

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413558

螺旋环结构超高频 RFID 双面抗金属标签的研究*

赖旺富¹, 施子斌², 林长桂², 袁家德¹

(1. 福州大学物理与信息工程学院 福州 350108; 2. 厦门信达物联科技有限公司 厦门 361101)

摘 要:提出一种小型化螺旋环结构双面抗金属超高频 RFID 标签。标签天线由 3 层金属平面组成,其中中间层为辐射贴片,上下两层为接地面,通过两层 1 mm 厚度泡棉基板隔离。辐射贴片包括外部环形贴片与内部螺旋环贴片,标签芯片位于环形贴片与螺旋环贴片之间。当标签天线下层接地面接触金属背景时,中间层辐射贴片和上层接地面共同产生有效辐射;反之,当上层接地面接触金属背景时,中间层辐射贴片和下层接地面可共同产生有效辐射,从而实现标签的双面抗金属性能和小型化。理论和仿真分析表明,改变中间层螺旋环贴片长度可有效调节天线的感抗,有利于实现天线与芯片阻抗共轭匹配。天线尺寸为 35 mm×20 mm×2.15 mm,仿真和实测结果表明,标签天线与芯片间最大功率传输系数在双面状态下均能达到 98% 以上;在 902~928 MHz 频率范围内和读写器设置为 3.28 W 等效全向辐射功率(EIRP)条件下,标签双面状态分别放置于 200 mm×200 mm 金属板上时最大读取距离分别为 7.5 和 7.6 m,最低灵敏度均为-14 dBm。本文所提出标签具有体积小、双面抗金属一致性好、读取距离远等优点,可有效提升金属环境应用场景中悬挂式标签的识别能力和稳定性,为复杂金属环境下的 RFID 标签应用提供了高效解决方案。

关键词: 射频识别;超高频;标签;标签天线;双面抗金属

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Research on double-sided anti-metal UHF RFID tag with spiral loop structure

Lai Wangfu¹, Shi Zibin², Lin Changgui², Yuan Jiade¹

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Xiamen Xindeco IOT Technology Ltd., Xiamen 361101, China)

Abstract: A miniaturized double-sided anti-metal UHF RFID tag with a spiral loop structure is proposed. The tag antenna comprises three metallic layers: a middle radiation patch, a lower ground plane, and an upper ground plane, separated by two layers of 1 mm-thick foam substrates. The middle radiation patch consists of an external ring patch and a central spiral loop patch, with the tag chip positioned between them. The middle radiation patch and the upper ground plane together generate effective radiation when the lower ground plane is mounted on the metallic plate. Conversely, the middle radiation patch and the lower ground plane act as the radiating pair when the upper ground plane is mounted on the metallic plate. This design enables the proposed antenna to achieve both double-sided anti-metal performance and miniaturization. Theoretical analysis and simulation results confirm that adjusting the length of the spiral loop patch in the middle layer effectively tunes the antenna's inductive reactance, which enables conjugate impedance matching between the antenna and the chip. The tag antenna has dimensions of 35 mm×20 mm×2.15 mm. Simulation and experimental results demonstrate that the maximum power transfer coefficient between the tag antenna and the chip exceeds 98% for both sides. When the two ground planes of the tag antenna are individually mounted on a 200 mm×200 mm metallic plate under an effective isotropic radiated power (EIRP) of 3.28 W, within the 902~928 MHz frequency range, the read distances reach 7.5 and 7.6 m, respectively. The minimum sensitivity is -14 dBm for both sides. The proposed tag offers advantages such as compact size, consistent double-sided anti-metal performance, and long read distance. It effectively enhance the identification capability and stability of suspended tags in metallic scenarios, providing an efficient solution for RFID tag applications in complex metallic scenarios.

Keywords: radio frequency identification; ultra high frequency; tag; tag antenna; double-sided anti-metal

收稿日期:2024-12-03 Received Date: 2024-12-03

* 基金项目:福建省高校产学研合作项目(2023H6004)资助

0 引 言

超高频(ultra high frequency, UHF)射频识别(radio frequency identification, RFID)技术具有传输距离远、通信容量大等优点,广泛用于物品自动识别与跟踪^[1-2]。在 RFID 技术中,标签作为其核心组成部分,对系统的整体性能起到决定性作用。多种仪器仪表中集成了 RFID 标签,用于环境数据的自动采集,如集成耐高温 RFID 标签的压力表、流量计等工业仪表,可在高温或腐蚀性环境下传输设备运行参数,支持远程状态监控;水质分析仪等设备集成传感器与 RFID 标签,实现环境数据(温湿度、污染物浓度)的自动化采集与无线回传等^[3-5]。随着应用环境复杂化,RFID 标签不可避免地接触金属环境,而金属表面产生的感应场会改变 RFID 标签天线自身的电流分布,导致标签天线性能衰减甚至失效^[6-7]。

目前提出了多种抗金属标签方案。第 1 类是增加天线与金属地的距离,如文献[8-9]用泡沫将标签天线与金属地隔离,以此降低金属地对标签的影响。第 2 类是采用自带金属地平面结构天线,如文献[10-11]设计了一种平面倒 L 结构的抗金属标签天线,文献[12-13]利用金属过孔设计成 PIFA 结构抗金属标签天线。第 3 类是采用折叠贴片结构天线,如文献[14-15]利用两层折叠贴片结构设计抗金属标签天线。

在一些特殊的金属背景 RFID 应用场景中,标签不适合粘贴在物体表面,例如金银首饰、文物等,只能采用悬挂的方式。然而,目前已发表文献中多为单面抗金属标签^[8-15],标签悬挂时只有特定的面能贴着金属物体,悬挂时需要严格区分,在金属背景悬挂式应用中存在明显局限性。本研究提出一种基于螺旋环结构的小型化双面抗金属 RFID 标签,其双面抗金属性能,可有效克服上述局限性,在金属背景 RFID 应用场景中可随意悬挂。

1 天线结构

天线由上下两层接地面和中间层的辐射贴片组成,如图 1 所示,天线蚀刻在厚度 0.05 mm PET 基底的金属铝箔上,用两块厚度 1 mm 泡棉($\epsilon_r = 1.12$, $\tan \delta = 0.0001$)基底将中间层辐射贴片和上下两层接地面隔离。中间层辐射贴片由外环形贴片和内螺旋环贴片组成,标签芯片位于外环形贴片和内螺旋环之间,芯片在 915 MHz 频点处阻抗为 $13.72-j221\ \Omega$,其对应灵敏度为 $-20\ \text{dBm}$ 。接地面 A 和 B 的外廓尺寸均为 $35\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$,其中在接地面 B 上蚀刻有一矩形槽,用于调节标签双面抗金属性能的一致性。中间层辐射贴片通过右侧

的短接臂 B 连接到接地面 A,接地面 A 通过左侧的短路臂 A 连接到接地面 B。

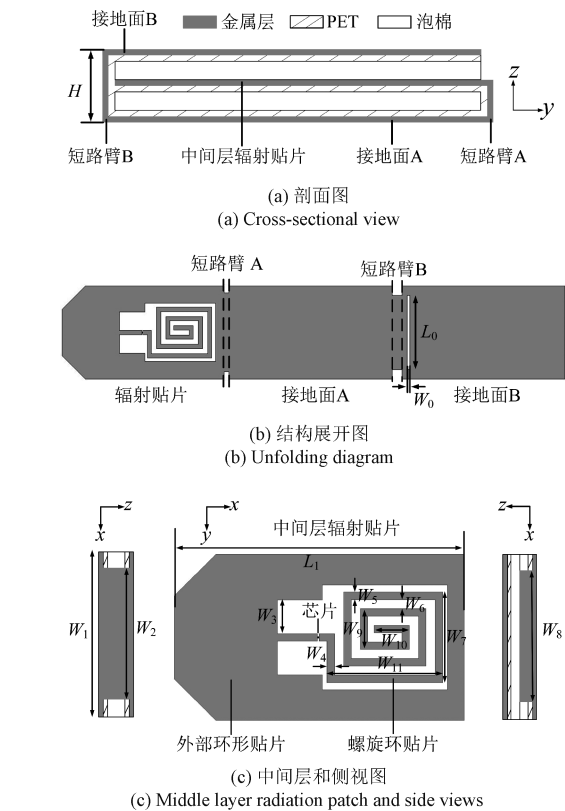


图 1 标签天线结构

Fig. 1 Tag antenna configuration

标签天线采用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 设计,在仿真及后续测试中,标签均位于尺寸为 $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ 平面金属板的中心,用以模拟标签所处的金属环境,表 1 列举了优化后标签天线的几何参数。

表 1 标签天线尺寸

Table 1 List of design parameters (mm)

参数	数值	参数	数值	参数	数值
L_0	16.0	W_3	4.0	W_8	17.00
L_1	35.0	W_4	0.9	W_9	4.90
W_0	0.5	W_5	0.8	W_{10}	4.30
W_1	20.0	W_6	1.1	W_{11}	13.90
W_2	16.0	W_7	10.9	H	2.15

2 标签天线设计与分析

如图 1(a)所示,标签天线下层接地面 A 和上层接地面 B,把辐射贴片包裹于中间层,在这种情况下,当接地

面 A 接触金属背景时,中间层辐射贴片和接地面 B 都可作为辐射体有效辐射电磁波,而当接地面 B 接触金属背景时,辐射贴片和接地面 A 则可有效辐射电磁波。表明无论标签天线 A 面或 B 面接触金属背景,天线都可实现有效辐射,从而实现标签天线的双面抗金属性能。为了后续分析问题方便,定义接地面 A 接触金属背景时为 GA 辐射状态,反之为 GB 辐射状态。

2.1 标签天线的设计

图 2(a)~(c)给出了标签天线中间辐射贴片设计的演化过程。天线初始结构如图 2(a)所示,天线由外部环形贴片和内部开路短截线组成;在此基础上辐射贴片左侧蚀刻两个三角形槽,并在开路短截线两侧进一步加宽方形槽,形成如图 2(b)所示的天线 2;最后开路短截线由外向内弯折形成螺旋环,形成如图 3(c)所示中间层辐射贴片结构的 天线 3。

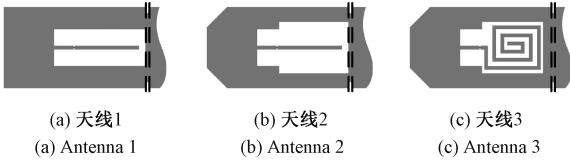


图 2 标签天线结构演变

Fig. 2 Structural evolution of the tag antenna design

天线功率传输系数(power transfer coefficient, PTC)反映了天线接收功率能传输给标签芯片的比率,定义^[11]为:

$$PTC = 1 - \left| \frac{Z_a - Z_c^*}{Z_a + Z_c} \right|^2 \quad (1)$$

其中, Z_a 和 Z_c 分别表示标签天线和芯片的阻抗。从式(1)可以看出,功率传输系数的最大值对应于标签天线端口反射系数的最小值,对应的频率即天线的谐振频率^[16]。

图 3 给出了天线演化过程中功率传输系数的变化情况,从图 3 中可以看出,从天线 1 演变到天线 3,功率传输系数最大值逐渐增加,且最大值对应的谐振频率逐渐向低频偏移。

天线 2 的三角形槽和矩形槽增加了天线表面的电流密度和电流路径,使得天线的谐振频率降低。值得注意的是,从天线 2 到 3,功率传输系数的最大值从 0.59(GA)/0.61(GB)大幅度增加到 0.995(GA)/0.989(GB),对应谐振频率从 936 MHz(GA)/935 MHz(GB)下降到 915 MHz(GA)/915 MHz(GB),这表明所提的天线辐射贴片中螺旋结构不仅有利于天线小型化,还能有效提升标签的功率传输系数。其原因是由于螺旋环的引入,使电阻基本不变,而电抗大幅度增加,在中心频率 915 MHz 处,天线阻抗从 $12.02 + j29 \Omega$ (GA)/ $12.12 + j35 \Omega$ (GB) 上升到 $12.68 + j219 \Omega$ (GA)/ $11.19 +$

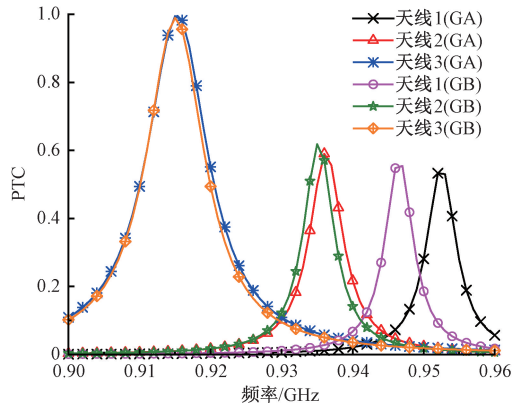


图 3 天线 1 到天线 3 的功率传输系数变化

Fig. 3 Power transfer coefficient for antenna 1 to 3

$j220 \Omega$ (GB),接近于标签芯片阻抗共轭值,如图 4 所示,从而实现标签功率传输系数显著提升。

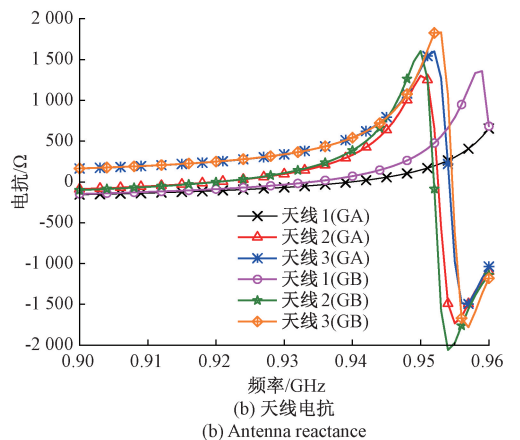
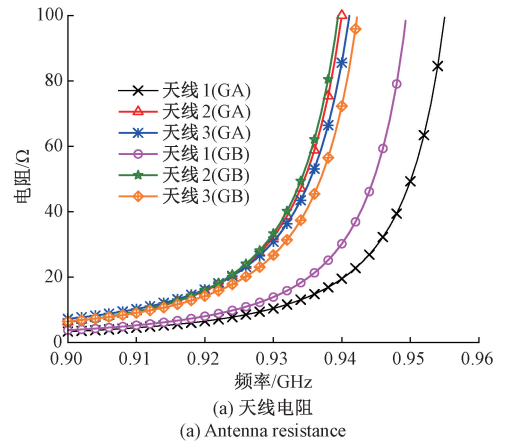


图 4 天线 1 到天线 3 的阻抗变化

Fig. 4 Antenna impedances for antenna 1 to 3

2.2 标签天线阻抗特性的理论分析

由于标签芯片端口阻抗中实部电阻较小而虚部容抗较大,为实现标签天线阻抗与芯片阻抗共轭匹配,标签天

线需加大端口感抗的设计。在提出的双面抗金属3层结构标签天线中,中间辐射层的外部环形贴片主要用于产生电磁辐射,等效为辐射电阻,天线输入阻抗的实部主要由其产生;而中间辐射层内部螺旋环可等效成微带传输线,天线输入阻抗中较大的感抗主要由螺旋环产生。天线等效电路如图5所示,把中间层外部环形贴片和内部螺旋环分别等效为两条传输线,长度分别为 d_1 和 d_2 。

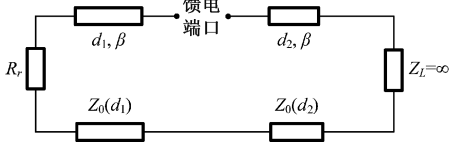


图5 标签天线中间层等效模型

Fig. 5 The equivalent model of the middle layer of the tag antenna

从图5中可以看出两者为串联关系,天线馈电端口的输入阻抗 Z_{in} 可表示^[17-18]为:

$$Z_{in} = Z_{in}(d_1) + Z_{in}(d_2) \quad (2)$$

其中, $Z_{in}(d_1)$ 和 $Z_{in}(d_2)$ 分别为辐射贴片和开路短截线的输入阻抗, $Z_0(d_1)$ 和 $Z_0(d_2)$ 分别为辐射贴片和开路短截线的等效特性阻抗, R_r 为辐射贴片产生的等效辐射电阻。

根据传输线理论,螺旋环等效为开路传输线的输入阻抗^[19]为:

$$Z_{in}(d_2) = -jZ_0(d_2) \cot(\beta d_2) \quad (3)$$

式中: d_2 为螺旋环长度; $\beta = 2\pi/\lambda$ 为传播常数; $Z_0(d_2)$ 的值由式(4)给出,即:

$$Z_0(d_2) = \frac{Z_f}{2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right) \quad (4)$$

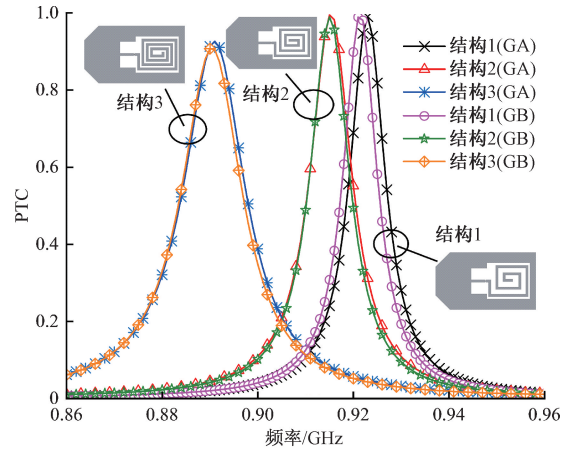
其中, $Z_f = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376.8 \Omega$ 是在自由空间的波阻抗, ϵ_{eff} 为等效介电常数, W 为螺旋环微带线的宽度, h 为螺旋环距离接地面的高度。

从表1中各参量数值可以计算出螺旋环总长度最优值为80.3 mm,宽度 $W_4 = 0.9$ mm,代入到式(4)可计算出螺旋环的特性阻抗 $Z_0(d_2)$ 为122.1 Ω ,再代入式(3)可计算出螺旋环产生的 $Z_{in}(d_2) = j220 \Omega$,而标签芯片阻抗为13.72-j221 Ω ,表明螺旋环产生电抗的理论值与标签芯片电抗值较好吻合。

2.3 参数分析

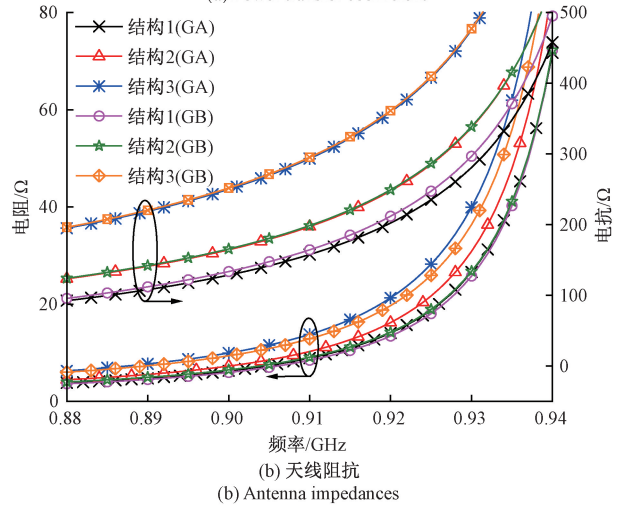
图6给出辐射贴片中不同长度螺旋环对标签天线阻抗和功率传输系数的影响。

图6(a)中天线结构1、2、3的螺旋环长度分别为:71.5、80.3、104.8 mm,从图6(a)可以看出,随着螺旋环长度的增大,标签功率传输系数最大值逐渐往低频偏移;结构1和2的最大功率传输系数都处于较高值,随着螺



(a) 功率传输系数

(a) Power transfer coefficient



(b) 天线阻抗

(b) Antenna impedances

图6 螺旋环长度对功率传输系数和阻抗的影响

Fig. 6 Effects of varying spiral loop length on power transfer coefficient and antenna impedances

旋环长度继续增加,结构3的最大功率传输系数降至0.92(GA)/0.9(GB)。因此,考虑工作频率和功率传输系数,结构2的尺寸为最优值。

从图6(b)可以看出,随着螺旋环长度的增加,标签天线在915 MHz处端口电阻和电抗均逐渐增加,其中电阻部分上升较为缓慢,而电抗部分明显增加。这是因为螺旋环越长,等效感抗越大,进而导致天线的阻抗变大、谐振频率降低,这与图6(a)功率传输系数的变化趋势相对应。从图6(a)和(b)中还可以看出,结构2标签GA和GB状态下功率传输系数曲线吻合程度最好,表明结构2标签的双面抗金属性能具有较好的一致性。

短路臂B的宽度 W_2 对标签功率传输系数的影响可从图7(a)中看出, W_2 分别取14、16和18 mm,随着 W_2 的增加,GA和GB状态下最大功率传输系数最大值均在98%以上,标签天线的谐振频率向高频偏移,当 $W_2 = 16$ mm时,标签天线工作在所需要的谐振频率。 W_2 的变

化对天线端口阻抗特性的影响如图 7(b) 所示, 当 W_2 增加, 标签天线的电阻和电抗逐渐下降, 其原因是 W_2 越大, 其等效感抗越小, 进而导致天线的阻抗减小, 谐振频率增大, 这与图 7(a) 功率传输系数的变化趋势相对应。

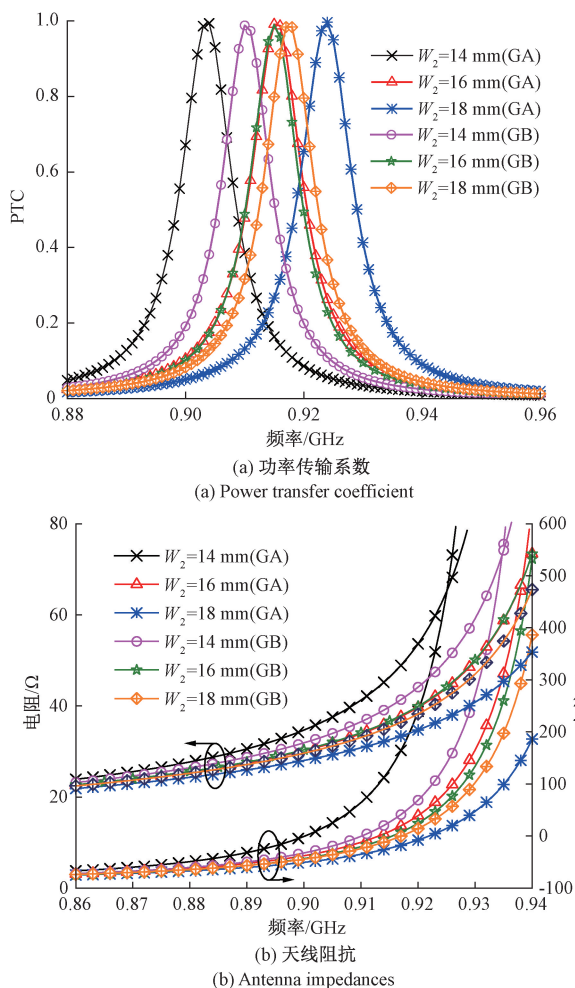


图 7 W_2 对功率传输系数和阻抗的影响

Fig. 7 Effects of varying W_2 on power transfer coefficient and antenna impedances

从图 7(a) 和 (b) 中还可以看出, 当 $W_2 = 16$ mm 时, GA 和 GB 状态下功率传输系数曲线和阻抗曲线在工作频段内吻合程度较好, 而当 $W_2 = 14$ mm 或 $W_2 = 18$ mm 时, GA 状态和 GB 状态对应的曲线有明显的偏差, 表明当 $W_2 = 16$ mm 时标签双面抗金属性能具有较好的一致性。

图 8 给出了接地面 B 上矩形缝隙长度 L_0 对功率传输系数和标签天线端口阻抗的影响。

从图 8(a) 中可以看出, GA 状态下, 当无矩形缝隙, 即 $L_0 = 0$ 时, 天线的最大功率传输系数 $> 98\%$, 谐振频率为 947 MHz。当 L_0 分别为 7.5、8 和 8.5 mm 时, 最大功率传输系数也均超过 98%, 对应的谐振频率分别为: 922、

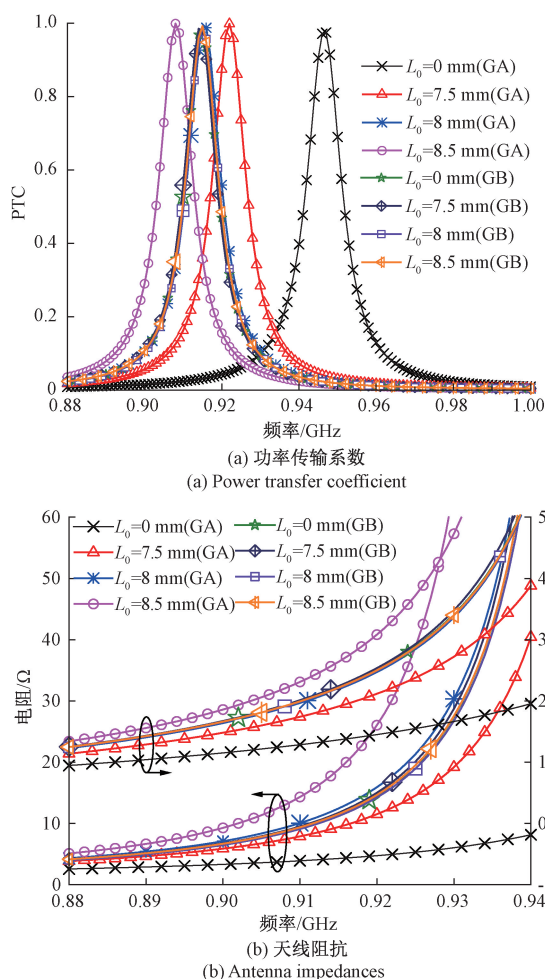


图 8 L_0 对功率传输系数和阻抗的影响

Fig. 8 Effects of varying L_0 on power transfer coefficient and antenna impedances

915、908 MHz, 其中在 $L_0 = 8$ mm 时, 标签天线工作在所需要的谐振频率。GB 状态下, L_0 不同取值的 4 条曲线与 GA 状态下 $L_0 = 8$ mm 时的曲线几乎重叠, 且最大功率传输系数均在 98% 以上, 谐振频率保持在 915 MHz。

L_0 对天线阻抗特性的影响如图 8(b) 所示, GA 状态下, 无矩形缝隙 $L_0 = 0$ 时, 天线在中心频率 915 MHz 时阻抗为 $4.3 + j136 \Omega$ 。当 L_0 分别为 7.5、8 和 8.5 mm 时, 天线在中心频率 915 MHz 处的阻抗分别为 $18.8 + j267$ 、 $12.68 + j219$ 和 $10 + j197.6 \Omega$, 其中在 $L_0 = 8$ mm 时天线阻抗与芯片阻抗最佳共轭匹配; GB 状态下, 标签天线阻抗曲线几乎完全重叠, 且几乎不随 L_0 变化。

上述影响规律是由于标签天线不同的接地状态标签天线的表面电流路径差异造成的, 蚀刻矩形缝隙是在调整这种差异。GA 状态是 A 面接触金属背景, 这时中间层辐射贴片和最上层接地面 B 看作是辐射面, L_0 越长, 增长了辐射面 B 上的电流分布, 从而降低天线的谐振频

率。在 GB 状态下,接地面 B 直接接触金属背景,此时 B 不作为辐射体, L_0 的变化不会影响到标签天线的辐射性能,所以随着 L_0 的变化,图 8(a) 中的功率传输系数和图 8(b) 中的阻抗曲线都未发生明显变化。由此表明,在接地面 B 上蚀刻矩形缝隙可以有效调节标签天线的双面抗金属性能一致性。

3 标签天线的制作与测试

图 9 为折叠前的标签天线,其通过激光蚀刻制成。图 10 展示了天线的折叠过程:将图 9 的标签翻转后,在接地面 A 粘上泡棉 A,即图 10(a);然后将辐射贴片向左折叠覆盖泡棉 A,即图 10(b);再将泡棉 B 放置于接地面 B,即图 10(c);最后将接地面 B 向右折叠覆盖辐射贴片形成图 10(d) 所示的双面抗金属标签天线,其总尺寸为 35 mm×20 mm×2.15 mm。

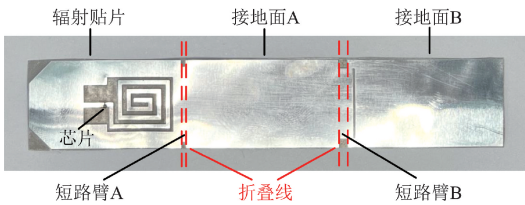


图 9 折叠前的标签天线

Fig. 9 Pre-folded of the tag antenna

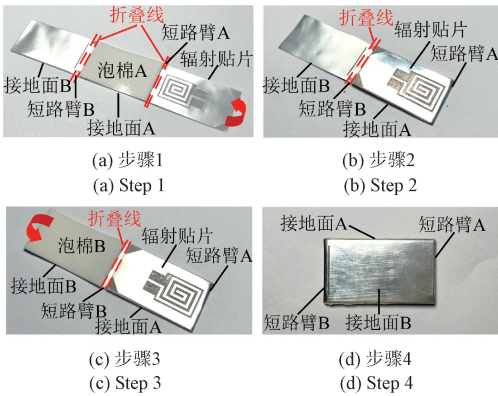


图 10 标签天线的折叠过程

Fig. 10 Folding procedure for fabricating the tag antenna

采用 Voyantic Tagformance Pro 测试系统在暗室中测试标签的读取距离和灵敏度,图 11 为标签测试场景,阅读器为 8 dBi 增益的线极化天线,等效全向辐射功率 (effective isotropic radiation power, EIRP) 为 3.28 W,标签天线与阅读器距离大于一个波长且垂直对齐。在测量过程中,阅读器发射并逐渐加大功率,系统每 1 MHz 扫描标签天线的反向散射功率,得到不同频率下标签天线的读取距离和灵敏度。

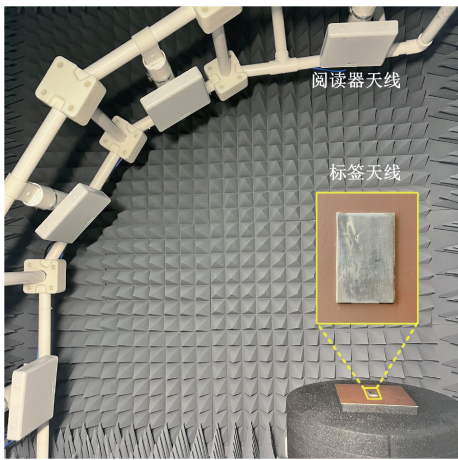


图 11 标签天线电波暗室测试装置

Fig. 11 Measurement setup of the tag antenna inside the anechoic chamber

实测结果如图 12 所示,标签天线在 GA、GB 两种放置状态下能完全覆盖 902~928 MHz 工作频段,最大读取距离分别为 7.5 和 7.6 m,其对应的谐振频率分别为 917 和 910 MHz,最低灵敏度均为 -14 dBm。这表明标签天线两面抗金属性能具有较好的稳定性,仿真和实测结果基本吻合,其误差原因主要来源于仿真、加工和测试过程。

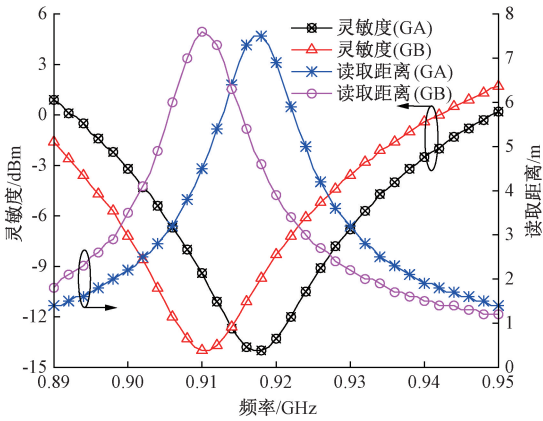


图 12 标签天线的读取距离和灵敏度曲线

Fig. 12 Measured tag sensitivities and read distances of the tag antenna

为了表征标签在空间各方向被识别的能力,图 13(a) 和 (b) 分别给出了在 xoy 和 $yozy$ 平面上标签被识别距离方向图的暗室测试结果。从图 13(a) 和 (b) 可以看出,在工作频段内,标签被识别距离方向图在 GA 和 GB 状态下较好吻合,表明本研究所提出标签的双面抗金属性能具有较好的一致性。

图 14 分别测试了本研究所设计单个标签和多标签共存时的识别距离,手持读写器发射功率设置为 33 dBm,内置增益为 4 dBi 圆极化天线。先测试了单标

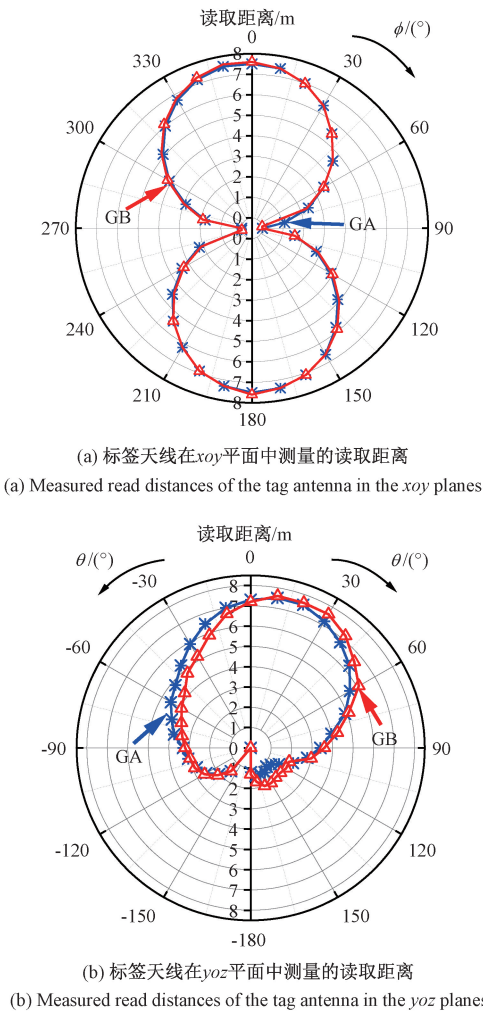


图 13 标签天线的读取距离方向图

Fig. 13 Read patterns of the tag antenna



图 14 自由空间下单标签和多标签测试场景

Fig. 14 Single tag and multiple tags test scenarios in free space

时相同,在距离标签 7.3 m 处,8 个标签被识别情况如表 2 所示,其中 RSSI (received signal strength indicator) 是接收信号强度指示,RSSI 值越大,说明设备接收到的信号越强^[20-21]。

表 2 多标签测试结果
Table 2 multiple tags test results

序号	放置状态	EPC	RSSI	10 s 内可被读取次数
1	GB	E283E0E02000F74302660385	-65	19
2	GB	E283E0E02000F743026603C8	-66	19
3	GA	E283E0E02000F743026603E9	-64	19
4	GB	E283E0E02000F743026603D3	-63	19
5	GA	E283E0E02000F743026603E6	-66	19
6	GA	E283E0E02000F743026603C2	-63	19
7	GB	E283E0E02000F7430266038C	-63	19
8	GA	E283E0E02000F743026603A7	-62	19

从表 2 中可以看出,8 个标签都能同时被识别,这表明在多 RFID 标签共存的金属环境场景下,本研究提出的标签具备稳定的通信性能,能够满足实际应用中多标签同时工作的需求。

表 3 给出了本研究所提出标签与近期已发表文献中的抗金属标签相关性能的对比,为了方便对比,按照 4 W 等效全向辐射功率重新算本文标签的读取距离,分别为 8.25 m(GA)/8.36 m(GB)。

表 3 本研究所设计天线与其他抗金属天线的性能对比
Table 3 Comparison of different anti-metal UHF RFID tag antennas

天线来源	标签尺寸/mm	天线体积/mm ³	EIRP/W	可使用面数	最大读取距离/m
本文天线	35×20×2.15	1 505.00	3.28	2	7.50/7.60
文献[22]	47×21×2.36	2 329.32	4	1	4.00
文献[23]	40×40×1.60	2 560.00	4	1	5.00
文献[24]	55.2×44.2×1.50	3 659.76	4	1	8.14
文献[25]	28.02×25.02×2.61	1 829.76	4	1	8.10
文献[26]	30×30×1.60	1 440.00	4	1	3.50
文献[27]	58×24×0.80	1 577.60	4	1	2.00

从表 3 可以看出,与文献[22-23]标签相比,本研究标签具有更小的尺寸和更远的读取距离;与文献[24-25]标签相比,读取距离相近,但本研究标签尺寸更小;与文献[26-27]标签相比,标签尺寸相近,但本研究标签具有

签在 GA 和 GB 放置状态下的识别距离,测试结果表明 GA 和 GB 状态下最大识别距离均为 7.3 m。然后测试多标签共存时的识别距离,将 8 个标签随机放置在 200 mm×200 mm 的金属板上,读写器设置与测试单标签

更远的读取距离。更为重要的是上述文献中的标签只能单面使用,而本研究的标签能够双面使用。

4 结 论

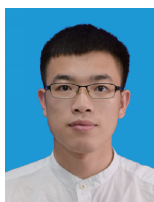
本研究提出了一种螺旋环结构超高频双面抗金属标签。中间层辐射贴片加载螺旋环结构有效调节了天线阻抗并实现了小型化,接地面蚀刻矩形缝隙使标签天线双面抗金属性能实现较好的一致性。天线的尺寸为 $35\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2.15\text{ mm}$,测试表明,在 EIRP 为 3.28 W 的条件下,天线在 2 种放置状态下读取距离方向图吻合度好,最大读取距离分别达到 7.5 m 和 7.6 m 。本研究所提出的抗金属标签天线具有尺寸小、双面一致性好、读取距离远等优点,适用于特殊金属应用背景中需要采用悬挂方式的应用场景。

参考文献

- [1] MOTRONI A, PINO M R, CECCHI G, et al. A near-field focused array antenna empowered by deep learning for UHF-RFID smart gates[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(10): 7946-7957.
- [2] 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.
- [3] POTYRAILO R A, DIERINGER J A. Toward high-value gas sensing in wearable and distributed formats: Discrimination of complex patterns of volatiles using multi-response RFID sensors[C]. 2017 ISOCs/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, 2017: 1-3.
- [4] BRENIUC L, HABA C G, PLOPA O, et al. Electrochemical RFID sensor for gas concentration measurement[C]. 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2018: 290-295.
- [5] HABA C G, BRENIUC L, PLOPA O, et al. Multiple gas sensing platform with RFID connectivity[C]. 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2018: 618-623.
- [6] ERMAN F, KOZIEL S, LIM E H, et al. A low-profile metal-backed dipole loaded with closely coupled arc-shaped open stubs for on-metal tag design with wide frequency tuning capability[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(4): 3772-3777.
- [7] 袁家德, 孟宪杰. 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, 42(11): 115-122.
YUAN J D, MENG X J. Research on the random rolling RFID detection tag antenna on metal surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 115-122.
- [8] KOO T W, KIM D, RYU J I, et al. Design of a label-typed UHF RFID tag antenna for metallic objects[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 1010-1014.
- [9] 赵犁, 邵笙, 虞俊俊. 金属介质对超高频 RFID 被动标签读取效能的影响及可用于金属表面标签的设计[J]. 工程设计学报, 2006(6): 416-420, 430.
ZHAO L, GAO SH, YU J J. Research on impact of metal media on RFID passive tag and design method of metal-surface-usable RFID tag[J]. Journal of Engineering Design, 2006(6): 416-420, 430.
- [10] 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.
- [11] LEE Y H, LIM E H, BONG F L, et al. Loop-fed planar inverted-L antennas (PILAs) for omnidirectional UHF on-metal tag design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(8): 5864-5871.
- [12] YAN ZH D, LU SH CH, ZHANG CH, et al. Design and implementation of long-distance dual PIFA antenna structure of small embedded metal UHF RFID tag[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2021, 116: 95-112.
- [13] 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.
- [14] CHOUDHARY A, SOOD D. Wideband long range compact serrated triangular patch-based UHF RFID tag for metallic base environment[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2024, 8: 643-651.
- [15] MURUGESH M, LIM E H, CHEE P S, et al. 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.
- [16] MA SH B, BJÖRNINEN T, SYDÄNHEIMO L, et al. Double split rings as extremely small and tuneable antennas for brain implantable wireless medical

- microsystems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 760-768.
- [17] BOUAZZA H, BANSAL A, BOUYA M, et al. Modeling and design of a compact metal mountable dual-band UHF RFID tag antenna with open bent stub feed for transport and logistics fields[J]. Advances in Science, Technology and Engineering Systems, 2021, 6(1): 1065-1071.
- [18] MO L F, QIN CH F. Planar UHF RFID tag antenna with open stub feed for metallic objects [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(9): 3037-3043.
- [19] 赖因霍尔德·路德维格, 吉恩·波格丹诺夫. 射频电路设计: 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
- LUDWIG R, BOGDANOV G. RF circuit design: Theory and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [20] 韦进文, 谭龙明, 郭志俊, 等. 基于单天线视轴信号传播模型的 RFID 定位方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 8-13.
- WEI J W, TAN L M, GUO ZH J, et al. RFID localization method based on single antenna boresight signal propagation model [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 8-13.
- [21] 谢良波, 李宇洋, 杨小龙, 等. 基于多频点相位距离/角度联合估计的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 112-122.
- XIE L B, LI Y Y, YANG X L, et al. RFID indoor localization algorithm based on joint range/angle estimation of multi-frequency point phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 112-122.
- [22] LEE S R, LIM E H, RAHIM S K A. Small wideband antenna for on-metal UHF RFID tag design [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 121-127.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] NGUYEN M T, LIN Y F, CHEN C H, et al. Shorted patch antenna with multi slots for a UHF RFID tag attached to a metallic object [J]. IEEE Access, 2021, 9: 111277-111292.
- [26] BONG F L, LIM E H, LO F L. Compact orientation insensitive dipolar patch for metal-mountable UHF RFID tag design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1788-1795.
- [27] FAUDZI N M, RASHID A N A, IBRAHIM A, et al. Microstrip dipole UHF-RFID tag antenna for metal object tagging [C]. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering, 2016: 36-41.

作者简介



赖旺富, 2017 年于云南师范大学获得硕士学位, 现为福州大学物理与信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为 RFID 标签天线。

E-mail: wandhooon@163.com

Lai Wangfu received his M.Sc. degree from Yunnan Normal University in 2017. He is currently a Ph.D. candidate with the College of Physics and Information Engineering at Fuzhou University. His main research interest is radio frequency identification tag antenna.



林长桂, 2012 年毕业于泉州信息职业技术学院, 现为厦门信达物联科技有限公司工程师, 主要研究方向为 RFID 标签天线设计。

E-mail: cglin@xindecoiot.com

Lin Changgui graduated from Quanzhou Polytechnic of Information Technology in 2012. Now he is an engineer of Xindeco IoT. His main research interest is radio frequency identification tag antenna design.



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) 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.