

## 多环形结构超高频RFID近场天线

陈榕, 谢维华, 袁家德

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 设计了一种多环形结构超高频射频识别 (RFID, radio frequency identification) 阅读器近场天线。天线整体结构呈圆形, 由 8 个扇形辐射贴片旋转分布组成, 通过扇形辐射贴片间的紧耦合和加载寄生弧形贴片, 实现了天线表面电流旋向相同, 能够在识别区域内产生较均匀的磁场和多极化的电场。天线直径为 130 mm, 印制在厚度为 1.6 mm 的阻燃 4 级 (FR-4, flame retardant 4) 介质基板上。测试结果表明, 端口反射系数 $|S_{11}| < -10$  dB 的频带宽度为 904~932 MHz, 在天线上方直径为 130 mm 的圆形区域内可产生较均匀的磁场; 采用 Impinj E710 阅读器进行标签测试, 在 30 dBm 的输出功率下, 磁耦合环形标签 J41 的最远 100% 读取距离为 16 cm; 所提天线能产生多极化电场, 对于不同方向摆放的电极化标签具备相近的读取能力。

**关键词:** 射频识别; 近场天线; 磁场均匀; 多环形结构

**中图分类号:** TN828.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00459

## A multi-ring UHF near-field RFID reader antenna

CHEN Rong, XIE Weihua, YUAN Jiade

College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

**Abstract:** A near-field antenna for ultra-high frequency radio frequency identification (RFID) reader with a multi-ring structure and uniform magnetic field was designed. The antenna was circular in shape and consisted of 8 fan-shaped radiating patches distributed in rotation. Through coupling between fan-shaped radiating patches and loading parasitic arc-shaped patches, the surface current of the antenna showed the same rotation direction, which could generate a relatively uniform magnetic field and a multi-polarized electric field in the identification area. The antenna had a diameter of 130 mm and was printed on a flame retardant 4 (FR-4) dielectric substrate with a thickness of 1.6 mm. The measured results show that the bandwidth of the reflection coefficient  $|S_{11}| < -10$  dB is 904~932 MHz. A relatively uniform magnetic field can be generated within a circular area with a diameter of 130 mm above the antenna. At a power output of 30 dBm, the farthest reading distance for the 100% identification rate of the magnetic coupled ring tag J41 is 16 cm when the Impinj E710 reader is used for tag testing. The proposed antenna can generate a multi-polarized electric field that exhibits similar readability for tags placed in different directions.

**Key words:** RFID, near field antenna, uniform magnetic field, multi-ring structure

### 0 引言

超高频 (UHF, ultra-high frequency) 射频识别

(RFID, radio frequency identification) 作为物联网概念中的重要技术, 被广泛应用于物品识别、仓储管理等领域<sup>[1-6]</sup>。而阅读器天线作为电磁波发射和接

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2025-04-19

通信作者: 袁家德, yuanjiade@fzu.edu.cn

基金项目: 福建省高校产学合作项目 (No. 2023H6004); 福州市科技项目 (No. 2023-P-001)

**Foundation Items:** The University Industry Cooperation Project of Fujian Province (No. 2023H6004), The Science and Technology Project of Fuzhou (No. 2023-P-001)

收的载体，性能的好坏决定了RFID系统的整体性能的优劣。在RFID阅读器天线的研究中，根据识别距离的远近分为远场天线和近场天线，近场天线因识别距离较短，具备不容易误读的特性，在医疗物品存放、文件管理等近距离识别场景中有着较好的应用价值<sup>[7-8]</sup>。

根据电磁场耦合机制的不同，RFID近场阅读器天线可以分为电场耦合和磁场耦合两类，包括电场电容耦合<sup>[9-10]</sup>和磁场电感耦合<sup>[11-12]</sup>。目前磁耦合近场天线的本质是通过同向电流环天线来产生均匀磁场<sup>[13-16]</sup>，文献[14]通过4个环型偶极子组成同向电流环；文献[15-16]通过周期分段线结构实现零相移特性，实现了环路结构变大的同时电流方向依旧同向；文献[17-20]通过对电流路径的合理安排，将天线划分为多个电流环共同作用进而扩大了磁场均匀面积。

相关文献对电耦合近场天线已开展了很多研究，文献[21]通过位于天线结构下方的短路馈线激励上方周期性的金属条天线，实现了均匀的近场辐射；文献[22]设计了一种边缘短路的缝隙微带天线。然而，早期的设计都是仅考虑总电场均匀的线极化天线，在读取线极化RFID标签的过程中很容易产生漏读<sup>[23-25]</sup>。文献[26-30]考虑了天线极化方向对于标签近场读取的影响，在设计过程中将电场的多极化电场的均匀性作为指标，实现了天线电场在三维空间的均匀分布，实测结果表明该类近场阅读器天线具有较高的电耦合标签读取率。但该类型天线并未对磁耦合功能进行设计，应用场景存在一定的局限性。

本文提出了一种多环形结构近场天线，能够产生相对均匀的磁场和多极化的平面电场，同时具备磁耦合和电耦合的功能，具有较好的近场读取RFID标签的能力。

### 1 天线结构设计

天线结构示意图如图1所示，天线侧面示意图如图1(a)所示，天线结构分为两层，分别印制于阻燃4级(FR-4, flame retardant 4)介质基板的上下表面，天线采用同轴线馈电，馈电位置位于结构中心。天线上、下层结构分别如图1(b)和图1(c)所示。上层辐射贴片由一个扇形单元旋转复制形成，扇形单元结构如图1(d)所示，不同半径处的弯折可以使

天线有3个不同半径的同向电流环，3个分布电流环有利于在一定区域产生均匀的垂直磁场 $H_z$ 。扇形单元的数量和下层圆形贴片的开槽可用于调整天线辐射磁场的分布。采用三维电磁场分析软件HFSS进行仿真优化，天线优化后参数尺寸见表1，FR-4介质基板的相对介电常数为4.4、损耗角正切为0.02、尺寸为150 mm×150 mm×1.6 mm。

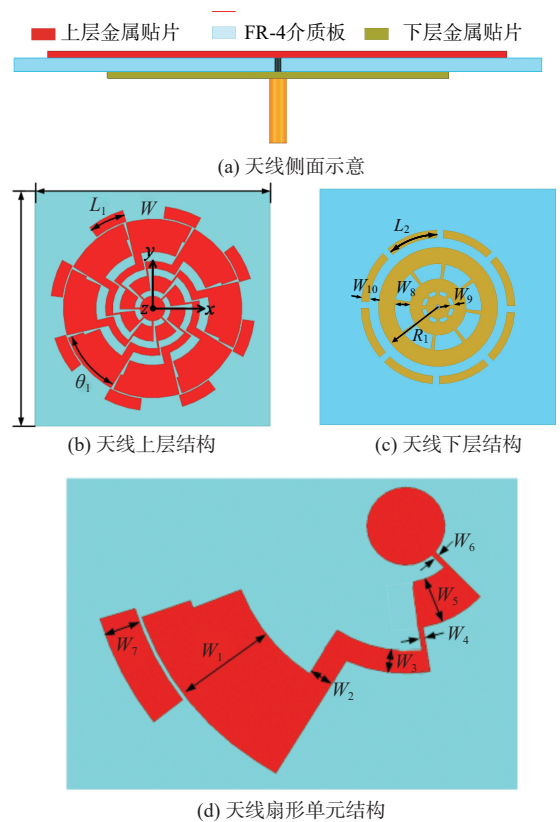


图1 天线结构示意图

表1 天线优化后参数尺寸

参数	尺寸	参数	尺寸	参数	尺寸
$W$	150 mm	$R_1$	38 mm	$L_1$	21.2 mm
$L_2$	30.7 mm	$W_1$	21 mm	$W_2$	5 mm
$W_3$	9.5 mm	$W_4$	1 mm	$W_5$	9.5 mm
$W_6$	1 mm	$W_7$	7.5 mm	$W_8$	9.5 mm
$W_9$	2.5 mm	$W_{10}$	2.5 mm	$\theta_1$	40°

#### 1.1 天线设计分析

天线由多个扇形单元组成，不同的单元数 $N$ 会影响天线的性能。天线结构演变过程如图2所示，图2(a)~(c)分别给出了 $N=4$ （天线1）、 $N=6$ （天线2）和 $N=8$ （天线3）时的结构形式。天线结构演变过程对应的磁场强度如图3所示，给出了天线正上方

$z=10\text{ mm}$  高度处, 磁场强度  $H_z$  沿  $x$  轴方向的分布情况, 其中, 坐标系原点位于天线上层辐射贴片中心点处。从图3可以看出, 天线1由于扇形单元数量较少, 电流分布连续性较弱, 导致沿  $x$  轴磁场强度起伏相对较大, 磁场分布均匀性差; 当  $N=6$  时, 天线表面电流的均匀性得到了提升, 图3中磁场强度曲线起伏变小; 当  $N=8$  时, 磁场强度起伏最小, 因此本文设计的天线选用8个扇形单元。同时从图2(c)还可以看出, 该扇形结构组成的近场天线, 可以形成多个电流环, 且旋转方向相同, 这有助于在天线上方形成均匀的磁场分布。相较于文献[15]中的单环天线, 本文所提天线中心磁场均匀性更好且强度提高了  $9\text{ dB A/m}$ ; 相较于文献[20], 中心磁场强度增加了  $4\text{ dB A/m}$ , 原因是本文所提的设计方法使天线每个电流环旋向都保持相同, 产生较强的磁场。

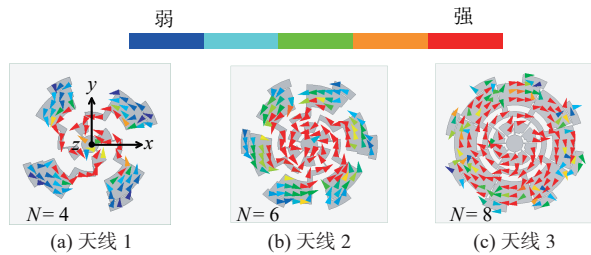


图2 天线结构演变过程

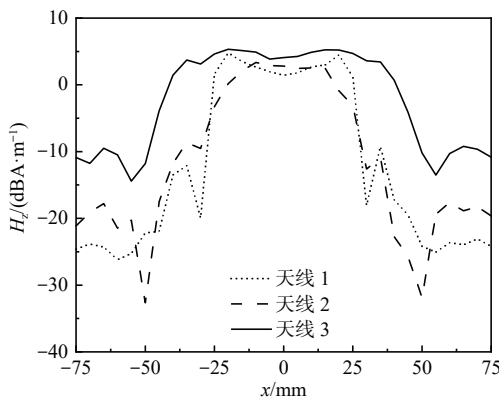


图3 天线结构演变过程对应的磁场强度

在RFID系统中, 可以通过仿真近场天线识别区域内垂直磁场强度  $H_z$  的分布来评估近场天线的性能。915 MHz 下天线不同高度对应的磁场强度如图4所示, 图4(a)~(d)分别给出了天线上方  $z=40\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$ 、 $120\text{ mm}$  和  $160\text{ mm}$  高度处, 直径为  $130\text{ mm}$  区域的磁场  $H_z$  的强度分布。从图4可以看出, 随着高度的增加, 天线辐射的磁场强度减小。

将激活磁耦合环形标签J41所要求的最低磁场垂直分量  $-24\text{ dB A/m}$  作为评估近场天线磁场强度的标准<sup>[15]</sup>, 可以发现当高度  $z=120\text{ mm}$  时, 识别区域内磁场强度都高于该值, 而当高度  $z=160\text{ mm}$  时, 部分区域磁场强度低于  $-24\text{ dB A/m}$ 。因此, 可以推断出, 该近场天线在读取磁耦合标签J41时, 在  $120\sim 160\text{ mm}$  高度范围内会出现部分位置漏读的情况。

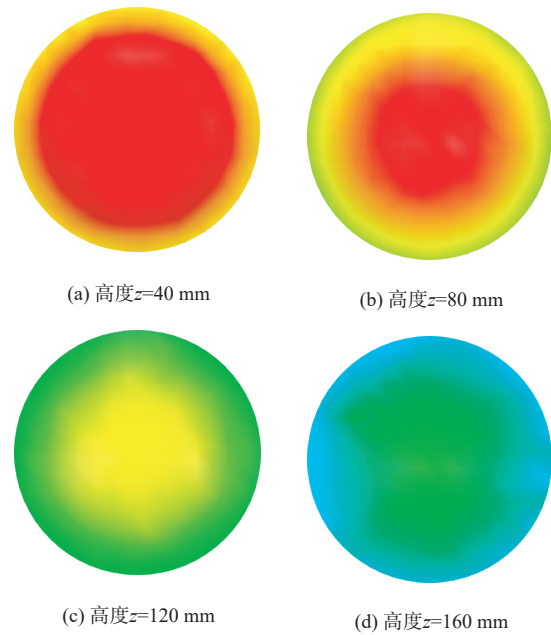


图4 915 MHz 下天线不同高度对应的磁场强度

天线上方  $50\text{ mm}$  高度处的电场矢量在1个周期内的分布如图5所示, 图5(a)~(d)分别给出了1个周期  $T$  内不同时刻, 在天线上方  $z=50\text{ mm}$  高度处, 直径为  $130\text{ mm}$  区域的电场矢量分布。从图5可以看出, 当  $t=0$  时,  $\omega_t=0^\circ$ , 此时电场矢量方向沿着逆时针方向, 如图5(a)所示; 当  $t=T/4$  时,  $\omega_t=90^\circ$ , 此时电场矢量方向沿着  $-z$  方向, 如图5(b)所示; 同理, 当  $t=T/2$  和  $t=3T/4$  时, 电场矢量方向分别沿着顺时针方向和  $+z$  方向, 如图5(c)和图5(d)所示。从图5上方电场分布变化可以发现, 电场矢量随着时间的改变而发生改变, 呈现多极化特性。这使该近场阅读器天线在读取上方任意摆放的电耦合线极化标签时, 无论标签以什么方向摆放, 都能避免极化失配。

### 1.2 天线参数分析

分析内环宽度  $W_3$  和外环宽度  $W_1$  两个参数对天线性能的影响。  $W_3$  参数对天线性能的影响如图6所

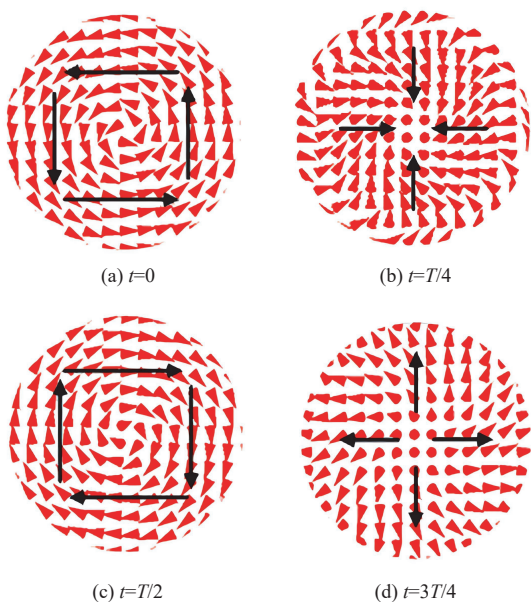


图5 天线上方50 mm高度处的电场矢量在1个周期内的分布

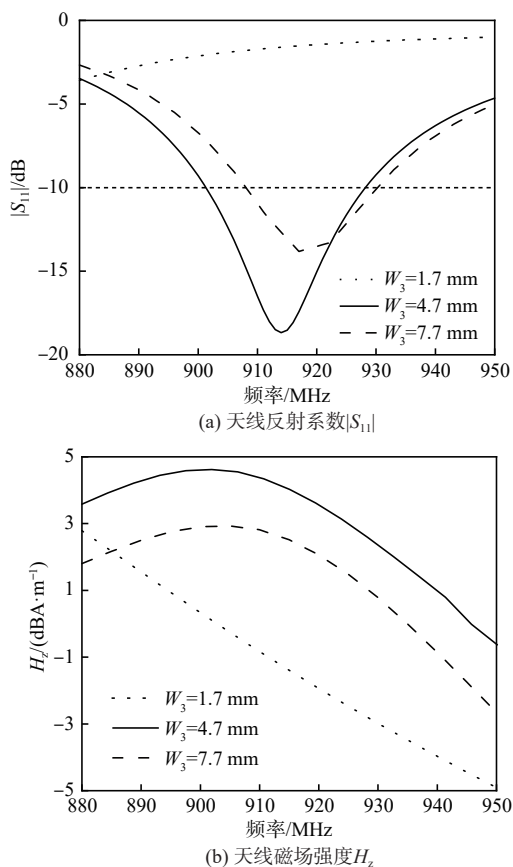


图6  $W_3$ 参数对天线性能的影响

示，图6(a)给出了 $W_3$ 参数变化时的 $|S_{11}|$ 曲线，图6(b)给出了不同 $W_3$ 对应的天线中心10 mm高度处磁场强度 $H_z$ 的曲线。从图6可以看出，当 $W_3=1.7$  mm时，耦合较弱，天线谐振频段和 $H_z$ 的峰值频率点不

在工作带宽内；当 $W_3=4.7$  mm时，出现了较好的 $|S_{11}|$ 谐振频段和 $H_z$ 峰值；当 $W_3=7.7$  mm时，过度的耦合又导致了天线阻抗带宽变窄， $H_z$ 的峰值降低。综合考虑该参数对 $|S_{11}|$ 和辐射磁场 $H_z$ 的影响，确定4.7 mm为 $W_3$ 的最优值。

$W_1$ 参数对天线性能的影响如图7所示，图7(a)和图7(b)给出了 $W_1$ 参数变化对天线 $|S_{11}|$ 和天线中心10 mm高度处磁场强度 $H_z$ 的影响。从图7可以发现，当 $W_1$ 从18 mm增加到21 mm时， $H_z$ 的变化不明显，而 $|S_{11}|$ 谐振频段向低频偏移；当 $W_1$ 继续增加到24 mm时， $H_z$ 的峰值减小， $|S_{11}|$ 谐振频段继续向低频偏移，原因是电流路径长度在增加。综合考虑 $|S_{11}|$ 和 $H_z$ 的峰值，选择 $W_1=24$  mm为最优值。

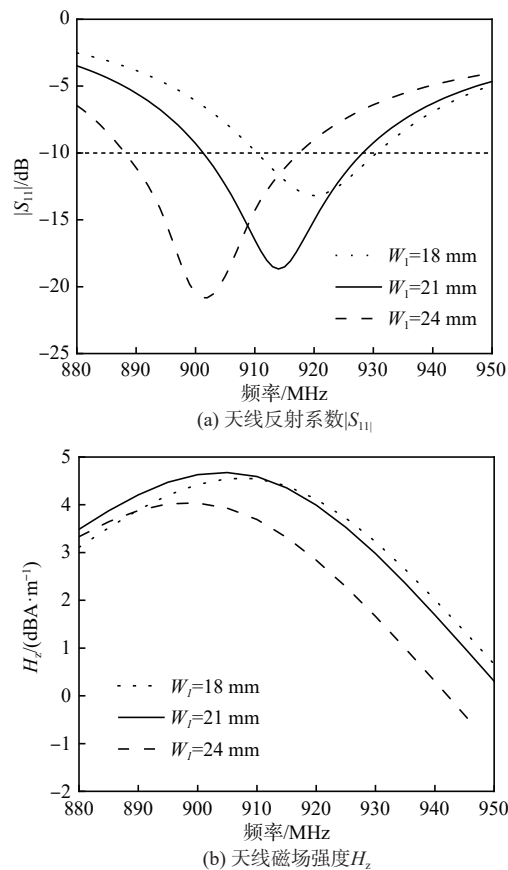


图7  $W_1$ 参数对天线性能的影响

## 2 天线测试结果

根据表1中的结构尺寸加工了天线样品，天线加工实物如图8所示。用矢量网络分析仪测试了天线的 $|S_{11}|$ 参数，天线实测和仿真 $|S_{11}|$ 如图9所示，从图9

可以观察到,  $|S_{11}| < -10$  dB 的仿真带宽为 28 MHz, 频率范围为 901~929 MHz; 实测带宽为 28 MHz, 频率范围为 904~932 MHz, 仿真和实测曲线较吻合。

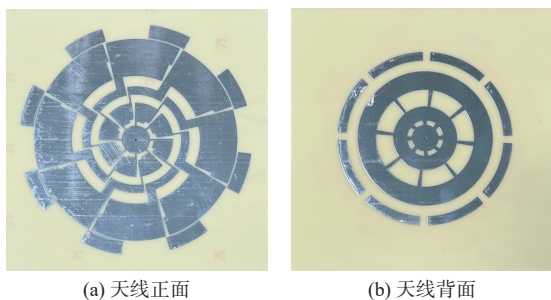


图 8 天线加工实物

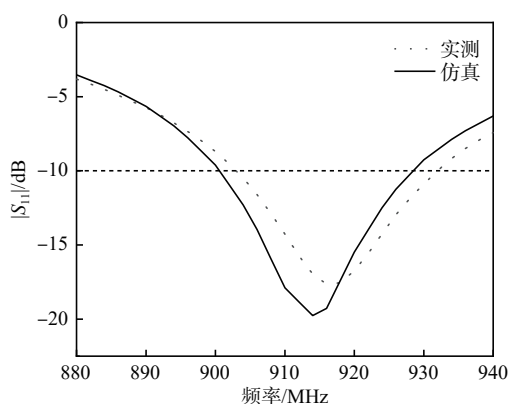


图 9 天线实测和仿真  $|S_{11}|$

标签读取测试环境如图 10 所示, 为了验证本文所设计的近场阅读器天线的实际读取性能, 搭建了本文所设计的天线读取多标签的测试平台, 其中, 阅读器天线放置在黑色泡沫支架的底部, 在黑色泡沫支架的上表面, 放置一层白色泡沫, 待测标签放置在白色泡沫的上表面。采用 Impinj E710 阅读器, 发射功率设定为 30 dBm。待测试标签采用两种, 分别是尺寸为 1.5 cm×1.5 cm 的 J41 磁耦合环形标签和 9.8 cm×2.7 cm 的电耦合偶极子标签。

磁耦合标签 J41 测试时, 50 个标签放置在白色泡沫上表面, 调整白色泡沫的高度  $z$ , 记录不同高度下, 采用本文设计的近场阅读器天线, 阅读器读取标签的数量。重复 5 次上述测试, 得出不同高度下的平均读取率, 不同高度下标签 J41 的读取率如图 11 所示。从图 11 可以看出, 在天线上方 0~16 cm 范围内, 标签的读取率达到了 100%, 当高度增加到 24 cm 时, 所有标签均无法被读取到。

将试验标签替换为 50 个电耦合偶极子标签,

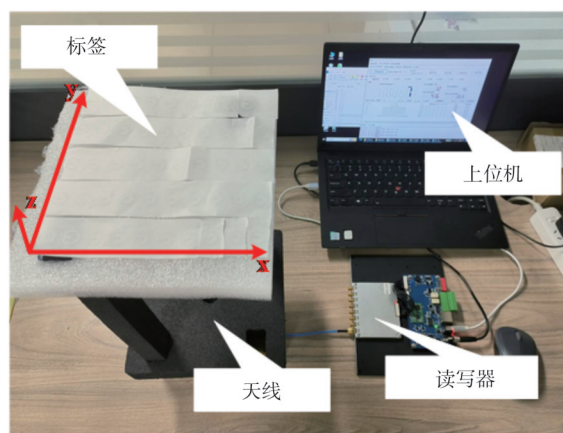
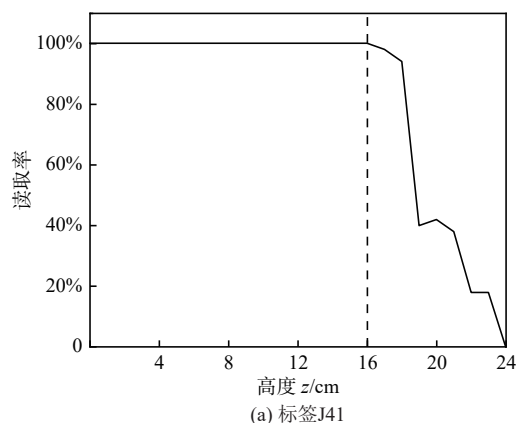


图 10 标签读取测试环境



(a) 标签 J41



(b) 标签 J41 的读取率

图 11 不同高度下标签 J41 的读取率

标签摆放区域扩大到 49 cm×27 cm。为了验证本文设计的近场阅读器天线的电场多极化特性, 将标签的长边分别沿  $x$  轴和  $y$  轴方向摆放, 进行了两组独立的测试, 调整标签高度并记录阅读器的读取数量。重复 5 次上述测试, 得出两种摆放试验标签在不同高度下的平均读取率, 不同高度下线极化标签的读取率如图 12 所示。长边沿  $x$  轴和  $y$  轴摆放的标签在相同高度下的读取率近似相同, 表明该天线对这两种摆放方向的标签具有相近的读取能力, 进而可以推得, 本文所设计的近场阅读器天线, 可以有效地读取在平面方向任意摆放的标签。

天线性能对比见表 2, 为本文天线与近年来已发表相关文献的天线的性能对比。从表 2 比较得出, 在阅读器输出功率相同的情况下, 读取同款标签 J41

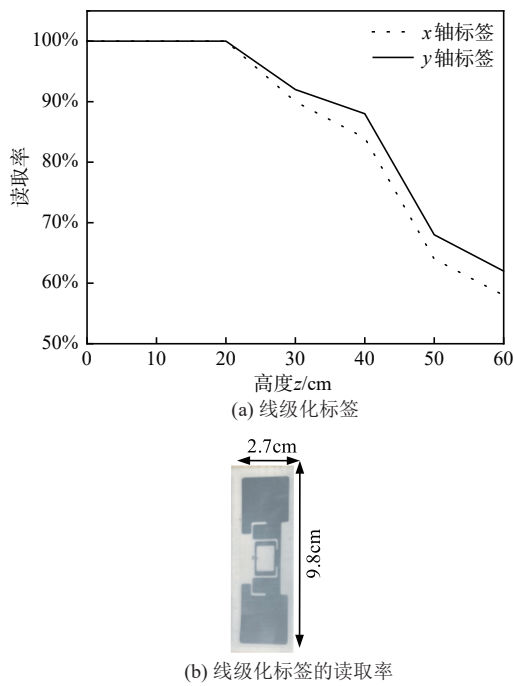


图12 不同高度下线极化标签的读取率

表2 天线性能对比

文献	天线大小/(mm×mm)	100%读取距离/cm	测试标签
文献[14]	40×40	5.0	J41
文献[15]	170×170	13.5	J41
文献[18]	776×120	12.0	J41
文献[19]	315×315	7.5	J41
文献[20]	170×170	15.0	J41
本文	150×150	16.0	J41

时，本文设计的天线在读取距离上展现了更优的性能。相较于其他已发表文献，本文设计天线100%读取距离达到16 cm，读取距离的提升，有助于提高物联网系统数据获取的稳定性和可靠性。

无人超市收银台模拟搭建场景如图13所示，类似物联网的无人超市收银台，尺寸为29 cm×20 cm×16 cm的购物篮放置在本文设计天线上方，篮内物品周围放置不同朝向的25个磁耦合标签和25个电耦合标签。经过多次测试，篮内50个标签均能被100%识别，表明本文设计天线具备较强的识别RFID标签的能力。

### 3 结束语

本文设计了一种多环形结构近场RFID阅读器天线，该天线能够在识别区域内产生均匀的磁场分

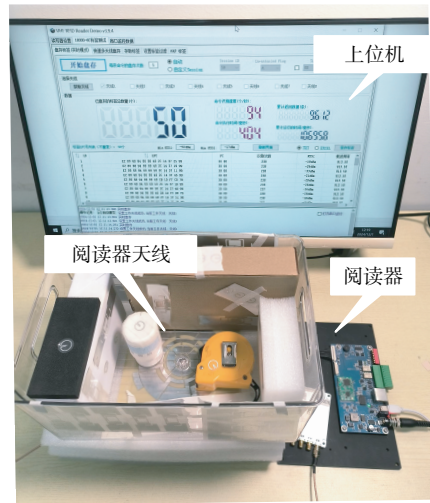


图13 无人超市收银台模拟搭建场景

布和多极化电场。仿真和实测结果表明，对于磁耦合环形标签，100%读取距离为16 cm，最大读取距离为23 cm；对于电耦合标签，天线产生的多极化电场对于不同方向摆放的标签都具有相近的读取能力。本文所提的物联网RFID阅读器天线适用于无人超市收银台，有利于增强RFID系统对不同类型标签的兼容性，提高物联网系统数据获取的稳定性和可靠性。

### 参考文献：

- [1] 张侦锐, 袁家德. 耦合馈电小型圆极化高增益RFID阅读器天线[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 512-516.
- ZHANG Z R, YUAN J D. Circularly polarized high gain RFID reader antenna with coupling feed[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2023, 51(4): 512-516.
- [2] KUMBHAKARNA G A, CHAUDHARI R P. RFID based lab inventory management system[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [3] HUNT V D, PUGLIA A, PUGLIA M. History and evolution of RFID technology[M]//RFID: A Guide to Radio Frequency Identification. Wiley, 2007: 25-31.
- [4] SHAHIN M K. Wireless communication and RFID based handheld database and medical diagnostic system[C]//Proceedings of the 2014 Cairo International Biomedical Engineering Conference (CIBEC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 6-9.
- [5] BANKS J. Past, present and future of RFID[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway: IEEE Press, 2007: nil26-nil27.
- [6] LI D Y, XIE S D, CHEN R J, et al. Design of Internet of things system for library materials management using UHF RFID[C]//

- Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 44-48.
- [7] CASO R, MICHEL A, BUFFI A, et al. A modular antenna for UHF RFID near-field desktop reader[C]//Proceedings of the 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 204-207.
- [8] MICHEL A, LISI F, MANARA G, et al. Design considerations on a UHF RFID smart gate antenna for the detection of tags embedded into boots[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2022: 98-100.
- [9] SHARMA A, ZUAZOLA I J G, BATCHELOR J C, et al. Dual purpose near- and far-field UHF RFID coil antenna with non-uniformly distributed-turns[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1342-1345.
- [10] MICHEL A, RODRIGUEZ PINO M, NEPA P. Reconfigurable modular antenna for NF UHF RFID smart point readers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 498-506.
- [11] CHOI W, KIM J S, BAE J H, et al. Near-field antenna for a radio frequency identification shelf in the UHF band[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010, 4(10): 1538-1542.
- [12] LI X P, ZHU H, ZHANG D, et al. Two-dimensional scanning antenna array for UHF radio frequency identification system application[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014, 8(14): 1250-1258.
- [13] CHOU H T, LEE M Y, YU C T. Subsystem of phased array antennas with adaptive beam steering in the near-field RFID applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1746-1749.
- [14] KIM S Y, AHN S H, LEE W S. Near-field UHF quadruple loop antenna with uniform field distribution for item-level tagging[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(4): 523-527.
- [15] WEI X D, ZHANG H L, HU B J. Novel broadband center-fed UHF near-field RFID reader antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14: 703-706.
- [16] QING X M, GOH C K, CHEN Z N. A broadband UHF near-field RFID antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(12): 3829-3838.
- [17] ZENG Y J, CHEN Z N, QING X M, et al. A zero-phase-shift line (ZPSL) grid loop antenna with enhanced magnetic field distribution[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2016: 99-100.
- [18] YAO Y, LIANG Y S, YU J S, et al. A broadband near-field UHF RFID reader antenna with low far-field gain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4869-4874.
- [19] XU R, SHEN Z X. A center-fed UHF near-field RFID reader antenna with large interrogation zone[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI). Piscataway: IEEE Press, 2022: 115-116.
- [20] 傅世强, 熊昂宇, 房少军. 对数周期偶极子结构的新型近场均匀天线[J]. 电讯技术, 2021, 61(11): 1446-1450.
- FU S Q, XIONG A Y, FANG S J. A novel near-field uniform antenna with log-periodic dipole structure[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(11): 1446-1450.
- [21] SONG C Y, WU Z P. A loop antenna array with an enlarged near-field interrogation zone for UHF RFID near-field and far-field applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(10): 1985-1989.
- [22] ANDRENKO A S. Optimized near-field antenna for UHF RFID smart shelf applications[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1576-1577.
- [23] 时代儿. 基于多种极化的RFID识别技术研究与应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- SHI D E. Research and application of RFID identification technology based on multiple polarization[D]. Suzhou: Soochow University, 2022.
- [24] NIU C C, YUAN J D, ZHAO Y J, et al. A compact radio frequency identification tag antenna for double-side anti-metal design[C]//Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [25] 戴利斌, 许志猛, 袁家德. 基于方形螺旋谐振器的紧凑型RFID标签天线[J]. 物联网学报, 2024, 8(1): 147-152.
- DAI L B, XU Z M, YUAN J D. Compact RFID tag antenna based on square spiral resonator[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(1): 147-152.
- [26] YAO Y, LIANG Y S, YU J S, et al. Design of a multipolarized RFID reader antenna for UHF near-field applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3344-3351.
- [27] 梁一山. 超高频区域可控RFID近场天线的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- LIANG Y S. The design of controllable interrogated area UHF RFID near-field reader antenna[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [28] 薛亚妮. 可扩展的三维均匀近场RFID读写器天线的设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- XUE Y N. Scalable three-dimensional uniform near-field RFID reader antenna design[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [29] REN X J, YAO Y, LIANG Y S, et al. A novel multi-polarization UHF RFID reader antenna for near-field applications[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Piscat-

away: IEEE Press, 2020: 1599-1600.

[30] 葛秋月. 三维场均匀的超高频近场RFID读写器天线研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.

GE Q Y. Research on UHF near-field RFID reader antenna with uniform field in three-dimensional direction[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.

[作者简介]



陈榕(2000-), 男, 福州大学物理与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为射频识别读写器天线。



谢维华(1979-), 男, 博士, 福州大学物理与信息工程学院研究员, 主要研究方向为卫星导航、通信应用等。



袁家德(1974-), 男, 博士, 福州大学物理与信息工程学院教授, 主要研究方向为通信天线、射频识别等。