2055. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2937201.
- [20] ZENG J P, ZHANG Z, LIN F H, *et al.* Penta-mode Ultrawideband Circularly Polarized Stacked Patch Antennas Using Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(10): 9051–9060. DOI: 10.1109/TAP.2022.3177485.
- [21] LIU S H, YANG D Q, CHEN Y P, *et al.* Low-profile Broadband Metasurface Antenna under Multimode Resonance[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(9): 1696–1700. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3094302.
- [22] HU W, LI C, LIU X, *et al.* Wideband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna with Multimode Resonance[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(4): 533–537. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3056404.