

文章编号 1672-6634(2024)05-0060-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024030013

一种新型共面波导馈电 Ku 波段 准八木贴片天线的设计

李沅昊¹, 牛慧娟^{1,2}, 陈庆涛³, 位健¹, 段晓峰⁴, 刘凯⁴, 黄永清⁴

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城大学 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059; 3. 蒙特利尔综合理工学院 电气工程系, Poly-Grames 研究中心, 加拿大 蒙特利尔 H3T1J4; 4. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 本文设计了一种中心频率为 15 GHz、基于共面波导结构的 Ku 波段准八木“贴片”天线, 该天线结构相对简单、工作频段较宽并且具有较高的增益特性。该设计通过分析、添加并且优化寄生竖向“贴片”的方式实现特定频率范围内电感或电容的改变, 从而达到提高天线带宽的目的。研究还表明: 在两侧竖向“贴片”的两端添加横向“贴片”, 通过调整横向“贴片”的方向, 以及改变寄生贴片的参数, 可以进一步地提高天线带宽。本设计提出的准八木“贴片”天线的工作频段比初始天线相对带宽提高了 13.3%, 工作频带内峰值增益达到 8.3 dBi, 平均增益达到 7.5 dBi, 工作频带内平均效率为 75%。该新型天线可广泛应用于无线通信系统中, 并可用作阵列元为设计相控阵、有源阵列以及毫米波成像阵列提供支持。

关键词 共面波导馈电; Ku 波段; 准八木天线; 寄生“贴片”; 相对带宽

中图分类号 TN822

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Design of a Novel Coplanar Waveguide Fed Ku-Band Quasi-Yagi Patch Antenna

LI Yuanhao¹, NIU Huijuan^{1,2}, CHEN Qingtao³, WEI Jian¹,
DUAN Xiaofeng⁴, LIU Kai⁴, HUANG Yongqing⁴

(1. School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 3. Department of Electrical Engineering, Poly-Grames Research Center, Polytechnique Montréal, Montreal H3T1J4, Canada; 4. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract This paper designs a Ku-band quasi-Yagi “patch” antenna, which is based on a coplanar waveguide structure, with a center frequency of 15 GHz. This antenna has a relatively simple structure

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(62374020); 山东省自然科学基金项目(ZR2022MF305, ZR2022MF253, ZR2021MF053, ZR2021MF070); 信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金项目(IPOC2021B07); 山东省高校 2021 年青年引进与培养计划; 科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC2570); 教育部产学协同育人项目(220605160271242, 221002802140950, 220906093200103)资助

通信作者: 牛慧娟, 女, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 新型高速大功率光探测器、微纳结构光电器件、毫米波天线, E-mail: supernhj@lcu.edu.cn.

with a wide operating frequency band and high gain characteristics. This design achieves the change of inductance or capacitance within a specific frequency range by analyzing, adding and optimizing the vertical parasitic “patches”, thereby achieving the purpose of improving the antenna bandwidth. This design also shows that by adding horizontal “patches” at both ends of the vertical “patches” on both sides, the antenna bandwidth can be further improved by adjusting the direction of the horizontal “patches” and changing the parameters of the parasitic “patches”. The working frequency band of the quasi-Yagi “patch” antenna proposed in this design is 13.3% higher than the relative bandwidth of the initial antenna. The peak gain in the working frequency band reaches 8.3 dBi, while the average gain reaches 7.5 dBi and the average efficiency is 75%. The new designed antenna can be widely used in wireless communication systems and can be used as an array element to support the design of phased arrays, active arrays and millimeter-wave imaging arrays.

Key words coplanar waveguide fed; Ku band; Quasi-Yagi antenna; parasitic “patches”; relative bandwidth

0 引言

微波频谱覆盖了 300 MHz 到 300 GHz 的频率范围,在无线通信系统、雷达科技以及无线电频谱监测等领域被广泛应用。Ku 波段作为微波频段的一部分,其频谱范围通常在 12 GHz 到 18 GHz 之间。该频段对降雨衰减的抵抗性和大气干扰的容忍性较强,因其具有较高的传输速率和较低的传输延迟,因此被广泛应用于无线通信中,并且在卫星通信领域扮演着重要角色^[1]。但是,为了实现特定区域的卫星通信和局部探测,以及通信质量的高效、稳定以及可靠性,特定 Ku 波段的定向天线便走向人们的视野并越来越受到大家的青睐。近些年来,一些定向天线已被广泛应用在无线通信与无线接入网等系统中,如使用喇叭天线等^[2]。贴片天线已被证明是定向天线的基本天线,但其存在增益较低等缺点,因此除了优化天线本身外,还可以使用阵列天线和超材料等结构增加其增益^[3,4]。

如今,已有多种类型的贴片天线可以实现高带宽和高增益特性,比如八木天线,作为一款具有高增益和高带宽的天线,由于其结构简单而受到广泛关注。但是,传统的八木天线由于体积较大,不适用于移动通信设备中并且也不易与电子设备集成^[5]。相比于传统的八木天线,准八木天线作为一种平面天线由于其体积小,易集成等优点^[6],被广泛应用在无线通信系统中,并且可以通过优化馈电网络等方式进一步提高天线的增益和带宽。文献[7]通过使用一种巴伦馈电的方式,使天线的相对带宽达到 38%,并且最大增益达到 6.7 dBi。文献[8]使用了一种简单的共面波导(Coplanar waveguide, CPW)馈电,这种馈电方式实现了 CPW 结构往共面带线(Coplanar strip, CPS)结构的转换,因此不需要设计额外的平衡器,极大的简化了馈电网络。文献[9]省略了额外的馈电网络,转而采用共线天线作为驱动部分,并采用一些共线寄生效应条,使在较窄的宽度下实现了 8.7 dBi 的峰值增益。文献[10]利用短载谐振器(SLR)和半波长谐振器作为馈电网络,成功实现了带宽为 19.1%的四阶滤波增益响应。

本文设计了一种新型、并具有小型化特性的用于 Ku 波段的紧凑型准八木天线,该天线通过设计并联合优化寄生和横向“贴片”(非贴片天线,以下如同,文中不再赘述)等实现了天线相对带宽、频带内峰值增益、平均增益以及工作效率等特性的改进,对进一步设计基于该天线的阵列器件提供了基础,有广泛的无线通信系统应用前景。

1 八木天线理论和结构

八木天线作为端射天线,它通常是由一个无源反射器、一个驱动元件(有源振子)以及若干引向器平行排列组成,该天线由日本东北大学的八木秀次和宇田太郎于 20 世纪 20 年代所发明,也被称为“八木宇田天

线”^[11]。在结构上,通常反射器位于驱动元件的后方,引向器位于驱动元件的前方,并依次排列^[12]。引向器所指的方向就是天线的主瓣方向。在尺寸上,驱动元件的长度一般为半波长,引向器一般为 0.45 倍的波长,反射器一般为 0.6 倍的波长^[13],引向器之间的长度为 0.1~0.2 倍的波长^[14]。本文所研究的准八木天线,其结构与八木天线类似,但是它主要由两部分组成:上半部是由驱动单元和引向器组成的辐射部分,而下半部则是天线的馈电网络部分。

天线使用 CPW 馈电,共面波导作为一种共面传输线,是由在介质基板的一个表面上制备的三条金属带构成。其中 CPW 馈电结构的等效介电常数和特征阻抗的大小为^[15]

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}, \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}, \quad (2)$$

式中 $k_0 = \frac{s}{s + 2w}$, $k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi s}{4h}\right)}{\sinh\left[\frac{\pi(s + 2w)}{4h}\right]}$, s 为信号线的宽度, w 为信号线与接地板间的缝隙, $k'_0 = \sqrt{1 - k_0^2}$,

$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}$, $k(k_0)$, $k(k'_0)$, $k(k_1)$, $k(k'_1)$ 为第一类完全椭圆积分函数和其补函数。由此看出,CPW 的特性阻抗是由信号线的宽度及信号线与接地板间的缝隙主导。

本文采用商用三维电磁场仿真软件进行仿真,并采用相对介电常数为 10.7、厚度为 0.69 mm 的 Rogers RT/duroid@6010LM 作为衬底。对于准八木天线结构,其有效波长为^[16]

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = 7.2, \quad (3)$$

其等效相对介电常数为^[17]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w}\right]^{-\frac{1}{2}} = 7.64, \quad (4)$$

式中 c 是自由空间中的光速 (3×10^8 m/s), f 是天线的中心频率 (15 GHz), ϵ_r 是介质基板的相对介电常数 (10.7), h 是介质基板的厚度 (0.69 mm), w 是微带线的宽度 ($w = L_2 = 1.3$ mm)。

本文使用微带偶极子进行驱动,由公式(2)可以得到其等效相对介电常数为 7.64。由于所设计天线的中心频率为 15 GHz,所以天线的有效波长 λ_g 由公式(1)计算为 7.2 mm,因此每个偶极子的长度为 $\lambda_g/4$,即为 1.8 mm。为了优化天线的带宽,此处假设偶极子的长度为 4 mm,利用 CPW 端口对天线进行阻抗匹配,可以得到 50Ω 的传输线宽度为 1.3 mm。初始天线 A 及优化天线 E 结构如图 1 所示。

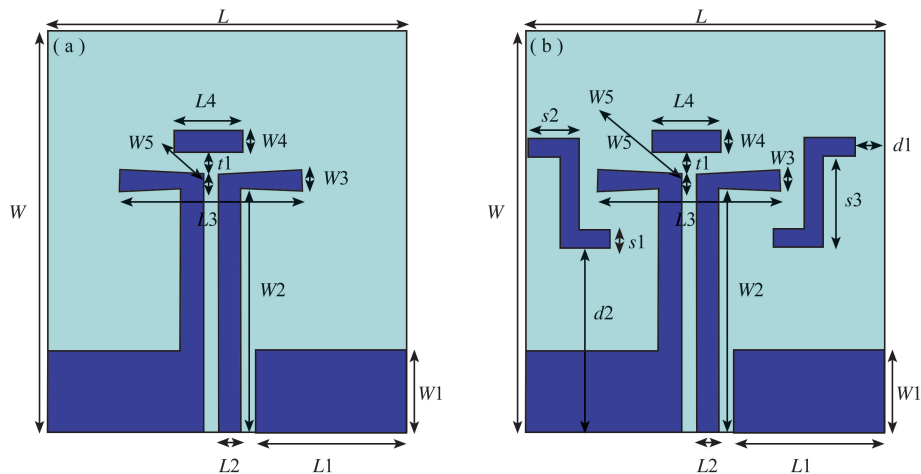


图 1 (a) 初始天线 A 结构图; (b) 优化天线 E 结构图

Fig. 1 (a) Schematics of the initial antenna; (b) The optimized antenna

为了提高天线的带宽,本设计通过添加寄生“贴片”的方式使其在特定的频率范围内提供附加的电感或电容。根据微带天线理论可知,在一般微带天线的振子附近添加寄生“贴片”,可以有效地将简单 RLC 电路修改为多谐振点的耦合谐振电路,通过适当调节寄生“贴片”的参数,经过不断的优化,使两个谐振点彼此靠近,从而展宽阻抗频带^[18,19]。同时通过调整寄生“贴片”的几何形状和尺寸,以调整电感效应来补偿天线的电容效应,这样可以改变天线的等效阻抗,并使其在更宽的频率范围内保持匹配。因此本设计在两侧竖向“贴片”的基础上又额外添加了两片横向“贴片”,并通过优化横向“贴片”的方向和排列方式,以及寄生“贴片”的位置达到最佳值,从而达到提高天线带宽的目的。优化后的最佳性能参数如表 1 所示。

表 1 天线结构参数优化

Table 1 The optimized parameters for antenna structures

Name	Unit/mm	Name	Unit/mm	Name	Unit/mm
L	19	$W1$	5.1	$s1$	0.8
$L1$	8.3	$W2$	14.5	$s2$	2.3
$L2$	1.3	$W3$	1.2	$s3$	4.8
$L3$	8.55	$W4$	1	$d1$	2.05
$L4$	3.05	$W5$	1	$d2$	11.4
W	24	$t1$	0.99	-	-

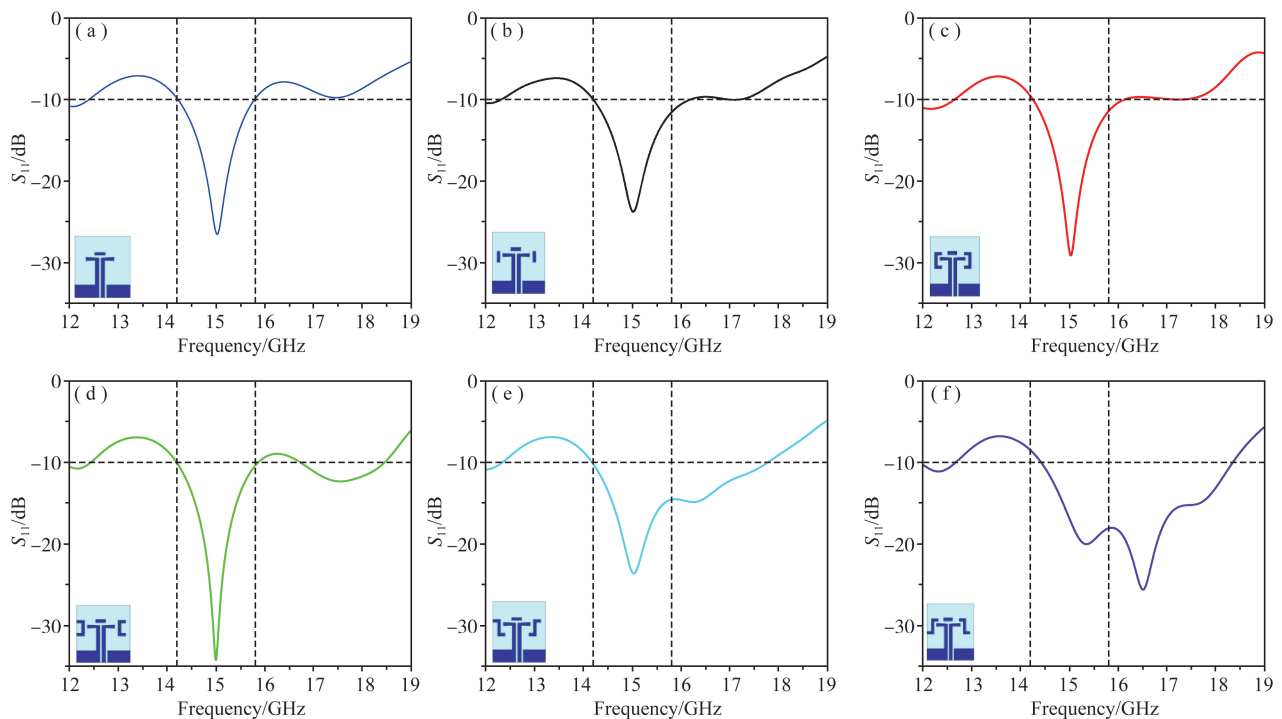


图 2 天线回波损耗及结构图: (a) 初始天线 A; (b) 添加竖向寄生“贴片”的天线 B; (c) 竖向寄生“贴片”两端添加横向“贴片”(方向朝内)的天线 C; (d) 竖向寄生贴片两端添加横向“贴片”(方向朝外)的天线 D; (e) 竖向寄生“贴片”两端横向贴片方向相异(顶部朝外,底部朝内)的天线 E; (f) 竖向寄生“贴片”两端横向“贴片”方向相异(顶部朝内,底部朝外)的天线 F

Fig. 2 Antenna return loss and structure diagram. (a) Initial antenna A; (b) Antenna with the added vertical parasitic “patches” B; (c) Antenna with the added horizontal “patches” (directed inward) at both ends of the vertical parasitic “patches” C; (d) Antenna with the added horizontal “patches” (direction facing outward) at both ends of the vertical parasitic “patches” D; (e) Antenna with different horizontal “patch” directions (top facing outward, bottom facing in) at both ends of the vertical parasitic “patch” E; (f) Antenna with different horizontal “patch” directions (top facing inward, bottom facing outward) at both ends of the vertical parasitic “patch” F

2 仿真结果及讨论

2.1 横向“贴片”方向对回波损耗的影响

图 2(a)为初始天线的回波损耗,从图中可以看出该天线的工作频段为 14.2~15.7 GHz, $S_{11} < -10$ dB 所对应的相对带宽为 10%。但是实际应用中需要带宽更宽的天线,例如在 RFID 系统中就需要更高的带宽来提高数据传输速率和识别范围^[20],因此需要进一步优化并获得带宽更高的八木天线。本设计通过在传统的八木天线中添加寄生“贴片”并且改变寄生“贴片”的形状,以此来改变附加的电容和电感达到提供更高带宽的目的。添加竖向“贴片”的天线结构如图 2(b)所示,仿真得到的回波损耗对应的带宽增大到 16.2 GHz, $S_{11} < -10$ dB 所对应的相对带宽为 13.3%,比初始天线的相对带宽增加了 3.3%,从而显示了寄生“贴片”的添加可以增加天线的相对带宽。

为了进一步探索寄生“贴片”对天线带宽的影响,本设计在加入竖向“贴片”两端分别添加了两个横向“贴片”[如图 2(c,d)所示],并通过调整横向“贴片”的方向和排列方式探索其对天线带宽的作用,仿真得到的回波损耗分别如图 2(c,d)。从图 2(c)可以看出,横向“贴片”朝向天线内侧时 $S_{11} < -10$ dB 的天线带宽为 14.2~16.1 GHz,其相对带宽为 12.7%,比初始天线提高了 2.7%。当横向“贴片”朝向天线外侧时[如图 2(d)所示], $S_{11} < -10$ dB 的天线带宽为两部分,分别为 14.2~15.9 GHz(相对带宽为 11.3%)以及 16.7~18.45 GHz。由此可见,横向寄生“贴片”朝向天线外侧时明显展宽了天线的带宽范围,这是由于经过“贴片”的电流方向所导致的。

基于上述现象,本设计调整了竖向寄生“贴片”两端横向“贴片”的方向,使同侧两端横向“贴片”的方向相异,并使两侧的竖向-横向“贴片”组合形成对称之势,如图 2(e,f)中的插图所示。从图 2(e)可以看出,天线的带宽明显出现了展宽的现象, $S_{11} < -10$ dB 的天线带宽为 14.2~17.7 GHz,其相对带宽为 23.3%,比初始天线提高了 13.3%。与图 2(e)不同的是天线的中心谐振频率在图 2(f)中发生了偏移,从 15 GHz 偏移到 16.5 GHz,天线的带宽范围明显出现了偏移。当 $S_{11} < -10$ dB 时,天线带宽为 14.4~18.4 GHz,其相对带宽为 24.2%,比初始天线增加了 14.2%。因此,横向“贴片”的方向会对天线带宽产生很大的影响,这是由于相反横向“贴片”产生的电流也是相反的,如图 3 所示,从而导致两个横向“贴片”的相互作用减弱,在改变天线电磁场分布的同时从而扩展天线带宽。

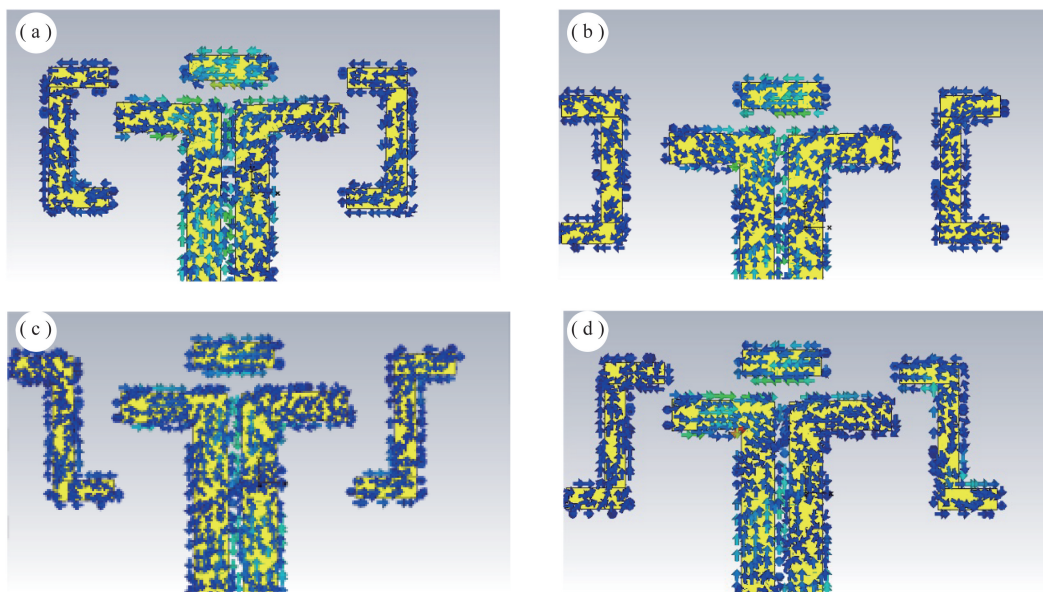


图 3 不同天线在 15 GHz 时的电流分布图: (a) 天线 C; (b) 天线 D; (c) 天线 E; (d) 天线 F

Fig. 3 Current distribution diagram of different antennas at 15 GHz: (a) Antenna C; (b) Antenna D; (c) Antenna E; (d) Antenna F

2.2 横向“贴片”方向对增益和效率的影响

天线的增益与频率的关系如图 4(a)所示,从图中可以发现当 $S_{11} < -10$ dB 所对应的带宽范围内,除了 F 天线,其它天线的增益均大于 6.5 dBi。同时,F 天线的增益在 15.4 GHz 时急剧下降。为了平衡带宽和增益,设计主要采用 E 天线的结构作进一步的分析。此时,从图 4(a)还可以观察到 E 天线 $S_{11} < -10$ dB 的带宽从 14.2~17.7 GHz 所对应的增益为 6.7~8.3 dBi。在 14.2 GHz 时,最大增益为 8.3 dBi,并且在天线工作频段内获得了 7.5 dBi 的平均值。此外,初始天线 $S_{11} < -10$ dB 的带宽为 14.2~15.7 GHz,对应的增益为 8.15~8.23 dBi,平均增益为 8.19 dBi,与初始天线相比,E 天线的平均增益大约降低了 0.69 dBi 左右。

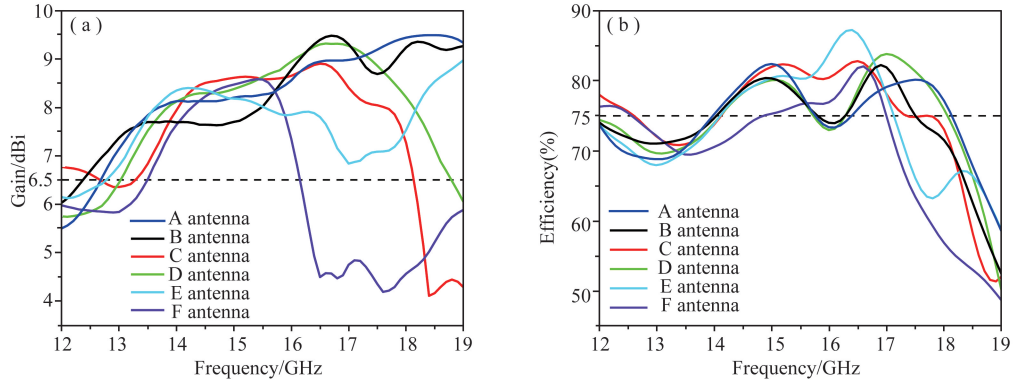


图 4 (a) 初始天线及优化天线的增益曲线图;(b) 初始天线及优化天线的效率曲线图

Fig. 4 (a) Gain curves of the initial antenna and the optimized antennas; (b) Efficiency curves of the initial antenna and the optimized antennas

本设计还研究了横向“贴片”对天线效率的影响如图 4(b)所示,在考虑天线的损耗以及匹配等问题之后,E 天线效率相比于其他方向的天线效率有明显的提高,其中在 16.4 GHz 处获得了最大效率为 87%,在工作频段内的平均效率达到了 75%左右。此外,所有天线的效率在带宽为 12~17 GHz 范围内均大于 67%。

2.3 寄生“贴片”参数对天线性能的影响

如前所述,横向“贴片”方向的不同,会对天线的带宽、增益和效率等参数产生一定的影响。在天线基本参数不变的情况下,调节 d_1 得到的天线回波损耗、增益和效率如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,随着 d_1 的增加,天线的相对带宽基本保持不变,仅有一点减小的趋势,同时天线的 S_{11} 数值在右侧谐振点处有逐步变小的趋势,这说明了适当增加寄生“贴片”的横向距离在一定程度上会影响天线的回波损耗。

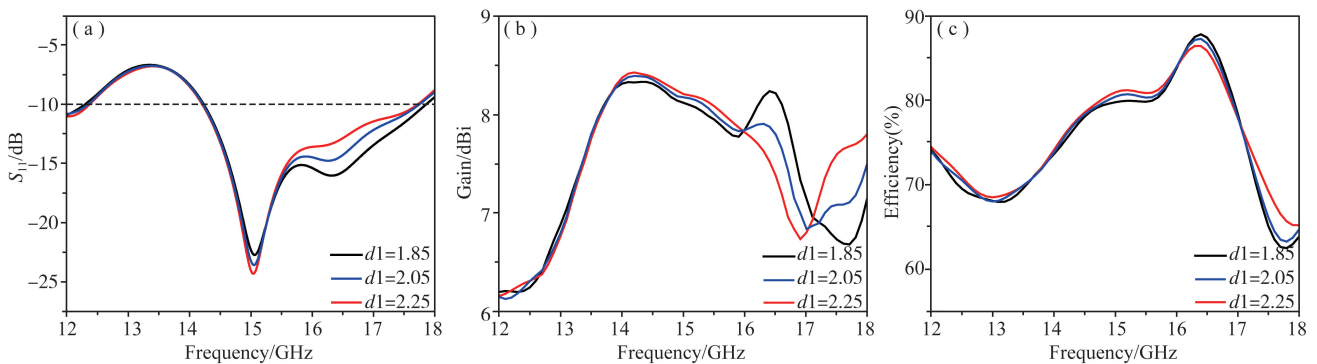


图 5 d_1 对天线性能参数的影响:(a) 回波损耗;(b) 增益;(c) 效率

Fig. 5 The effect of d_1 on antenna performance parameters: (a) Return loss; (b) Gain; (c) Efficiency

图 5(b,c)分别对应了调节 d_1 对天线的增益和效率的影响。从图 5(b)可以看出,天线增益在 14 GHz 时有些许变化,但是在 16 GHz 时存在迅速变小的趋势;而天线效率[图 5(c)]在 15 GHz 时有增加趋势,但是在 16.5 GHz 时有减小的趋势。因此,可以通过结合优化其它参数一起达到优化天线的相对带宽、谐振

点、增益以及效率的目的。

为此,可以保持 d_1 不变,继续观察 d_2 的变化对天线性能的影响,仿真结果如图(6)所示。从图 6(a)可以发现,通过调节 d_2 可以使天线的带宽和谐振点的大小发生变化,即减小 d_2 ,左侧谐振点处所对应的 S_{11} 数值变小,但是右侧谐振点的 S_{11} 数值呈逐步增大的趋势,同时天线的增益[图 6(b)]和效率[图 6(c)]也随之发生变化,因此要达到天线的最佳性能,需要平衡 d_1 和 d_2 的取值。

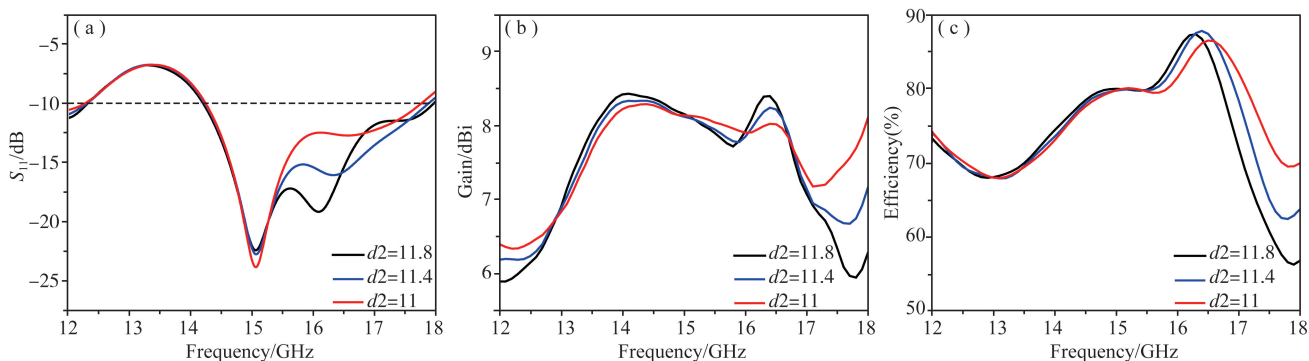


图 6 d_2 对天线性能参数的影响: (a) 回波损耗; (b) 增益; (c) 效率

Fig. 6 The effect of d_2 on antenna performance parameters (a) Return loss; (b) Gain; (c) Efficiency

所设计天线在 15、16 和 17 GHz 时的 E 平面和 H 平面方向图如图 7 所示,图中可以看出 15 GHz 时,天线此时最大增益为 8.18 dBi,最大辐射方向为 89° ,天线在 16 GHz 时,天线此时最大增益为 7.6 dBi,最大辐射方向为 90° ,天线在 17 GHz 时,天线此时最大增益为 6.5 dBi,最大辐射方向为 92° 。由此看出天线有良好的辐射特性,并且所设计的天线有良好的定向性。本设计中由于天线采用了 CPW 结构到 CPS 结构的过渡,并且该结构中馈线较长,同时改变了馈电结构的对称性,因此导致天线辐射方向图的对称性发生了变化。

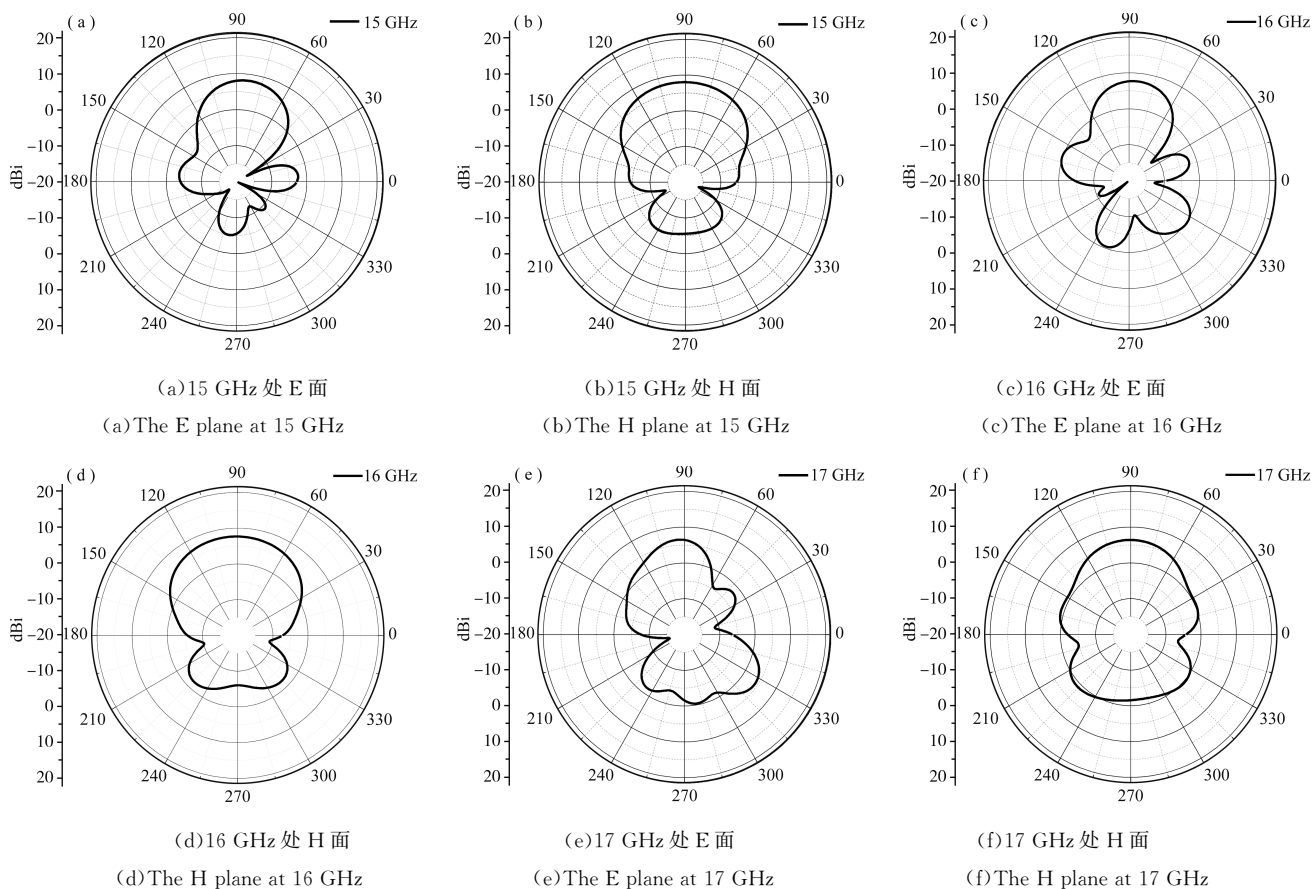


图 7 天线在 15、16 和 17 GHz 时的方向图

Fig. 7 The directional patterns of the antenna at 15, 16 and 17 GHz

3 结论

本研究提出了一种使用 CPW 馈电的 Ku 波段宽带准八木天线。通过添加寄生“贴片”并改变其形状、方向等方法应用于初始天线结构,提出了高性能准八木“贴片”天线,获得了 23.3% 的相对带宽,并在有效频带内获得了 7.5 dBi 的平均增益。与初始天线相比,该天线的相对带宽提高了 13.3%,同时,经过优化后的 F 天线其相对带宽提高了 14.2%,但是其中心频率发生了偏移,增益在 15.4 GHz 处出现迅速下降的趋势。该设计指明了寄生“贴片”对八木天线性能的影响,并为其进一步的无线通信工程应用提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 王浩,史小卫,刘淑芳,等. 一种宽频高增益的 Ku 波段微带天线设计[J]. 微波学报, 2012, 28(5): 44-47.
- [2] BHOWMIK W, SRIVASTAVA S. Design of substrate integrated folded waveguide h-plane horn antenna array with simultaneous omnidirectional and directional radiation characteristics[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2022, 107: 141-154.
- [3] JHA K R, SINGH G. Microstrip patch array antenna on photonic crystal substrate at terahertz frequency[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(1): 32-39.
- [4] SERRIA E A, HUSSEIN M I. Implications of metamaterial on ultra-wide band microstrip antenna performance[J]. Crystals, 2020, 10(8): 677.
- [5] 陈明,朱先成. 基于八木天线的双频带微带天线[J]. 西安邮电大学学报, 2016, 21(1): 72-75.
- [6] BOUKARKAR A, BOUDRA F, GUERMOUA O. Miniaturized bandwidth reconfigurable Yagi-Uda antenna for wireless applications[J]. IETE Journal of Research, 2022: 1-8.
- [7] 王金洪,延波,王志刚. Ka 波段超宽带准八木天线[C]. // 2009 年全国微波毫米波会议论文集(上册), 西安:电子工业出版社, 2009.
- [8] KAN H K, WATERHOUSE R B, ABBOSH A M, et al. Simple broadband planar CPW-fed quasi-Yagi antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 18-20.
- [9] LINGLONG M, WEIMIN W, RUI J, et al. A novel wideband planar quasi-Yagi antenna loading with parasitical patches and multiple reflectors[J]. IEICE Electronics Express, 2017, 14(16): 20170681-20170681.
- [10] YUAN H, CHEN F. A high selectivity planar filtering quasi-Yagi antenna[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2022, 32.
- [11] 常媛媛. 八木天线的设计仿真与测试[D]. 北京:北京交通大学, 2006.
- [12] SETHI W T, DE SAGAZAN O, VETTIKALLADI H, et al. Yagi-Uda nantenna for 1 550 nanometers optical communication systems[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(9): 2236-2242.
- [13] HSU S S, WEI K C, HSU C Y, et al. A 60 GHz millimeter-wave CPW-fed Yagi antenna fabricated by using 0.18 μm cmos technology[J]. IEEE Electron Device Letters, 2008, 29(6): 625-627.
- [14] KAN H K, ABBOSH A M, WATERHOUSE R B, et al. Compact broadband coplanar waveguide-fed curved quasi-Yagi antenna[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2007, 1(3): 572-574.
- [15] 白玉. 共面波导馈电的多陷波超宽带天线的设计与测试[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2014.
- [16] HAQUE M A, ZAKARIYA M A, SINGH N S S, et al. Parametric study of a dual-band quasi-Yagi antenna for LTE application[J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2023, 12(3): 1513-1522.
- [17] POORGHOLAM-KHANJARI S, ZARRABI F B, JARCHI S. Compact and wide-band quasi Yagi-Uda antenna based on periodic grating ground and coupling method in terahertz regime[J]. Optik, 2020, 203: 163990.
- [18] 商锋,李晓娇. 一种宽带微带八木天线的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(3): 445-447.
- [19] CHEN C. A compact wideband endfire filtering antenna inspired by a uniplanar microstrip antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 853-857.
- [20] BAE S W, LEE W, CHANG K, et al. A small RFID tag antenna with bandwidth-enhanced characteristics and a simple feeding structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(8): 2027-2031.

(责任编辑:赵海军)