材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241106001

基于临近耦合馈电的超宽带圆极化天线

王树奇*，陈家乐

（西安科技大学 通信与信息工程学院，西安 710054）

摘　要： 针对通感一体化技术卫星通信对超宽带、圆极化的双重需求，提出一种加载弧形枝节的超宽带圆极化微带天线设计方法。该天线通过对方环天线进行裁剪处理，有效调节表面横向电流和纵向电流，以产生圆极化波。此外，通过在天线加载两个1/4圆弧型枝节，进一步扩展了天线的轴比带宽。同时，通过设计天线底层的临近耦合馈电结构，与天线顶层产生谐振，实现天线小型化，并扩展阻抗带宽。从仿真和测量结果可以看出，天线为右旋圆极化辐射；阻抗带宽为9.06～22.55 GHz（85.4%）；3 dB圆极化轴比带宽为9.91～21.54 GHz（74%）；峰值增益为3.5 dBi；尺寸为11.7 mm×11.7 mm×0.127 mm（0.38λ mm×0.38λ mm×0.127 mm，λ为9.91 GHz对应的自由空间波长）。所设计的天线结构简单紧凑、工作频带宽，能覆盖Ku波段。

关键词： 卫星通信；超宽带；圆极化；临近耦合馈电；小型化

中图分类号： TN822　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0307－06

Ultra-Wideband Circularly Polarized Antenna Based on Adjacent Coupled Feed

WANG Shuqi, CHEN Jiale

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, CHN)

Abstract: An ultrawide-band circularly polarized microstrip antenna loaded with arc-shaped branches was proposed for satellite communication in integrated sensing and communication. By cutting the square loop antenna and adjusting the surface transverse and longitudinal currents, circularly polarized waves were generated. The axial ratio bandwidth was expanded by loading two quarter arc-shaped branches. By designing an adjacent coupled feed structure that resonated with the top layer of the antenna, antenna miniaturization and impedance bandwidth expansion were achieved. The simulation and experimental results show that the antenna emits right-handed circularly polarized radiation; the impedance bandwidth is 9.06～22.55 GHz (85.4%); the 3 dB circular polarization axis ratio bandwidth is 9.91～21.54 GHz (74%); the peak gain is 3.5 dBi; and the dimensions of the antenna are 11.7 mm×11.7 mm×0.127 mm (0.38λ mm×0.38λ mm×0.127 mm, where λ is the free space wavelength corresponding to 9.91 GHz). The designed antenna structure is simple, compact, and has a wide operating frequency that can cover the Ku-band.

Key words: satellite communication; ultra-wideband; circular polarization; adjacent coupled feeding; miniaturization

收稿日期：2024－11－06.

基金项目：国家自然科学基金项目（NSFC52174197）.

* **通信作者：**王树奇

0 引言

卫星通信作为通感一体化网络的关键支撑要素，亟需通过扩展通信频率的覆盖范围来增强通信的稳定性。超宽带圆极化天线具有宽频带、抗多径干扰强、避免极化损失能力强等优势，适用于大容量系统[1-2]。

在宽带终端天线的研究领域，取得诸多重要进展。在缝隙天线设计中，Li等提出一种由阶梯型贴片馈电的印刷缝隙天线设计，其阻抗带宽为2.30～7.42 GHz(105.3%)，轴比带宽为4.72～6.53 GHz(32.2%)，可应用于超宽带系统[3]；Islam等提出一种具有改进的部分接地平面的缝隙天线，其轴比带宽为3.1～6 GHz(64%)，可应用于无线胶囊内镜[4]；Patwary等提出一种带有50 Ω微带激励线的缝隙天线，其轴比带宽为4.25～9.4 GHz(75.5%)，可应用于神经信号记录系统[5]；Ma等提出一种环形缝隙加载的小型化天线，其阻抗带宽为4.52～8.06 GHz(56%)，轴比带宽为5.9～7.3 GHz(21.25%)，应用于超宽带系统[6]；Gharaati等设计出一种采用共面波导馈电，蚀刻矩形槽以提高轴比性能的紧凑型缝隙天线，其阻抗带宽为2.03～2.85 GHz(33.6%)，轴比带宽为2.34～2.92 GHz(22%)，可应用于无线局域网[7]。

在单极子天线设计中，Wang等提出一种通过添加寄生开环拓宽带宽的具有不对称接地平面的刀形单极子天线，其阻抗带宽为2.19～7.89 GHz(113.1%)，轴比带宽为2.65～6 GHz(77.4%)，可应用于超宽带系统[8]；Teja等研究了受元表面启发的单极子天线，其带宽大于15%，可应用于5G通信[9]；Xu等提出一种具有非对称地平面圆的弧形单极子天线，其轴比带宽为1.75～4.75 GHz(92.3%)，可应用于卫星通信[10]；Manohar等提出一种在地平面上加载L形微扰结构的三角形单极子天线，其轴比带宽为2～9 GHz(127%)，可应用于互联网宽带系统[11]；严冬等设计出一款加载L型枝节的环形单极子天线，阻抗带宽为21.13～27.43 GHz(25.8%)，轴比带宽为17.99～29.5 GHz(47.1%)，可应用于5G通信[12]。

此外，Sun等提出一种通过L形槽拓宽带宽的垂直交叉偶极子天线，其阻抗带宽为1.77～3.52 GHz(66.2%)，轴比带宽为2.26～3.47 GHz(42.2%)[13]；Inserra等提出一种基于串联功率分配器实现圆极化的交叉偶极子天线，其阻抗带宽为865.6～1 000 MHz(14.4%)，轴比带宽为906～932 MHz(2.8%)，可应用于超高频系统[14]；Sun等提出一种基于贴片天线多模分析的宽带增强方法，天线轴比带宽为2.2～5.5 GHz(85%)，可应用于超宽带系统[15]；Liu等提出一种通过弯曲辐射臂减小维瓦尔第天线体积的方法，天线阻抗带宽为1.59～5.51 GHz(110.4%)，轴比带宽为1.55～5.45 GHz(111.4%)，可应用于5G通信[16]。

上述天线具有工作频带宽的优势，如单极子天线，但又存在尺寸较大的不足；部分天线具有小型化的优势，但存在设计复杂的不足，如多模分析下的贴片天线。在当前小型化宽带化的背景下，上述宽带终端天线设计难以完全满足各种无线通信系统集成的需求。

为了优化天线在超宽带和圆极化方面的传输性能，并满足设备对小型化的需求，提出一种基于临近耦合馈电的超宽带圆极化天线。设计开环单极子天线实现超宽带及圆极化性能；通过加载弧形枝节拓宽天线的轴比带宽；设计耦合馈电结构，拓宽阻抗带宽并实现小型化。所设计的天线结构简单紧凑，有效实现小型化和较宽工作带宽，可进一步应用于通感一体化领域中的卫星通信。

1 耦合馈电圆极化天线设计

为实现超宽带圆极化性能，首先基于环形单极子天线进行改进。单极子天线由一个竖直导体和接地面组成，长度为工作中心频率对应波长的1/4。该结构使得其在高、低频段具有较好的匹配特性，从而实现较宽的工作频带。将天线做成方环状可以增加电感，从而增加其电气长度，减小尺寸。对方环形结构进行剪切开环，可以调节表面横向及纵向电流，使电流呈非对称，电流经过1/4波长的环形路径，相位滞后90°且方向正交变化，有效激发出相应的正交模式实现圆极化辐射。

其次，利用层叠技术，使底面的馈线和表面的辐射贴片产生耦合，这种天线也叫宽缝天线。该结构可以等效于加载电容减少电抗，能较好地完成阻抗匹配，扩展带宽，阶梯阻抗型馈电设计灵活，具有小型化的优势[17]。最后，在天线对角处加载成对弧形枝节进一步微调表面电流，通过改变电流路径，改善相应电流模式的相位90°相差以及方向正交效

果，拓宽天线轴比带宽。

选择厚度为 0.127 mm 的罗杰斯 5880 基板，其相对介电常数为 2.2，损耗正切为 0.000 9。天线三维结构如图 1 所示，天线平面结构如图 2 所示，顶部为环状单极子，底部为耦合馈电结构。上述超宽带圆极化天线设计原理总体为两步，如图 3 所示。设计步骤中的两种不同天线的 S_{11} 和轴比 R_a 曲线如图 4 所示。天线的基本结构尺寸 L_3 及有效介电常数 ε_e 可以通过公式(1)及(2)计算：

$$L_3=\frac{c}{2f}\left(\frac{\varepsilon_r+1}{2}\right)^{-1/2} \tag{1}$$

$$\varepsilon_e=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(1+12\frac{H}{L_3}\right)^{-1/2} \tag{2}$$

式中，c 为光速，f 为中心频率，ε_r 为相对介电常数，H 为基板厚度。

天线建模的结构参数(单位/mm)：W_1=1.77，W_2=0.33，Wk_1=0.12，Wk_2=2.73，L_1=5.94，L_2=1.95，L_3=11.76，L_4=11.65，Lk_1=1.82，Lk_2=3.32，H=0.127。

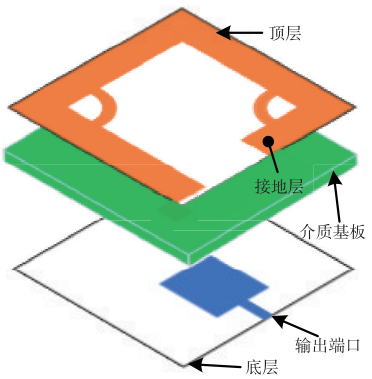
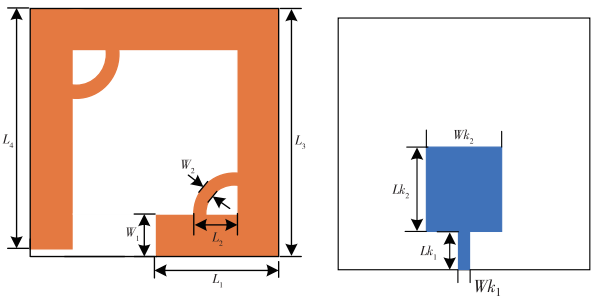


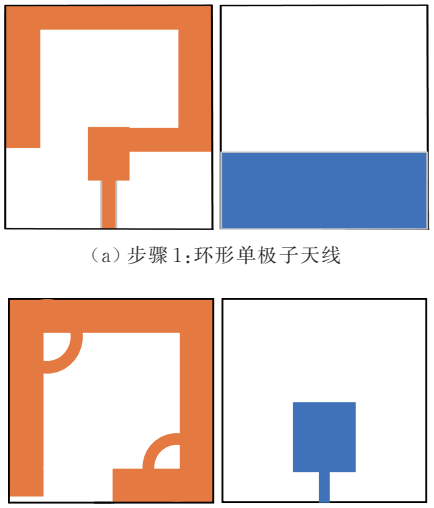
图 1　超宽带圆极化天线结构三维图



(a) 俯视图　　(b) 底视图

(c) 侧视图

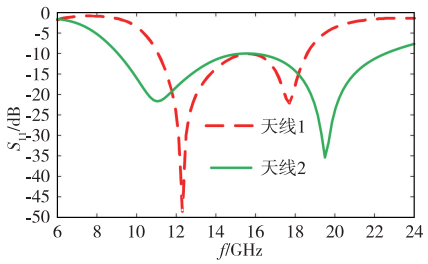
图 2　超宽带圆极化天线结构三视图



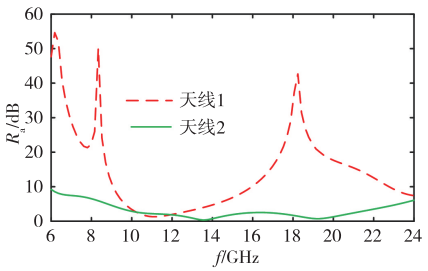
(a) 步骤 1：环形单极子天线

(b) 步骤 2：加载弧形枝节天线

图 3　超宽带圆极化天线的设计原理图



(a) 两种类型天线的 S_{11} 对比



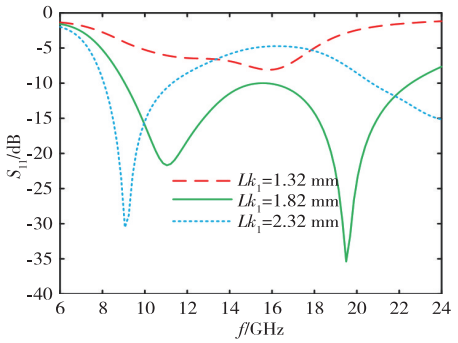
(b) 两种类型天线的 R_a 对比

图 4　两种类型天线的 S_{11} 和 R_a 曲线对比

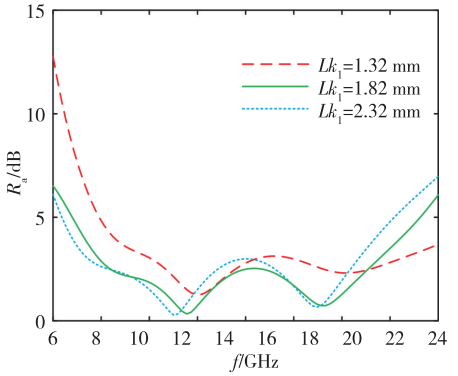
2　天线参数优化及分析

在设计过程中，馈线结构以及弧形枝节对天线阻抗匹配以及圆极化性能具有关键作用。在保持其他参数不变的情况下，对馈线长度 Lk_1 及弧形枝节半径 L_2 进行优化分析。

阶梯型馈线长度 Lk_1 将影响单极子天线的 S_{11} 参数，不同 Lk_1 的 S_{11} 和轴比性能如图 5。Lk_1 对 S_{11} 指标有较大影响，而对轴比值及轴比带宽影响较小。最终取 Lk_1=1.82 mm，天线呈现良好的阻抗匹配。



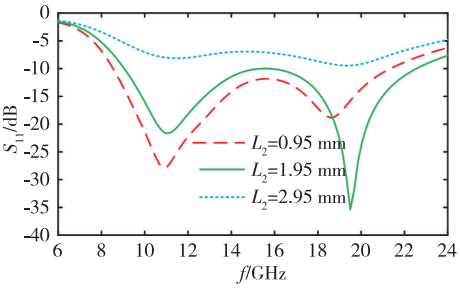
（a）馈线长度Lk_1对S_{11}的影响



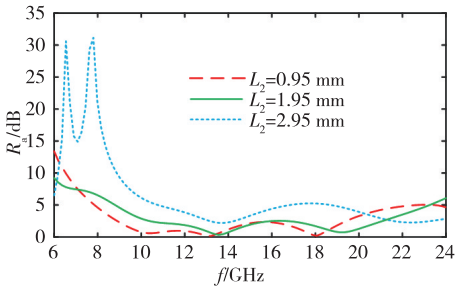
（b）馈线长度Lk_1对R_a的影响

图5 不同馈线长度Lk_1下天线S_{11}和R_a的性能

不同枝节半径L_2下的S_{11}和轴比性能如图6所示，枝节对天线表面的横向和纵向电流具有关键影响。当L_2=0.95 mm时，阻抗失配；当L_2=2.95 mm时，轴比值升高。最终取L_2为1.95 mm，轴比最小值为0.5 dB，阻抗带宽和轴比带宽较好，可以覆盖Ku波段。



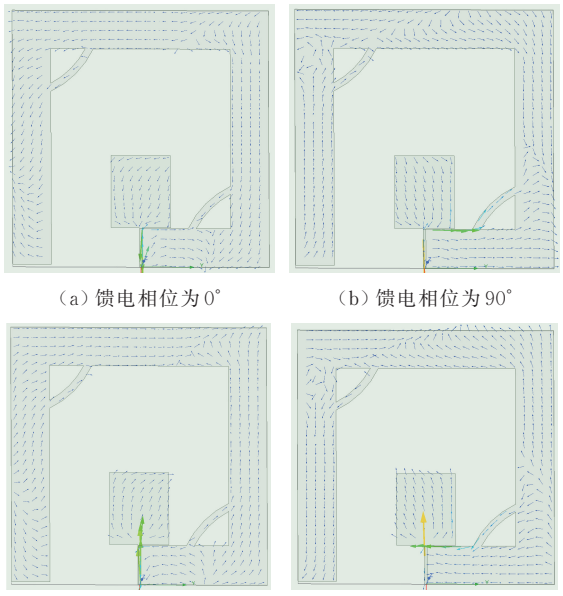
（a）枝节半径L_2对S_{11}的影响



（b）枝节半径L_2对R_a的影响

图6 不同枝节半径L_2下天线S_{11}和R_a的性能

研究电场的方向变化可以分析圆极化特性[18]。当天线工作在15 GHz时，馈电相位分别为0°，90°，180°和270°的天线表面电流分布如图7所示。天线位于XOY平面，$+Z$轴垂直天线向上。当馈电相位为0°时，右侧枝节处的电流矢量方向为$+X$方向；当相位为90°时，电流矢量方向为$+Y$方向；当相位为180°时，电流矢量方向为$-X$方向；当相位为270°时，电流矢量方向为$-Y$方向。从$+Z$方向观察，天线电流总矢量的旋转方向变化趋势符合右手螺旋规律。因此，天线在$+Z$方向辐射右旋圆极化波。



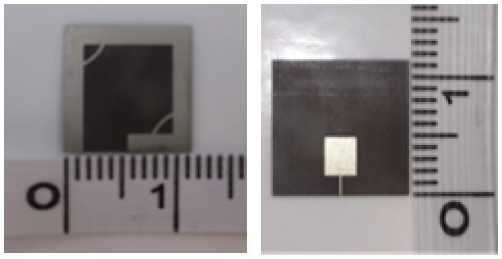
（a）馈电相位为0° （b）馈电相位为90°

（c）馈电相位为180° （d）馈电相位为270°

图7 不同馈电相位的天线表面电流矢量图

3 天线模拟和测量结果

天线实物照片如图8所示，测试环境如图9所示，通过矢量网络分析仪，对天线进行测试，测试天线位于XOY平面。模拟和测量的回波损耗、轴比及带内增益结果如图10～12所示。天线阻抗带宽为9.06～22.55 GHz（85.4%），S_{11}极小值有较小变化。实测轴比带宽为9.91～21.54 GHz（74%）；轴



（a）俯视图 （b）底视图

图8 天线实物照片

比测量值相较于仿真结果有一定的升高，最小值为 0.8 dB。频段内增益有一定的下降，实测峰值增益为 3.5 dBi。以上误差可能是由天线尺寸较小所带来的制造精度误差、焊接误差以及介质基板的不稳定性等因素所造成的。

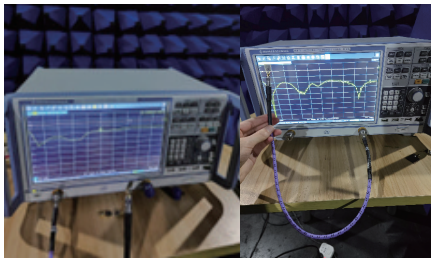


图 9　微波暗室测试环境

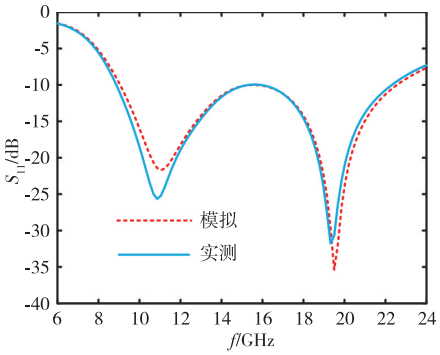


图 10　天线 S_{11} 参数的仿真与测试结果对比

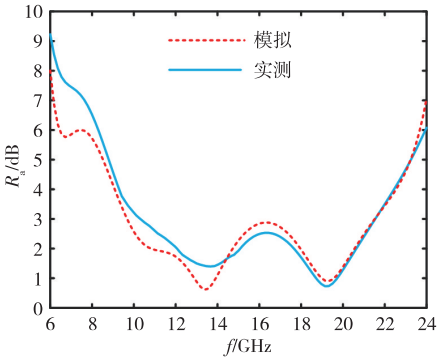


图 11　天线 R_a 参数的仿真与测试结果对比

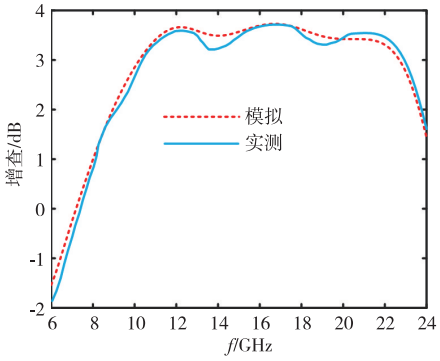
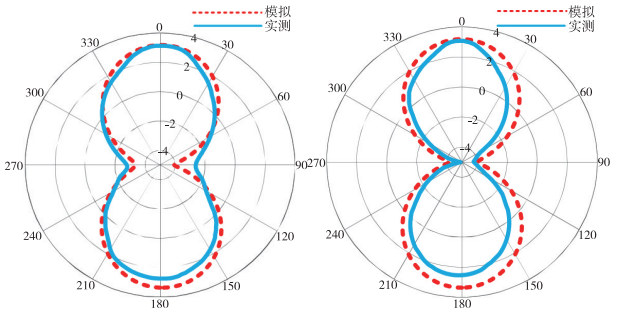


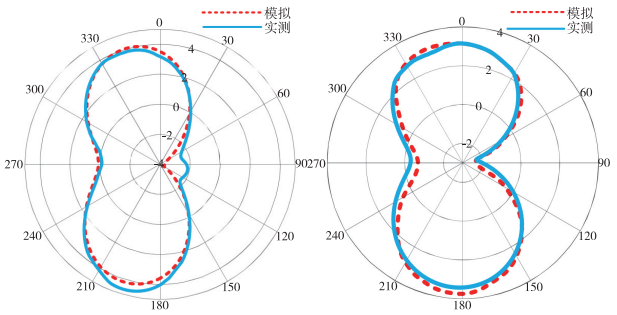
图 12　天线增益参数的仿真与测试结果对比

当天线工作在 10，15 和 20 GHz 时，模拟和测量的 E 面（XOZ 及 YOZ 平面）右旋圆极化辐射方向图如图 13～15。因频率增加，图案存在一定失真，天线辐射能量主要集中在 Z 轴方向，在该方向上有较高增益。从最大辐射方向可见，天线在 $+Z$ 方向上辐射右旋圆极化波，测试与仿真结果一致性较好。



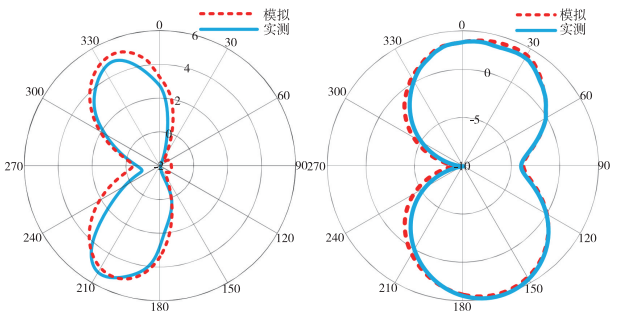
（a）10 GHz，XOZ 平面　　（b）10 GHz，YOZ 平面

图 13　天线 10 GHz 方向图仿真与测试结果对比



（a）15 GHz，XOZ 平面　　（b）15 GHz，YOZ 平面

图 14　天线 15 GHz 方向图仿真与测试结果对比



（a）20 GHz，XOZ 平面　　（b）20 GHz，YOZ 平面

图 15　天线 20 GHz 方向图仿真与测试结果对比

为比较设计的超宽带圆极化天线性能，从研究中选择 5 款天线，并对天线尺寸、阻抗带宽、圆极化轴比带宽和峰值增益进行比较，相关数据见表 1。通过比较，参考工作中天线尺寸较大、剖面较高或带宽较窄。所设计的天线实现圆极化性能，不仅有较宽的工作带宽，而且通过设计耦合馈电结构，减小了整体尺寸，适合应用于卫星无线通信。

表1 与其他天线的性能比较

文献	尺寸/mm³	阻抗带宽/GHz	轴比带宽/GHz	峰值增益/dBi
[3]	0.66λ×0.66λ×1.5	2.30～7.42（105.3%）	4.72～6.53（32.2%）	1.6
[6]	0.49λ×0.47λ×1	4.52～8.06（56.28%）	5.9～7.3（21.25%）	4.59
[7]	0.23λ×0.23λ×0.64	2.03～2.85（33.6%）	2.34～2.92（22%）	0.2
[12]	0.39λ×0.39λ×0.127	21.13～27.43（25.8%）	17.99～29.5（47%）	4.32
[13]	0.41λ×0.41λ×1.524	1.77～3.52（66.2%）	2.26～3.47（42.2%）	5
本文	0.38λ×0.38λ×0.127	9.06～22.55（85.4%）	9.91～21.54（74%）	3.5

4 结论

本文提出一种新型的超宽带圆极化单极子天线设计方法。通过对辐射贴片作裁剪开环处理，实现超宽带圆极化辐射；此外，在单极子贴片上增加弧形枝节及设计临近耦合馈电结构，分别改善轴比带宽和阻抗带宽。该天线设计简单、外形小、剖面低，阻抗带宽为9.06～22.55 GHz；3 dB圆极化轴比带宽为9.91～21.54 GHz，可以完全覆盖Ku波段，在通感一体化技术卫星通信中具有良好应用前景。

参考文献：

[1] Wang S, Zhang H, Li Z. Ultra-wideband circularly polarized millimeter wave antenna based on adjacent coupled feed [J]. Electromagnetics, 2023, 43(1): 48-62.

[2] Li H D, Du X Y, Yin J Y, et al. Differentially fed dual-circularly polarized antenna with slow wave delay lines [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 4066-4071.

[3] Li J, Yu C, Huang G, et al. A wideband circularly polarized slot antenna for UWB application [C]// 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2024: 1-4.

[4] Islam S, Samad M F. Design and analysis of a miniaturized UWB antenna for wireless capsule endoscopy [C]// 2018 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2018: 369-372.

[5] Basir Patwary A, Virushabadoss N, Henderson R, et al. Modeling and characterization of electrically small ultrawideband antenna for headstage-based wireless neural signal recording system [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2024, 5(5): 1249-1257.

[6] Ma Z H, Chen J X, Chen P, et al. Design of planar microstrip ultrawideband circularly polarized antenna loaded by annular-ring slot [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2021(1): 6638096.

[7] Gharaati A, Goudarzi A, Mirzavand R. Compact circularly polarized wideband wearable slot antenna for WBAN/WLAN applications [C]// 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2021: 1-3.

[8] Wang X, Li Y, Zhang J, et al. A CPW-fed broadband circularly polarized monopole antenna with parasitic open loop [C]// 2023 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2023: 1-3.

[9] Teja A R, Jashwanth P, Srinivas K, et al. Circularly polarized high gain monopole antenna for 5G applications [C]// 2024 Third International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE), 2024: 1-6.

[10] Xu R, Gao S S, Liu J, et al. Analysis and design of ultrawideband circularly polarized antenna and array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(12): 7842-7853.

[11] Manohar M, Chaudhary A K. Wideband circularly polarized triangular monopole antenna for high-speed Internet access [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021, 35(15): 2102-2113.

[12] 严 冬，程 威，郭琪富，等. 一种适用于5G网络的宽带圆极化天线设计[J]. 电子元件与材料，2020，39(9)：83-89.
Yan Dong, Cheng Wei, Guo Qifu, et al. Design of a wideband circularly polarized antenna suitable for 5G networks [J]. Electronic Components & Materials, 2020, 39(9): 83-89.

[13] Sun Y, He Y, He W, et al. A wideband circularly polarized cross-dipole antenna with L-shape slots [C]// 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020: 673-674.

[14] Inserra D, Wen G. Compact crossed dipole antenna with meandered series power divider for UHF RFID tag and handheld reader devices [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4195-4199.

[15] Sun C. A design of compact ultrawideband circularly polarized microstrip patch antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(9): 6170-6175.

[16] Liu X, Zhu Y, Xie W. Miniaturized ultrawideband circularly polarized antenna with folded arms inspired by the conventional Vivaldi antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(12): 2768-2772.

[17] Wang Z, Gao Y, Meng Z. Miniaturized reconstructed antenna based on coupled feed [C]// 2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA), 2022: 198-201.

[18] 李振亚，竺小松，张建华，等. 新型超宽带圆极化印刷天线[J]. 系统工程与电子技术，2019，41(1)：9-13.
Li Zhenya, Zhu Xiaosong, Zhang Jianhua, et al. New type ultra-wideband circularly polarized printed antenna [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(1): 9-13.

作者简介：

王树奇(1974—)，男，博士，副教授，研究方向为复杂电磁环境数值模拟、微波射频电路与天线设计。