

文章编号: 1671-7449(2025)05-0506-05

J. Test Measur. Technol., 2025, 39(5): 506-510.

加载缺陷金属腔体的圆极化探地雷达天线

杨国富^{1,2}, 秦会来¹, 王长瑞^{3*}

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 中建二局第三建筑工程有限公司, 北京 100070;
3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 设计了一种加载缺陷金属背腔的宽带高增益圆极化交叉偶极子天线。天线在宽末端椭圆辐射贴片的基础上加载具有两种工作模式的缺陷金属腔体, 形成两个新的圆极化通带。此外, 天线贴片刻蚀了十字型缝隙结构提升极化连续性, 拓展天线圆极化带宽。同时, 利用阶梯状相位延迟线, 拓展天线阻抗带宽。对该天线进行仿真优化的结果表明: 该天线的阻抗带宽 99.2% (0.95~2.82 GHz, 回波损耗小于 -10 dB), 圆极化带宽 103.7% (0.9~2.84 GHz, 轴比小于 3 dB), 工作带宽内峰值增益 7.4 dBic, 天线尺寸 $0.6\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$, 可广泛应用在超高频段探地雷达系统中。

关键词: 探地雷达; 交叉偶极子天线; 圆极化; 缺陷金属腔体; 宽带

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025064

引用格式: 杨国富, 秦会来, 王长瑞. 加载缺陷金属腔体的圆极化探地雷达天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 506-510.

YANG Guofu, QIN Huilai, WANG Changrui. CP cross dipole antenna with defected metal cavity for GPR system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 506-510.

CP Cross Dipole Antenna with Defected Metal Cavity for GPR System

YANG Guofu^{1,2}, QIN Huilai¹, WANG Changrui^{3*}

(1. China Construction Second Ltd., Beijing 100160, China;

2. The Third Construction Engineering Company Ltd. of China Construction Second Engineering Bureau, Beijing 100070, China;

3. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A broadband high-gain circularly polarized (CP) cross-dipole antenna loaded with a defective metal back cavity is proposed in this article. Based on wide-ended elliptical radiating patches, two new CP passbands are formed by loading defective metal cavities with two operating modes. In addition, four cross-slots are etched on the radiation patch to enhance polarization continuity. Meanwhile, a stepped phase delay line is employed to extend the impedance bandwidth (IMBW) of the antenna. The antenna is simulated and optimized, and the results show that the proposed antenna owns an IMBW of 0.95~2.82 GHz (99.2%), a 3 dB axial ratio bandwidth (ARBW) of 0.9~2.84 GHz (103.7%), a maximum gain of 7.4 dBic and a size of $0.6\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$, which meets the requirement of UHF band ground penetrating radar systems.

Key words: ground penetrating radar; cross dipole antenna; circularly polarized; defected metal cavity; broadband

收稿日期: 2024-08-18

基金项目: 中建二局科技资助计划(2021ZX000001)

作者简介: 杨国富(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事建筑工程、桥梁隧道施工技术研究。

* 通信作者: 王长瑞(1983-), 男, 研究员, 博士, 主要从事天线设计、电子装备智能装配技术研究。E-mail: 2606714144@qq.com。

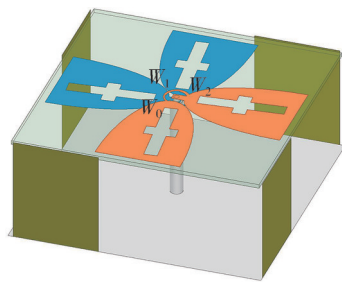
0 引言

天线作为探地雷达系统的射频前端,负责向地下发射电磁波并接收地表的电磁场回波,性能好坏直接影响系统的最大探测深度、地层分辨率等。圆极化交叉偶极子天线结构简单、成本低廉,可以接收除反向圆极化波的任意极化波,近些年被广泛应用于探地雷达系统中^[1-3]。传统圆极化交叉偶极子天线工作带宽仅有 15%,不利于探地雷达系统的高分辨率探测^[4]。为了拓展天线工作带宽,Qu 等^[5]提出了金属背腔结构,该结构可以形成一个新的圆极化通带,从而拓展天线工作带宽。基于该研究,Saurav 等^[6]利用金属背腔结构,将传统圆极化交叉偶极子天线的工作带宽拓展至 22.9%,并提升天线的增益与前后比。Nguyen 等^[7]采用双层阶梯状金属背腔结构,在高频段形成两个新的圆极化频点,拓展天线工作带宽至 66.7%。Zhang 等^[8]利用加载不等长鱼鳍结构的金属腔体,实现 96.6% 的工作带宽,并提升了天线的前后比。

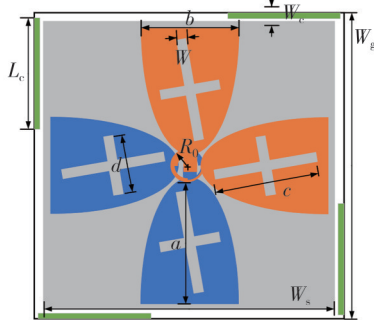
在上述研究的基础上,本文设计了一种加载缺陷金属腔体的宽带圆极化交叉偶极子天线。该天线采用宽末端半椭圆辐射贴片、缺陷金属腔体和阶梯相位延迟线结构,缺陷金属腔体不仅能以传统金属腔体模式工作,在高频段形成圆极化通带,而且可以延展辐射贴片的有效电流路径,在低频段形成一个新的圆极化通带。该天线具有工作带宽大、峰值增益高、天线结构紧凑等优点,能够提升探地雷达系统的最大探测深度及地层分辨率,满足系统需求。

1 天线结构

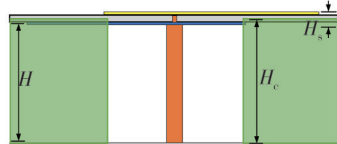
图 1 所示为本文设计的宽带圆极化探地雷达天线结构,天线由 Arlon 350 介质基板(介电常数=3.5;损耗角正切=0.003)、半钢同轴线、半椭圆辐射贴片、阶梯相位延迟环、缺陷金属背腔和十字形缝隙组成。两对长轴为 a 、短轴为 b 的半椭圆辐射贴片被分别印制在厚度 H_s 、宽度 W_s 的介质基板上下两端,同一端的辐射贴片由半径 R_0 、线宽 W_0 、 W_1 、 W_2 的阶梯相位延迟线连接以实现阻抗匹配和 90° 相位差。 $50\ \Omega$ 半钢同轴线穿过介质基板连接两端辐射贴片,形成 0° 、 90° 、 180° 、 270° 时序相差,实现圆极化。十字缝隙长 c 、宽 d 、厚 W ,相对天线中心旋转 θ_1 。缺陷金属腔体高 H_c 、宽 L_c 、厚 W_c ,具体参数尺寸如表 1 所示。



(a) 天线透视图



(b) 天线俯视图



(c) 天线主视图

图 1 天线结构图

Fig. 1 Antenna geometry

表 1 天线参数尺寸

Tab. 1 Antenna dimensions

参数	R_0/mm	W_g/mm	W_0/mm	W_1/mm	W_2/mm	W_s/mm
值	4.8	95	0.2	0.6	0.9	93
参数	a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	W/mm	W_c/mm
值	82	32	32	11.8	5	1
参数	H_s/mm	H_c/mm	L_c/mm	H/mm	$\theta_1/^\circ$	
值	1.5	39.7	32.5	38.2	-9	

2 天线原理分析

为进一步分析天线工作原理,如图 2 所示给出天线设计流程。天线 1 使用半椭圆形辐射贴片及金属地板,天线 2 在天线 1 的基础上加载了传统金属腔体结构,不同于天线 2,天线 3 使用了缺陷金属腔体,最终,本文设计天线采用刻蚀了十字缝隙的半椭圆辐射贴片结合缺陷金属腔体。

图 3 所示为设计流程中天线的性能对比,天线 1、天线 2、天线 3 与本文天线使用相同尺寸的 Arlon 350 介质基板,且具有相同的天线剖面、辐射贴片长度以控制变量。天线 1 阻抗带宽 $2.23\sim 2.71\ \text{GHz}$ (19.4%),圆极化带宽 $1.67\sim 2.12\ \text{GHz}$ (23.8%),这是由于天线 1 的 4 个辐射贴片具有时序相位差,从而在 $1.9\ \text{GHz}$ 形成了一个圆极化频点。天线 2 在天

线1的基础上加载金属背腔结构,金属背腔利用辐射贴片耦合馈电,形成了一个新的圆极化通带,扩展天线阻抗带宽至1.64~2.85 GHz(53.9%),拓展天线轴比带宽至1.39~2.23 GHz(46.4%)。天线3在天线2的金属背腔上时序刻蚀了4个缺口,阻抗带宽0.93~2.78 GHz(80.3%),圆极化带宽0.91~2.33 GHz(83.4%)。

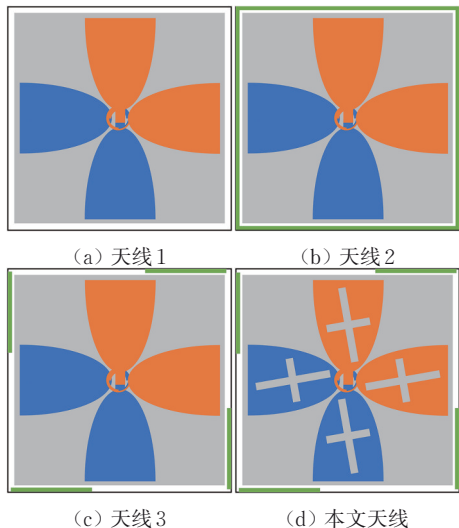


图2 天线设计流程图

Fig. 2 Design procedure of antenna

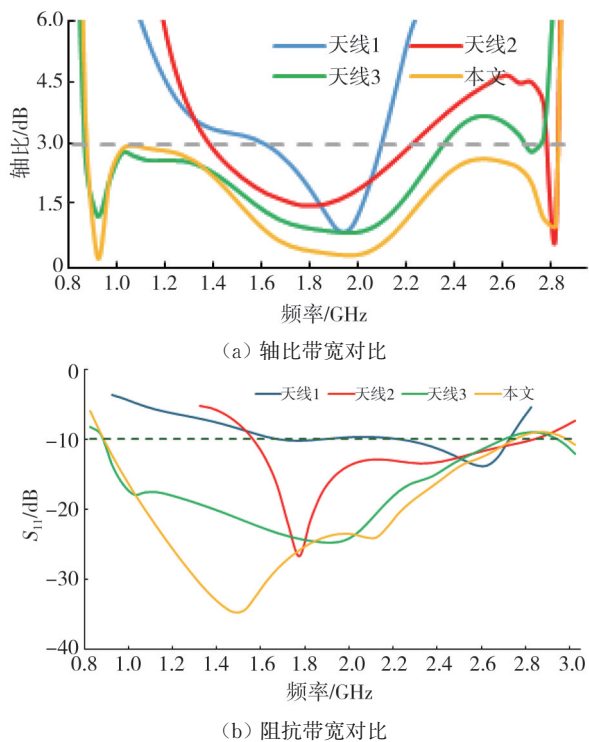


图3 天线性能对比

Fig. 3 Performance of antennas

相较于天线2,天线3的缺陷金属腔体结构具有两种工作模式,在高频段能通过耦合形成一个圆极化频点。如图4所示,在低频段,缺陷金属腔体能

够延展天线辐射贴片的有效电流路径从而形成一个新的圆极化频点。本文设计天线在天线3的辐射贴片上刻蚀了十字型槽缝,天线阻抗带宽为0.95~2.82 GHz(99.2%)、3 dB轴比带宽为0.9~2.84 GHz(103.7%),十字缝隙可以提升天线的极化连续性,使本文设计天线具有宽带特性。

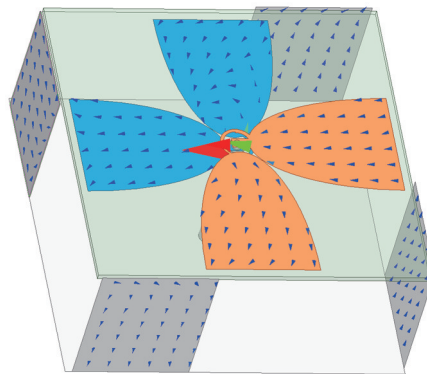


图4 天线3表面电流分布

Fig. 4 Surface current distribution of antenna 3

3 天线性能

使用ANSYS HFSS 2022对本文设计圆极化探地雷达天线进行仿真分析。如图5所示为本文设计天线的轴比、增益与回波损耗。

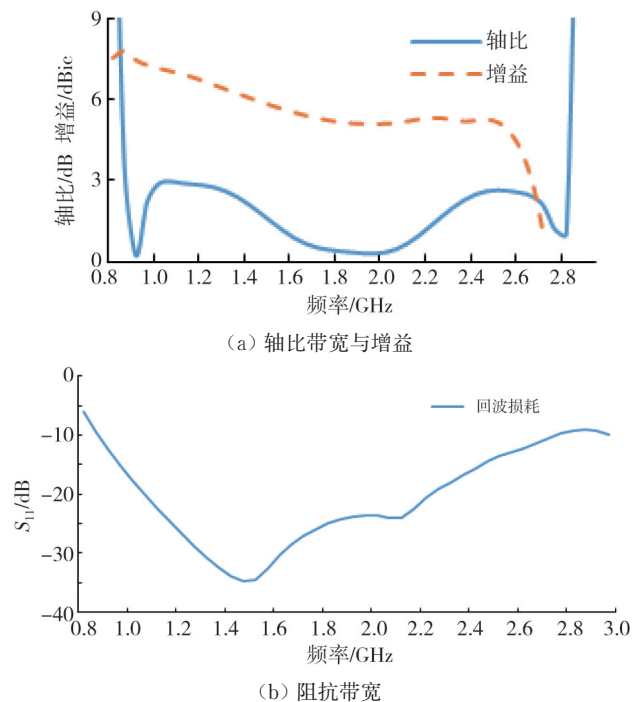


图5 本文设计天线性能

Fig. 5 Performance of proposed antenna

该天线具有0.95~2.82 GHz(99.2%)的阻抗带宽、0.9~2.84 GHz(103.7%)的3 dB轴比带宽,工

作带宽 99.2%，峰值增益 7.4 dBic，工作带宽内平均增益 5.45 dBic。如图 6 所示为 $\phi=0^\circ$ 时天线在 3 个圆极化频点处的远场辐射方向图，交叉偶极子天线具有辐射方向图对称的优点，因此，仅给出 $\phi=0^\circ$ 的辐射方向图，天线在 0.9、1.8、2.8 GHz 交叉极化均小于 -10 dB。为了进一步分析天线参数对天线圆极化特性的影响，对天线进行参数优化分析。

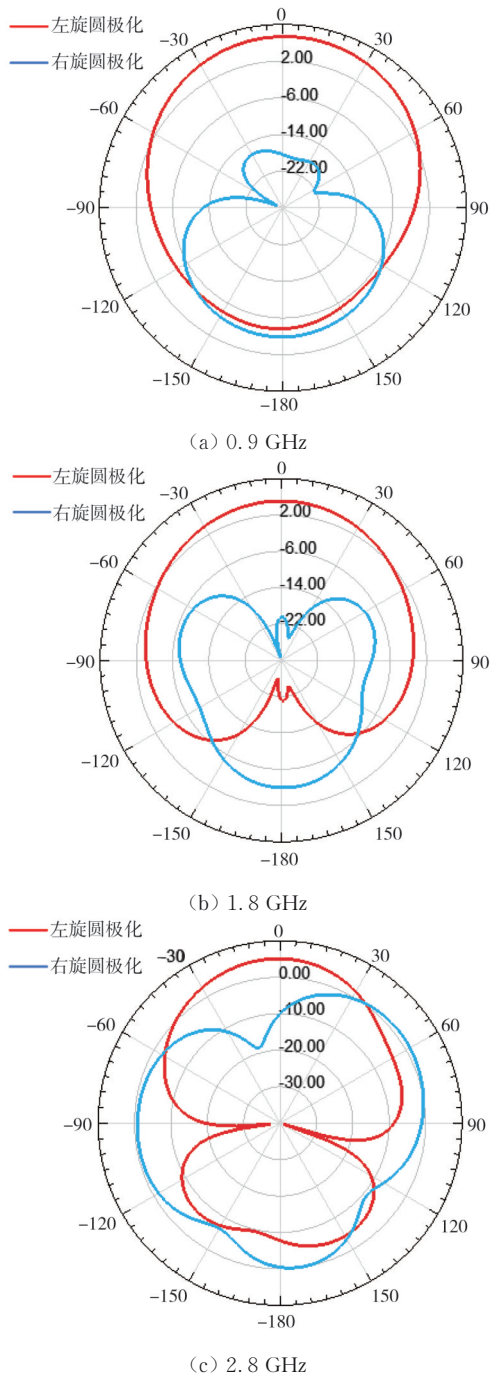


图 6 辐射方向图
Fig. 6 Radiation pattern

天线剖面对圆极化特性的影响如图 7 所示，随天线剖面增加，高频段圆极化频点不变，低频

段圆极化频点出现，当 $H=38.2$ mm 时，天线具有最佳圆极化特性。

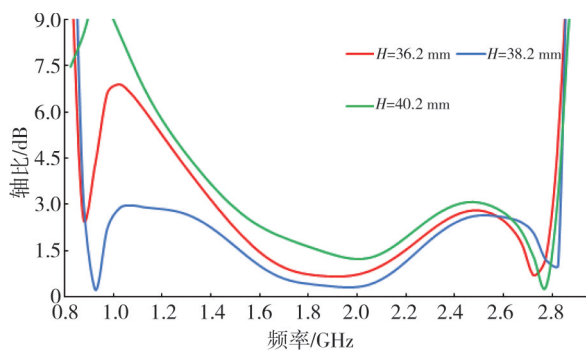


图 7 轴比随 H 变化趋势
Fig. 7 Axial ratio for different H

金属腔体宽 W_g 对天线圆极化特性的影响如图 8 所示，随 W_g 增加，低频段圆极化频点消失，高频段圆极化频点向低频段偏移，说明高频段圆极化频点由金属腔体形成。当 $W_g=95$ mm 时，天线具有最佳圆极化特性。

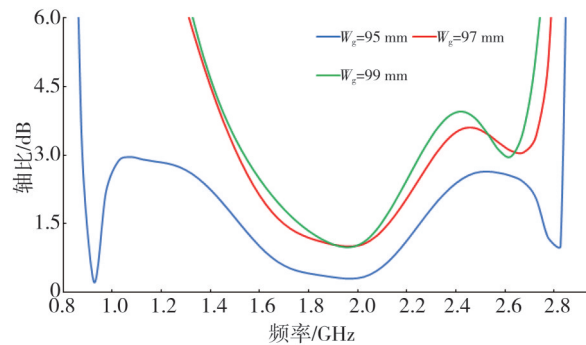


图 8 轴比随 W_g 变化趋势
Fig. 8 Axial ratio for different W_g

表 2 所示为本文设计探地雷达天线与参考文献中圆极化交叉偶极子天线的性能对比。

表 2 天线对比

Tab. 2 Antenna comparison

天线	剖面/ λ_0	阻抗带宽/%	轴比带宽/%
文献[4]	0.25	30.7	15.6
文献[6]	0.28	56.6	21.1
文献[7]	0.24	79.4	66.7
文献[8]	0.35	106.6	96.6
文献[9]	0.26	57.0	33.0
文献[10]	0.26	81.2	82.5
本文	0.25	99.2	103.7

本文设计天线具有最大的圆极化带宽，且设计天线结构紧凑。综上，本文设计天线具有最大的工作带宽，结构简单，易于制造，综合性能最好。

4 结论

本文提出了一种高增益宽带圆极化探地雷达

天线。天线由椭圆形辐射贴片、半钢同轴线以及缺陷金属背腔组成,缺陷金属背腔不仅可以通过耦合馈电在高频段形成一个圆极化频点,还可以拓展贴片有效电流路径,在低频段形成一个圆极化通带,拓展天线带宽,提升天线增益。天线结构紧凑,尺寸 $0.6\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$,且具有99.2%的工作带宽(0.95~2.82 GHz,回波损耗小于-10 dB且轴比小于3 dB),工作带宽内峰值增益达7.4 dBic,交叉极化小于-10 dB,满足超高频段探地雷达系统高分辨率、大深度探测的需求。

参考文献:

- [1] 卢红,张文梅,韩丽萍,等.宽频带圆极化交叉偶极子天线设计[J].测试技术学报,2018,32(4):344-348.
LU Hong, ZHANG Wenmei, HAN Liping, et al. Design of broadband circularly polarized cross-dipole antenna[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(4): 344-348. (in Chinese)
- [2] 李东霞,丁永红,尤文斌.一种LoRa微带天线的小型化设计[J].中北大学学报(自然科学版),2022,43(2):180-185.
LI Dongxia, DING Yonghong, YOU Wenbin. Miniaturized design of a LoRa microstrip antenna[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 180-185. (in Chinese)
- [3] YANG T Q, TIAN X L, LOU W Z, et al. High-gain microstrip patch antenna with conformal metamaterials based on topological transformation[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(1): 103-107.
- [4] BAIK J W, LEE K J, YOON W S, et al. Circularly polarised printed crossed dipole antennas with broadband axial ratio[J]. Electronics Letters, 2008, 44(13): 785-786.
- [5] QU S W, CHAN C H, XUE Q. Ultrawideband composite cavity-backed folded sectorial bowtie antenna with stable pattern and high gain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(8): 2478-2483.
- [6] SAURAV K, SARKAR D, SRIVASTAVA K V. Wide-band circularly polarized cavity backed crossed dipole antenna[C]//2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2017: 1-4.
- [7] NGUYEN T K, TRAN H H, NGUYEN-TRONG N. A wideband dual-cavity-backed circularly polarized crossed dipole antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 3135-3138.
- [8] ZHANG L, GAO S, LUO Q, et al. Single-feed ultra-wideband circularly polarized antenna with enhanced front-to-back ratio[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 355-360.
- [9] SEFIDI M, GHOBADI C, NOURINIA J, et al. Broadband circularly polarized printed crossed-dipole antenna and its arrays for cellular base stations[J]. IEEE Access, 2024, 12: 6842-6851.
- [10] YANG D, HAO L, WANG L. A compact broad circularly polarized cross-dipole antenna with grounded parasitic elements[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2023: 9359671.