

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.02.008

引用格式: 李胜哲, 武哲, 云宇, 等. 一种新型宽频带微带贴片天线[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(2): 92-104.



一种新型宽频带微带贴片天线

李胜哲, 武哲, 云宇, 马令坤

(陕西科技大学 电子信息与人工智能学院, 西安 710021)

摘要: 针对微带天线带宽有限的固有不足, 提出一种基于 L 型寄生结构的宽频带微带贴片天线。采用主辐射贴片与 L 型寄生贴片组合设计, 整体尺寸为 $0.83\lambda_0 \times 0.83\lambda_0 \times 0.083\lambda_0$ (λ_0 为中心频率 5 GHz 对应的波长)。主辐射贴片工作在 TM_{10} 模, 通过 L 型寄生贴片电磁耦合激发多谐振点扩展带宽, 选用介电常数 2.2、损耗角正切 0.000 9 的 Rogers5880 介质基板降低 Q 值。采用 180° 反相差分馈电设计抑制方向图畸变。结果表明, 天线在 3.6~6.6 GHz 频段内电压驻波比小于 2, 相对带宽达 60%, 是传统微带天线的 6 倍。在 6.2 GHz 峰值增益为 9.8 dBi, 远高于一般贴片单元, 工作频段内增益波动小于 1.5 dB。辐射方向图在 3.6~6.3 GHz 频段内主瓣指向偏差小于 5° , 交叉极化抑制优于 -15 dB, 中心频点达 -38 dB。该设计通过单层寄生结构实现了宽带高增益特性, 适用于 5G 和 Wi-Fi 等宽带无线通信系统。

关键词: L 型寄生结构; 宽频带; 差分馈电; 微带贴片天线

中图分类号: TN822

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)02-092-13

A novel broadband patch antenna

LI Shengzhe, WU Zhe, YUN Yu, MA Lingku

(School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, P. R. China)

Abstract: To overcome the inherently narrow bandwidth of conventional microstrip antennas, this work proposes a wideband microstrip patch antenna using an L-shaped parasitic structure. The antenna consists of a main radiating patch and L-shaped parasitic elements, with an overall size of $0.83\lambda_0 \times 0.83\lambda_0 \times 0.083\lambda_0$, where λ_0 denotes the free-space wavelength at the 5 GHz center frequency. The main patch operates in the fundamental transverse magnetic (TM_{10}) mode, while multiple resonances are introduced via electromagnetic coupling with the parasitic elements, thereby significantly extending the bandwidth. A Rogers 5880 substrate with a relative permittivity of 2.2 and a loss tangent of 0.000 9 was used to reduce the quality factor. A 180° out-of-phase differential feeding scheme was applied to suppress radiation pattern distortion. Simulation results show that the proposed antenna achieves a voltage standing wave ratio (VSWR) below 2 from 3.6 GHz to 6.6 GHz, corresponding to a 60% fractional bandwidth—six times wider than that of traditional microstrip designs. The antenna exhibits a peak gain

收稿日期: 2025-04-11

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2024JC-YBQN-0654)。

Supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2024JC-YBQN-0654).

作者简介: 李胜哲 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事毫米波天线方向研究, (E-mail) Lizhe9912@163.com。

通信作者: 云宇, 男, 教授, 硕士生导师, (E-mail) yunyu@sust.edu.cn。

of 9.8 dBi at 6.2 GHz, with gain variation within 1.5 dB across the operating band. The main beam remains stable, with a pointing deviation within 5° , and cross-polarization levels remain below -15 dB over 3.6 GHz to 6.3 GHz, reaching as low as -38 dB at the center frequency. This single-layer configuration achieves both broadband and high-gain performance, demonstrating strong potential for broadband wireless applications, including 5G communication and Wi-Fi systems.

Keywords: L-shaped parasitic structure; broadband; differential feeding; microstrip patch antenna

随着第五代移动通信、毫米波雷达及物联网技术的快速发展,现代无线系统对天线性能提出了更高的综合要求。在 sub-6 GHz 频段内,天线不仅需实现超过 50% 的相对带宽以支持多载波聚合,还需保持低于 $0.1\lambda_0$ 的剖面高度,以适应日益紧凑的终端设备设计^[1]。微带贴片天线凭借其低剖面、易共形、制造成本低等优点,成为众多无线设备中的主流选择^[2]。然而,由于传统微带天线受限于高品质因数(Q)谐振特性,阻抗带宽通常仅为 5%~10%^[3],难以满足宽带无线通信系统的需求。

针对带宽受限问题,已有研究提出多种改进方案:1)通过贴片上开槽扰动表面电流路径激发多重谐振模式,可以拓宽带宽,但通常会导致辐射效率下降^[4-5];2)加载人工电磁材料降低结构等效介电常数,可提升带宽但会引起结构复杂度和高度的提升^[6-8];3)采用多层叠层结构增加垂直耦合,虽然可有效提升带宽,但制造工艺复杂,成本显著增加^[9-10]。天线优化往往在提升某一性能指标的同时牺牲其他的关键特性,难以兼顾带宽、剖面、增益与结构复杂度之间的平衡。近年来,一些宽带微带天线设计已取得一定进展。例如文献[11]提出一款毫米波超宽带阵列天线,阻抗带宽达 72.1%,但二单元阵列的增益仅为 5.54 dBi;文献[12]设计了双 45° 极化宽带天线,阻抗带宽达 38%,峰值增益为 9 dBi;文献[13]采用人工磁导体结构实现了 27.7% 带宽和 8.4 dBi 增益,但其结构中引入了超表面层,制造难度显著增加。

为此,笔者提出了一种带 L 型寄生结构的宽带差分馈微带贴片天线。通过在主辐射贴片周围引入 L 型寄生贴片,利用其与主贴片间的电磁耦合激发多个谐振点,有效拓展了天线带宽;同时,采用 180° 反相差分馈电方式,在保证辐射方向图稳定的同时抑制高频段方向图畸变。经全波仿真验证,所提出天线在 3.6~6.6 GHz 频段内实现了 $VSWR < 2$,阻抗带宽达到 60%,在保持低剖面结构的同时获得了良好的增益与方向图性能,适用于 5G、Wi-Fi 等新一代宽带无线通信系统。

1 天线设计与分析

1.1 单元结构

图 1(a)所示为工作于中心频率 5 GHz 的宽带贴片天线三维架构,整体尺寸为 $0.83\lambda_0 \times 0.83\lambda_0 \times 0.83\lambda_0$ 。该结构采用多层堆叠配置:顶部为主辐射贴片与 L 型寄生贴片组合体;中间层为 Rogers 5880 介质基板,相对介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.000 9,厚度为 1 mm,由于其低损耗的特性,大幅降低了天线的 Q 值,增加天线单元的带宽^[14];底部为全金属接地板,通过尼龙支撑柱($\epsilon_r=2.3$,高度 $h_1=4$ mm)实现精确空气层控制,抑制天线表面波耦合效应^[15]。

如图 1(b)所示,天线单元总体是由一个主辐射贴片和周围 L 型寄生贴片组成。一般情况,微带贴片^[16]的长宽都应该接近于 $\lambda_g/2$ 。 λ_g 为导波波长, λ_0 为自由空间波长, c 为光速, f 为工作频率。 ϵ_{eff} 为有效介电常数,多层介质时应使用加权平均法近似计算,如式(3)所示, h_i 为第 i 层的高度, ϵ_{ri} 为第 i 层的介电常数。

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{h_{\text{total}}} \epsilon_{ri}, \quad (3)$$

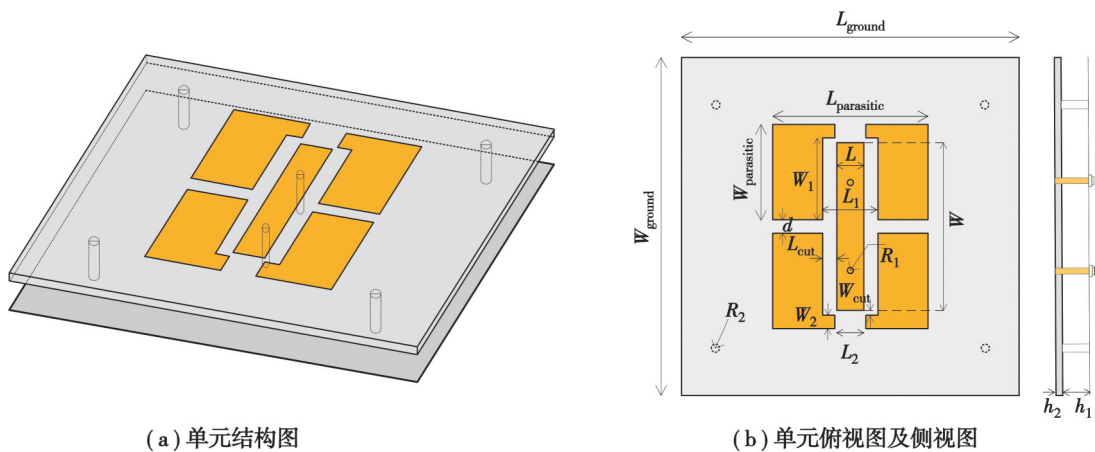


图 1 天线模型图

Fig. 1 Antenna model diagram

在本设计中为了保证单元的小型化,只取 W 的大小为 $\lambda_g/2$, L 的值通过仿真优化缩减至 4 mm。寄生单元采用二级切槽设计:首先将长宽分别为 $L_{\text{parasitic}}$ 、 $W_{\text{parasitic}}$ 的初始矩形贴片中心区域移除长宽为 L_1 、 W_1 的小矩形形成 U 型结构,再次切除长宽分别为 L_2 、 W_2 的小矩形在主辐射贴片周围形成 4 个 L 型寄生贴片。主辐射贴片和寄生贴片之间的电磁耦合是通过缝隙 W_{cut} 和 L_{cut} 实现的,并且调整 $W_{\text{parasitic}}$ 和 $L_{\text{parasitic}}$ 的长度可以调整寄生贴片谐振频率。

馈电系统采用同轴探针加载技术,半径为 R_1 的铜质探针穿过地板和 Rogers 5880 基板与主辐射贴片相连。机械支持系统由 4 根高度为 h_1 的尼龙柱构成。最终优化的天线具体尺寸见表 1。

表 1 天线单元具体参数
Table 1 Specific parameters of the antenna unit

参数	取值/mm	参数	取值/mm	参数	取值/mm	参数	取值/mm
W_{ground}	50.0	L_{ground}	50.000	W	24.0	L	4.0
W_1	11.7	L_1	8.200	W_2	2.0	L_2	4.6
W_{cut}	0.7	L_{cut}	2.100	$W_{\text{parasitic}}$	13.7	$L_{\text{parasitic}}$	19.8
d	2.0	R_1	0.445	R_2	1.0	h_1	4.0
h_2	1.0						

1.2 单元设计过程

图 2 展示了天线单元的设计流程,共提出了 4 种天线模型。图 3 为这 4 种天线模型的电流分布图,直观呈现电流流动特性与辐射机制。

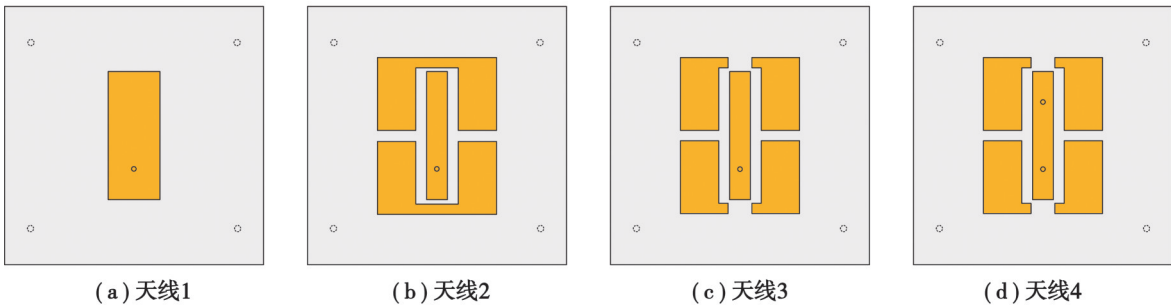


图 2 单元设计过程

Fig. 2 Unit design process

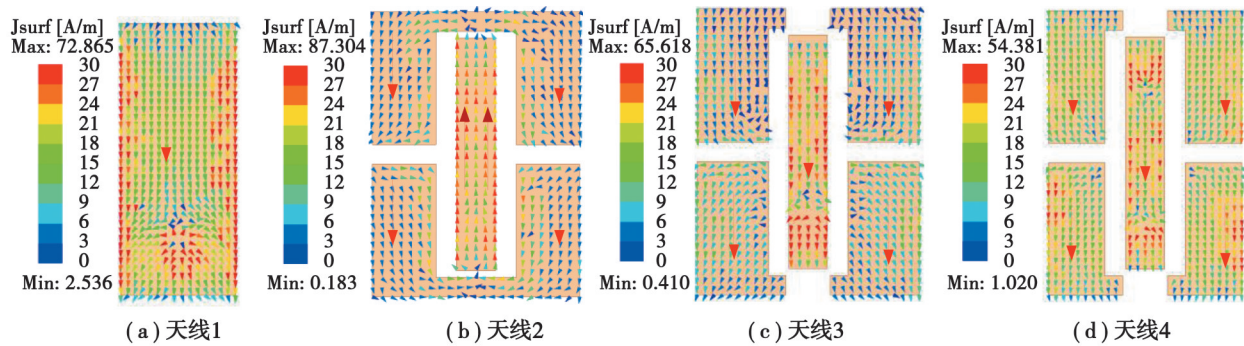


图 3 电流分布图

Fig. 3 Current distribution diagram

天线 1 采用经典的微带贴片天线结构,辐射体由单个矩形贴片组成。从图 4 天线仿真结果可以看出,该天线的阻抗带宽受限,仅为 8.6% ($VSWR < 2$),峰值增益为 7.5 dBi。这一局限性主要源于微带天线的单一谐振特性,使其难以满足宽带通信系统的需求。

在天线 1 的基础上,天线 2 通过在主辐射贴片的上下两侧引入 U 型寄生贴片,增强电磁耦合。寄生贴片包围主辐射贴片的辐射边和非辐射边,有助于提供额外的谐振模式,扩展阻抗带宽。仿真结果表明,天线 2 的阻抗带宽提升至 13.4%,相较天线 1 提高了 4.8%,然而,在带宽范围内,峰值增益下降到 5.6 dBi。

为进一步提升单元性能,天线 3 在 U 型寄生贴片的中央开槽,裁去一小矩形区域调节电流路径,使主辐射贴片与寄生贴片上的电流分布更有助于增强能量耦合效率。优化后的电流分布图表明,该结构有效减少了电流相位失配问题,同时在图 4(a)中观察到高频处引入了一个新的谐振点。通过与原有谐振点合并,天线 3 的阻抗带宽进一步提升至 20.6%,相较天线 2 提高了 7.2%,同时峰值增益达到了 7.9 dBi。

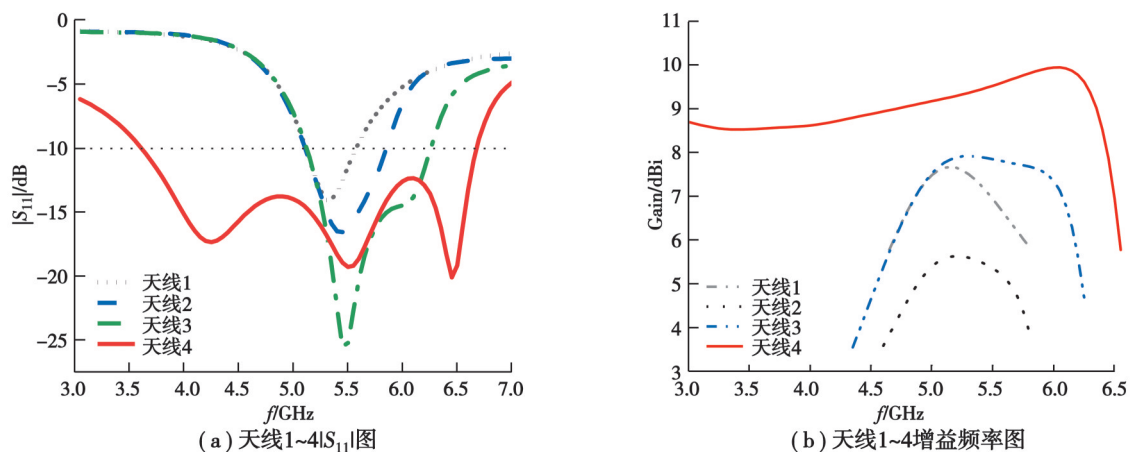


图 4 天线 1~4 仿真结果

Fig. 4 Antenna 1 to 4 simulation results

为进一步扩展带宽并优化匹配特性,天线 4 借鉴了文献[17]中的 180° 相位差分馈电方式。差分馈电相较于传统单点馈电的优势在于能够有效降低交叉极化,提高辐射效率。通过调整馈电间距和相位差,差分馈电可以优化输入阻抗匹配,进一步拓展带宽。最终优化后的天线 4 阻抗带宽为 3.6~6.6 GHz,相对带宽达到 60%,峰值增益达到 9.8 dBi,相较于天线 3 进一步提升。

上述优化过程表明,通过逐步引入寄生结构、调整电流路径,并结合差分馈电策略,可以显著改善微带贴片天线的带宽性能。此外,为确保工程可行性,后面针对天线的结构参数进行进一步优化,通过仿真结果验证优化的准确性。

1.3 单元设计分析

由于本天线的宽频带特性主要依赖于寄生贴片的引入,因此寄生贴片的尺寸以及其与主辐射贴片之间的距离对天线单元的阻抗带宽具有决定性影响。当寄生贴片尺寸过大时,可能会引入不必要的高次谐振,导致谐振点分布不均,降低整体带宽;而尺寸过小则不足以激发额外谐振模式,难以实现带宽扩展。同时,寄生贴片与主辐射贴片之间的距离直接影响两者之间的电磁耦合程度,距离过大将削弱耦合,降低寄生效应;而距离过近则可能产生过量的电容或电感效应,进而偏移匹配频点并影响天线的匹配特性。

接下来,将通过参数扫描和仿真分析,对寄生贴片的尺寸以及其与主辐射贴片之间的距离进行系统分析,找到最佳设计参数,实现天线单元宽频带与高匹配性能的双重目标。

如图5(a)所示,寄生贴片与主辐射贴片之间的间距 L_{cut} 对天线的 $|S_{11}|$ 特性具有显著影响。当 L_{cut} 为0.5 mm时,整个工作频段仅存在2个主要谐振点,表明寄生贴片未能有效激发额外的谐振模式。随着 L_{cut} 的增加,高频谐振点逐渐向低频移动,这是由于寄生贴片对电磁场的影响增强,导致有效电长度增加,从而降低谐振频率。然而,当 L_{cut} 进一步增大至3.2 mm时,耦合效应减弱,导致天线的谐振模式退化,使阻抗带宽明显缩减。因此,在保证宽带特性与阻抗匹配的优化中,需综合考虑 L_{cut} 值的影响。通过参数扫描分析,最终确定 $L_{\text{cut}}=2.1$ mm为较优选择,此时天线的阻抗带宽与匹配性能均满足需求。

图5(b)为 W_{cut} 值的变化对天线阻抗带宽影响。从仿真结果可以看出,当 W_{cut} 为0.1 mm时,天线模型的阻抗带宽基本满足设计需求,但由于主辐射贴片与寄生贴片的间距过小,在实际加工过程中可能因制造公差导致天线性能下降,甚至影响匹配特性。因此,需要适当增大 W_{cut} 以改善天线的加工容差。然而,随着 W_{cut} 的增加,高频谐振点的阻抗匹配逐渐恶化,特别是在6 GHz附近,表现为反射系数增大。例如,当 W_{cut} 增加至1.3 mm时,5.94~6.12 GHz频段的反射系数高于-10 dB,进一步增大至1.9 mm时,5.74~6.27 GHz频段的阻抗匹配进一步恶化。因此,在综合权衡阻抗带宽与阻抗匹配的优化方案后,选择 $W_{\text{cut}}=0.7$ mm作为最终设计参数,以确保宽带性能的同时,保持良好的阻抗匹配,并提升天线的加工容差适应性。

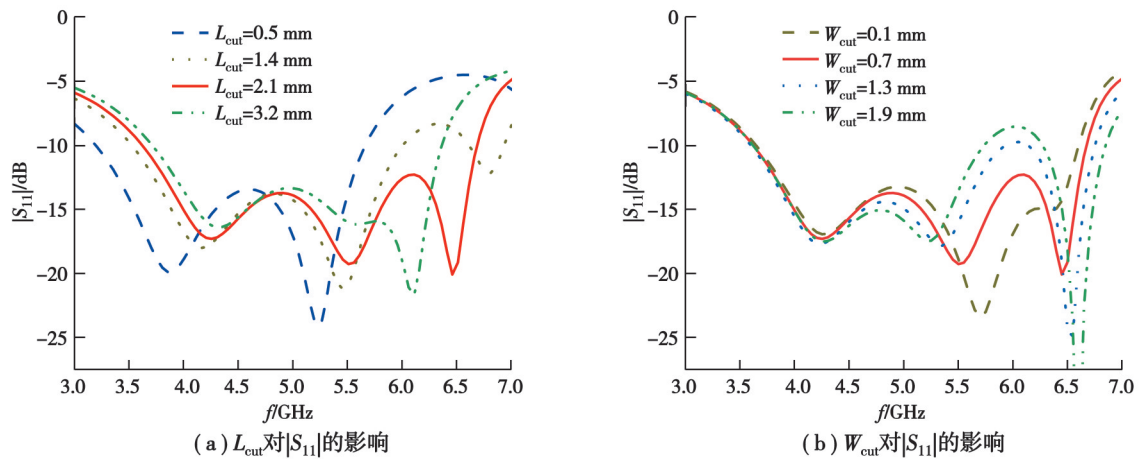


图5 耦合缝隙对 $|S_{11}|$ 的影响

Fig. 5 Effect of coupling gaps on $|S_{11}|$

如图6(a)所示, $L_{\text{parasitic}}$ 值的变化对天线的阻抗带宽产生一定的影响。根据等效电容计算公式(4)得,当 $L_{\text{parasitic}}$ 减小时,寄生贴片的等效电容降低,使等效电流路径缩短,导致谐振频率略微上移。相反,当 $L_{\text{parasitic}}$ 增大时,寄生贴片的等效电容增加,使等效电长度增加,使谐振频率略微下移。尽管 $L_{\text{parasitic}}$ 对谐振频率的影响相对较小,但其对天线的阻抗匹配和带宽特性起着重要作用,综合仿真优化结果,最终选取 $L_{\text{parasitic}}=19.8$ mm作为优化设计参数,以确保天线的阻抗匹配与带宽特性达到平衡。

公式(4)中 ϵ_{eff} 为有效介电常数, W 为寄生贴片的宽度, h 为介质基板的厚度, d 为寄生贴片与主辐射贴片之间的间距。

$$C_{\text{eq}} = \frac{\epsilon_{\text{eff}} W}{60} \ln \left(\frac{4h}{d} + \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{d} \right)^2} \right) \quad (4)$$

如图 6(b) 所示, $W_{\text{parasitic}}$ 的变化对天线阻抗匹配产生了显著影响, 但对阻抗带宽的上下边缘影响较小, 主要改变了频带内的匹配情况。从理论上讲, 寄生贴片的宽度 $W_{\text{parasitic}}$ 变化会改变寄生贴片的有效尺寸, 从而改变其等效电容和电感值对寄生贴片与主贴片之间的电磁耦合产生影响。当 $W_{\text{parasitic}}$ 为 13.7 mm 时, 天线表现出理想的阻抗带宽, 低频、中频和高频谐振点均处于较好的匹配状态。随着 $W_{\text{parasitic}}$ 增大, 高频区域内增强的耦合效应使得高频谐振点的匹配逐步改善, 而频带内第 2 个谐振点则向低频方向移动, 导致中低频 2 个谐振点逐渐靠拢。从图中趋势可以看出, 当 $W_{\text{parasitic}}$ 增大到一定程度时, 中低频谐振点可能会合并一个, 导致中高频段内出现阻抗匹配恶化的情况, 例如当 $W_{\text{parasitic}}$ 为 16.7 mm 时, 5.23~6.23 GHz 频段的反射系数明显高于 -10 dB。综合参数扫描仿真结果, 最终选取 $W_{\text{parasitic}}$ 值为 13.7 mm, 以确保天线在整个工作频带内具有较为理想的阻抗匹配和宽带性能。

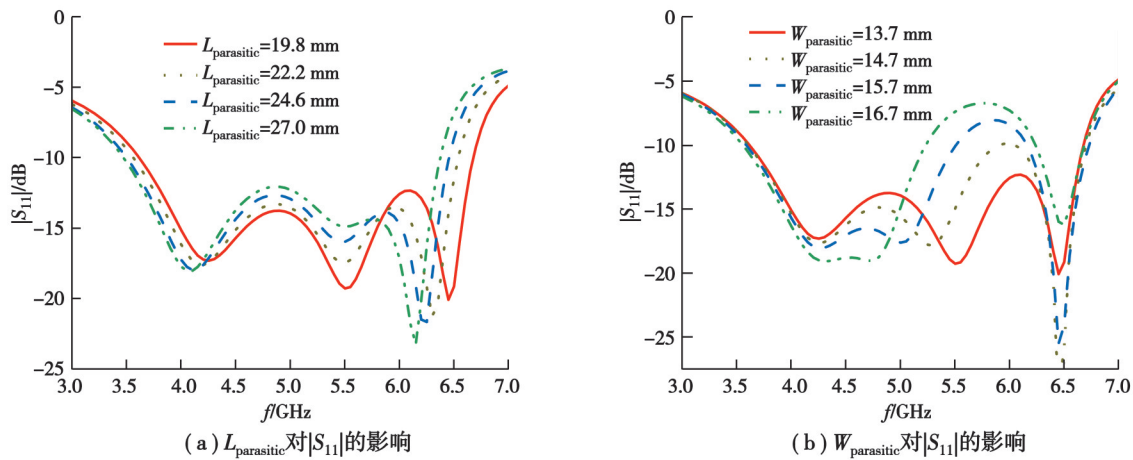


图 6 寄生贴片对 $|S_{11}|$ 的影响

Fig. 6 Effect of parasitic patch size on $|S_{11}|$

除单元设计参数的影响, 差分馈电形式的引入也对带宽扩展起到了关键作用。现将天线 1、天线 2 和天线 3 使用差分馈电形式激励, 与原有单元进行对比, 验证差分馈电对单元性能的提升效果。

图 7 展示了天线 1、天线 2 和天线 3 在未加载与加载差分馈电条件下的 $|S_{11}|$ 仿真结果。天线 1 在未加载差分馈电时的带宽为 5.1~5.6 GHz, 加载差分馈电后, 在低频段新增了一个谐振点, 使带宽拓展至 2.2~3.9 GHz 和 4.95~5.7 GHz 2 个频段; 天线 2 的原始带宽为 5.1~5.85 GHz, 加入差分馈电后扩展至 3.4~6 GHz, 相对带宽增加了约 38%; 天线 3 的原始带宽为 5.12~6.25 GHz, 加载差分馈电后扩展至 3.6~6.6 GHz, 相对带宽提升了约 39.4%。

综上所述可见, 在天线 1~3 的结构演进中, 添加 L 型寄生贴片能够显著拓宽阻抗带宽, 引入差分馈电不仅进一步扩大了原有带宽范围, 还在部分结构中引入新的谐振点, 有效提升了天线的低频响应能力。因此, 差分馈电与寄生结构的结合有效促进了天线单元的带宽扩展。

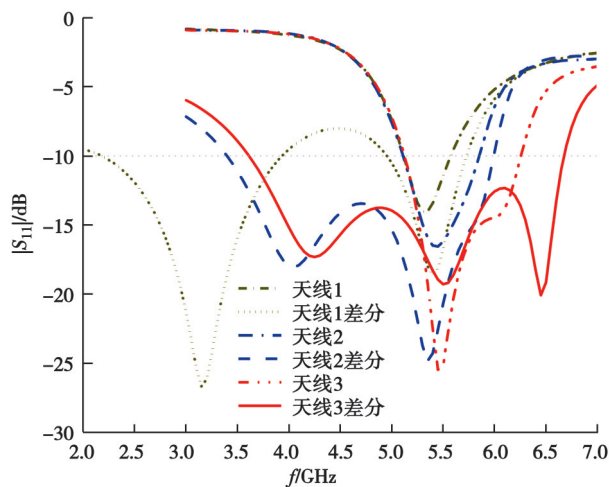


图7 差分馈电单元对比结果

Fig. 7 Comparison results of differential feed units

2 结果分析

在电磁仿真软件 Ansys HFSS 中对所提出的天线进行仿真,主要验证以下性能指标:通过 S 参数分析确定天线单元的阻抗带宽 ($VSWR < 2$);通过增益随频率变化图验证天线在整个宽带内的增益表现;通过各个谐振点的表面电流分布图以及表面电流强度图分析天线的耦合与谐振原理;通过阻抗带宽内低频、中频和高频的方向图,验证天线在不同频段内的辐射特性和方向性。

2.1 阻抗带宽与增益

从图 8(a)天线的 $|S_{11}|$ 曲线观察得,分别在 4.2、5.5、6.4 GHz 处出现了多个谐振点,说明在这些频段天线实现了比较好的阻抗匹配。从多谐振点的分布可以推断,天线在高频与低频部分均存在有效的耦合与辐射机制,表明寄生贴片的结构设计在拓展带宽方面发挥了作用。天线以工程中常用的 -10 dB 作为衡量标准,可以看到天线在 3.6~6.6 GHz 均满足带宽要求,整体相对带宽达到了 60%。这种宽带特性不仅能够适应 5G、Wi-Fi 等多频带通信的需求,同时也能在所需频段内保持较好的匹配特性^[18]。

观察图 8(b)得,天线在 3~6 GHz 区间内保持着相对稳定的增益水平,并在 6 GHz 左右达到频带内的峰值增益 9.8 dBi。增益达到峰值后开始有所下降,在 6.5 GHz 处下降至 7 dBi,随后增益快速衰减,这种现象的出现可能是由于高阶模表面波的激发导致的^[19]。如图 9 所示,展示了单元从 5.5~7 GHz 频段的模式特性。在低

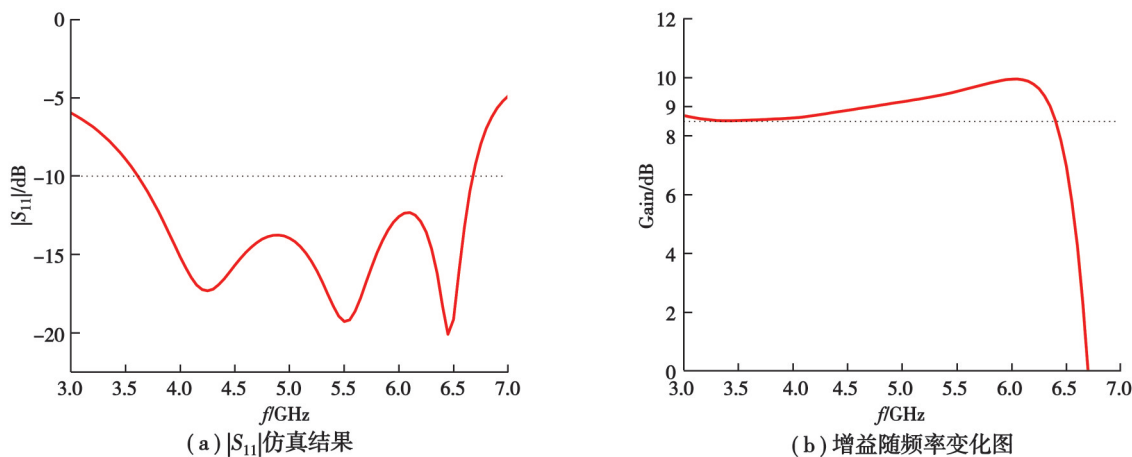


图8 单元仿真结果

Fig. 8 Cell simulation results

频时 5.6 GHz 时,模式 1 的幅度达到峰值,主导辐射特性,表明单元此时工作在主模。随着频率的升高,模式 1 逐渐衰减,而模式 2 逐渐增强并主导辐射过程。此现象主要是源于天线的结构尺寸在频率提升时保持不变,随着频率的增大,天线模型的电尺寸等效变大,除主模外更易激发高阶模的出现,使辐射模式发生变化。

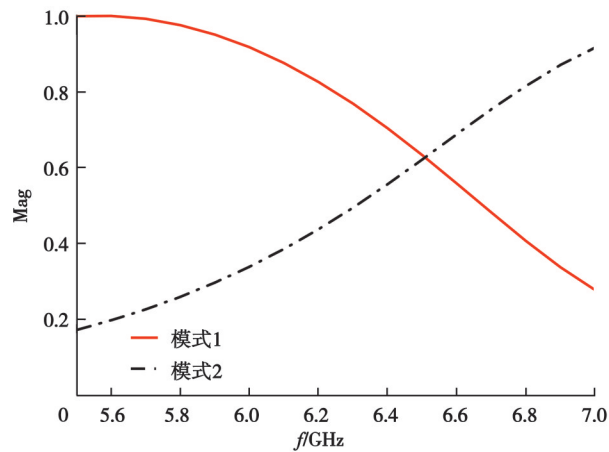


图 9 天线归一化模式分析

Fig. 9 Antenna mode normalization analysis

2.2 谐振点电流分布、电场分布

从图 10(a)中的 4.2 GHz 电流分布图可以看出,电流主要沿着主辐射贴片的长边方向分布,并在边缘处形成较高的电流密度。结合图 11(a)的电场强度分布,可以看到主辐射贴片的上下两侧的主辐射边电场强度最高,这与 TM_{10} 模的典型特征相吻合,表明天线在该频点处主要由主辐射贴片激励,并且以 TM_{10} 模主导辐射。

在图 10(b)、图 11(b)处的电流分布图和电场强度图来看,单元的电流分布和电场强度与 4.2 GHz 处相似,仍然以 TM_{10} 模为主。在 6.4 GHz 处,从图 10(c)中观看到电流主要集中在主辐射贴片上,同时寄生贴片上部分电流方向杂乱。观察此时的电场强度图,主辐射贴片工作依然工作在 TM_{10} 模,由图 9 可知在 6.4 GHz 处模式 2 的强度增强并逐渐主导辐射过程,影响了主辐射贴片的辐射模式,导致高频处的增益出现快速下降。

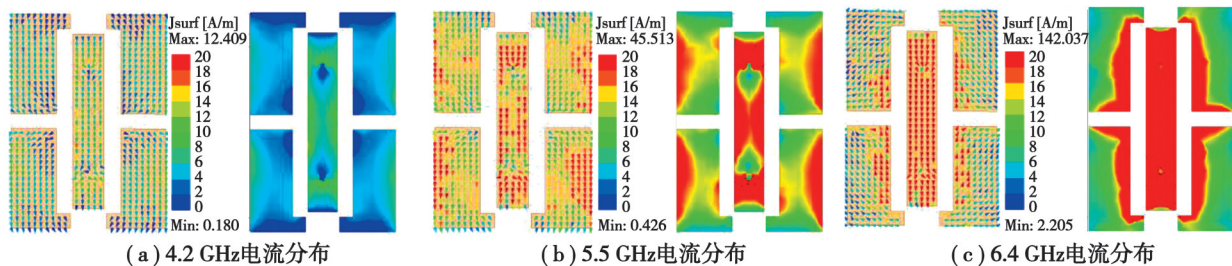


图 10 单元谐振点电流分布图

Fig. 10 Current distribution diagram of the resonant point of the unit

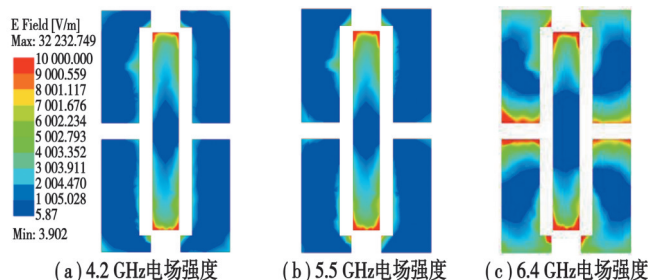


图 11 单元谐振点电场强度图

Fig. 11 Diagram of the electric field strength at the resonant point of the element

2.3 方向图

为确保天线的辐射特性、方向性和极化特性在整个频段内是稳定的,针对阻抗带宽对应的低频3.6 GHz、中频5 GHz和高频6.6 GHz的方向图进行模拟仿真分析。

低频段3.6 GHz的辐射方向图如图12(a)所示,属于微带贴片天线典型的宽波束,E/H面半功率波束宽度分别为 80° 和 68° ,在该频段内天线具有较广的覆盖范围,在 $\theta=0^\circ$ 时增益为8.1 dBi。峰值交叉极化抑制比达到-15.8 dB,表明在此频率下极化纯度相对较好。主瓣辐射指向性良好且E面和H面的方向图对称性较好,保证信号的均匀覆盖。图12(b)展现了中频段5 GHz的辐射方向图。与低频3.6 GHz相比,E/H面的半功率波束宽度减小至 70° 和 58° ,主瓣的指向性更加集中, $\theta=0^\circ$ 时增益为9.1 dBi。同时,交叉极化电平进一步降低,达到了-40 dB,相较于低频段降低了24.2 dB,在此频点天线已经有了较高的极化纯度。图12(c)为高频段6.6 GHz的方向图,H面方向图显示,最大增益指向方向相较于中低频有了 7.5° 波束偏转,但是在 $\theta=0^\circ$ 时增益衰减只有0.4 dB,这表明在主瓣依然保持着较强的辐射能力。尽管在高频由于结构导致增益的快速下降,但在此频点的方向图依然稳定。

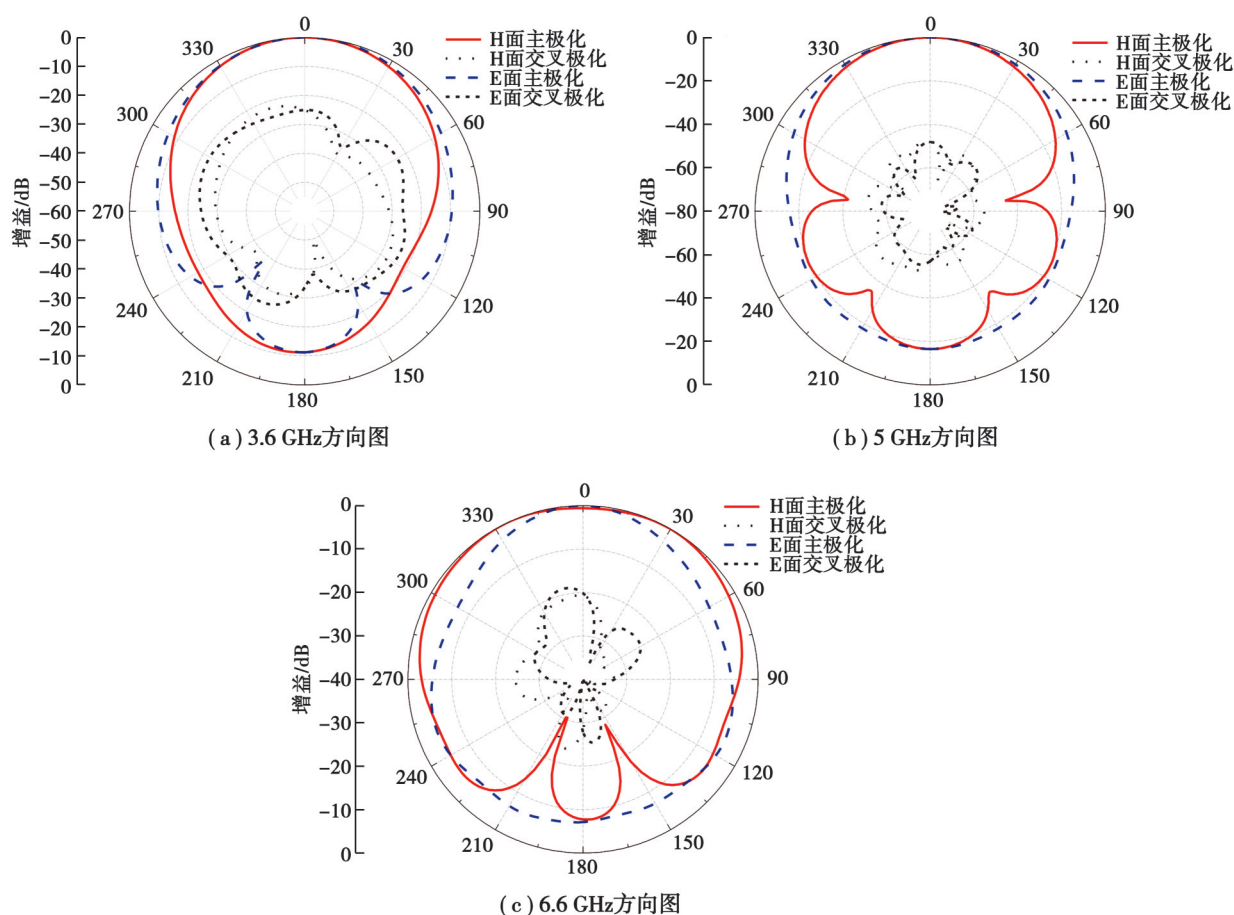


图12 天线在不同频段的方向图

Fig. 12 Patterns of antennas in different frequency bands

2.4 文献对比

通过将本设计与已有文献中的贴片天线进行尺寸、阻抗带宽和增益等关键性能参数的对比(如表2所示)。文献[11]的带宽比本设计大12.21%,但是其单元增益仅有2.4 dBi;文献[12]的尺寸比本设计略大,但其带宽只有38%;文献[13]和文献[20]中的设计相较于本设计较小,但是文献[13]中的带宽分别只有38%和27.7%,文献[20]的带宽更小,只有3.14%;文献[21-23]的长宽均大于一个波长,虽然文献[21]的带宽和增益效

果较好,但是其尺寸接近本设计的 2 倍。综合以上文献对比,本设计的尺寸为 $0.83\lambda_0\times0.83\lambda_0\times0.083\lambda_0$,仍然保持在紧凑范围内,且阻抗带宽达到了 60%,峰值增益达到 9.8 dBi,在同类型天线设计性能较为理想,有较强的竞争力。

表 2 提出设计与类似设计的参数对比
Table 2 Propose a comparison of the parameters of the design with similar designs

参考文献	尺寸/ λ_0^3	阻抗带宽/%	增益/dBi
文献[11]	$1.5\times1\times0.043$	72.1	2.4
文献[12]	$1\times1\times0.193$	38.0	9.0
文献[13]	$0.6\times0.6\times0.12$	27.7	8.4
文献[20]	$0.76\times0.63\times0.02$	3.14	7.6
文献[21]	$1.68\times1.68\times0.054$	58.6	12.1
文献[22]	$1.86\times1.86\times0.124$	39.6	9.9
文献[23]	$1.39\times1.08\times0.07$	27.6	6.8
本设计	$0.83\times0.83\times0.083$	60.0	9.8

2.5 阵列分析

为进一步提升天线的方向性与增益性能,在单元天线的基础上构建了 2×2 面阵结构。将 4 个单元按照一定间距排列组成阵列,通过阵列配置,增强整体辐射强度和主瓣增益,还可以在保持宽带特性的同时改善方向图的波束宽度和指向性,使其更适应高增益、指向性强的场景。考虑到阵元之间的耦合效应以及抑制栅瓣,阵元之间的间距设为 $0.63\lambda_0$,阵列示意,如图 13 所示。

阵列的 $|S_{11}|$ 仿真结果如图 14 所示,阵列在 3.6~6.6 GHz 频段内 $|S_{11}|$ 均低于 -10 dB,阻抗带宽达到 60%,与天线单元相比并没有恶化。

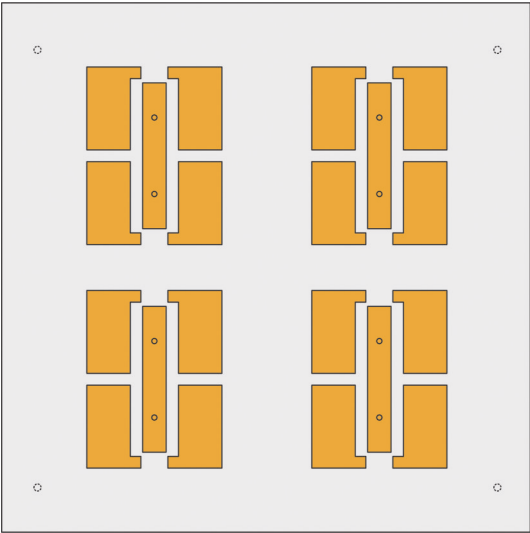


图 13 2×2 阵列图
Fig. 13 A 2×2 array diagram

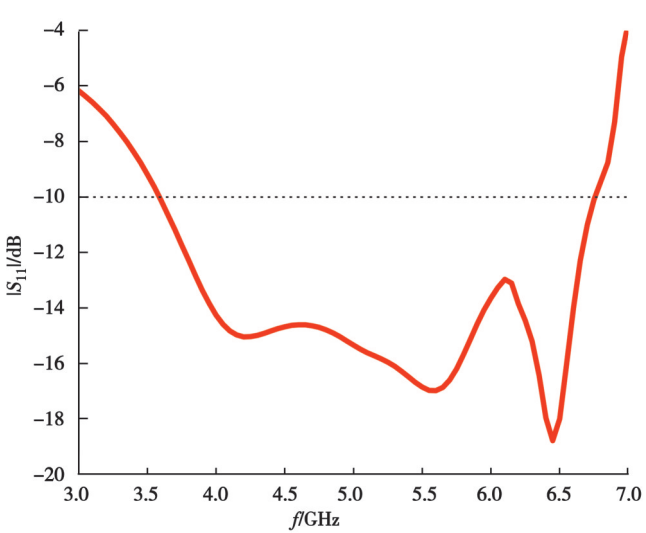


图 14 阵列 $|S_{11}|$ 仿真图
Fig. 14 Array $|S_{11}|$ simulation diagram

图 15 为阵列天线在不同频点的辐射方向图。由于阵元之间的间距是根据 5 GHz 对应的波长计算的,在 3.6 GHz 时阵元之间的间距相对减小,阵列方向图与单元相比稍微提升了方向性。在 5 GHz 时,H 面与 E 面没有明显的副瓣干扰,交叉极化相较于低频进一步降至 -60 dB 左右,方向图呈现明显的阵列叠加效果。

图 15(c)为阵列天线在 6.6 GHz 处的方向图,主瓣指向性依旧良好,副瓣水平略微提升,但并没有出现主瓣畸变的问题,这种现象出现的原因是,阵列之间的间距是按照 5 GHz 所对应的波长计算的,在 6.6 GHz 时阵元之间的间距相对较大,阵元之间的耦合没有达到最佳状态。

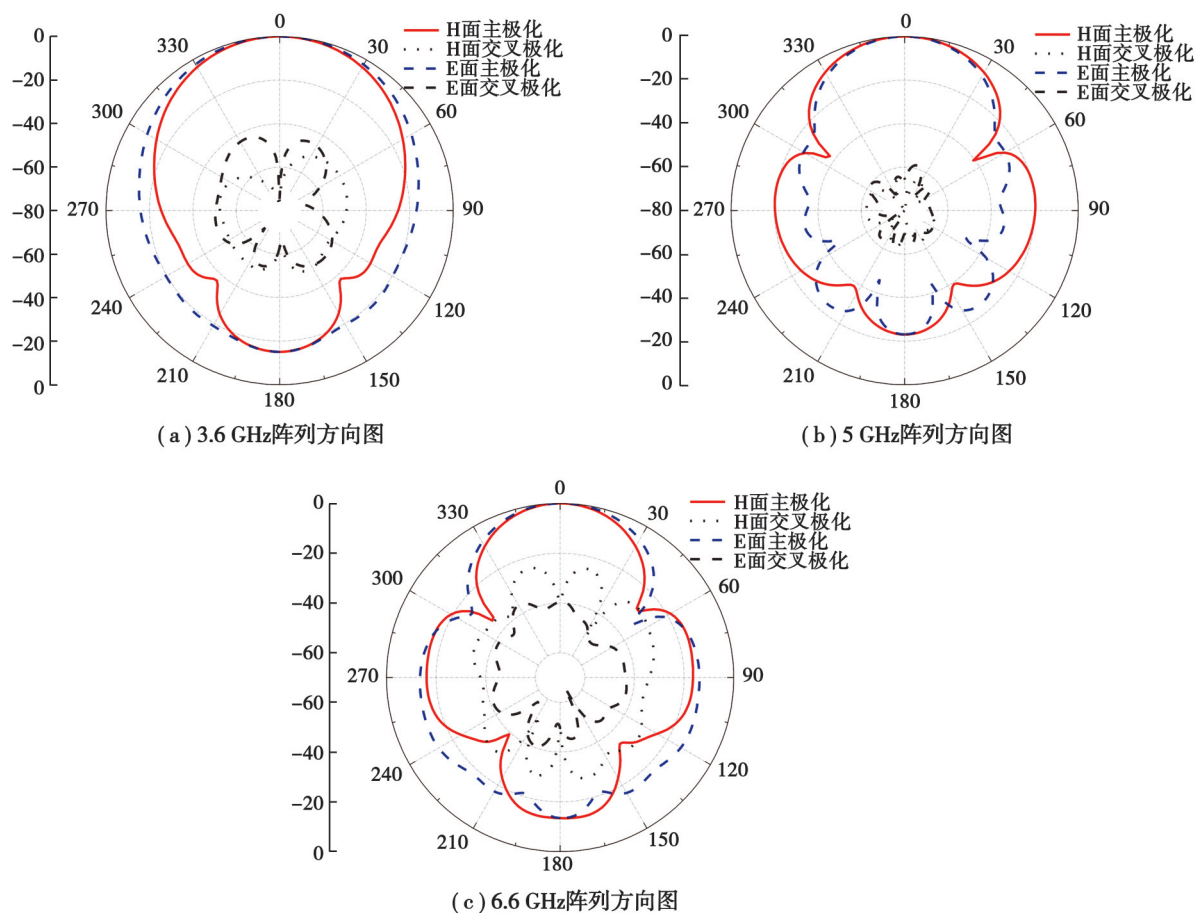


图 15 阵列天线在不同频点的方向图

Fig. 15 Pattern of array antennas at different frequencies

相对于单天线单元,阵列天线通过空间合成辐射功率,提升天线整体的增益。理论上 N 个阵元的最大增益如公式(5)所示,将 N 等于 4 代入公式得到阵列的理论最大增益为 6 dB。图 16 为阵列增益曲线,低频处增益只提升了 4 dB 左右,随着频率的增加,增益的提升效果逐渐变好,并在 6.4 GHz 左右达到峰值增益 16.7 dBi,相较于单元提升了接近 7 dB。增益提升大于理论最大提升值的原因是频率升高时波长变短,在阵列结构没有发生变化时,等效电长度变大,阵列的主瓣进一步收敛使指向性增强,导致了这种现象的出现。 G_{add} 为阵列相对于单元增加的增益, N 为面阵中单元总数。

$$G_{\text{add}} = 10 \cdot \log_{10}(N) \quad (5)$$

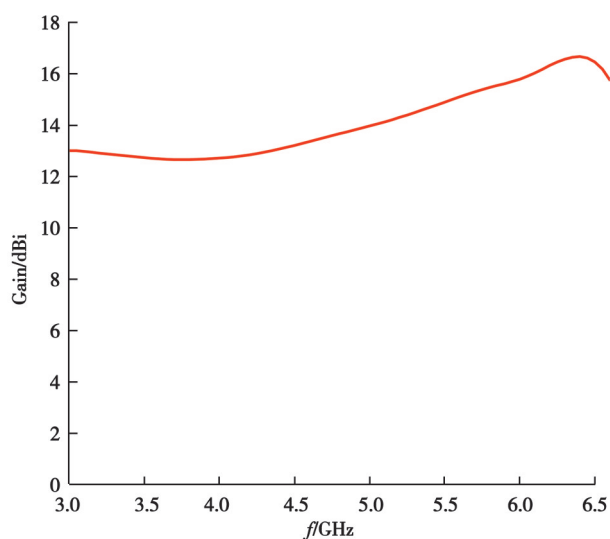


图 16 阵列增益频率关系图

Fig. 16 Array gain frequency plot

3 结 论

研究设计了一种紧凑型宽频带微带贴片天线结构。该天线通过在主辐射贴片周围引入L型寄生结构,有效激发多个谐振点拓展工作带宽,并采用差分馈电方式改善方向图对称性及交叉极化水平。最终天线整体尺寸保持在 $0.83\lambda_0 \times 0.83\lambda_0 \times 0.083\lambda_0$ 。结果表明天线在3.6~6.6 GHz范围内实现了60%的相对带宽,远超传统微带贴片天线的典型带宽。天线在6.2 GHz处达到峰值增益9.8 dBi,且在整个工作频段内增益波动小,交叉极化抑制能力优良,方向图稳定,主瓣指向偏差小于 5° 。这些性能验证了所提结构在宽带、高增益和低交叉极化方面的综合优势。

本研究在不增加天线层数和加工复杂度的前提下,通过单层寄生结构与差分馈电联合设计,实现宽频带高性能微带天线的可行性。该天线方案适用于5G、Wi-Fi等对性能指标要求严格的无线通信系统,具备良好的工程实用性。

参考文献

- [1] Fang D G. Antenna theory and microstrip antennas[M]. Boca Raton: CRC press, 2017.
- [2] Khan M U, Sharawi M S, Mittra R. Microstrip patch antenna miniaturisation techniques: a review[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, 9(9): 913-922.
- [3] Abirami M. A review of patch antenna design for 5G[C]//2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE). Karur, India: IEEE, 2017: 1-3.
- [4] 郭萌萌. 基于间隙波导馈电毫米波阵列天线研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
Guo M M. Research on millimeter wave array antenna based on gap waveguide feeding network[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [5] Ghazaoui Y, El Alami A, El Ghzaoui M, et al. Millimeter wave antenna with enhanced bandwidth for 5G wireless application[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(01): T01003.
- [6] 王维婧. 基于透明材料的毫米波和Sub-6 GHz天线设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
Wang W J. Millimeter wave and sub-6 GHz antenna designs based on transparent materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [7] 王丽黎, 张智欢, 陈俊池. 一种加载超表面结构的宽带天线设计[J]. 微波学报, 2022, 38(2): 44-47.
Wang L L, Zhang Z H, Chen J C. A wideband antenna by loading metasurface structure[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(2): 44-47. (in Chinese)
- [8] Khan A, He Y, Chen Z N. An eight-port circularly polarized wideband MIMO antenna based on a metamaterial-inspired element for 5G mmWave applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(7): 1572-1576.
- [9] Chen J, Berg M, Rasilainen K, et al. Broadband cross-slotted patch antenna for 5G millimeter-wave applications based on characteristic mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(12): 11277-11292.
- [10] Hussain S, Qu S W, Zhou W L, et al. Design and fabrication of wideband dual-polarized dipole array for 5G wireless systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 65155-65163.
- [11] 武风波, 杨财正, 王树奇. 毫米波超宽带阵列天线设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(23): 168-172.
Wu F B, Yang C Z, Wang S Q. Design of ultra-wideband millimeter wave array antenna[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(23): 168-172. (in Chinese)
- [12] 王安义, 叶竹辉, 李旭虹, 等. C波段超宽带双极化微带贴片天线的设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(05): 1871-1876.
Wang A Y, Ye Z H, Li X H, et al. Design of C-band ultra-wideband dual-polarized microstrip patch antenna[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(05): 1871-1876. (in Chinese)
- [13] 苏晋荣, 王嘉勇, 药春晖, 等. 基于人工磁导体的低剖面高增益宽带天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(01): 33-40.
Su J R, Wang J Y, Yao C H, et al. A low-profile high-gain broadband antenna based on AMC[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(01): 33-40. (in Chinese)

- [14] Nel B A P, Skrivervik A K, Gustafsson M. Q-factor bounds for microstrip patch antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(4): 3430-3440.
- [15] Gonzalo R, De Maagt P, Sorolla M. Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates[J]. IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2131-2138.
- [16] Wi S H, Lee Y S, Yook J G. Wideband microstrip patch antenna with U-shaped parasitic elements[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2007, 55(4): 1196-1199.
- [17] Radavaram S, Pour M. Wideband radiation reconfigurable microstrip patch antenna loaded with two inverted U-slots[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 67(3): 1501-1508.
- [18] Nie N S, Yang X S, Chen Z N, et al. A low-profile wideband hybrid metasurface antenna array for 5G and WiFi systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 68(2): 665-671.
- [19] Zames G. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(2): 301-320.
- [20] Ripin N, Awang R A, Sulaiman A A, et al. Rectangular microstrip patch antenna with EBG structure[C]//2012 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). Pulau Pinang: IEEE, 2012: 266-271.
- [21] de Dieu Ntawangaheza J, Sun L, Yang C, et al. Thin-profile wideband and high-gain microstrip patch antenna on a modified AMC[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(12): 2518-2522.
- [22] Kashani M, Shafai L, Isleifson D. Performance improvement of a microstrip patch antenna on an EBG structure[C]//2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 143-144.
- [23] Wu T, Chen J, Wu P F. Multi-mode high-gain antenna array loaded with high impedance surface[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147070-147076.

(编辑 侯 湘)