

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108276

# 金属表面任意滚动型 RFID 探测标签天线的研究\*

袁家德, 孟宪杰

(福州大学物理与信息工程学院 福州 350116)

**摘要:**射频识别(RFID)技术在工业探测领域的应用不断深入,对 RFID 标签在多金属环境中的读取性能提出了更高的要求,本文提出一种可以在金属表面任意滚动的高效率 RFID 标签天线。所设计的滚动型标签天线是由倒 F 天线(IFA)进化而成,天线采用了呈柱状布局的 4 个辐射臂,其中一组相对的两臂通过馈电面与同轴线芯线相连,另一组相对两臂与同轴线外导体相连,一开槽的矩形辅助面置于四个辐射臂中心。标签天线体积为 11.3 mm×11.3 mm×77.5 mm,在金属平面上各种状态滚动时中心频率变化范围为 897~932 MHz,  $|S_{11}| \leq -10$  dB 的带宽范围为 3.5~8 MHz,天线辐射效率达到 70%。该无源标签天线具有可以在金属背景环境中任意滚动、小型化、高效率等优势,无源标签天线与温度传感器芯片相连,可用于工业物联网复杂环境温度探测。

**关键词:** 射频识别; 标签; 标签天线; 抗金属; 滚动型

**中图分类号:** TH89 TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Research on the random rolling RFID detection tag antenna on metal surface

Yuan Jiade, Meng Xianjie

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** The application of radio frequency identification (RFID) technology is becoming wider and wider in the field of industrial detection. The performance of RFID tags in multi-metal environments is also required to be higher and higher. This article proposes a high-efficiency RFID tag antenna that can roll arbitrarily on metal surfaces. The designed tag antenna evolves from the inverted F antenna (IFA). The antenna uses four radiating arms in the columnar layout. One set of opposite arms is connected to the coaxial inner conductor through the feed plane, the other opposite two arms are connected with the outer conductor of the coaxial line, and a slotted rectangular auxiliary plane is placed in the four radiating arms. The overall size of the tag antenna is 11.3 mm×11.3 mm×77.5 mm, the frequency range is 897~932 MHz when rolling in various positions on a metal plane, the bandwidth range of  $|S_{11}| \leq -10$  dB is 3.5~8 MHz, and the antenna radiation efficiency reaches 70%. The tag antenna has the advantages of rolling freely in a metal plane, miniaturization, and high efficiency. The proposed tag antenna is connected with the temperature sensor chip and can be used for temperature detection in the complex environment of the industrial internet of things.

**Keywords:** radio frequency identification; tag; tag antenna; anti-metal antenna; rollable antenna

## 0 引言

射频识别(radio frequency identification, RFID)技术是一种通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据的无接触式技术,超高频 RFID 技术由于其读取距离较远、读取速率快、成本低、安全性高等诸多优势,已广泛运用

于物流、IT 资产管理、工具管理等领域<sup>[1-4]</sup>。

随着 RFID 和传感器芯片技术的发展,传感器芯片感知到的信息可以通过无源标签天线辐射出来,通过 RFID 读写器接收并处理,可在工业复杂环境中探测出环境目标信息参量,解决或化简目前工业物联网中测量领域遇到的相关难题。在这一探测系统中,RFID 标签天线的鲁棒性、高效率、小型化是关键。

收稿日期:2021-07-21 Received Date: 2021-07-21

\* 基金项目:国家自然科学基金(62071125)项目资助

当标签天线处于金属环境中时,标签天线的阻抗匹配、辐射效率、方向性等都会因为金属环境的影响而发生变化,产生明显的失谐效应,使得其读取效果变差,甚至无法读取<sup>[5]</sup>;又或是标签天线需要在高温环境下应用时,传统的标签天线无法满足需求。近年来学者们提出了多种抗金属标签天线的研究方案<sup>[6-15]</sup>。传统的抗金属标签天线常通过增加标签天线与金属之间距离来实现抗金属的性能,文献[6]通过研究天线与金属板之间不同的距离和金属板的尺寸大小对天线性能的影响,设计出了抗金属标签天线。文献[7-8]引入电磁带隙 (electromagnetic band gap, EBG) 结构,能够在特定频率对反射波的相位进行特定的调制,实现低剖面抗金属的效果。文献[9-11]采用折叠的方法为标签天线提供一块金属地面,以此来达到抗金属的目的。文献[12-15]利用合适的天线结构,如微带天线、平面倒 F 天线 (planar inverted-F antenna, PIFA) 等定向辐射天线来克服金属面对标签天线的影 响。但上述这些抗金属标签天线对其在金属面上的摆放有严格要求,通常只设计一个特定面可以接触应用环境中的金属面,而其它面与金属接地面接触时,标签天线将无法正常工作<sup>[16]</sup>。

本文设计了一种可在金属表面任意滚动的抗金属标签天线,研究了不同状态接触背景环境金属面时对天线性能的影响,分析了天线的辐射原理。

### 1 天线设计

#### 1.1 天线的结构

图 1(a)为滚动型抗金属标签天线的立体结构图,图 1(b)是其分解立体结构图。该天线是基于倒 F 天线 (inverted-F antenna, IFA) 演变而成的一种侧馈四臂倒 F 天线,其中一组是上、下两臂为完全相同的辐射臂 A,另一组是左、右两臂为完全相同的辐射臂 B,四个辐射臂通过前端“十”字形短路墙连接面相接。天线采用同轴馈电,馈电端口阻抗为 50 Ω。馈电面位于 IFA 天线内部,上下连接辐射臂 A,并与同轴线内导体相连接。位于天线内部的矩形开槽辅助面与“十”字形短路墙相接,同轴线的外导体相接短路墙。天线的结构如图 1 所示。

采用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 18 对天线性能进行仿真优化,得到最优结构尺寸如表 1 所示。

#### 1.2 天线的基本原理

图 2 所示为基础的倒 F 天线结构,在振子弯折处加载短路结构,该结构所具有的感性分量补偿振子弯折所形成的对地容性分量,有效解决倒 L 天线输入阻抗不易调节的问题<sup>[17]</sup>。

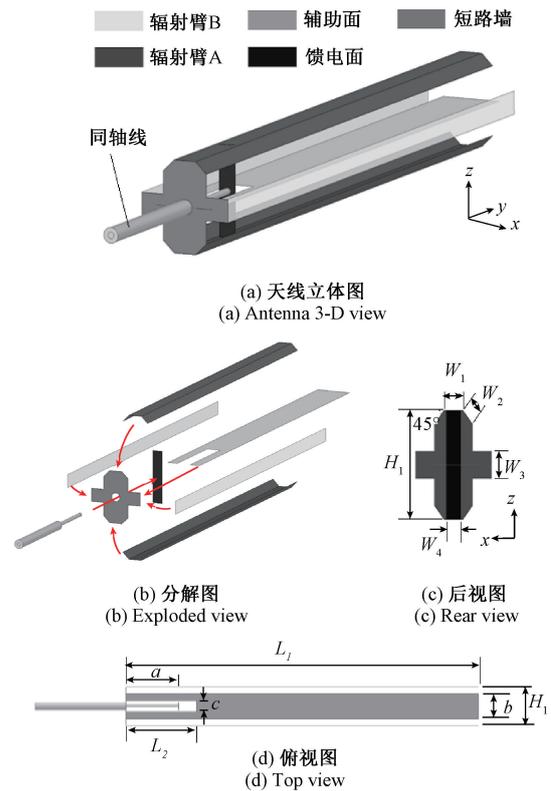


图 1 天线结构图

Fig. 1 Layout of antenna

表 1 天线尺寸

Table 1 Antenna size mm

参数	尺寸	参数	尺寸
$W_1$	2.8	$a$	11.5
$W_2$	2.0	$b$	7.3
$W_3$	2.8	$c$	3.0
$W_4$	2.0	$L_1$	77.5
$H_1$	11.3	$L_2$	16.5

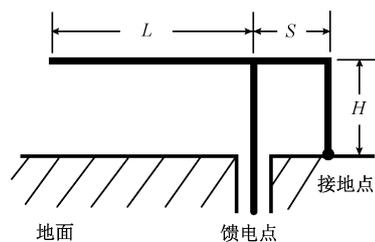


图 2 倒 F 天线

Fig. 2 Inverted-F antenna

在设计时通常采用式(1)计算倒 F 天线的初始尺寸设定<sup>[18]</sup>,即:

$$L + H \approx \frac{\lambda_0}{4\sqrt{(1 + \varepsilon_r)/2}} \quad (1)$$

式中: $\lambda_0$  表示自由空间中的波长; $\varepsilon_r$  表示介质的相对介电常数。

### 1.3 天线设计要求

本文 RFID 标签天线主要设计指标为:1) 天线尺寸满足实际工程应用需求,结构为细长型且横截面直径小于 12 mm。2) 天线在金属背景环境中任意滚动时,其工作带宽变化范围能够被超高频 RFID 频段(860 ~ 960 MHz)覆盖。3) 阅读器接收到标签反向散射信号强度用接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)表征,要求  $RSSI \geq -45$  dBm。

### 1.4 天线原理分析

本文提出的滚动型抗金属标签天线由倒 F 天线结构演变而来,共 4 个天线臂。当天线放置在金属面上时,与金属面接触的天线臂变为接地平面,其余的天线臂将会产生辐射。天线在金属面上滚动时存在 3 种典型状态,即状态 I 为一侧辐射臂 A 与背景金属面接触、状态 II 为一侧辐射臂 A 和 B 同时与背景金属面接触和状态 III 为一侧辐射臂 B 与背景金属面接触。本文提出的天线结构具有一定的旋转对称性,因此分析天线在金属面上任意滚动时,其余的状态与该 3 种典型状态某一种存在共性。图 3~5 给出了天线各个面和金属面接触时的 3 种典型状态以及在该状态下处于中心频率时的电流分布图。仿真中天线背景金属板尺寸为 300 mm×400 mm,远大于天线自身尺寸,研究天线不同状态性能时可将背景金属板视为无限大尺寸。为了增强图 3~5 中电流的可视化效果,图中的模拟金属接地板只截取了部分。

当天线按照状态 I 和背景金属面接触时,图 3 给出了天线在中心频率 897 MHz 时的表面电流分布图,与金属面接触的辐射臂 A 起到接地平面的作用,而未与地面接触的另一辐射臂 A 和左右两侧的辐射臂 B 能产生有效辐射。从天线表面的电流强度来看,位于该中心频率的状态 I,此时的左右两侧的辐射臂 B 表面产生了强谐振电流,正上方的辐射臂 A 上的电流弱于辐射臂 B 表面电流,原因是此状态正上方辐射臂 A 的谐振点不在 897 MHz 附近。因此,状态 I 情况下,897 MHz 频点时辐射臂 B 起到主要辐射作用。

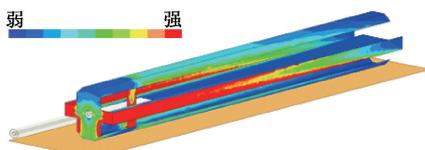


图 3 状态 I 电流分布

Fig. 3 Current distribution of state I

当天线按照状态 II 和背景金属面接触时,此状态辐射臂 A 和辐射臂 B 一侧同时与金属面接触而起到接地平面的作用,而另一侧未与地面接触的辐射臂 A 和辐射臂 B 产生有效辐射。图 4 给出了天线在频率 910 MHz 时的表面电流分布图,从图 4 中可以看出,未与金属面接触的辐射臂 B 表面产生了强谐振电流,而未与金属面接触的辐射臂 A 电流较弱。这是因为未与金属面接触的辐射臂 A 产生的谐振点不在 910 MHz 附近。因此,在 910 MHz 的谐振点处,未与金属面接触的辐射臂 B 起到主要辐射作用。

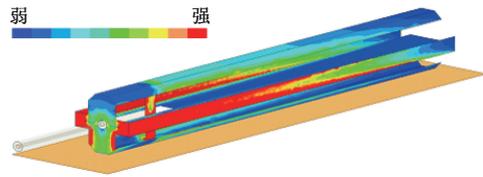


图 4 状态 II 电流分布

Fig. 4 Current distribution of state II

当天线按照状态 III 和背景金属面接触时,辐射臂 B 与金属面接触起到接地平面的作用,而另一未与地面接触的辐射臂 B 和左右两侧的辐射臂 A 能产生有效辐射。图 5 给出了天线在频率 930 MHz 时的表面电流分布图,从天线表面电流强度来看,此时未与金属面接触的辐射臂 B 表面产生了强谐振电流,同时位于左右两侧的辐射臂 A 表面电流与辐射臂 B 相比明显较弱。因此,在 930 MHz 该谐振点处,未与金属面接触的辐射臂 B 起到主要辐射作用。

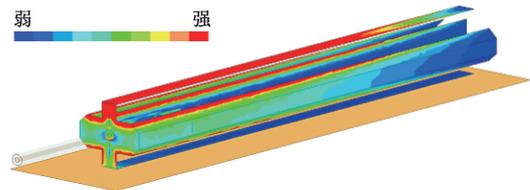


图 5 状态 III 电流分布

Fig. 5 Current distribution of state III

### 1.5 参数分析

天线的辅助面的尺寸变化将会影响天线的谐振频率以及阻抗匹配的程度。图 6 给出了在辅助面的矩形槽尺寸不变的情况下(即参数  $L_2$ 、 $c$  固定),参数  $b$  取值对 3 种典型状态下天线端口的反射系数  $|S_{11}|$  的影响。

从图 6(a)~(c)可以看出,当天线以不同状态放置于金属板上时,辅助面尺寸影响着天线谐振频率和频率偏移范围大小,将图 6 中的仿真结果制作成表 2。

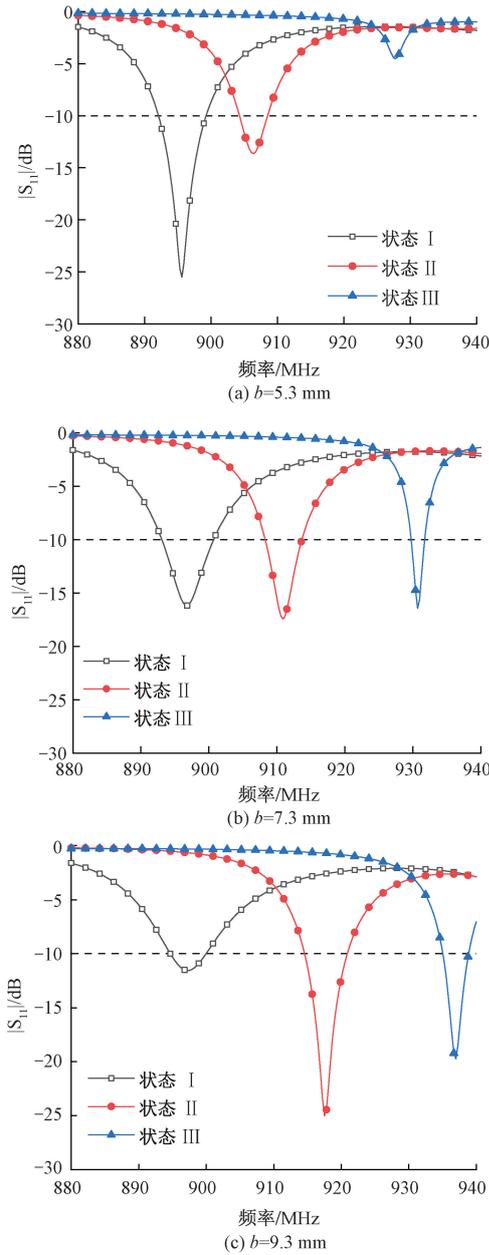


图6 参数  $b$  对天线性能的影响

Fig. 6 The influence of parameter  $b$  on antenna performance

表2 参数  $b$  对天线的影响

Table 2 The influence of parameter  $b$  on the antenna

参数 $b$ /mm	状态 I 谐振频率/MHz	状态 II 谐振频率/MHz	状态 III 谐振频率/MHz	偏移范围 /MHz
5.3	895	906	928	33
7.3	897	910	930	33
9.3	897	917	937	40

从表2中可以看出,当参数  $b$  增大时,状态 I ~ III 的谐振频率差值的绝对值会随之增大,除此之外,参数  $b$  还

会影响着不同状态下天线阻抗匹配程度,尺寸变小,会使得天线在金属面上滚动时状态 III 的阻抗匹配变差;尺寸变大,会使得天线在金属面上滚动时状态 I 的阻抗匹配变差。经过仿真优化,  $b = 7.3$  mm 时为频点偏移范围最小和阻抗匹配程度最好的最优值。

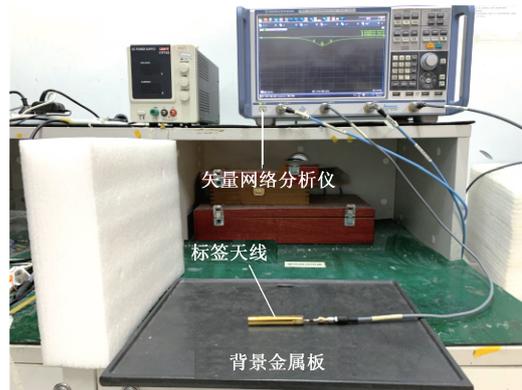
## 2 结果分析

根据表1中的仿真优化尺寸,制作了天线实物,如图7所示。采用矢量网络分析仪测量天线放置于金属板上各个状态的端口反射系数,采用微波暗室测试天线的方向图及效率,其中使用背景金属板尺寸均为  $300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ,由于金属板尺寸远大于天线尺寸,因此可近似于天线处于无限大金属背景环境下所得到的测试结果,如图8所示。

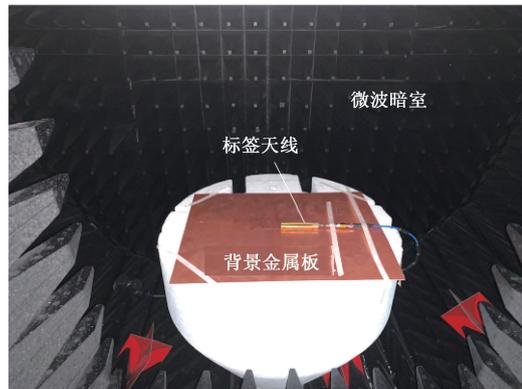


图7 标签天线实物图

Fig. 7 Prototype of the tag antenna



(a) 网络分析仪测试  
(a) Network analyzer test



(b) 微波暗室测量  
(b) Microwave darkroom measurement

图8 测试环境

Fig. 8 Test environment

图 9 给出的天线仿真和实测结果对比图可以看出, 3 种典型状态实测  $|S_{11}|$  参数的中心频点分别为 897、910、932 MHz, 该标签天线在金属面上滚动时的频点偏移范围为  $\pm 17.5$  MHz。同时该天线在金属面上滚动在不同状态时, 状态 I (892~900 MHz)、状态 II (906~914 MHz)、状态 III (930.5~934 MHz)  $|S_{11}| \leq -10$  dB 带宽范围为 3.5~8 MHz, 可以看出天线在不同转角、不同方位时, 天线  $|S_{11}|$  带宽产生了变化, 但变化范围在读写器工作带宽

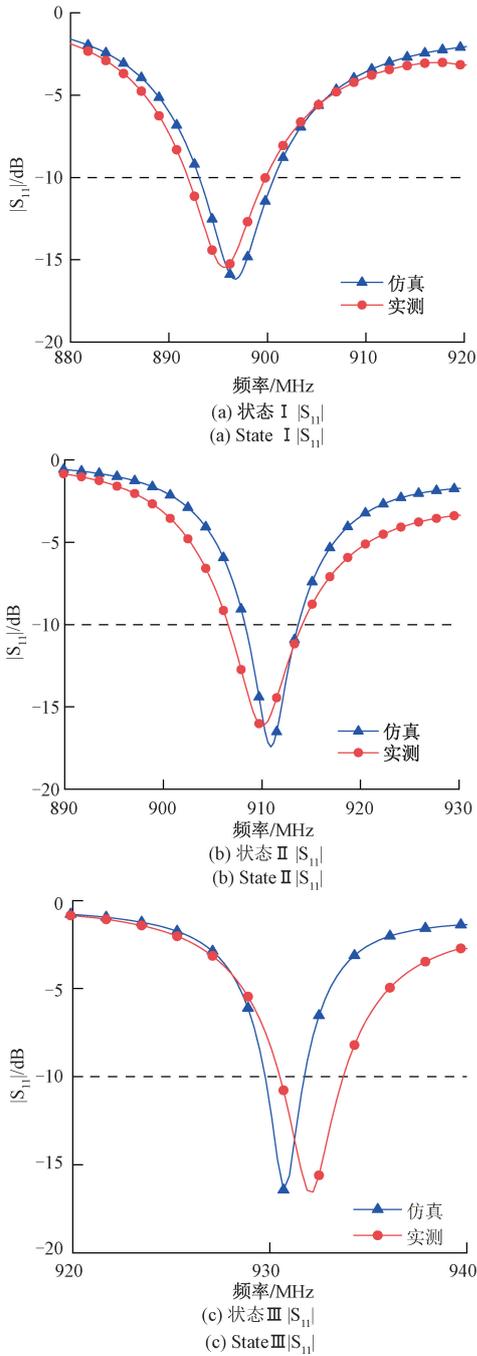


图 9 各状态下的  $|S_{11}|$  曲线

Fig. 9  $|S_{11}|$  curves in various states

范围 (阅读器天线带宽 890~940 MHz) 内。测试结果表明本文提出天线在具有滚动抗金属性能的同时, 保持其频点的偏差范围较小, 能够在可控范围内。仿真和实测结果曲线吻合程度较好。

图 10~12 给出了天线在背景金属面上滚动时各个状态在其谐振频率时的仿真和实测的方向图曲线, 结合 3 种典型状态的天线方向图可以看出, 当天线在背景金属板上轴向滚动的过程中, 天线都具有良好的辐射性能, 方向图稳定性较好。并且仿真和实测的结果曲线吻合程度较好。

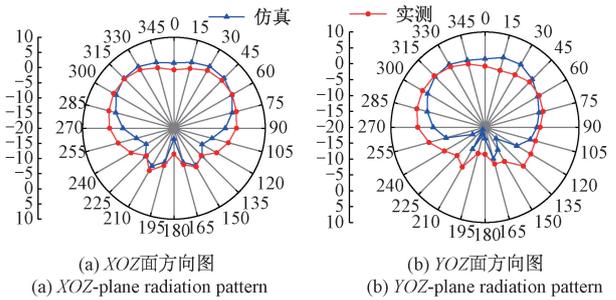


图 10 状态 I 方向图

Fig. 10 Radiation patterns of state I

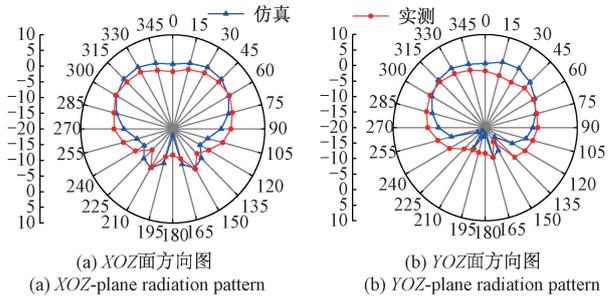


图 11 状态 II 方向图

Fig. 11 Radiation patterns of state II

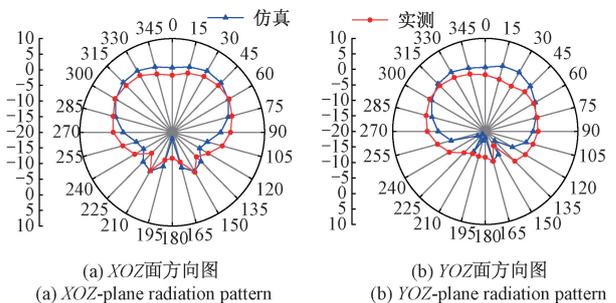


图 12 状态 III 方向图

Fig. 12 Radiation patterns of state III

图 13 给出了天线在 890~940 MHz 内的仿真和测试效率, 从图 13 中可以看出, 在谐振点处仿真效率为 80%,

工作带宽内测试效率最高达到 70%,表明该标签天线具有较高效率。仿真和实测结果吻合较好,仿真和测试结果间误差主要来源于实际材料损耗可能大于仿真设置损耗和仿真与实际测试过程中产生的误差。

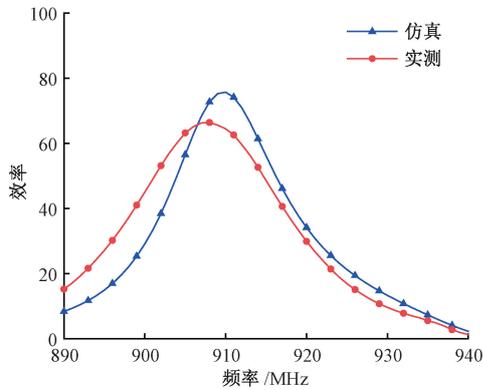


图 13 效率曲线

Fig. 13 Efficiency curves

本文提出的无源标签天线与温度传感器芯片相连,可用于工业物联网复杂环境中的温度探测,如图 14。图 14 中的芯片经匹配电路将阻抗匹配至  $50 \Omega$ ,再用特性阻抗为  $50 \Omega$  的同轴管与天线相连接,构成一个完整的标签。将芯片、匹配电路和同轴线封装在探针内,天线主体部分用抗高温的介质封装,该标签结合 RFID 读写器,可实现苛刻环境(如高温)中环境参量的探测。

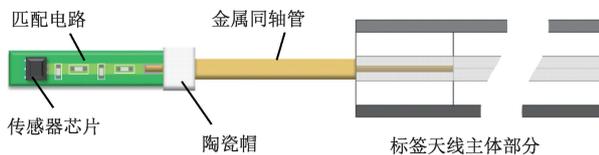


图 14 标签示意图

Fig. 14 Illustration of the tag

图 15 给出了实际测试场景图,测试该标签的实际读取效果,利用阅读器天线连接上 KLM 系列的超高频 RFID 射频识别模块,构成了一套完整的 RFID 系统进行实际读取测试。测试使用的烤炉体积为  $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ,将连接上芯片的标签天线以任意不同的旋转状态,放置于烤炉金属架表面任意位置,再将 RFID 阅读器天线与阅读器模块相连,放置于烤炉边沿,阅读器模块连接计算机,在其配套测试软件上可以读取到标签天线所连接的芯片型号和测得的温度值,识别效果呈现绿色时即显示成功且稳定读取。从图 15 中可以看出,多个标签呈不同状态位于烤炉金属架表面不同位置,都能够从软件中读取到标签温度传感器芯片型号以及温度信息。软件中显示的 RSSI 值是衡量该 RFID 系统

中读取性能的主要指标之一。测试结果显示,阅读器接收到标签反向散射信号都能使得  $\text{RSSI} \geq -45 \text{ dBm}$ ,因此本文所设计标签以任意状态、摆放在  $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  的烤炉金属架表面任意位置,都可以稳定、准确地被阅读器所识别。



图 15 标签天线测试场景

Fig. 15 Test scene of the tag antenna

本文设计的标签天线,当不同状态与背景金属面接触时,谐振频率会发生动态变化,变化范围约为  $35 \text{ MHz}$ 。当 RFID 读写器能够覆盖这一频率动态变化时,本文提出的标签天线就可以在这套 RFID 系统中正常工作。

### 3 结 论

本文提出了一种能在金属表面任意滚动的小型化 RFID 标签天线。该天线基于倒 F 天线结构,呈柱状分布,研究了其中一个辐射臂或两个辐射臂同时与背景地面接触时天线的阻抗匹配特性,分析了多种典型状态下天线工作频率的偏移程度。测量结果表明,天线在金属面上滚动时,其频点的偏移范围  $897 \sim 932 \text{ MHz}$  内,可用于工作于  $860 \sim 960 \text{ MHz}$  超高频 RFID 系统中。将该标签天线与温度传感器芯片相组合,在烤炉背景环境中测试了该标签的性能,实际应用效果表明性能良好。本文提出的标签天线及其设计方法可在一定程度上克服金属背景环境对天线性能的影响,适合应用于基于 RFID 技术的工业物联网复杂环境参量探测。

### 参考文献

- [1] DENG Y, DU G H, TANG T. Dual-band metal skin UHF RFID tag antenna[J]. Electronics Letters, 2013, 49(14):858-859.
- [2] 余开,何怡刚,李兵,等. 无源超高频 RFID 系统链路预算分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5):974-979.

- SHE K, HE Y G, LI B, et al. Link budget analysis of passive UHF RFID system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5):974-979.
- [ 3 ] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12):1-7.
- WANF B Y. Overview of internet of things technology research [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2009, 23(12):1-7.
- [ 4 ] 江建军, 杨彪, 邵晖, 等. 近高频射频识别读写器虚拟仪器系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6):1024-1028.
- JIANG J J, YANG B, SHAO H, et al. Design and implementation of virtual instrument system for near-high frequency radio frequency identification reader [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6):1024-1028.
- [ 5 ] ABDALLAH E B, CARLE A, MONDON P. Analysis, design, and measurements of an ultrasmall on-metal UHF RFID tag antenna [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(11):2468-2476.
- [ 6 ] 王平, 文光俊. 集装箱表面的超高频 RFID 标签天线设计[J]. 微波学报, 2011(2):46-50.
- WANG P, WEN G J. UHF RFID tag antenna design on container surface[J]. Journal of Microwaves, 2011(2):46-50.
- [ 7 ] DU J, WU C Y, ZHU W J, et al. Ultrathin low cost EBG structure for insulating UHF RFID tag from metal objects [C]. 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2011: 1-4.
- [ 8 ] GAO B, CHENG C H, YUEN M M F, et al. Low cost passive UHF RFID packaging with electromagnetic band gap (EBG) substrate for metal objects [C]. 2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2007: 974-978.
- [ 9 ] NG W H, LIM E H, BONG F L, et al. Compact planar inverted-S antenna with embedded tuning arm for onmetal UHF RFID tag design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6):4247-4252.
- [ 10 ] THIRAPPA K, LIM E H, BONG F L, et al. Compact folded-patch with orthogonal tuning slots for on-metal tag design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(9):5833-5842.
- [ 11 ] LEE Y H, LIM E H, BONG F L, et al. Compact folded C-shaped antenna for metal-mountable UHF RFID applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 67(2):765-773.
- [ 12 ] CHEN H D, TSAO Y H. Low-profile PIFA array antennas for UHF band RFID tags mountable on metallic objects [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(4):1087-1092.
- [ 13 ] ROMPUTTAL A, LUADANG B, PHONGCHAROENPANICH C. Characteristics of a multi-slotted PIFA for UHF RFID tag [C]. TENCON 2014-2014 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2014: 1-4.
- [ 14 ] SIDÉN J, NILSSON H E. An electrically small elliptic PIFA for RFID in harsh metallic environments [C]. 2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013). IEEE, 2013: 1-4.
- [ 15 ] SEE C H, HRAGA H I, ABD-ALHAMEED R A, et al. A low-profile ultra-wideband modified planar inverted-F antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 61(1):100-108.
- [ 16 ] GHANNAY N, SALAH M B B, ROMDHANI F, et al. Effects of metal plate to RFID tag antenna parameters [C]. 2009 Mediterranean Microwave Symposium (MMS). IEEE, 2009: 1-3.
- [ 17 ] 陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 等. 高增益蓝牙天线的设计与应用 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2):197-206.
- CHEN H H, SUN X L, ZHAO H M, et al. Design and application of high-gain Bluetooth antenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2):197-206.
- [ 18 ] 蒋尚杰, 王全宇, 陈小强, 等. 2.4 GHz 频段倒 F 印刷天线的设计与研究 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10):39-41.
- JIANG SH J, WANG Q Y, CHEN X Q, et al. Design and study of 2.4 GHz band inverted-F printed antenna [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(10):39-41.

## 作者简介



袁家德(通信作者),2007年于电子科技大学获得硕士学位,2010年于南京航空航天大学获得博士学位,现为福州大学副教授,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 M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2007, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010. He is currently an associate professor at Fuzhou University. His main research interests include communication antennas, radio

frequency identification and radio frequency circuit.



孟宪杰,2019年于厦门理工学院光电与通信工程学院获得学士学位,现为福州大学物理与信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为射频识别(RFID)天线。

E-mail: mxj12345wyt@126.com

**Meng Xianjie** received his B. Sc. degree from Opto-electronic and Communication Engineering of Xiamen University of Technology in 2019. He is currently a master student in the School of Physics and Information Engineering at Fuzhou University. His current research interest is radio frequency identification antenna.