

基于 1/4 圆环谐振器的无芯片标签设计与识别 *

张强林, 邹传云, 焦良玉

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 面对无芯片 RFID 标签小型化、紧凑式的发展, 以及为降低传统 RFID 标签的成本, 提出了基于 1/4 圆环谐振单元的一种小型化、极化不敏感、无源无芯片射频识别标签, 在频率 6 GHz~11.5 GHz 范围内, 具有 4.39 bit/cm^2 的高编码密度。通过矩阵束算法(MPM)对标签的极点提取, 对比仿真数据与算法提取数据, 所设计标签满足识别的准确性要求, 且具有良好的数据编码性能。

关键词: 无芯片 RFID 标签; 1/4 圆环; 极化不敏感; 高编码密度; 矩阵束算法

中图分类号: TN91

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200851

中文引用格式: 张强林, 邹传云, 焦良玉. 基于 1/4 圆环谐振器的无芯片标签设计与识别 [J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 9~13.

英文引用格式: Zhang Qianglin, Zou Chuanyun, Jiao Liangyu. Design and identification of chipless tag based on 1/4 ring resonator[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 9~13.

Design and identification of chipless tag based on 1/4 ring resonator

Zhang Qianglin, Zou Chuanyun, Jiao Liangyu

(School of Information Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In the face of the development of miniaturization and compactness of chipless RFID tags, and in order to reduce the cost of traditional RFID tags, this paper proposes a compact, polarization insensitive, passive chip less RFID tag based on 1/4 ring resonant unit. It has a high coding density of 4.39 bit/cm^2 in the frequency range of 6 GHz~11.5 GHz. The pole of the tag is extracted by Matrix Pencil Method(MPM). Compared with the simulation data and the algorithm extraction data, the designed tag meets the requirements of identification accuracy and has good data coding performance.

Key words: chipless RFID tag; 1/4 ring; polarization insensitive; high coding density; MPM

0 引言

无芯片射频识别(RFID)系统与传统的基于芯片的 RFID 系统相比, 因其潜在的低成本成为许多研究的主题^[1~3]。无芯片 RFID 的主要优点是, 由于标签上没有集成电路(Integrated Circuit, IC)或芯片, 标签的成本可以大大降低。近几年, 对可打印和紧凑的无芯片 RFID 标签的设计和识别技术进行了许多改进^[2]。另一方面, 无源无芯片 RFID 标签 ID(标识码)的检测识别是一个重大的挑战, 它需要一个比传统 RFID 更复杂的读写系统^[3]。

无芯片 RFID 标签的数据编码可以基于时域(Time Domain, TD)、频域(Frequency Domain, FD)、相位域(Phase Domain, PD)、空间域(Spatial Domain, SD)和混合域(Hybrid Domain, HD)^[4], 无芯片 RFID 系统分类如图 1 所示。基于 TD 的标签是通过后向散射信号之间的延迟量表示编码的数据^[5], 由于电磁波的速度, 标签中的时间延迟非常

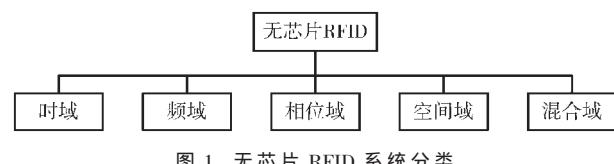


图 1 无芯片 RFID 系统分类

短, 因此很难计算延迟的持续时间。对于 FD 的标签, 信息编码在标签的频率响应中^[6], 标签包含特定的结构, 该结构会在特定频率产生谐振, 该谐振可以在其后向散射信号中检测到, 超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)信号通常用作询问信号, 因为信号带宽越宽, 标签中编码的比特就越多。在 PD 标签中, 标签 ID 是通过响应信号中的相移来编码的^[7], 对于预定频率观察到相移, 并且从相位频率分布图解码相关联的标签 ID; 目前为止, 这种类型的标签提供有限数量的数据位作为标签 ID。在 SD 域(也称为基于图像的技术)中^[8], 标签结构的每个小部分都包含其自己的数据, 阅读器扫描标签表面, 并分别提取标签表面各部分的数据, 然后, 通过后期处理, 整个标

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671393)

签的图像都会显示出来,其中显示了完全编码的标签数据^[9]。将上述这些技术的组合增加数据容量称为混合域编码^[10],虽然增加了无芯片标签的比特容量,但是系统相对复杂。到目前为止,已经开发和报道的无芯片RFID标签和阅读器系统的5种主要的数据编码和查询方法^[4-10],其中,FD标签提供了较大的数据容量和鲁棒性更高的编码和解码方法,因此,基于所述频域(FD)无芯片标签具有更高的编码密度,更容易实现紧凑化^[4,6]。

在雷达系统或者无芯片RFID系统中,目标极点在目标的检测与识别中是很重要的参数之一,无芯片标签的瞬时电磁散射响应是以奇点展开法(Singularity Expansion Method,SEM)为理论基础的^[11]。无芯片标签是没有集成电路(IC)或芯片的金属结构,可以通过无芯片标签入射的平面波的散射特性进行极点提取,要实现无芯片标签的识别,矩阵束算法(Matrix Pencil Method,MPM)有较强的抑制噪声和数据拟合能力,在极点提取算法中得到广泛应用^[12]。

本文提出了一种利用1/4圆环谐振器设计频域编码标签的新结构,在各频率谐振带宽较窄的情况下,设计和制作大容量编码数据的贴片式标签是可行的,仿真分析和算法提取结果将更详细地描述该标签的多位生成。

1 矩阵束算法的相关理论

奇点展开法(SEM)广泛用于表征具有各种形状、大小和构造的未知对象,它首先由BAUM C E提出^[11]。基于SEM,各种对象对电磁激励的反应可以完全通过复平面(拉普拉斯变换平面,即s平面)中的极点来表征,无芯片标签的瞬态响应在其后时是由许多衰减震荡的和组成的,其数学模型可以表示为^[13]:

$$y(\theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^M R_i(\theta, \varphi) e^{s_i t} \Leftrightarrow Y(\theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^M \frac{R_i(\theta, \varphi)}{s - s_i} \quad (1)$$

式中,M为信号模型的极点对数,R_i为复振幅(留数);s_i=α_i+jω_i是极点(α_i、ω_i分别代表衰减因子和角频率)。

提取极点的方法有很多,但是在实际应用中Prony方法和矩阵束算法是最常用的极点提取方法。Prony的算法提供了一种有效而准确的方法^[14],可以从时间间隔相等的一组采样数据中估算出极点和留数,但是,它对数据中存在的噪声非常敏感。为了提高其在噪声下的性能,矩阵束算法是一种单步方法,涉及解决广义特征值问题,采用奇异值分解(Singular Value Decomposition,SVD)有较好的抗噪性能,以便从采样数据中获得参数。因此,使用矩阵束方法,可以找到的极点数量没有实际限制,在一定的程度上,得到的留数和极点有比较高的精度。

2 无芯片标签的设计

2.1 基本谐振单元

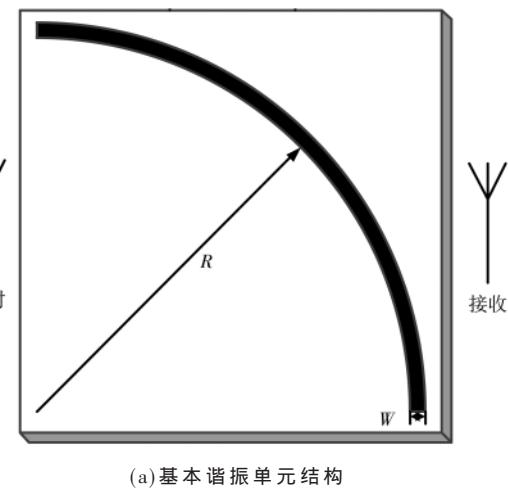
通过FEKO软件设计了1/4圆环贴片式基本谐振单元,其基本结构如图2(a)所示,其中半径R=9.3 mm,宽

度W=0.5 mm,选取基板材料为F4BM220(介电常数ε_r=2.2,损耗角正切为tanδ=0.000 7,厚度h=0.5 mm)。1/4圆环的谐振频率由其弧长(L)决定,并计算关系如下:

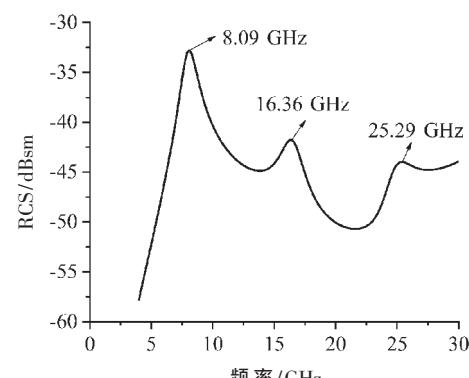
$$L = R \times \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

如果在F4BM基板上加载上1/4圆环谐振器,则谐振频率是谐振器弧长(L)的函数。

不同弧长的1/4圆环谐振器用于为该标签创建不同的频率特征,其中每个特征用于表示一个比特。仿真得到其雷达散射截面(Radar Cross Section,RCS)幅频特性曲线如图2(b)所示,在8.09 GHz的基频上产生代表一位数据的尖锐而清晰的谐振,另外,谐振器二次谐波和三次谐波出现在16.36 GHz和25.29 GHz处。因此,可以使用UWB频带对数据进行编码,因为8.09 GHz谐振器的二次谐波和三次谐波不会处在所编码的频带中,可以避免谐波的干扰。此外,可以通过以紧凑的尺寸组合多个谐振器来实现高编码密度。



(a) 基本谐振单元结构



(b) RCS 响应曲线

图2 基本谐振单元结构及所对应的RCS曲线

分析谐振器所对应的极化特性如图3所示,由于1/4圆环形谐振器的对称结构,可以得到与阅读器天线在各个方向上相同的频率特征。在水平极化和垂直极化方式下,两者的谐振频率相互重合,表明此基本谐振单

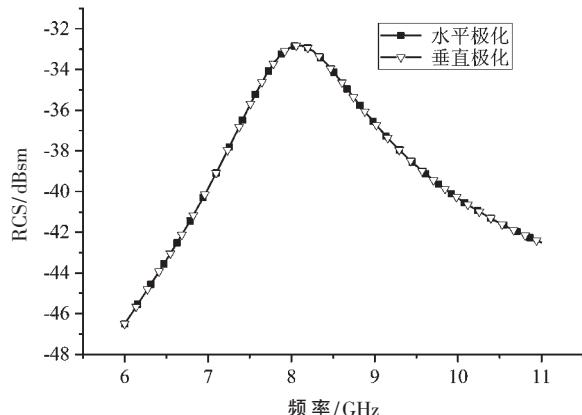


图 3 在不同极化角下的 RCS 响应曲线

元具有双极化特性。

2.2 无芯片标签结构设计

由上节可知,基于 1/4 圆环贴片的基本谐振单元的频率与其弧长(L)有密切关系,通过改变 1/4 圆环半径(R)使弧长(L)的大小发生改变,从而构造出不同的谐振频率。基于 1/4 圆环无芯片标签的基本结构如图 4 所示,选取基板材料为 F4BM220(介电常数 $\epsilon_r=2.2$, 损耗角正切为 $\tan\delta=0.0007$),其中 m 和 n 分别是基板长度与宽度, h 为基板厚度, R_1 与 R_2 分别是最内环半径与最外环半径, W 为谐振器宽度, d 为谐振器之间的间隔, g 与 l 分别为边缘间隔。

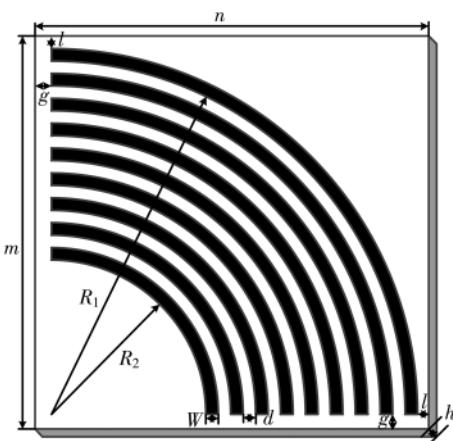


图 4 基于 1/4 圆环无芯片标签的基本结构

表 1 所示为无芯片标签结构的参数,环的宽度(W)及其之间的间隙(d)分别选择为 0.5 mm 和 0.3 mm。在 FEKO 仿真环境中,分别研究了 W 和 d 对 RCS 水平的影响。结果表明,以较大的表面积为代价,用较宽的环可以获得更高的标签 RCS。因此,尽量选择 W 较小来制作一个紧凑的标签,此外, d 不会显著影响标签 RCS 水平。

表 1 主要设计参数

参数	R_1	R_2	W	m	n	d	g	l	h	(mm)
长度	6.1	12.5	0.5	13.5	13.5	0.3	0.2	0.3	0.5	

在 FEKO 中,通过矩量法(Method of Moments, MoM),以平面波为激励源,利用远场求解,模拟得到了后向散射响应。在线极化方式下,它们都被一个具有垂直于基板的电场的平面波激发,在 $13.5 \times 13.5 \text{ mm}^2$ 的面积内容纳了 9 个谐振器,可实现 8 bit 的数据容量。表 2 比较了一些近几年已报道的无芯片标签的编码效率,表明所提出的谐振器具有显著的高编码密度。

表 2 无芯片 RFID 谐振器的编码密度比较

标签	位数/bit	面积/mm ²	编码密度/(bit/cm ²)
参考文献[15]	8	59×30	0.45
参考文献[16]	12	37×20.5	1.58
参考文献[17]	10	22×40	1.14
参考文献[18]	10	22.8×16	2.74
本设计	8	13.5×13.5	4.39

2.3 仿真分析

此次仿真编码方式是通过波谷编码,弧长(L)最大的谐振器则谐振频率最低,用来编码最高位;弧长(L)最小的谐振器则谐振频率最高,用来编码最低位。每一个谐振频率在 RCS 曲线上都有一个波峰和波谷,其中波谷被用于编码逻辑状态“1”,所对应波谷不存在表示逻辑状态“0”。

在 FEKO 软件中,选择线极化方式,入射角为 $\theta=0^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ 的平面波激励下,分别以极化角 $\eta=0^\circ$ 到 90° 分析其 RCS 曲线,如图 5 所示。可以看出,在不同方式下,谐振频率保持不变,且不受极化角变化的影响。此外,通过改变极化角,无芯片标签的 RCS 响应幅度向上移动,其中 0° 与 90° 、 30° 与 60° 曲线重合。可以观察到,相邻的波谷具有很小的变化,而标签的响应由于轴对称而在 0° 和 90° 处保持不变,这使得所实现的无芯片 RFID 标签设计极化不敏感。

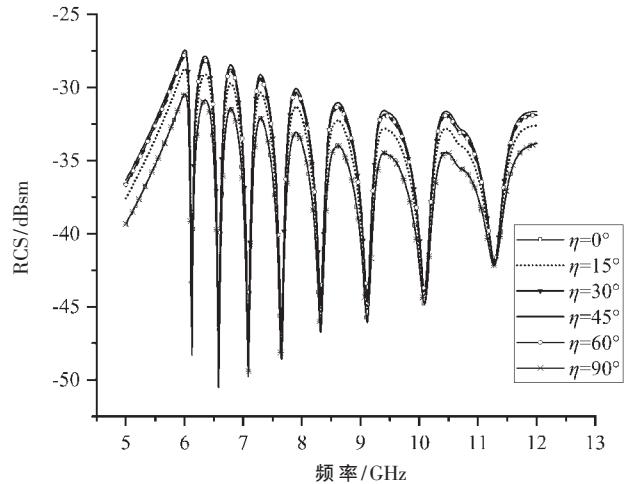


图 5 不同极化角度下的 RCS 曲线

图 6 为无芯片 RFID 标签不同 ID 信息的结构图,图 7 是与其所对应的 RCS 曲线图,无芯标签在入射角为 $\theta=0^\circ$ 、

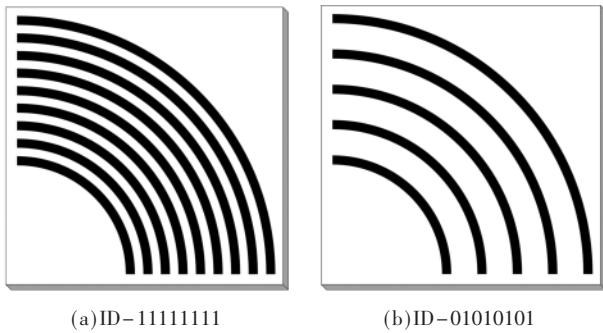


图 6 不同 ID 的无芯片标签结构

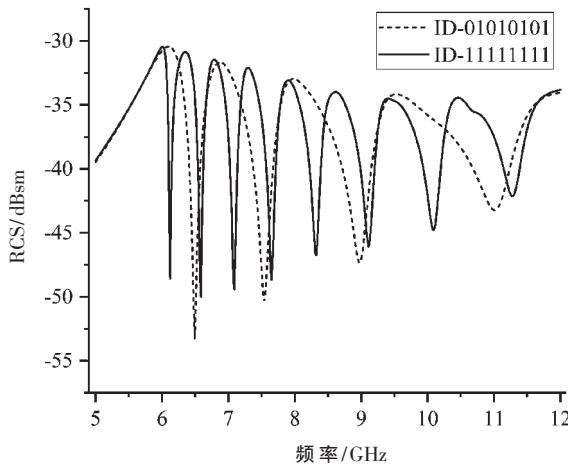


图 7 不同 ID 信息标签的 RCS 曲线

$\varphi=0^\circ$ 、极化角 $\eta=0^\circ$ 的平面波激励下, 基板材料为 F4BM220 (介电常数 $\epsilon_r=2.2$, 损耗角正切为 $\tan\delta=0.0007$, 厚度 $h=0.5\text{ mm}$) 上进行仿真。

分析无芯标 ID 的 2 种状态: 01010101 和 11111111。任何位为“1”表示相关贴片在标签中, 而“0”位表示贴片不存在。在图 6(b)中, 由于波谷编码, 第一条贴片相当于“虚设”, 当第 2、第 4、第 6 和第 8 条贴片被移除, 因此图 7 中所对应的谐振频率也被移除。此外, 在设计中可以增加更多的谐振单元, 但要以牺牲标签尺寸和编码密度为代价。编码组合可以通过增加和消除不同的贴片来实现, 这些贴片会影响 RCS 曲线上相应的频率特征。从标签的 RCS 曲线中观察到, 由于贴片之间存在短路槽, 对相邻频率的影响可以忽略不计。

3 无芯片标签的识别

无芯片标签的极点是实现多标签识别的重要参数之一, 通过对图 7 进行快速傅里叶变换(FFT)得到其时域响应, 利用矩阵束算法(MPM)提取的极点分布如图 8 所示, 分别对 ID-11111111 与 ID-01010101 波谷频点的提取, 可以得出极点的数目对应着谐振单元的数目, 其中每个极点的参数取决于相应的谐振器的特性, 不同无芯片 RFID 标签结构的极点分布状态不同。

从图 8 可以看出, 利用矩阵束算法(MPM)提取 ID-11111111 的无芯片标签, 针对在极点分布图中出现的由

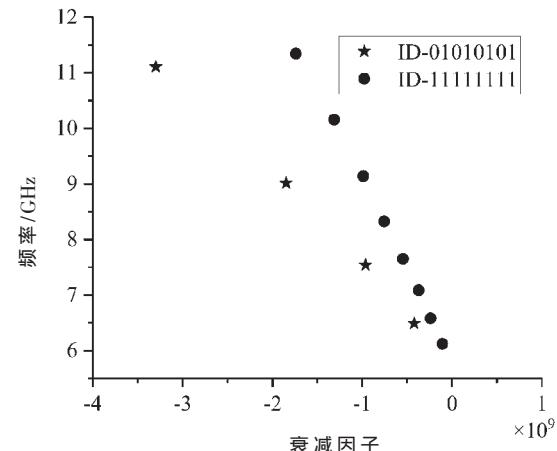


图 8 无芯片标签的极点分布

极点虚部所对应的 8 个频点, 将仿真与算法提取频点进行比较, 如表 3 所示。

表 3 仿真与算法提取频点比较

波谷点	仿真频率 (GHz)	算法提取 (GHz)	误差值
1	6.13	6.12	0.01
2	6.58	6.58	0
3	7.09	7.08	0.01
4	7.65	7.65	0
5	8.32	8.33	0.01
6	9.12	9.14	0.02
7	10.09	10.16	0.07
8	11.28	11.36	0.08

通过比较可以发现, 利用矩阵束算法(MPM)提取的频点与仿真波谷频点最大误差为 0.08 GHz; 最小误差为 0, 对于 ID-11111111 的无芯片标签的误差值均小于最小谐振频率差值的 1/2, 即 $(6.58-6.13)/2=0.225\text{ GHz}$, 基本可以达到识别效果。

上述只是对表格数据简单的分析, 对表 3 数据进行最小二乘法拟合, 如图 9 所示, 将仿真频点与算法提取频点数据进行拟合为一次方程, 可以看出线性度比较好,

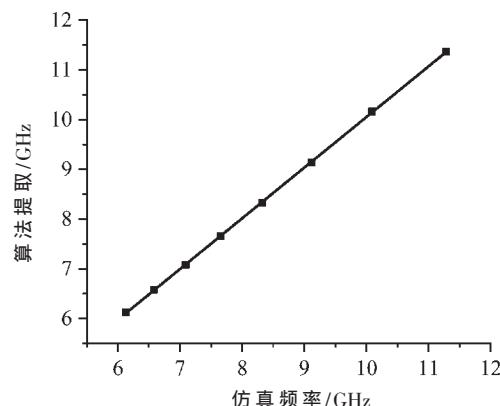


图 9 频点线性拟合

计算出的一次方程为：

$$f(x) = 1.01869x - 0.13478 \quad (3)$$

由方程(3)可以得出一次项系数为 1.01869, 拟合优度 Adj.R-square 约等于 0.99995, 则表明线性拟合良好, 所以满足识别的准确性要求。

4 结论

本文采用 1/4 圆环谐振器设计了一种基于频域的无芯片 RFID 标签, 设计了一个 8 位标签, 标签的尺寸 $13.5 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$, 工作的频段为 $6 \text{ GHz} \sim 11.5 \text{ GHz}$, 具有 4.39 bits/cm^2 的高编码密度, 验证了其设计的性能。虽然标签的尺寸不是最优的, 但对于设计无芯片 RFID 标签有很好的参考价值, 结合一些小型化技术, 还可以在柔性基板上印刷出尺寸更小、容量更大的标签。

参考文献

- [1] PERRET E. Radio frequency identification and sensors: from RFID to chipless RFID[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.
- [2] MULLONI V, DONELLI M. Chipless RFID sensors for the Internet of Things: challenges and opportunities[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2135.
- [3] DIVARATHNE C, KARMAKAR N. An advanced tag detection technique for chipless RFID systems[C]. 2015 European Microwave Conference(EuMC), Paris, 2015: 251–254.
- [4] ALIASGARI J, FOROUZANDEH M, KARMAKAR N. Chipless RFID readers for frequency-coded tags: time-domain or frequency-domain[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(2): 146–158.
- [5] PPPERL M, PARR A, MANDEL C, et al. Potential and practical limits of time-domain reflectometry chipless RFID[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(9): 2968–2976.
- [6] ALAM J, KHALIEL M, FAWKY A, et al. Frequency-coded chipless RFID tags: notch model, detection, angular orientation, and coverage measurements[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1843.
- [7] SCHÜBLER M, MANDEL C, MAASCH M, et al. Phase modulation scheme for chipless RFID- and wireless sensor tags[C]. Microwave Conference. IEEE, 2010.
- [8] ZOMORRODI M. Image-based chipless RFID system with high content capacity for low cost tagging[C]. IMaRC. IEEE, 2014.
- [9] NGUYEN D H, ZOMORRODI M, KARMAKA N C. Spa-

(上接第 8 页)

- [3] DONG M M, HU Z Z, LIU Y, et al. A fiber based diamond RF B-field sensor and characterization of a small helical antenna[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(13): 131105.1–131105.5.
- [4] YANG B, DONG Y, HU Z Z, et al. Noninvasive imaging method of microwave near field based on solid-state quantum sensing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and

tial-based chipless RFID system[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2019, 3(1): 46–55.

- [10] JIMÉNEZ-SÁEZ A, SCHUBLER M, NICKEL M, et al. Hybrid time-frequency modulation scheme for chipless wireless identification and sensing[C]. 2017 IEEE Sensors, 2017.
- [11] BAUM C E. The singularity expansion method: background and developments[J]. IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, 1986, 28(4): 14–23.
- [12] DRISSI K E K. The matrix pencil method applied to smart monitoring and radar[C]. CMEM 2015, 2015.
- [13] BLISCHAK A T, MANTEGHI M. Embedded singularity chipless RFID tags[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(11): 3961–3968.
- [14] TRUDNOWSKI D J, JOHNSON J M, HAUER J F. Making prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 226–231.
- [15] SUMI M, DINESH R, NIJAS C M, et al. High bit encoding chipless RFID tag using multiple E-shaped microstrip resonators[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2014, 61: 185–196.
- [16] 马中华, 杨建红. 基于 I 型缝隙谐振器的完全印刷无芯片标签[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 44–49, 57.
- [17] 夏正浩, 邹传云. 多谐振器无芯片 RFID 标签设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(7): 87–89.
- [18] JABEEN I, EJAZ A, AKRAM A, et al. Elliptical slot based polarization insensitive compact and flexible chipless RFID tag[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(11): 1–10.

(收稿日期: 2020-08-16)

作者简介:

张强林(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线射频识别技术。

邹传云(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 超宽带技术、无线射频识别技术。

焦良玉(1993-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 无线射频识别技术。

and Techniques, 2018, 28(12): 204–211.

(收稿日期: 2020-06-11)

作者简介:

王昊(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 量子微波场成像。

顾邦兴(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 芯片近场精密测量。

陈国彬(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 自旋电子学、纳米磁学。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所