

一种低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线

林炫, 刘璐*, 陈彭

(集美大学海洋信息工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: [目的] 为适应万物互联中信号覆盖范围可实时调控的需求, 对可重构微带天线进行研究. [方法] 提出一种低剖面波瓣宽度可重构的双极化微带天线, 该天线采用双极化同轴馈电结构, 配备四对加载二极管的寄生结构, 通过改变寄生结构中二极管的工作状态, 实现天线工作模式的切换. [结果] 所提出的天线具备四种辐射模式, 对应波束宽度分别为 66.95° 、 94.49° 、 90.65° 、 129.36° , 其中 94.49° 和 90.65° 模式的波束指向分别为 -16° 和 16° . [结论] 所设计微带天线的实测结果与仿真结果吻合良好. 寄生结构的引入对天线匹配特性的影响很小, 保证了天线在不同工作模式下良好的匹配兼容性. 通过直流偏置电压灵活调节波束宽度, 具有调控方式便捷高效、构型简单、制造成本低等优势.

关键词: 波瓣宽度可重构; 低剖面微带天线; 双极化; 寄生结构

中图分类号: TN 820

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)04-0669-06

A low-profile dual-polarized microstrip antenna with reconfigurable beamwidth

LIN Xuan, LIU Lu*, CHEN Peng

(School of Ocean Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: [Objective] To meet the demand for the real-time adjustment of signal coverage in the internet of everything, herein we study a reconfigurable microstrip antenna. [Methods] A low-profile dual-polarized microstrip antenna with reconfigurable beamwidth is proposed. This antenna adopts a dual-polarized coaxial feeding structure and is equipped with four pairs of parasitic structures loaded with diodes. By changing the working state of the diodes on the parasitic structures, the operating mode of the antenna can be switched. [Results] In the proposed antenna, four radiation modes exist, with corresponding beamwidths of 66.95° , 94.49° , 90.65° , and 129.36° . Among them, beam directions in those 94.49° and 90.65° modes are -16° and 16° , respectively. [Conclusions] Measured results of the designed microstrip antenna agree satisfactorily with simulation results. Additionally, the introduction of the parasitic structure in this design exerts a minimal impact on the antenna's matching characteristics, thus ensuring high matching compatibilities in different operating modes. This design can flexibly adjust the beamwidth through DC bias voltage, so that advantages such as convenient and efficient regulation, simple configurations, and low manufacturing cost are offered.

Keywords: reconfigurable lobe width; low profile microstrip antenna; dual-polarized; parasitic structure

随着全球信息化、智能化的飞速发展, 移动用户数量激增, 人们对万物互联的需求也日益增长, 使得无线通信的应用场景和功能变得更加复杂. 在这种背

景下, 无线通信系统对射频前端技术的要求持续升高. 天线作为射频前端的核心组件之一, 也随之呈现多样的需求变化. 过去大多数设备仍采用固定或单一

收稿日期: 2024-06-01 录用日期: 2025-02-26

基金项目: 福建省自然科学基金(2021J05179); 用于 5G 无线通信终端的射频组件集成设计及产业化研究(2023CXY0303)

通信作者: 202161000023@jmu.edu.cn

引文格式: 林炫, 刘璐, 陈彭. 一种低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(4): 669-674.

Citation: LIN X, LIU L, CHEN P. A low-profile dual-polarized microstrip antenna with reconfigurable beamwidth[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(4): 669-674. (in Chinese)



模式的天线设计,如微带天线和振子天线^[1].然而,在某些临时活动(如音乐节、体育赛事等)场景下,需要临时增强信号覆盖能力或临时扩大信号覆盖面积,以保证通信设备的正常联网.这对信号覆盖提出了新的要求.部署分布式天线系统是一种较为传统的解决方案^[2],但其设计过程复杂,铺设成本较高.Schaubert等^[3]提出的“可重构天线”为此提供了新的解决思路.

天线的电流分布决定其辐射性能,可重构天线即是基于这一思想,通过改变自身电气结构来改变其天线特性.根据重构参数分为频率、方向图、极化、混合可重构天线.例如,频率可重构天线^[4-5]实时改变天线工作频段,减少同频干扰;极化可重构天线^[6-7]改变自身极化状态,从而使天线具有多极化的能力;波瓣宽度可重构天线^[8-10]属于方向图可重构天线的一种,通过改变其波瓣宽度以适应不同的覆盖需求.现有常见的波瓣宽度可重构天线多采用天线阵列形式^[11-12],或添加贴片层的多层结构^[13],通过对馈电网络或控制网络进行不同的配置,实现波瓣宽度的变换.此类天线结构通常较为复杂,制造成本较高,且其复杂构型还导致不同模式间的匹配兼容性成为设计的一大难点.

本文提出一种低剖面的双极化微带天线,该天线以双极化微带天线为基础,通过加载可控寄生结构实现波瓣宽度的灵活切换.寄生结构采用二极管开关控制,旨在实现天线模式切换的数字化逻辑控制,以便于与智能化数字系统集成.

1 天线设计

本文将低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线的设计流程分成两部分:根据工作频点要求设计低剖面双极化微带天线;设计寄生结构,优化寄生结构的参数与布局,以实现波瓣宽度的灵活可调.

1.1 低剖面双极化微带天线的设计

本文设计的工作在 3.95 GHz 频点的低剖面双极化微带天线结构如图 1 所示.该天线由 $L_S \times L_S \times H_S$ 的上介质板和 $L_G \times L_G \times H_G$ 的下介质板(中间层),边长为 L 的矩形辐射贴片(上层),边长为 L_G 的矩形金属地(底层)构成.介质板相对介电常数均为 ϵ .轴馈电方式采用双同轴正交馈电,通过激励不同的端口可以在贴片上产生相互垂直方向上的电流,从而产生相互垂直的线极化波,达到双极化的目的.两个馈电端口 P_1 、 P_2 的位置如图 1(b)所示,分别与中心点相距 d .馈电孔内径和外径分别为 r 和 R (图 1(c)).双极化微带天线的具体参数见表 1.

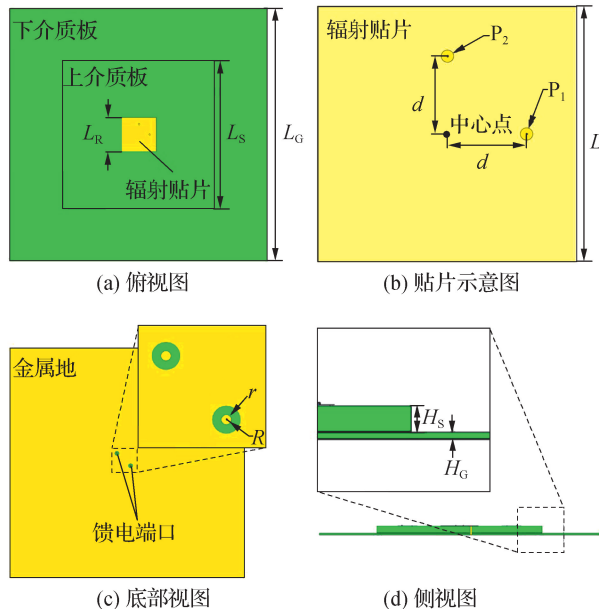


图 1 双极化微带天线结构

Fig. 1 Structural diagram of dual polarization microstrip antenna

表 1 双极化微带天线具体参数

Tab. 1 Specific parameters of dual-polarization microstrip antenna

参数	数值	参数	数值
L_R /mm	23	d /mm	7
L_S /mm	100	L /mm	170
L_G /mm	170	H_S /mm	4
r /mm	0.55	H_G /mm	1
R /mm	1.54	ϵ	2.2

1.2 寄生结构的设计

寄生结构的设计如图 2 所示,由一对金属贴片、一个二极管以及扼流偏置结构组成.金属贴片的尺寸为 $L_P \times W_P$,间距为 d_1 .金属贴片间由二极管相连,侧面由铁氧体磁珠构成的高频扼流结构分别与直流偏置电压和金属地相连.

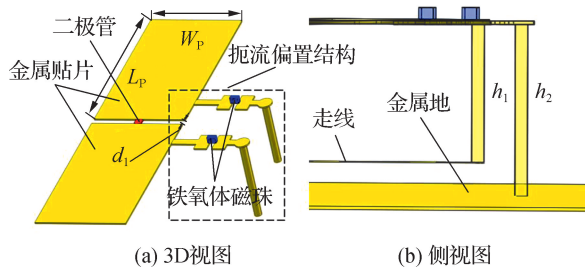


图 2 寄生结构

Fig. 2 Parasitic structure

为抑制偏置电路可能引入的高频干扰信号,本

设计在扼流偏置支路中加入了铁氧体磁珠,如图 2 (a)虚线框所示. 铁氧体磁珠可等效为电感元件,对高频信号呈现较高阻抗,近似开路状态,而对低频信号则表现为低阻抗,近似短路状态,从而实现了通低频、阻高频的滤波效果. 相比于扇形开路滤波偏置结构,铁氧体磁珠在中低频具有更紧凑的空间结构. 本文所用型号为 BLF03RD102GNEB. 如图 2(b)所示,直流偏置线分别连接至走线层和金属接地层. 二极管的阳极接走线层,阴极接金属地,通过调节走线层的偏置电压即可控制二极管的导通与截止状态. 当施加合适偏置电压使二极管导通时,两个金属贴片电连接,整体长度约为介质波长的 $1/2$,此时寄生结构等效为一偶极子. 该偶极子可耦合有源天线的能量并谐振产生辐射场,从而实现对波瓣宽度的扩展. 相反,当偏置电压使二极管截止时,两个金属贴片断开,寄生结构不再处于谐振状态,对有源天线的辐射特性影响甚微. 因此,通过调控直流偏置电压控制二极管通断状态,可实现对所设计天线波束宽度的动态调节.

1.3 低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线

最终低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线的结构如图 3 所示,在低剖面的双极化微带天线辐射贴片四个方向上分别添加一对寄生结构,寄生结构与辐射贴片相距 K_0 . 寄生结构与辐射贴片的相对位置对导通时的耦合情况以及天线的波瓣调控能力产生影响. 在一定范围内,寄生结构与辐射贴片的距离 K_0 越大,其产生的耦合越弱,对波瓣宽度调控能力越小. 反之,寄生结构所能产生的耦合越强,在对应方向所产生的辐射增益越强,所能调控的波瓣宽度也就越宽. 但随着耦合的增强,波瓣会出现“双峰”情况,导致在 0° 方向上增益过小. 寄生结构长度 L_p 的改变主要会影响天线的最佳工作频点. 因此,为实现最佳调控性能,需合理优化 K_0 及 L_p . 寄生结构的具体参数见表 2. 寄生结构通过两条偏置线,其中一条直接连接到地,另一条通过走线连接到天线边缘焊盘,用于后续与单片机相连接.

表 2 寄生结构具体参数

Tab. 2 Specific parameters of the parasitic structure

参数	数值	参数	数值
W_p/mm	6.5	h_1/mm	4
L_p/mm	11.25	h_2/mm	5
d_1/mm	0.5	K_0/mm	14

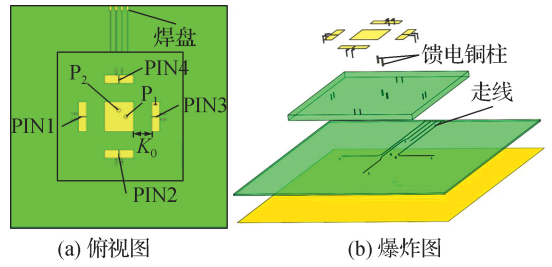


图 3 低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线结构
Fig. 3 Structure of low-profile lobe width reconfigurable dual-polarization microstrip antenna

2 天线模式与仿真结果分析

2.1 四种天线模式

由于本天线为双极化天线且整体结构对称,故以下以 P1 端口激励为例进行说明. 所设计天线在 P1 端口激励下,有源天线的辐射场极化方向与 PIN2 和 PIN4 所在寄生单元的极化方向一致,而与 PIN1 和 PIN3 所在寄生单元的极化方向正交. 因此,仅 PIN2 和 PIN4 所在的寄生单元能够有效耦合主能量,感应电流并产生辐射,进而实现波束调控功能;而 PIN1 和 PIN3 所在寄生单元则几乎不与主辐射场耦合,对辐射性能影响甚微. 因此,在 P1 端口激励状态下,PIN1 和 PIN3 始终维持截止状态,仅需调控 PIN2 和 PIN4 的导通与截止状态,共形成四种不同的工作模式,具体如表 3 所示. 同理,当 P2 端口激励时,则可通过调控 PIN1 和 PIN3 实现波束控制.

表 3 天线模式与二极管状态关系

Tab. 3 The relationship between the antenna mode and the diode status

模式	PIN1	PIN2	PIN3	PIN4
模式一	截止	截止	截止	截止
模式二	截止	导通	截止	截止
模式三	截止	截止	截止	导通
模式四	截止	导通	截止	导通

图 4 给出了模式一和模式四所对应的表面电流 J_{surf} 的分布. 从图中可以看出当 PIN 管截止时(模式一),寄生结构表面感应电流较弱. 当 PIN 管导通时(模式四),寄生结构中感应出较强电流,其分布类似于处于谐振状态下偶极子的电流分布,所产生的辐射场与有源天线辐射场叠加,最终表现为扩大天线的波瓣宽度.

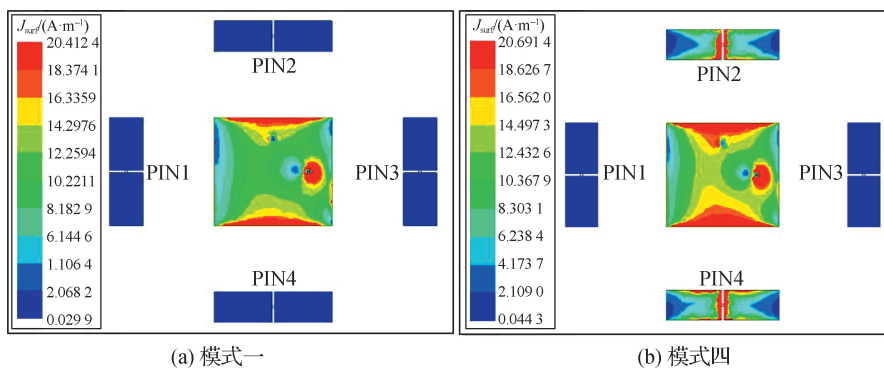


图 4 电流分布对比

Fig. 4 Current distribution comparison

2.2 仿真结果分析

无寄生结构与 4 个有寄生结构的回波损耗 S_{11} 如图 5 所示, 5 种结构的辐射频率均集中在 4 GHz 附近. 未出现“双峰”现象, 说明寄生结构的参数设计合理. 模式的切换对天线的谐振频点及匹配特性的影响并不大, 在整个工作频段范围内与无寄生结构的有源天线 S_{11} 特性几乎一致.

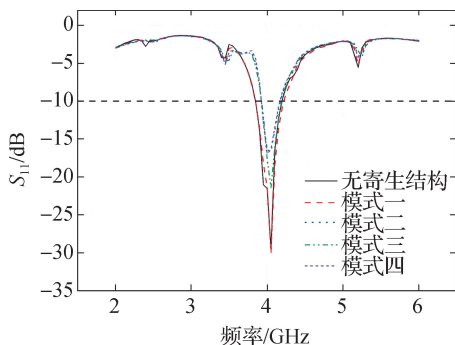


图 5 S_{11}

Fig. 5 S_{11}

交极化依据主极化最大值进行归一化. 无寄生结构与模式一有基本一致的归一化增益方向图. 波瓣宽度分别为 $70.15^\circ (-34.57^\circ \sim 35.58^\circ)$ 和 $66.95^\circ (-31.98^\circ \sim 34.97^\circ)$. 这一结果验证了前文设计思路的正确性: 当二极管处于截止状态时, 寄生单元几乎不与有源单元发生能量耦合, 对有源天线的辐射特性影响极小, 方向图与未引入寄生结构的矩形微带天线几乎相同.

当 PIN2 导通时(模式二), 天线在 H 面方向的波瓣宽度增大至 $94.49^\circ (-51.18^\circ \sim 43.31^\circ)$, 相比二极管截止状态下的波瓣宽度扩展了约 41.1%. 同时, 主波束的指向角发生偏移, 变化为 -16° . 类似地, 当 PIN4 导通时(模式三), 天线在 H 面方向的波瓣宽度变为 $90.65^\circ (-37.61^\circ \sim 53.04^\circ)$, 与模式一相比扩大了 35.4%, 同时波束指向变为 16° . 由于天线结构的对称性, 模式二与模式三的辐射特性呈对称关系. 此外, 当 PIN2 和 PIN4 同时导通时(模式四), 天线在 H 面的波瓣宽度变为 $129.36^\circ (-63.29^\circ \sim 65.44^\circ)$, 与截止相比扩大 93.2%, 实现了最大程度的波瓣展宽效果. 4 种天线模式的性能参数如表 4 所示, 辐射波瓣宽度越宽天线效率与增益越低.

H 面的归一化增益仿真结果如图 6 所示, 其中正

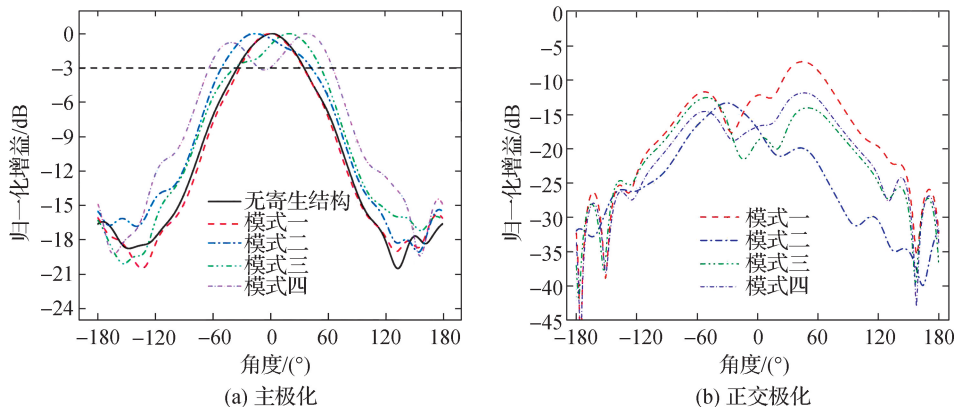


图 6 增益仿真结果

Fig. 6 Gain simulation results

表 4 天线各模式与其性能(3.95 GHz)

Tab. 4 Antenna modes and performance (3.95 GHz)

模式	模式一	模式二	模式三	模式四
S_{11} /dB	-18.32	-12.46	-11.75	-12.43
增益最大值/dB	6.70	5.35	5.80	4.83
天线效率/%	98.72	92.37	93.61	86.85
波瓣宽度/(°)	66.95	94.49	90.65	129.36
波瓣宽度增幅/%	—	41.1	35.4	93.2

2.3 测试结果分析

图 7 是天线实物测试图,利用矢量网络分析仪,在微波暗室测试.图 8 给出了天线的 S_{11} 和隔离度 S_{21} 的测试结果.由图 8(a)可知,该天线的四种模式在

3.95 GHz 工作频点上回波损耗均小于 -10 dB,具有良好的匹配特性.由图 8(b)可知,该天线的四种模式下,馈电端口间均具有良好的隔离度,均小于 -20 dB.



图 7 天线实物测试

Fig. 7 Physical testing of antenna

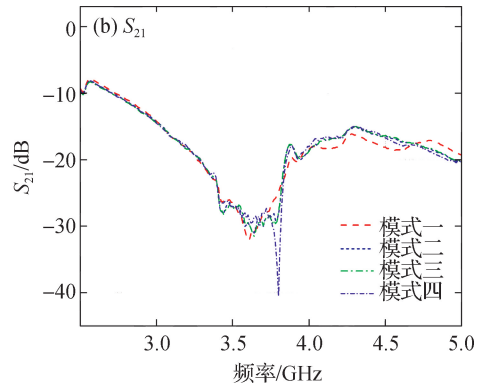
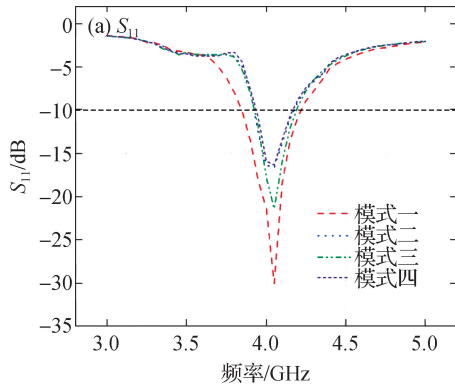


图 8 S_{11} 和 S_{21} 测试结果

Fig. 8 Measuring results of S_{11} and S_{21}

综上,通过改变寄生结构的导通与截止状态,对天线辐射贴片上的电流分布特性影响不大(如图 4 所示),因此对天线的匹配特性以及传输系数影响较小,使得不同模式间具有良好的匹配兼容性.

图 9 为天线增益的仿真结果与测试结果对比,图 10 为增益的 3D 仿真结果.4 种模式下天线实测分别有 86° 、 113° 、 107° 、 132° 左右的波瓣宽度,3D 仿真波瓣宽度分别为 66.95° 、 94.49° 、 90.65° 、 129.36° .实测结果与仿真结果基本一致.

增强边缘辐射;截止时则恢复基础电长度.这种电长度可调机制结合双极化馈电,既保持了天线的低剖面特性(总高度仅 5 mm),又实现了 4 种可切换的辐射模式(波瓣宽度 $66.95^\circ \sim 129.36^\circ$).通过优化寄生单元与主贴片的间距($K_0 = 14$ mm)、寄生单元尺寸和偏置电路设计,确保了各模式间良好的阻抗匹配($S_{11} < -10$ dB)和极化隔离度($S_{21} < -20$ dB),为智能通信场景提供了高效的波束调控解决方案.所设计天线调控方式便捷灵活,构型简单,易加工,制造成本低的优势.

3 结 论

为满足无线通信系统中信号覆盖范围动态调控的需求,本文提出一种低剖面波瓣宽度可重构双极化微带天线.该设计基于双极化微带天线,创新性地引入四组可控寄生单元,通过调节二极管的导通状态实现波瓣宽度的动态重构.其核心机理在于:当二极管导通时,寄生单元与主辐射体形成等效电长度延展的复合谐振结构,

参考文献:

[1] 苏道一.移动通信系统中天线的分析与设计[D].西安:西安电子科技大学,2008.
 [2] OKUYAMA T, SUYAMA S, MASHINO J, et al. Antenna deployment for 5G ultra high-density distributed antenna system at low SHF bands[C]//Conference on Standards for Communications and Networking. Piscataway: IEEE, 2016:1-6.

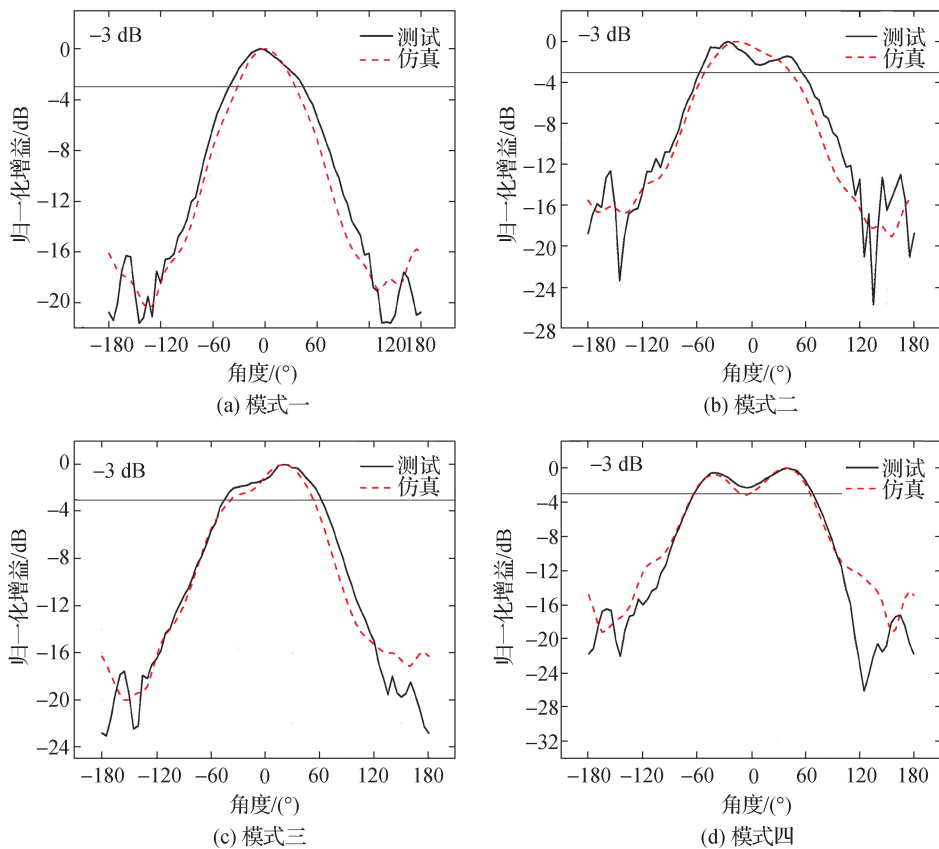


图 9 归一化增益对比

Fig. 9 Normalized gain comparison

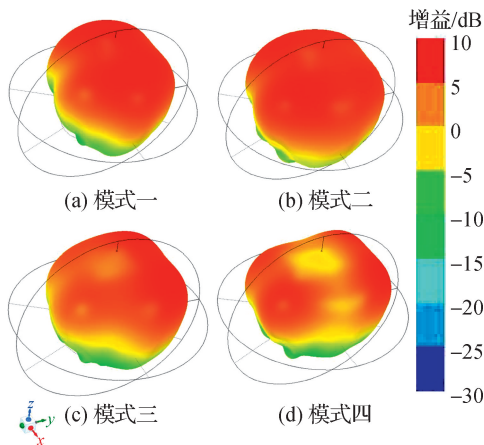


图 10 增益仿真结果(3D)

Fig. 10 Gain simulation results (3D)

[3] SCHAUBERT D H, FARRAR F G, HAYES S T, et al. Frequency-agile, polarization diverse microstrip antennas and frequency scanned arrays; US4367474[P]. 1980-08-05.

[4] 史洋一, 高小强, 陆畅, 等. 多频连续可调的可重构滤波天线[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 337-344.

[5] 储怡冰, 项颖, 张文慧, 等. 基于聚合物分散液晶的频率可重构贴片天线[J]. 液晶与显示, 2024, 39(1): 17-24.

[6] 施宏宇, 张雪健, 李波, 等. 基于可重构馈电网络的线极化

连续可调微带天线[C]// 全国天线年会. 哈尔滨: 中国电子学会, 2023: 093149.

[7] 孙胜, 王世通, 孙虎成. 一种双频四模极化可重构天线[J]. 电子学报, 2023, 51(8): 2168-2178.

[8] 赵虎辰, 唐涛, 黄和平, 等. 频率和方向图可重构天线设计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(9): 21-25.

[9] 王安国, 张佳杰, 王鹏, 等. 可重构天线的研究现状与发展趋势[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 997-1002, 1008.

[10] 田雨波, 谭冠南. 可重构天线研究综述[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 271-277.

[11] GE L, LUK K M. A three-element linear magneto-electric dipole array with beamwidth reconfiguration[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14: 28-31.

[12] FENG B T, TU Y T, CHUNG K L, et al. A beamwidth reconfigurable antenna array with triple dual-polarized magneto-electric dipole elements [J]. IEEE Access, 2018, 6: 36083-36091.

[13] 赵浩然, 严彬云, 张馨予, 等. 一种新型波束宽度可重构天线设计[C]// 全国天线年会. 哈尔滨: 中国电子学会, 2023: 092385.

(责任编辑: 任滢滢)