文章编号:1005-6122(2023)04-0018-05

**DOI**:10. 14183/j. cnki. 1005-6122. 202304005

# 一种宽频带方形槽圆极化天线设计

#### 曹振华1 刘雯雯2 张秀平1

(1. 新开普电子股份有限公司,郑州 450001; 2. 郑州大学 力学与安全工程学院,郑州 450001)

摘 要: 文中提出了一种加载微扰元素的新型宽频带圆极化方形槽天线,它由一个倒L型微带馈电线、一个L型核节、一对矩形槽和一个方形槽地板组成。用这些缝隙槽和枝节作为微扰元素来调节天线表面电流分布,可以激发出多个圆极化谐振模式,从而实现了宽频带圆极化辐射。为了验证其合理性,加工并测试了天线模型。测量结果表明,实测小于-10 dB的阻抗带宽为 74.9%,小于 3 dB 的轴比带宽为 84.7%。此外,测量和仿真的峰值增益分别为 4.88 dBi 和 4.86 dBi。因此,文中设计的圆极化方形槽天线具有宽的圆极化带宽特性。

关键词: 宽带天线,圆极化天线,方形槽接地板

## Design of a Broadband Square-slot Circularly Polarized Antenna

#### CAO Zheng-hua<sup>1</sup>, LIU Wen-wen<sup>2</sup>, ZHANG Xiu-ping<sup>1</sup>

(1. New Cape Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 2. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The antenna is consisted of an inverted L-shaped feeding line, an L-shaped strip, a pair of rectangular slots and a square-slot ground. The numerous circular polarization resonant modes are excited simultaneously using these slots and patches as perturbation elements to change the surface current distribution. To verify this rationality, an antenna prototype is printed and manufactured. The measured results indicate the -10dB impedance bandwidth (IBW) is 74.9% and 3 dB axial ratio bandwidth (ARBW) is 84.7%. Furthermore, the measured peak gain is 4.88 dBi, and the simulated peak gain is 4.86 dBi. Therefore, the presented antenna features wide circular polarization bandwidth (CPBW).

Key words: broadband antenna, circularly polarized antenna, square-slot ground

# 引 言

圆极化天线具有减轻多径干扰和改善极化失配 的显著优势,在卫星导航、射频识别和无线局域网等 多种通信系统中日益受到青睐。缝隙天线具有低成 本、宽带和低剖面等突出特点,近年来,人们研究了 多种不同变形槽地板的圆极化缝隙天线<sup>[1-20]</sup>。首 先,在基板两侧分别蚀刻一个方形槽接地板和一条 改进的微带线,然后,在方形槽接地板中引入一些寄 生枝节/槽,就可以设计出各种具有宽带特性的圆极 化槽天线<sup>[1-10]</sup>。例如,文献[1]在方形槽接地板中 蚀刻一对螺旋槽并插入一个 T 型枝节,设计出了一 种具有 56% 3 dB 轴比带宽的圆极化缝隙天线。类 似地,将方形贴片<sup>[2]</sup>、倒 L 型枝节<sup>[3]</sup>、I 型枝节<sup>[4]</sup>、两 个大小不等的倒 L 型枝节<sup>[5]</sup>、一个弧形枝节<sup>[6]</sup>、凸 出枝节<sup>[7]</sup>和两个螺旋缝隙槽<sup>[8]</sup>分别蚀刻到方形槽 接地板中形成的圆极化缝隙天线可以实现 6%、 25%、30%、48.8%、18.8%、52%和 56%的 3 dB 轴比 带宽。由于这些缝隙槽和枝节可以成为微扰元素以 激发更多的圆极化谐振模式,因而展宽了圆极化缝 隙天线的带宽。

此外,堆叠技术也是一种增加圆极化天线带宽的有效方法。基于两层堆叠的介质基板,作为寄生 元件的各种枝节和贴片被放置在上层基板的底 层<sup>[9-12]</sup>。文献[9]提出了一个加载寄生圆形贴片的 宽频带圆极化缝隙天线,寄生圆形贴片被用来激励 额外圆极化谐振模式。相似地,作为寄生元素的方 形贴片<sup>[10]</sup>、U型枝节<sup>[11]</sup>和方形环<sup>[12]</sup>相应地置于缝 隙天线的上层,从而获得45%、56%和37.1%的 3 dB轴比带宽。然而,由于两个介质基板之间存 在空气,堆叠结构无疑增加了圆极化缝隙天线的剖面。因此,为了不增加圆极化天线的剖面,一些枝节和缝隙槽<sup>[13-22]</sup>作为寄生枝节被蚀刻进接地板中以产生一个新的圆极化谐振点。例如,在槽地板中插入矩形槽和L型枝节<sup>[13]</sup>、L型枝节和螺旋槽<sup>[14]</sup>、垂直枝节和倒L型枝节<sup>[15]</sup>以及I型和Y型枝节<sup>[16]</sup>,分别实现了75.1%、54.2%、64.6%和41%的轴比带宽。

本文提出了一种加载微扰元素的新型宽频带圆 极化方形槽天线。天线结构由一个倒L型微带馈 电线、一个L型枝节、一对矩形槽和一个方形槽地 板组成。利用这些缝隙槽和枝节作为微扰元素来调 节天线表面电流分布,可以激发出多个圆极化谐振 模式,从而实现了宽频带圆极化辐射。为了验证设 计的合理性,加工并测试了天线模型。测量结果表 明,实测小于-10 dB 的阻抗带宽为 74.9%,小于 3 dB 的轴比带宽为 84.7%。此外,测量和仿真的峰值 增益分别为 4.88 dBi 和 4.86 dBi。因此,该设计具 有宽的圆极化带宽特性。

#### 1 天线结构与设计

圆极化方形槽天线的几何结构如图 1 所示。 在一块 FR4 基板( $\varepsilon_r$ =4.4,tan $\delta$ =0.02,h=1.8 mm)上 蚀刻制造了该天线。采用倒 L 型微带馈电线作为 50  $\Omega$ 馈电线来提高天线的阻抗带宽。天线由一条 倒 L 型微带馈电线( $L_a \times W_a, L_b \times W_b, L_c \times W_c$  和  $L_d \times W_d$ )、一对矩形槽( $L_1 \times W_1$  和  $L_2 \times W_2$ )、一个倒 L 型枝 节( $L_3 \times W_3$  和  $L_4 \times W_4$ )和方形槽接地板( $L \times W$ )组成。 需指出,除倒 L 型微带馈电被蚀刻在基板的上层 外,其余枝节和槽被蚀刻在基板的下层。用这些 枝节和槽来改变天线的表面电流分布以及引入 额外的电流路径,能同时激励多种圆极化谐振模 式。利用高频电磁仿真软件(HFSS)对所涉及的 圆极化天线进行了建模仿真。表 1 给出了优化 后的天线几何参数。



图 1 天线结构

	mm					
L	$L_{\rm a}$	$L_{ m b}$	$L_{\rm e}$	$L_{ m d}$	$L_1$	$L_2$
77.6	4	7	24.8	27.6	16.4	27.2
$L_3$	$L_4$	W	$W_{\rm a}$	$W_{ m b}$	W <sub>c</sub>	W <sub>d</sub>
14.5	18.0	52.4	2.6	0.4	4.4	10
$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$			
8	4	19.7	5			

#### 2 天线分析与讨论

图 2 绘制了四种渐变的天线模型,以便研究圆 极化方形槽天线的工作原理。这些天线模型如下: 基于倒 L 型馈电线, 天线 1 的接地板是一个简单的 方形槽结构:在天线1的接地板上引入一对矩形槽 构成了天线 2:相似地,在天线 1 的接地板上引入一 个倒L型枝节构成了天线3;在接地板中同时蚀刻 矩形槽和倒L型枝节就构成本文设计的天线。图3 (a)和(b)分别绘制了四种天线模型对应的回波损 耗和轴比值。如图所示,当接地板中仅蚀刻一个方 形槽时,天线1的回波损耗和轴比值均很差。当方 形槽地板蚀刻进一对矩形槽后,天线2的回波损耗 和轴比值均得到明显改善,且 4.8 GHz 附近出现一 个新的阻抗谐振点。然而当方形槽接地板单独蚀刻 一个倒L型枝节后,天线3的回波损耗值无明显变 化、轴比值变小。当方形槽接地板同时蚀刻进矩形 槽和倒L型枝节后,天线有较小的回波损耗和轴比 值,这是因为蚀刻的矩形槽和倒L型枝节能够增加天 线的电流路径。本文所提出的天线其小于-10 dB 阻 抗带宽为 70.8% (2.60~5.45 GHz), 小于 3 dB 的轴 比带宽为 87.5%(2.30~5.88 GHz)。



图 2 四种渐变的天线结构



为了研究圆极化方形槽天线的工作原理,图 4 绘制了 2.8GHz、3.1GHz 和 4.3 GHz 三个不同谐振频率下,天线沿着+z 方向的表面电流分布。如图所

示,天线上的表面电流主要集中在倒 L 型微带馈线 上,少量分布在矩形槽和倒 L 型枝节上。这些集中 在微扰元素上的表面电流有着不同的方向并且部分 正交。此外,在三个不同谐振频率下,总的矢量表面 电流在  $\varphi = 0^{\circ}$ 和  $\varphi = 90^{\circ}$ 处正交。如图 4 所示,总的 矢量表面电流在三个不同频率下随着不同相位(0° 和 90°)逆时针旋转,表明所提出的天线可以在+z 方 向的三个不同谐振频率下辐射右手圆极化波。利用 这三个圆极化谐振点,能够显著增强圆极化方形槽 天线的轴比带宽。



图 4 天线在三个不同频率谐振下的表面电流分布 (彩色图片参见本刊电子版)

为了研究作为微扰元素的缝隙槽和枝节对天线 的回波损耗值和轴比值的影响,本文使用了单一变 量法对天线结构进行了参数扫描和结果分析。这些 扫描参数包括矩形槽的长和宽(L,×W,),倒L型馈 电线的宽  $W_h$  以及倒 L 型枝节的长  $L_4$ 。这些参数对 应的回波损耗值和 AR 值分别绘制在图 5(a)~(d) 中。由图可见,矩形槽的长和宽(L,×W,)在整个频 带内对回波损耗带宽和轴比带宽均有影响;倒L型 馈电线的宽 W, 仅仅对阻抗带宽有影响, 而倒 L 型 枝节的长L<sub>4</sub>却仅对轴比带宽有显著影响。这一现 象与图3渐变结构的仿真结果有很好的一致性。这 就说明,倒L型枝节和矩形槽对天线在整个频段 的圆极化性能起关键作用。当 $L_2$ =27.2 mm、 $W_2$ =  $4.0 \text{ mm}_{L_4} = 18.0 \text{ mm} 和 W_b = 0.4 \text{ mm} 时, 天线的圆$ 极化带宽可以达到最佳。此外,表2给出了已发表 和本文设计的圆极化天线性能的比对结果,可以看 出,所设计的天线有更为简单的结构和更宽的圆极 化带宽。



天线	类型	微扰结构	-10 dB 阻抗带宽/(%)	3 dB 轴比带宽/(%)	1.5 dB 增益变化 范围内的圆极化 带宽/(%)	峰值增益/ dBi
[7]	单层	I型枝节+倒L型馈电线	101.3	52	< 52	8.6
[10]	双层	方形贴片+圆形槽+方形腔体	70	43.3	43.3	8.6
[12]	双层	方形环+圆形槽+矩形槽	60	56	56	4.4
[13]	单层	L型枝节+矩形槽	65	75.1	< 65	4.6
[14]	单层	螺旋槽+矩形槽+三角形贴片+ I 型枝节	92.7	54.2	< 54	4.5
[18]	单层	倒 U 型枝节+I 型枝节+共面波导馈电线	62	49	49	3.5
[21]	单层	Z型枝节+倒F馈电线+矩形槽+ I型槽+三角形切角	87.8	96	< 73	4.75
本文	单层	L型枝节+一对矩形槽	74.9	84.7	74.9	4.88

#### 3 试验结果

本文加工制作了优化的天线模型,并利用 Satimo Starlab 测试系统对其进行了测试,以验证天线模 型的合理性。图 6(a)~(b)绘制了模拟和测试的回 波损耗值和轴比值。测试结果表明,该天线具有 74.9%(2.54~5.58 GHz)的-10 dB阻抗带宽和 84.7%(2.35~5.80 GHz)的3 dB 轴比带宽。然而, 仿真的-10 dB 阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽分别为 70.8%(2.60~5.45 GHz)和87.5%(2.30~5.88 GHz)。 图7分别给出了随频率变化的天线仿真和测量增益 图以及测试照片。如图所示,测试和仿真的峰值增 益分别为 4.88 dBi 和 4.86 dBi,在 1.5dB 增益范围 内的圆极化带宽为 74.9%。所设计天线在 2.8 GHz 和4.3 GHz(E面和H面)下的仿真和测试的归一化 辐射方向图如图 8(a)~(b)所示。天线的接地板参 与了辐射,因此天线是双向辐射的。此外,如图所  $\overline{\pi}, \underline{\alpha} = 0^{\circ}$ 处右旋圆极化值明显大于左旋圆极化 值至少20dB。因此,所提出的天线可以在这两个 谐振点沿+z方向辐射右旋圆极化波。在整个频带 内,仿真和测量结果有良好的一致性。





### 4 结论

本文提出了一种结构简单并加载微扰元素的新型宽频带圆极化方形槽天线。用一对矩形槽和一个倒L型枝节作为微扰元素来调节天线表面电流分布,可以激发出多个圆极化谐振模式,从而实现了宽频带圆极化辐射。为了验证设计的合理性,加工和测试了天线模型。测量结果表明,实测小于-10 dB的阻抗带宽为74.9%,小于3 dB的轴比带宽为84.7%,1.5 dB增益范围内的圆极化带宽为74.9%。因此,与已发表文献相比,本文设计的天线有更为简单的结构、更宽的圆极化带宽以及更为稳定的增益,在无线通信系统有潜在的应用价值。

#### 参考文献

- Chen C, Yung E K. Dual-band dual-sense circularly-polarized CPW-fed slot antenna with two spiral slots loaded
   [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(6): 1829-1833
- [2] Row J S. The design of a squarer-ring slot antenna for circular polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(6): 1967-1972
- [3] Sze J Y, Chang C C. Circularly polarized square slot antenna with a pair of inverted-L grounded strips[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2008, 7 (1): 149-151
- [4] Sze J Y, Wang J C, Chang C C. Axial-ratio bandwidth enhancement of asymmetric-CPW-fed circularly-polarised square slot antenna [J]. Electronics Letters, 2008, 44 (18): 1048-1049
- [5] Sze J Y, Hsu C I G, Chen Z W, et al. Broadband CPW-fed circularly polarized square slot antenna with lighte-ning-shaped feedline and inverted-L grounded strips[J].
  IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(3): 973-977
- [6] Chiang M, Hung T, Bor S. Dual-band circular slot antenna design for circularly and linearly polarized opera-

tions [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(12): 2717-2721

- [7] Chen, Z F, Xu B, Hu J, et al. A CPW-fed broadband circularly polarized wide slot antenna with modified shape of slot and modified feeding structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(6): 1453-1457
- [8] Ghobadi C, Nourinia J, Sadeghi P. Square slot antenna with two spiral slots loaded for broadband circular polarisation[J]. Electronics Letters, 2016, 52(10): 787-788
- [9] Row J S, Wu S W. Circularly-polarized wide slot antenna loaded with a parasitic patch [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(9): 2826-2832
- [10] Yang W, Zhou J. Wideband circularly polarized cavitybacked aperture antenna with a parasitic square patch
   [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 197-200
- [11] Gyasi K O , Li J , Huang Y, et al. Broadband circularly polarized square slot antenna with a G-shaped feedline
   [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(12); 3055-3063
- [12] Zhang H, Jiao Y C, Liang L, et al. Broadband circularly polarized square-ring-loaded slot antenna with flat gains
   [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16(99): 29-32
- [13] Liu Y, Cai S T, Xiong X M, et al. A novel wideband circularly polarized modified square-slot antenna with loaded strips[J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(5): e21873
- [14] Wang L, Fang W X, En Y F, et al. A new broadband circularly polarized square-slot antenna with low axial ratios
   [J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(1): e21502
- [15] Saraswat Kapil, Harish A R. Analysis of wideband circularly polarized ring slot antenna using characteristics mode for bandwidth enhancement [J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2018, 28 (2): e21186

- [16] Nosrati Mehrdad, Tavassolian N. Miniaturized circularly polarized square slot antenna with enhanced axial-ratio bandwidth using an antipodal Y-strip[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(1): 817-820
- [17] Xu R, Li J Y, Liu J, et al. Simple design of compact dual-wideband square slot antenna with dual-sense circularly polarized radiation for WLAN/wi-fi communications [J].
  IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(9): 4884-4889
- [18] Ubaid U, Koziel S. A broadband circularly polarized wide-slot antenna with a miniaturized footprint[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17 (12): 2454-2458
- [19] Le T T, Tran H H, Park H C. Simple-structured dualslot broadband circularly polarized antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17 (3): 476-479
- [20] Huang H F, Zhang Z P. A small single fed broadband circularly polarized slot antenna[J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30 (4): e22122
- [21] Liu W W, Cao Z H, Wang Z. New broadband circularly polarized antenna with an inverted F-shaped feedline[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(9): e22313
- [22] 王丽黎, 雷兰, 杨海龙, 等. 一种共面波导馈电的圆极化天线的设计[J]. 微波学报, 2018, 34(3): 37-40
  Wang L L, Lei L, Yang H L, et al. Design of a circularly antenna fed by co-planar waveguide[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(3): 37-40

**曹振华** 男,1980年生,硕士,工程师。主要研究方向:电 磁兼容设计,超宽带辐射、散射理论与技术。

**刘雯雯(通信作者)** 女,1981 年生,博士,副教授。主要 研究方向:电磁兼容设计,超宽带辐射、散射理论与技术。 E-mail: liuwenwen@zzu. edu. cn