

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508544

低剖面双臂全向螺旋抗金属超高频 RFID 标签*

蓝华昀 赖旺富 袁家德
(福州大学物理与信息工程学院 福州 350108)

摘要:金属环境会影响射频识别(radio frequency identification,RFID)标签天线的阻抗匹配和辐射性能,同时为了减小标签厚度,提出了一种小型化低剖面双臂螺旋抗金属超高频 RFID 标签。标签天线由上层辐射贴片和下层接地面组成,上层辐射贴片结构为两条偶极子臂从中心向外螺旋延伸,呈中心对称,芯片位于两条螺旋臂的对称中心。从上层辐射贴片偶极子臂上引入一条金属短接臂连接下层接地面,通过改变辐射贴片中的偶极子臂宽度和短路臂的位置,能够有效调节标签天线工作频率,减小天线尺寸。所提出的标签天线尺寸为 $\phi 27\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$,将该标签贴于金属圆柱形水阀上表面,在等效全向辐射功率为 3.28 W 的条件下,水平方向围绕一周实测阅读距离在 $8.5\sim 9.3\text{ m}$ 。所设计的标签天线具有低剖面、抗金属、全向性、读取距离远、易生产等特点,适用于在金属水阀、酒类金属瓶盖等圆柱形金属应用场景中,采用 RFID 技术进行生产运输、识别监测等方面的管理。

关键词: 标签天线;低剖面;全向;抗金属;超高频 RFID
中图分类号: TN828.4;TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Low-profile double-arm omnidirectional helical anti-metal UHF RFID tag

Lan Huayun Lai Wangfu Yuan Jiade
(School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The impedance matching and radiation performance of the RFID tag antenna will be affected in the metal environment. Meanwhile, in order to reduce the thickness of the tag, a miniaturized low-profile double-arm spiral anti-metal UHF RFID tag is proposed. The tag antenna is composed of an upper radiating patch and a lower ground patch. The structure of the upper radiating patch is that two dipole arms spirally extend outward from the center, presenting a central symmetry, and the chip is located at the symmetrical center of the two spiral arms. A metal short-circuit arm is introduced from the dipole arm of the upper radiation patch to connect the lower layer to the ground. By changing the width of the dipole arm and the position of the short-circuit arm in the radiation patch, the resonant frequency of the tag antenna can be effectively adjusted and the size of the antenna can be reduced. The size of the tag antenna proposed in this paper is $\phi 27\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$. The tag is attached to the upper surface of the metal cylindrical water valve. Under the condition of an equivalent omnidirectional radiation power of 3.28 W , the measured reading distance around one circle in the horizontal direction is $8.5\sim 9.3\text{ m}$. The tag antenna designed in this paper features low profile, metal resistance, omnidirectionality, long reading distance and easy production. It is suitable for cylindrical metal application scenarios such as metal water valves and metal bottle caps for alcoholic beverages, and is managed in aspects such as production transportation, identification and monitoring using RFID technology.

Keywords: tag antenna; low profile; omnidirectional; anti-metal; UHF RFID

0 引 言

射频识别 (radio frequency identification, RFID) 作为物联网的核心技术之一,通过无线电波自动识别目标对象并获取数据进行无线通信,RFID 技术在医疗、货物采集等多个领域都有广泛应用^[1-2],标签是 RFID 技术的重要组成部分,由标签天线和芯片组成^[3-4]。在实际应用中,标签经常需要处于金属环境中,面临金属环境对标签天线的显著影响^[5],因此需要设计专门的抗金属标签天线。

目前,学者们已提出多种方案解决标签天线的抗金属问题,如增大标签天线与金属地间距、采用电磁带隙结构 (electromagnetic band gap, EBG)^[6]、采用人造导磁体 (artificial magnetic conductor, AMC)^[7]、折叠型结构^[8]等。自带金属地的折叠型结构由于具有易于实现小型化、低剖面等优点,相关文献开展了深入的研究,包括微带天线、平面倒 F 型天线、平面倒 L 型天线、平面倒 S 型天线等。文献[9]基于微带天线提出了一种可安装在金属物体上的标签天线,该天线在金属上能够实现较好的读取距离;文献[10]基于平面倒 F 型天线设计了一种用于金属腔内识别金属部件的紧凑型标签天线,该天线能够在金属腔体中正常工作并性能稳定;文献[11-12]提出了平面倒 L 型抗金属标签天线,这两款标签在金属环境有较远的读取距离;文献[13]提出了一种平面倒 S 型天线,在实现小型化的同时能够实现较远的读取距离。

本文在上述折叠型抗金属标签天线的基础上,提出了一种圆形结构全向辐射的超高频 RFID 标签天线,通过采用中心对称、馈电端口两侧加载封闭半圆环、添加金属接地板等方法,实现标签天线在特定金属应用场景中具有较好的辐射性能。

1 抗金属 RFID 标签天线结构

天线结构如图 1 所示,天线由上层辐射贴片、下层接地面和两层间的短接臂组成,上下层间介质基板是泡棉,泡棉厚度为 0.5 mm,相对介电常数 ε_r 为 1.06,损耗角正切 $\tan\delta$ 为 0.000 1,低损耗角正切能够降低电磁波在介质中的能量损耗,提高天线的辐射性能,同时加工方便,成本较低,因此选择泡棉作为介质基板,如图 1(a) 天线侧视图所示。天线上层辐射贴片由两个偶极子臂旋转并呈中心对称,天线的偶极子臂从中心向外旋转延伸,由 3 个半径逐渐增大的圆弧 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 组成,在其中一条偶极子臂添加宽度为 W_5 短接线连接背部金属地,与 x 轴正方向夹角为 θ_5 ,如图 1(b) 所示。标签天线金属层通

过铝箔材料激光蚀刻而成,铝箔材料由金属铝覆盖在 0.05 mm 柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 上构成, PET 相对介电常数 ε_r 为 0.002,如图 1(c) 所示;标签芯片采用 NXP 公司 Ucode 8 芯片,位于天线偶极子臂的中心位置,在 915 MHz 时,芯片读取灵敏度为 -22.9 dBm,阻抗为 (13-j191) Ω 。天线优化后的参数尺寸如表 1 所示。

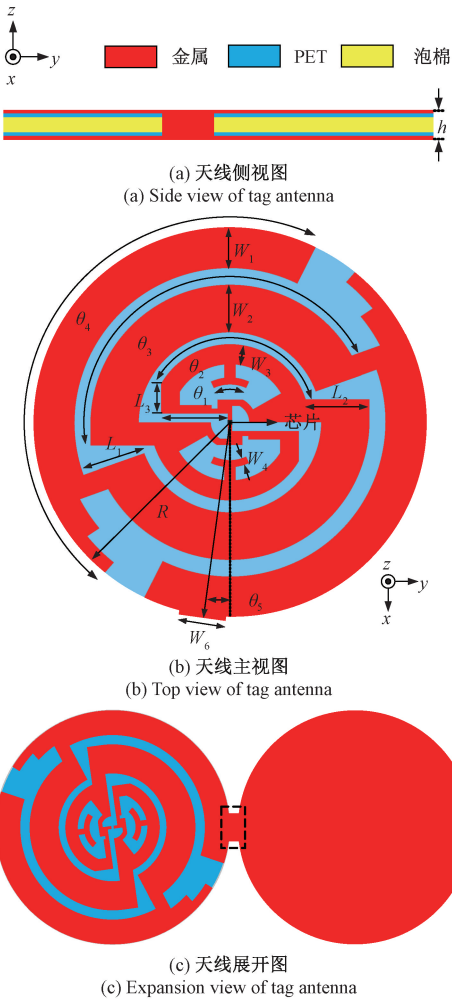


图 1 整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the antenna structure

表 1 天线优化后设计参数

Table 1 Design parameters after antenna optimization

参数	数值	参数	数值	参数	数值
W_1	2.8 mm	L_1	4.4 mm	θ_3	160.5°
W_2	3.3 mm	L_2	4.35 mm	θ_4	166.5°
W_3	1.4 mm	L_3	2.08 mm	θ_5	8°
W_4	0.5 mm	θ_1	50°	R	13.5 mm
W_5	3.2 mm	θ_2	55°	h	0.6 mm

2 抗金属 RFID 标签天线设计与仿真分析

2.1 天线设计和原理分析

功率传输系数表示 RFID 天线接收能量传输到标签芯片的能量比例,反映了标签天线与芯片之间的匹配程度,功率传输系数 τ 计算公式为^[14]:

$$\tau = \frac{4R_c R_{in}}{|Z_c + Z_{in}|^2} \quad (1)$$

式中: $Z_c = R_c + jX_c$ 为芯片阻抗; R_c 为芯片的输入阻抗; jX_c 芯片的输入电抗; $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ 为天线阻抗; R_{in} 为天线在馈电点处的输入电阻; jX_{in} 为天线在馈电点处的输入电抗,当 $Z_c + Z_a = 2R_c = 2R_a$ 时,芯片阻抗与天线阻抗共轭,此时功率传输系数 τ 达到最大值 1。

RFID 标签由标签天线和芯片组成,标签天线设计演变过程如图 2(a)~(d)所示。图 2(a)天线 1 是基于偶极子天线设计的螺旋结构标签天线,从图 3(a)可以看出,天线 1 功率传输系数最大值对应的频率 $f = 1.875$ GHz,从图 3(b)和(c)可以看出,标签天线对应频率的阻抗为 $(5.82 + j191.74) \Omega$ 。

基于图 2(a),为了降低功率传输系数最大值对应频率和优化芯片阻抗与天线阻抗之间的匹配,在芯片附近添加了中心对称的封闭半圆环,形成了图 2(b)中的天线 2。从图 3(a)可以看出,天线 2 的实部曲线相较于天线 1 向低频有较大偏移,增加的封闭半圆环结构有助于标签功率传输系数最大值对应频率向低频移动,同时功率传输系数 τ 最大值提升了 0.1;从图 3(b)和(c)可以看出,添加该结构增大了功率传输系数最大值对应频率附近标签天线阻抗的实部,天线 2 功率传输系数最大值对应频率 $f = 1.757$ GHz,阻抗为 $(8.61 + j191.71) \Omega$ 。

图 2(c)中,为了进一步降低功率传输系数最大值对应的频率,实现抗金属性能,偶极子外环上添加了金属臂以及背面金属地,同时调节了封闭半圆环的宽度,根据图 3 可以看出,标签在添加金属短接臂连接金属地后,使标签最接近与芯片阻抗共轭对应的频率向低频偏移,降低了标签天线功率传输系数最大值对应频率,相较于相同尺寸的标签能够实现尽量减少开槽的情况下调整天线的功率传输系数最大值对应频率,标签能够在需要的工作频段内正常工作,天线 3 功率传输系数最大值对应的频率 $f = 1.318$ GHz,阻抗为 $(7.11 + j191.98) \Omega$ 。

图 2(d)调整功率传输系数最大值对应的频率在 902~928 MHz 工作频率范围内,标签天线 4 改变了金属臂在外环上的位置,在封闭半圆环中添加了一对“T”型枝节等结构用于微调标签天线 4 的功率传输系数最大值对应频率,天线 4 功率传输系数最大值对应的频率 $f = 0.918$ GHz,阻抗为 $(11.6 + j190.82) \Omega$,在小尺寸低剖面

的条件下实现该天线在 902~928 MHz 频段内实现良好阻抗匹配。

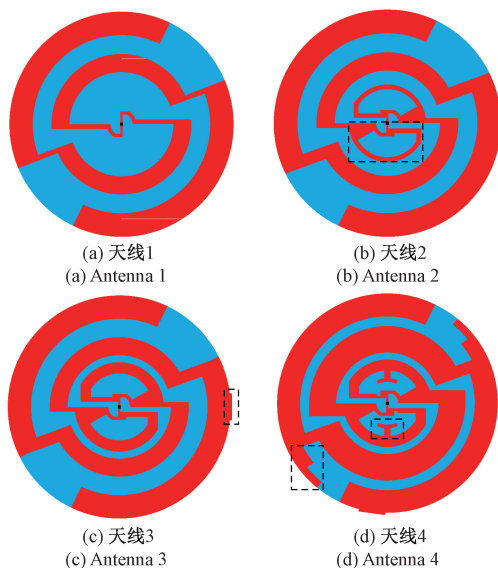
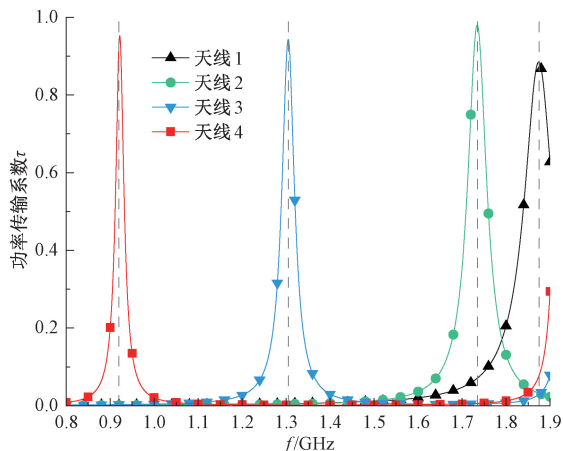


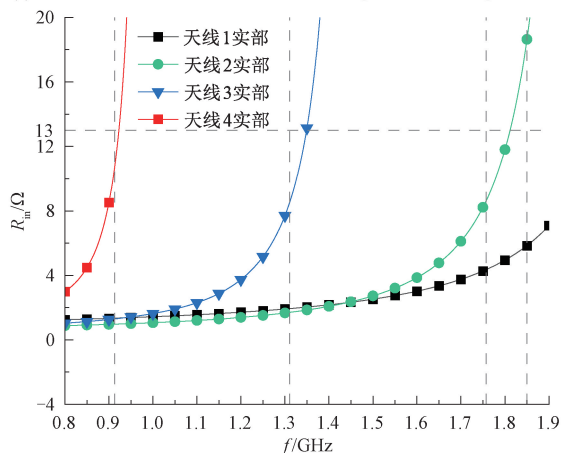
图2 标签天线的结构演变步骤

Fig. 2 The structural evolution steps of the tag antenna



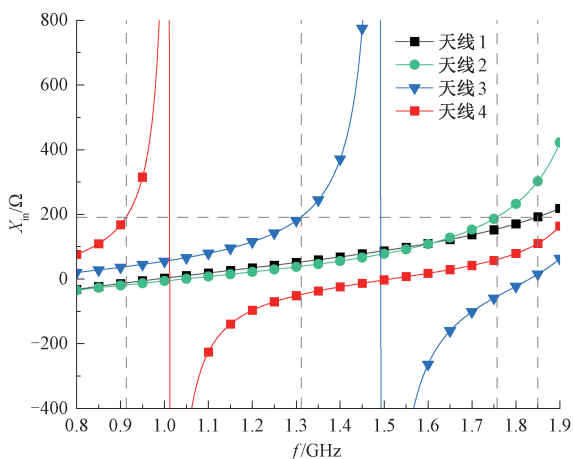
(a) 标签1-标签4的功率传输系数曲线

(a) Power transmission coefficient curves of tag antenna 1 to tag antenna 4



(b) 标签天线1-标签天线4的阻抗实部变化

(b) Impedance real part change from tag antenna 1 to tag antenna 4



(c) 标签天线1-标签天线4的阻抗虚部变化

(c) Impedance imaginary part change from tag antenna 1 to tag antenna 4

图3 标签天线功率传输系数和阻抗曲线

Fig. 3 Power transmission coefficient and impedance curve graph of the tag antenna

2.2 天线参数分析

采用电磁仿真软件 Ansys HFSS 对天线进行仿真设计,创建辐射边界,标签天线整体设置为金属边界,激励方式为集总端口激励,在参数分析过程中,标签天线贴在金属水阀上表面,标签天线所有结构参数都会影响标签的性能,本文重点分析关键参数圆弧臂宽 W_1 和金属短接臂夹角 θ_5 对天线性能的影响。

分析外圈圆弧臂宽 W_1 对功率传输系数 τ 和阻抗 ($R_m + jX_m$) 的影响,如图4(a)所示。在控制其他参数不变的情况下, W_1 从 2.6 mm 以 0.1 mm 的步长增大到 2.9 mm,功率传输系数 τ 的最大值对应频率从 892 MHz,逐渐增大到 906、918 和 928 MHz。图4(b)给出了标签天线端口阻抗的实部和虚部,其中实心图例表示实部,空心图例表示虚部。在其他参数不变的情况下,观察外圈圆弧臂宽 W_1 变化对功率传输系数最大值对应频率的影响,可以看出 W_1 在逐渐增大的过程中,天线的功率传输系数最大值对应频率向高频偏移,其原因为 W_1 变化引起其等效电感和电容发生相对变化。式(2)和(3)分别给出了其等效电感和电容的表达式^[15-16]。

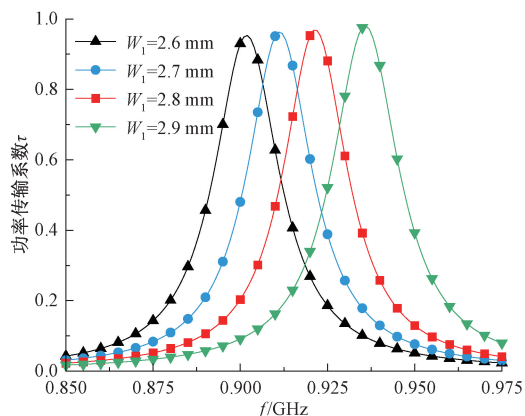
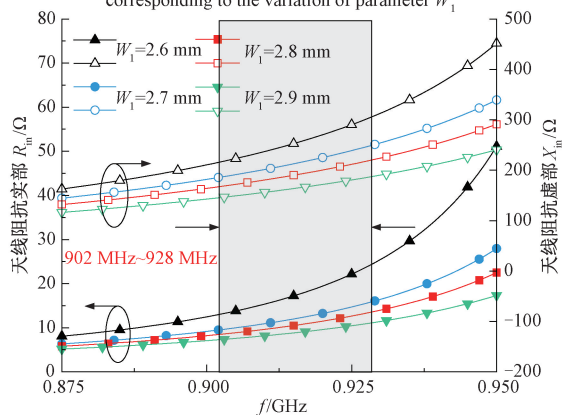
$$L_s = \frac{\mu_0 \mu_r l h}{W} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为介质磁导率; l 为外环臂长度; h 为介质厚度; W 为外环臂宽度。

$$C_p = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A_e}{h} \quad (3)$$

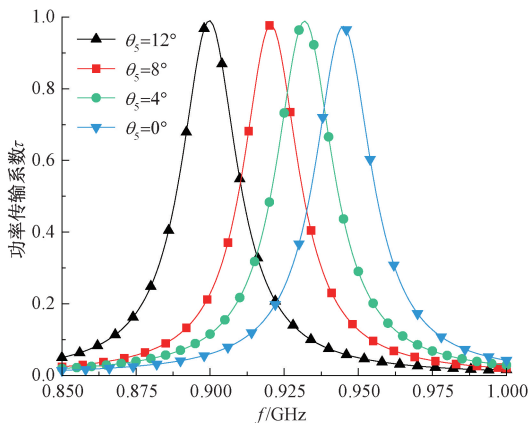
式中: ε_r 为介质泡棉介电常数; ε_0 为真空介电常数; A_e 为天线有效表面积; h 为介质泡棉厚度。当 W_1 增大,辐射臂产生的等效电感 L_s 减小,产生的等效电容 C_p 增大,共

同影响功率传输系数最大值对应频率。综合考虑功率传输系数和覆盖带宽,最优值取 $W_1 = 2.8$ mm。

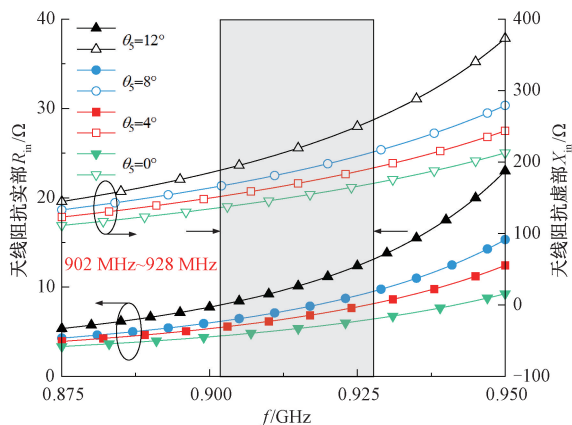
(a) 参数 W_1 变化对应的功率传输系数 τ 曲线(a) The curve of the power transmission coefficient τ corresponding to the variation of parameter W_1 (b) 天线阻抗 ($R_m + jX_m$) 的变化曲线(b) The variation curve of antenna impedance ($R_m + jX_m$)图4 W_1 变化对应功率传输系数 τ 和天线阻抗曲线Fig. 4 The W_1 variation corresponds to the power transmission coefficient τ curve graph and the antenna impedance curve graph

讨论金属短接臂与 x 轴正方向的夹角 θ_5 的变化对标签性能的影响,为了确保标签天线工作频率在参数扫描范围内和直观准确分析所得不同 θ_5 值对应的功率传输系数曲线,将 θ_5 以 4° 步长从 12° 减小到 0° ,标签功率传输系数最大值对应的频率由 891 MHz 逐渐增大到 939 MHz,同时观察到功率传输系数最大值变化很小,如图5(a)所示。因此改变 θ_5 有利于在一定范围内调节功率传输系数最大值对应频率,并且不影响功率传输系数的最大值,其原因是 θ_5 逐渐增大使得天线上表面外圈电流流过的路径变长,使得功率传输系数最大值对应谐振频率降低。图5(b)给出了 θ_5 变化对天线阻抗的影响,其中实心图例表示实部,空心图例表示虚部。从图5(b)可以看出,当 θ_5 为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 时,功率传输系数最大值对应频率下的标签天线阻抗分别为 $(10.16 + j191.61) \Omega$ 、

$(10.69 + j192.05) \Omega$ 、 $(10.34 + j191.96) \Omega$ 、 $(10.67 + j191.94) \Omega$, 阻抗基本不变。考虑到标签的工作带宽, θ_s 取最优值 8° 。



(a) 参数 θ_s 变化对应的功率传输系数 τ 曲线
(a) The curve of the power transmission coefficient τ corresponding to the variation of parameter θ_s



(b) 天线阻抗 $(R_m + jX_m)$ 的变化曲线
(b) The variation curve of antenna impedance $(R_m + jX_m)$

图 5 θ_s 变化对应功率传输系数 τ 和天线阻抗曲线

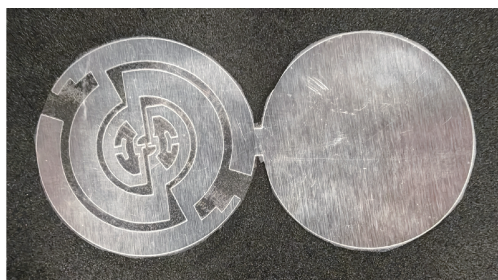
Fig. 5 The θ_s variation corresponds to the power transmission coefficient τ curve graph and the antenna impedance curve graph

综上所述, 参数 W_1 和 θ_s 对标签性能有着不同的影响, 通过改变 W_1 能够改变上表面与金属接地面之间的等效电容和螺旋臂等效电感, 有效优化标签天线阻抗和标签工作频率; 改变 θ_s 即改变短接臂在外环的位置, 能够不影响功率传输系数最大值的情况下有效优化标签工作频率。

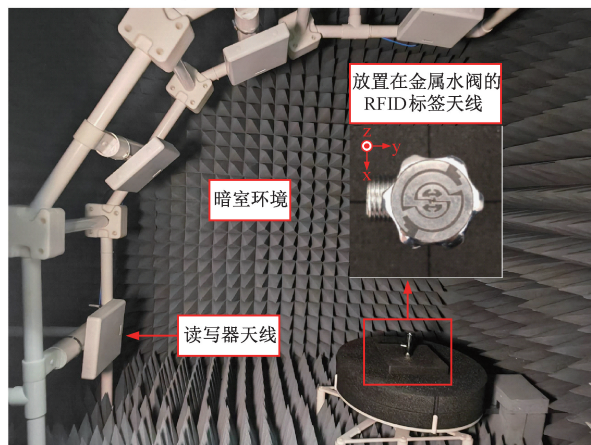
3 结果与讨论

根据表 1 优化参数, 使用激光蚀刻机制作 RFID 标签天线实物, 图 6(a) 所示为标签天线展开图, 图 6(b) 为实测场景。将标签实物置于金属圆柱形水阀上表面, 水阀

整体放置在 Voyantic Tagformance Pro 测量系统的平台正中央, 测量系统的等效全向辐射功率为 3.28 W。



(a) 标签天线展开图
(a) The expansion diagram of the tag antenna



(b) 测试场景
(b) Test scenario

图 6 标签天线实物和测试场景

Fig. 6 Physical image and test scene of the tag antenna

根据 Friis 公式^[17]描述的发射天线与接收天线之间的关系, 可以计算得到 RFID 标签天线的阅读距离为:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_r}} \quad (4)$$

式中: λ 为信号波长; P_t 为阅读器发射功率; G_t 为阅读器发射天线增益; G_r 为接收发射信号的标签天线增益; τ 为衡量接收天线与芯片之间匹配程度的功率传输系数; P_r 为激活标签芯片的功率阈值。根据式 (4), 图 7 给出了天线放置在金属水阀上表面的理论读取距离, 通过标签暗室测试取得了实测读取距离、实测标签灵敏度随频率变化的曲线图, 从图中可以看出, 在天线工作频段内, 天线的理论最大读取距离达到 10.1 m, 天线实测最大读取距离达到 9.3 m, 在 915 MHz 时, 标签天线的灵敏度为 -16.2 dBm。

通过标签暗室测得在频率 915 MHz 时, 标签放置在金属水阀上表面的理论读取距离与实际读取距离方向图曲线, 以图 6(b) 中坐标轴为标准, 其中芯片正上方对应 xoz 面中 $\theta = 0^\circ$, 芯片正下方对应 xoy 面中 $\theta = -180^\circ$, 图 8(a) 为标签天线 xoy 方向图曲线, 标签天线在 xoy 面

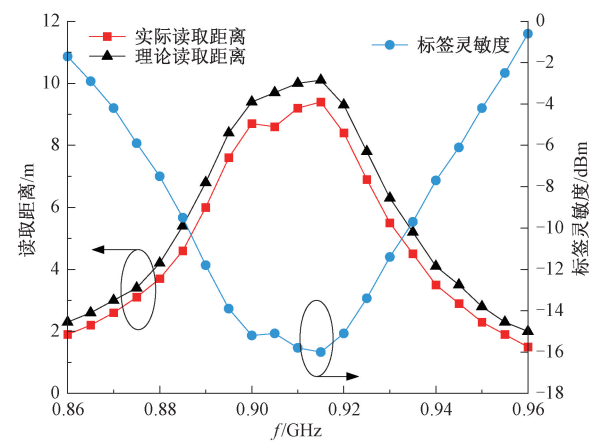
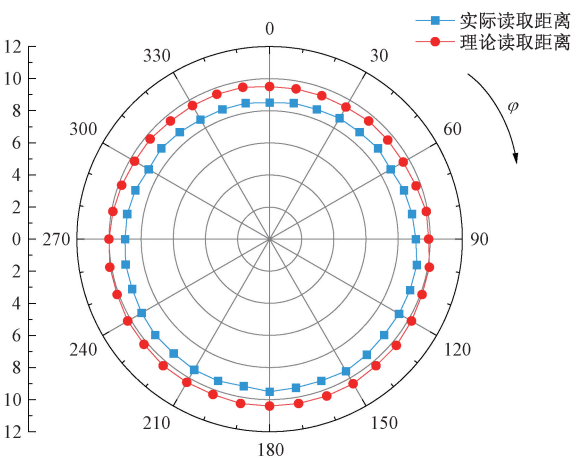


图 7 阅读距离和灵敏度曲线

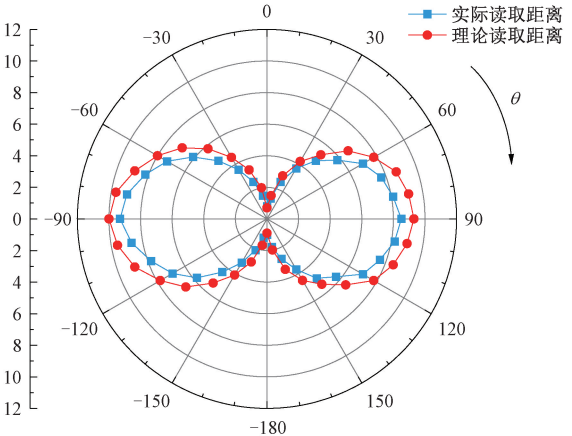
Fig. 7 Read the distance and sensitivity curves

上实际读取范围为 8.5~9.3 m,从各个方向上读取均在 8.5 m 以上,具有较好的读取稳定性和全向性;图 8(b) 为标签天线 xoz 方向图曲线,在 xoz 面上实际读取范围为 0.7~9.3 m,其中 θ 为 0° 或者 -180° 时,即水阀正上方或者正下方时读取距离最近,为 0.7 m 左右, θ 为 90° 或者 -90° 时,与水阀金属上表面位于同一水平面时读取距离最远,能够达到 9.3 m 左右。

表 2 将本文所提出的抗金属标签天线与近期发表的抗金属标签天线进行比较,在相近尺寸的情况下,与文献[11,21]的标签相比,本文的抗金属标签有较远的读取距离;在相近的读取距离下,与文献[8,19-20]的标签相比,本文的抗金属标签有较小的尺寸。更为重要的是相较于上述文献中的标签,本研究的标签能够实现全向读取。



(a) xoy 面读取距离
(a) Reading distance of the xoy surface



(b) xoz 面读取距离
(b) Reading distance of the xoz surface

图 8 标签天线读取距离图

Fig. 8 Tag antenna reading distance pattern

表 2 本文所提出标签与近期已发表文献中抗金属标签性能比较

Table 2 The performance comparison of the anti-metal tags proposed in this paper with those in the recently published literature

来源	芯片	芯片灵敏度/dBm	介质基板材料	标签尺寸	金属背板大小/mm ²	P_{EIRP}/W	d^*/m
文献[8]	MW8112	-20	Foam	35 mm×20 mm×2.15 mm (1 505 mm ³)	200×200	3.28	7.6
文献[11]	Monza 5	-17.8	Foam	31.5 mm×31.5 mm×3.2 mm (3 175.2 mm ³)	200×200	4	7.25
文献[18]	Monza R6	-20	Foam	40 mm×40 mm×1.6 mm (2 560 mm ³)	200×200	3.28	5
文献[19]	Higgs 4	-20.5	Foam	55.2 mm×44.2 mm×1.5 mm (3 659.76 mm ³)	200×200	4	8.14
文献[20]	Higgs 4	-20.5	PTFE	57.72 mm×60.9 mm×1.5 mm (5272 mm ³)	200×200	4	8.44
文献[21]	Monza 5	-17.8	Foam	38 mm×38 mm×1.6 mm (2 310.4 mm ³)	200×200	4	5.65
本文	Ucode 8	-22.9	Foam	$\pi \times (13.5)^2 \text{ mm}^2 \times 0.6 \text{ mm}$ (343.5 mm ³)	$13.5 \times 13.5 \times \pi$	3.28	9.3

注: d^* 为标签天线在金属环境下的最大读取距离

4 结 论

本文提出了一种圆形结构低剖面小型化全向辐射的超高频 RFID 抗金属标签天线。标签天线整体呈硬币形结构,天线上表面辐射体馈电两侧采用对称封闭半圆环,两条偶极子臂螺旋向外延伸,通过金属短接臂部连接背部金属地面。将标签水平放置贴于金属圆柱形水阀上表面,在有效全向辐射功率为 3.28 W 的条件下,围绕水平一周实测读取距离为 8.5~9.3 m。本文所提出标签具有硬币形状、小型化、低剖面、全向性、读距远等优点,适合于多种金属圆柱形工业物联网应用场景,如圆柱形水阀、金属瓶颈酒类等管理。

参考文献

- [1] 沈盱亮. 基于 RFID 技术的医疗设备信息技术研究[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(9): 21-27.
SHEN X L. Research on information technology of medical equipment based on RFID technology[J]. China Medical Devices, 2024, 39(9): 21-27.
- [2] LIN K, CHEN H, LI Z, et al. Efficiently identifying unknown COTS RFID tags for intelligent transportation systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(1): 987-997.
- [3] 李帅,张雪凡,任秀方,等. UHF RFID 标签谐振特性非接触测试方法的研究与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 5-10.
LI SH, ZHANG X F, REN X F, et al. Research on and realization of contactless testing method of UHF RFID tags' resonance characteristics [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 5-10.
- [4] 孙英,花赛月,刘乃源,等. 变形工作状态下非等间距柔性 NFC 标签天线设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 57-66.
SUN Y, HUA S Y, LIU N Y, et al. Design of non-equal spacing flexible NFC tag antenna under deformed working states [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 57-66.
- [5] 孟宪杰,袁家德. 金属表面任意滚动型 RFID 探测标签天线的研究[J]. 仪器仪表学报, 2021(11): 115-122.
MENG X J, YUAN J D. Research on the random rolling RFID detection tag antenna on metal surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021(11): 115-122.
- [6] LI X, GAO G, ZHU H, et al. UHF RFID tag antenna based on the DLS-EBG structure for metallic objects[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2020, 14(7): 567-572.
- [7] LUO W, WANG P. A Compact UHF-RFID tag antenna with embedded AMC for metallic objects [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(4): 873-877.
- [8] 赖旺富,施子斌,林长桂,等. 螺旋环结构超高频 RFID 双面抗金属标签的研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 114-122.
LAI W F, SHI Z B, LIN CH G, et al. Research on double-sided anti-metal UHF RFID tag with spiral loop structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 114-122.
- [9] MO L, QIN C. Planar UHF RFID tag antenna with open stub feed for metallic objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(9): 3037-3043.
- [10] MICHEL A, FRANCHINA V, NEPA P, et al. A UHF RFID tag embeddable in small metal cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1374-1379.
- [11] OOI S Y, CHEE P S, LIM E H, et al. Stacked planar inverted-L antenna with enhanced capacitance for compact tag design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 1816-1823.
- [12] TAN J I, LEE Y H, LIM E H. Coplanar-fed planar inverted-L antennas (PILAs) for miniature on-metal RFID tag design [C]. 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), 2021: 185-186.
- [13] MURUGESH M, LIM E H, CHEE P S, et al. Bong complementarily coupled C-Shaped microstrip patches with wide-range frequency tuning capability for metal-applicable UHF RFID tag design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(12): 11548-11558.
- [14] ERMAN F, KOZIEL S, LEIFSSON L. Broadband/dual-band metal-mountable UHF RFID tag antennas: A systematic review, taxonomy analysis, standards of seamless RFID system operation, supporting IoT implementations, recommendations, and future directions[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(16): 14780-14797.
- [15] WANG J H, YUAN J D. A Low-Profile UHF RFID tag antenna loaded with rectangular loop for double-sided anti-metal applications[J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2024, 141: 25-32.
- [16] NG W H, LIM E H, BONG F L, et al. Compact planar inverted-s antenna with embedded tuning arm for on-metal UHF RFID tag design [J]. IEEE Transactions on

- Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4247-4252.
- [17] SHE Y, TANG T, WEN G J, et al. Ultra-high-frequency radio frequency identification tag antenna applied for human body and water surfaces[J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(4): 21464.
- [18] NG W H, LIM E H, BONG F L, et al. Folded patch antenna with tunable inductive slots and stubs for UHF tag design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018 66(6): 2799-2806.
- [19] ERMAN F, MANSOUR D, KOUALI M, et al. Low-Profile interdigitated UHF RFID tag antenna for metallic objects[J]. IEEE Access, 2022, 10: 90915-90923.
- [20] ERMAN F, HANAFI E, LIM E H, et al. U-Shaped inductively coupled feed UHF rfid tag antenna with dms for metal objects [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(6): 907-911.
- [21] LEE S R, NG W H, LIM E H, et al, Compact magnetic loop antenna for omnidirectional on-metal UHF tag design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(2): 765-772.

作者简介



currently a M. Sc. candidate at Fuzhou University. His main research interests include radio frequency identification tag antenna.



received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010. He is currently a professor at Fuzhou University. His main research interests include communication antennas, radio frequency identification and radio frequency circuit.

蓝华昀, 2023 年于福州大学获得学士学位, 现为福州大学物理与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为 RFID 标签天线。
E-mail: lanhy_fzu@163.com

Lan Huayun received his B. Sc. degree from Fuzhou University in 2023. He is

袁家德 (通信作者), 2010 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为福州大学教授, 主要研究方向为通信天线、射频识别、射频电路等。

E-mail: yuanjiade@fzu.edu.cn

Yuan Jiade (Corresponding author)