光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024031802

基于频率选择表面的太赫兹标签设计

马　勇[1]，盛宏远[1]，徐应松[1]，陈　鑫[1]，黎人溥[1*]，陈前斌[1]，周幸叶[2]，陈　沁[3]，Anthony Vickers[1,4]，Jehan Akbar[5]，马晓燠[6*]

（1. 重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065；2. 中国电子科技集团公司第十三研究所，石家庄 050057；3. 暨南大学 纳米光子学研究院，广州 511443；4. 重庆太赫智芯科技发展有限公司，重庆 400060；5. 哈扎拉大学，巴基斯坦 曼塞赫拉；6. 四川文理学院 成都研究院，四川 达州 635000）

摘　要： 设计了一种基于频率选择表面的太赫兹超表面标签，整体结构由表面金属图案、中间介质和底面金属板组成。频率选择表面的结构单元由对称八边形嵌套环构成，刻蚀在材料为聚酰亚胺的中间介质上。标签采用频率编码规则，当一个嵌套环消失时，相对应的共振频率点的吸收峰也消失，从而完成不同的编码，通过频率编码也实现有效的带宽利用。仿真结果表明，所提出的结构实现了 4 bit 的编码容量，其工作频率范围为 0.1～0.5 THz，标签面积仅为 0.25 mm^2，具有较高的编码密度，角度稳定性不小于 45°，具有偏振不敏感的特性，满足标签识别准确性的要求，具有良好的编码性能。此外，提出了一种频移编码规则，通过改变谐振结构参数来引入频移，从而实现了在不改变标签体积的基础上增加了编码容量、提高标签编码密度，能够更灵活地满足实际应用需求。所提出的基于超表面的柔性太赫兹标签区别于流行的射频标签，在医疗和工业部件、汽车零件和硅芯片等微小物体上有很好的应用前景。

关键词： 太赫兹；超材料；射频识别；频率选择；标签防伪

中图分类号： TP391.44　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0751－08

Terahertz Tag Design Based on Frequency-selective Surfaces

MA Yong[1], SHENG Hongyuan[1], XU Yingsong[1], CHEN Xin[1], LI Renpu[1], CHEN Qianbin[1], ZHOU Xingye[2], CHEN Qin[3], Anthony Vickers[1,4], Jehan Akbar[5], MA Xiaoyu[6]

(1. College of Optoelectronics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065 CHN; 2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050057, CHN; 3. Nano Photonics Research Institute of Jinan University, Guangzhou 511443, CHN; 4. Chongqing Taihe Zhixin Technology Development Co., Ltd., Chongqing; 5. Hazara University, Mansehra 21300, PAK; 6. Chengdu Research Institute, Sichuan University of Arts and Sciences, Dazhou 635000, CHN)

Abstract: In this study, a terahertz metasurface label based on a frequency-selective surface (FSS) was designed. The overall structure is composed of a surface metal pattern, intermediate medium, and a bottom metal plate. The structural unit of the FSS consists of symmetrical octagonal nesting rings etched onto an intermediate polyimide medium. When a nested ring disappears, the absorption peak of the corresponding resonant frequency point disappears through different coding. Effective bandwidth utilization is also achieved through frequency coding. The

收稿日期：2024－03－18.

基金项目：新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心“基于太赫兹的无损感测技术研究”项目；中电科芯片技术(集团)有限公司量子实验室基金项目(6310001-2)；重庆邮电大学交叉学科和新兴领域重点专项项目(A2018-01)；重庆市基础与前沿研究项目(cstc2016jcyjA0301)；2021 年度重庆市留学人员创业创新支持计划项目(cx2021011)；河北省杰青项目(F2021516001)；自然科学基金青年基金项目(61405001).

* **通信作者：**黎人溥，马晓燠

simulation results show that the proposed structure achieves a 4 bit coding capacity, with a working frequency range of 0.1～0.5 THz and a label area of only 0.25 mm^2. The proposed structure has a high coding density, the angular stability is ≥45°, polarization insensitivity is present, the requirements of label recognition accuracy are satisfied, and the coding performance is strong. In addition, a frequency shift coding rule is proposed, which introduces a frequency shift by changing the resonant structural parameters to increase the coding capacity and label coding density without changing the label volume, which can satisfy the practical application requirements more flexibly. The metasurface-based flexible terahertz tag proposed in this study is different from the popular RF tag and has strong application prospects for miniature objects, such as medical and industrial components, automotive parts, and silicon chips.

Key words: terahertz; metamaterials; radio frequency identification; frequency selection; tag anti-counterfeiting

0 引言

射频识别(RFID)作为一种无线数据采集技术，是通过射频波的空间耦合实现信息的双向传输，进而实现目标智能识别。得益于电磁波出色的穿透性和传播能力，RFID技术具有非接触式自动识别、不受视线限制、多目标同时识别、高效识别、环境适应性强且耐用等诸多优势[1-3]，在防伪认证[4]、传感[5]、物流管理和追踪[6]等领域有着广阔的应用前景。

目前，射频识别领域的研究重心在于无芯片射频标签。根据数据编码方式的不同，无芯RFID标签主要分为三类：时域反射编码标签[7]、频谱特征编码标签[8]以及基于反向散射场幅度和相位编码的标签[9]。其中研究最多的是时域标签，其基本原理为：利用时延线使得反射信号的到达时间产生差异，让信号得以区分从而实现编码。2015年，Mandel等[7]利用高次脉冲调制的方式设计了一种调制时域标签，通过传输线电路理论分析和非对称功分器的应用，每个标签单元可以达到4种调制状态，最终达到了16 bit的编码容量；基于频谱特征编码的标签，最典型的是2019年Tariq等[8]利用新型同心三叶型缝隙谐振器结构设计频域编码标签，通过添加或删除每个嵌套槽谐振器来实现标签编码，实现了5.44 bit/cm^{2}的编码密度；在基于反射信号幅度编码的无芯标签设计中，Vena等[9]所提出的可重构ASK喷印式标签最具有代表性，标签使用导电性油墨喷印在薄介质基板上，结构类似双菱形，通过在标签中间喷印有机油墨，利用其阻抗变化来改变原来的谐振特性，从而控制反射信号的幅度实现编码，利用3个谐振单元实现了6.9 bit的容量编码。

尽管这些标签都能通过射频信号实现物体识别和数据传输，但它们各自都存在一些局限。例如，时域反射标签的编码比特数有限；频谱特征标签对多径传播和干扰敏感，难以实现大容量编码；基于幅度/相位调制的标签对阅读器天线极化方向敏感，识别准确性易受影响。此外，标签体积过大也限制了其在微小物体如医疗和工业部件、汽车零件和硅芯片上的应用。随着太赫兹科学技术的快速发展，太赫兹光谱[10]和成像技术[11]逐渐为人们所熟知。太赫兹波在电磁频谱中的特殊位置，为其在安全应用[12]领域提供了可能。因此，基于太赫兹光谱的识别技术为实现高编码密度、高稳定性的标签提供了潜在机会，特别是在微小物体上的应用。

为解决上述问题，本文设计了一款结构紧凑的太赫兹超表面标签，其编码容量为4 bit，标签面积仅为0.25 mm^2。同时，提出了一种频移编码规则，通过调整谐振结构参数引入频移，从而在不增加标签体积的情况下，提高了编码容量和编码密度，更能灵活满足实际应用需求。这一研究为太赫兹频段标签的安全应用提供了重要支持。

1 理论分析

1.1 标签编码原理

频率选择表面(FSS)[13]是一种由大量无源谐振单元组成的周期性阵列结构，可以是单频或多频设计。这些谐振单元为金属贴片单元或金属上周期性排列的孔径单元。这种特殊的表面结构能在单元谐振频率附近表现出全反射(贴片型)或全传输(孔径型)的特性。对于采用贴片式谐振结构的标签，其设计通常为三层结构：金属谐振结构位于介质基板的

上层，而基板的下层则覆盖着金属地，这种结构在太赫兹波的照射下，能够产生特定的谐振效应；而孔径型谐振结构标签则只有一层金属结构，它位于介质基板的上层。通过在金属表面上刻蚀出不同形状，可以实现不同频率的谐振。然而，这种设计无法在金属表面物体上使用，从而限制了标签的应用范围。

鉴于此，本文设计的太赫兹超表面标签选用了贴片式谐振结构。通过在介质板上按一定规律周期性嵌套相应的金属谐振结构，当太赫兹波与这些谐振结构相互作用时，反射频谱曲线上就会出现相应的谐振点，这些谐振点代表编码“1”。而若某个谐振结构缺失或被移除，对应的谐振点则会消失，这代表编码“0”。此外，不同长度的谐振贴片会产生不同的谐振频率，这些谐振频率可以根据特定的公式来确定，其中涉及自由空间的光速、介质的相对介电常数以及谐振的长度，谐振频率可表达为：

$$f=\frac{C}{2L}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \tag{1}$$

因此，可以通过改变谐振结构参数去调整频率点的位置从而提升编码容量，为后续标签容量的拓展提供理论基础。

1.2　标签识别原理

所设计的标签在太赫兹频段内工作，其识别原理与射频识别相似，都是通过特定波段的电磁波来识别目标并读写相关数据。产生太赫兹波的装置被称为太赫兹时域光谱系统（THz-TDS），如图 1 所示。系统运行时，飞秒激光器产生的激光被分为两束：一束经过时域延迟后成为泵浦光，直接照射到发射端的光电导天线，从而产生太赫兹脉冲；另一束作为探测光，同样照射到接收端的光电导天线，用于接收样品反射的信号。接收到的信号经过锁相放大器的处理，最终在计算机中通过对时域延迟线的精确控制，调节泵浦光和探测光的时间延迟，从而获取到完整的时域光谱数据。这些时域光谱数据经过傅里叶变换后，可以转化为频域谱，为后续的标签识别和数据读取提供关键信息。

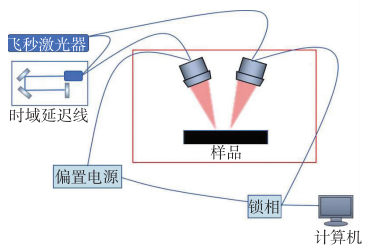


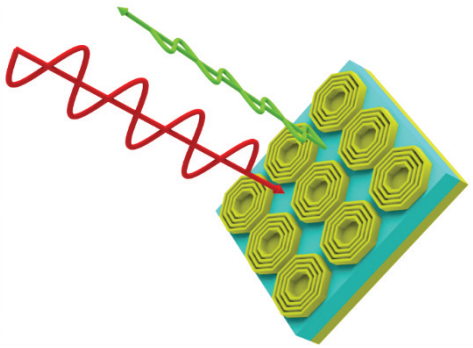
图 1　THz-TDS 工作原理示意图

2　结构设计与仿真分析

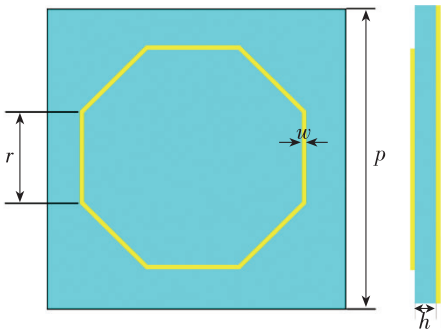
2.1　单元结构设计

环形结构以其优良的品质因数和清晰的反射系数特性，成为标签设计的理想选择。故选用对称的“八边形”结构作为标签基本谐振单元。该设计不仅结构紧凑，且能够满足大编码容量的实际应用需求。

设计的超表面标签结构如图 2 所示。图 2(a)展示了嵌套八边形结构标签的三维阵列示意图，而图 2(b)则提供了该结构的正视图和侧视图。超表面标签采用了经典的三层结构，即金属-介质-金属的三层结构。上层是嵌套的“八边形”图案层，底层是金属反射层，两者均选用导电性能优越的金材料，其电导率 $\sigma=4.52\times10^7$ S/m。中间的介质层则采用聚酰亚胺薄膜，其介电常数 $\varepsilon=3.4+j0.54$。设计该太赫兹超表面标签的单元周期 $P=500$ μm，表面金属图案层和底面金属反射层的厚度均为 $t=100$ nm，中间介质层厚度 $d=50$ μm。单元结构的八边形边长为 r。这样的设计既保证了标签的稳定性，又充分考虑了其在实际应用中的编码容量需求。



(a) 嵌套结构标签三维示意图



(b) 单元结构正视图和侧视图

图 2　结构示意图

为了深入研究所设计的“八边形”结构的频率选择特性，对超表面标签顶层金属图案层中不同尺寸的金属“开口方环”结构进行了模拟仿真，所用软件

为 CST Microware Studio 2020。经仿真结果发现，通过控制“八边形”谐振环的边长，可以产生不同的谐振频率。具体来说，当开口方环的边长分别为 100，110，120 和 130 μm 时，其对应的谐振曲线如图 3 所示。可以看出，随着八边形谐振环边长的增加，谐振频率对应的频点依次降低。因此，可以通过不同长度的谐振单元进行一系列的组合，从而进行编码信息的设置。此外，还需要注意的是，谐振频率并不随着谐振长度的变化而线性改变，这为后续的编码设计提供了重要的参考依据。

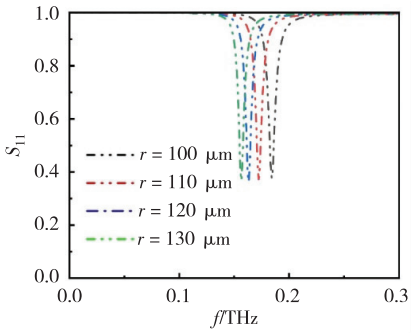
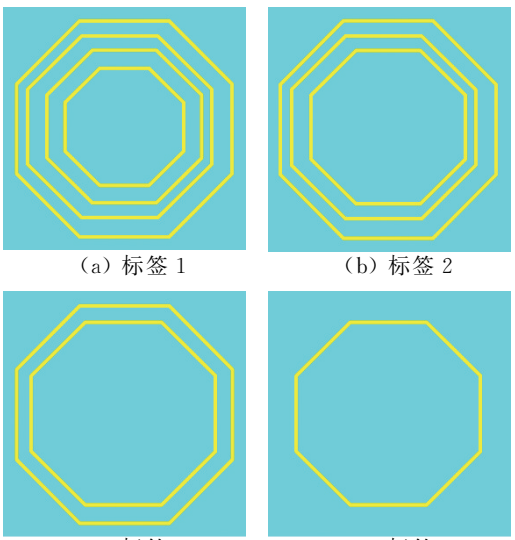


图 3 不同尺寸下单环谐振反射响应

2.2 不同标签仿真分析

为验证嵌套结构设计对于实现频率编码的可行性，设计了 4 种不同的标签，如图 4 所示。



(a) 标签 1 (b) 标签 2

(c) 标签 3 (d) 标签 4

图 4 四种不同结构标签

标签 1 采用 4 个不同大小的开口方环按照一定周期嵌套排列；标签 2 移除最内层的 1 个八边形环，只保留了 3 个八边形环嵌套排列；标签 3 移除了最内层的两个八边形环，保留了最外层的两个开口方环；标签 4 移除了最外层的八边形环和最内层的两个八边形环。标签最外层到最内层从小到大标记，环的边长标记为 r_1，r_2，r_3 和 r_4，八边形环边长尺寸大小分别 170，140，110，80 μm。选用频域求解器进行仿真，x 和 y 方向设置为元胞边界，z 方向为开放边界，结果如图 5 所示。

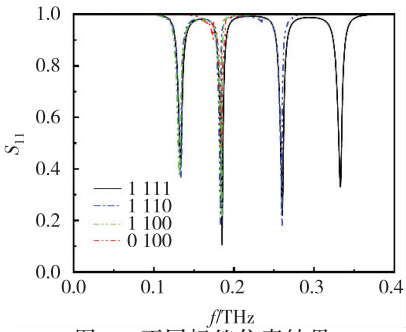


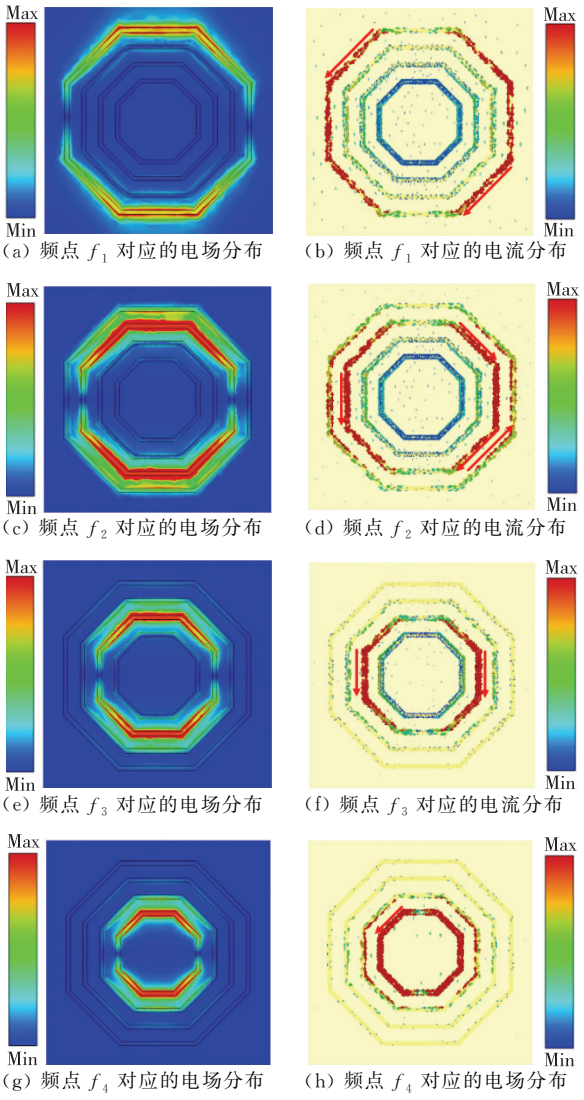
图 5 不同标签仿真结果

根据仿真得到的结果可以看到在金属谐振移除后，频谱上对应的位置谐振峰消失，最外层的环对应最低频位置，最内层的环对应最高频位置，四个标签可分别编码为“1111，1110，1100，0100”，此外在移除金属谐振后，相邻谐振峰的峰值出现了很小的偏移，但并不影响标签的检测识别。

3 谐振机理分析

为了更深入探究基于“开口方环”嵌套结构的超表面标签在工作频点产生的机制，对各个工作频点的表面电场和电流进行了详细分析。本节选取了一个包含四个“八边形”嵌套结构的标签作为研究对象，该标签的四个主要工作频点分别为 $f_1=0.172$ THz，$f_2=0.225$ THz，$f_3=0.303$ THz 和 $f_4=0.379$ THz。在这四个频点处设置场监视器，并通过模拟仿真得到了各个谐振峰中心频率处的表面电流和电场分布，如图 6 所示。

首先，对电场分布进行分析，在入射电磁波电场作用下，金属环上的电荷随着入射电场向金属环两侧移动，并在相应的金属线上集聚了大量的正负电荷，因此电场主要集中在金属环两侧的水平金属线上。由于磁谐振的独立性，电场分布也相对独立且主要分布在相应的金属环上，通过电场分布图可以发现，高频谐振时的电场主要分布在内环，低频谐振时电场主要分布在外环，即随着谐振频率的增加，电场分布由外侧金属环向内侧金属环收缩。在四个谐振频率中，从图 6(c)可见，f_2 对应的电场颜色最深，在该频点对应的谐振最强，其对应电场也最强。



(a) 频点 f_1 对应的电场分布　(b) 频点 f_1 对应的电流分布

(c) 频点 f_2 对应的电场分布　(d) 频点 f_2 对应的电流分布

(e) 频点 f_3 对应的电场分布　(f) 频点 f_3 对应的电流分布

(g) 频点 f_4 对应的电场分布　(h) 频点 f_4 对应的电场分布

图 6　各谐振峰处表面电流及电场分布图

在谐振频率 $f_1=0.132$ THz，$f_2=0.176$ THz，$f_3=0.235$ THz，$f_4=0.336$ THz 处，金属嵌套环和金属反射面上的表面电流图分别为图 6(b)、(d)、(f)和(h)。当上层金属嵌套环在不同谐振频率时，不同的金属环两侧由于存在电势差，会产生表面电流，并且上层嵌套环两侧金属线上集聚的电荷会在下层金属反射面上感应出异性电荷，从而在下层金属反射面上产生反平行电流。上下层金属中的反平行电流与介质层中的磁场相互作用形成的磁偶极子和电偶极子之间强烈耦合，进而实现谐振效应。与电场分布图类似，表面电流的分布也随着频率的增大，由外侧金属环向内侧金属环收缩，且表面电流增强，在 f_4 处电流强度最大。相邻金属环之间也感应出异相电荷和反平行表面电流，并且这种相互耦合作用会使得谐振频率相发生一定的漂移，如果耦合作用过强也会使得相应谐振峰强度的削弱。

4　结构参数对标签性能的影响

单元结构参数对基于 FSS 标签频率响应有着直接的关系，边长与线宽直接影响单元结构的频率响应特性，从而对标签性能起到至关重要的作用。为明确结构参数的影响，在 TE 极化垂直入射下，作了如下研究：(1)通过改变周期长度，分析对标签性能的影响；(2)改变介质厚度，分析对标签性能的作用；(3)通过改变谐振长度，分析对标签频率响应特性的影响；(4)通过改变金属谐振线宽，分析标签频率响应特性。

4.1　单元周期 P 对标签性能的影响

为了研究设计的超表面标签设计的合理性，本节以标签 1 为例，在保持其他参数不变的情况下，通过改变单元结构周期 P 值的大小，分析其对标签性能带来的影响。将单元结构周期设置为 450，500，550，600 μm，得到太赫兹超表面标签的反射特性曲线，如图 7 所示。

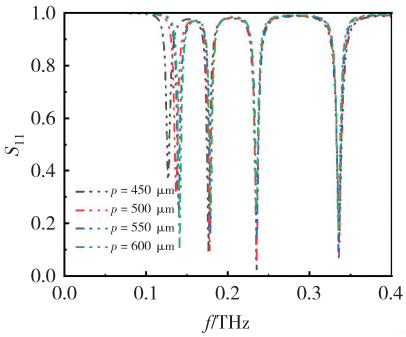


图 7　随单元周期变化的反射响应

根据仿真结果，可以发现超表面标签高频工作频点及反射系数均没有发生明显变化，而低频频点随着 P 值的增大，发生了明显的蓝移现象，反射系数出现了明显增大，谐振峰出现明显下陷，标签品质因数 Q 值明显增大。结构周期的变化对标签反射系数的影响可以用等效电路理论进行分析，将整个结构等效为 LC 谐振电路，金属条带为电感，电感 L 与参与谐振的金属条带长度成正比，表面结构和金属底板间及表面结构之间均可形成电容，电容 C 可表示为：

$$C=\varepsilon S/4\pi kd \tag{2}$$

当 P 增大时，结构之间的距离 d 变大，单元结构间的相互作用变弱，而结构内部的谐振相对增强，整体上 C 增大，又根据谐振频率 f 公式：

$$f=1/(2\pi\sqrt{LC}) \tag{3}$$

得到谐振频率的大小与等效电感和等效电容的值成反比，因此，f 变大，谐振峰向右边移动。故合理的结构周期对标签检测识别有很大影响。

4.2 介质厚度 d 对标签性能的影响

介质厚度的改变，对超表面结构的工作带宽会产生影响，进而影响超表面标签的品质因数，故介质厚度对于评价一款超表面标签的性能来说至关重要。在仿真过程中，保持其他参数不变，设置介质厚度 d 变化范围为 40～55 μm 时，变化步长为 5 μm，探讨介质厚度的改变对超表面标签性能的影响，仿真结果如图 8 所示。

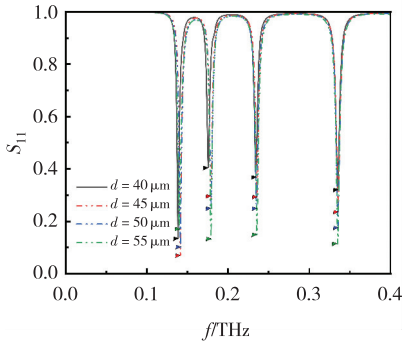


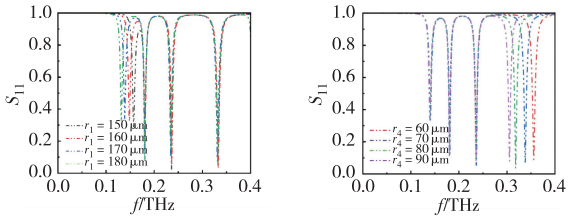
图 8 随介质厚度变化的反射响应

结果显示，超表面工作频点并没有随介质厚度的改变而改变，但是随着 d 的增加，电磁的谐振强度逐渐增强，对应的谐振峰更为尖锐。为了标签能更好地检测识别，综合考虑选择最终的介质层厚度 $d=55$ μm。

4.3 谐振边长 r 对标签性能的影响

嵌套式超表面标签可以等效为电容电感关联的等效电路；金属谐振的宽度和长度又会影响等效电容及等效电感的值。采用控制变量的方法，以“1111”标签为例，在保证其他结构参数不变的情况下，分别改变最外层环的边长大小和最内层环的边长大小，研究谐振长度的改变对标签性能的影响。

如图 9(a)所示，超表面标签低频 f_1 工作点随着 r_1 值的增加发生了明显向低频移动，发生红移，与之相邻的第二个工作频点 f_2 并没有发生相应的频移，但是谐振峰值出现了明显的变化。随着最外层环的大小变大，f_2 的峰值出现明显增加，这是因为环间距变大，第一个环和第二个环之间耦合作用减弱所导致的。同样在图 9(b)中，仅改变标签最内层环的大小，即随着 r_4 值的增加，谐振峰明显向低频移动，发生红移，与之相邻工作频点 f_3 并没有发生相应的频移。可以看出，超表面标签可以通过改变结构参数 r 的大小，来控制标签工作频点的位置。



(a) 随外环半径变化的反射响应 (b) 随内环半径变化的反射响应

图 9 随半径变化的反射响应

4.4 谐振线宽 w 对标签性能的影响

以“1111”标签为例，在保证其他结构参数不变的情况下，改变最外层环的线宽大小研究其对标签性能的影响。设置谐振线宽 w 变化范围为 6～14 μm，变化步长为 2 μm。如图 10 所示，随着线宽的改变，谐振峰的深度及频点也发生了相应的移动。这是因为当最外层谐振线宽增大时，相邻单元之间结构单元间距减小，相邻单元之间的电磁耦合增强，削弱了谐振峰的强度，相应的频点也会出现漂移。因此，在设计超表面时，需要精确控制结构单元的线宽，线宽的改变会间接地控制单元间的耦合作用，以实现预期的谐振频率和相应的电磁性能。

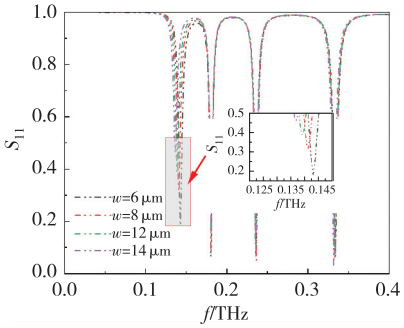


图 10 随线宽变化的反射响应

5 频移编码对标签容量的提升

现有的基于频域法构造的无芯标签，利用共振峰的有无进行编码[11-12]，要获取更多的编码容量，则需要增加更多的谐振器，这无疑将增大标签的尺寸。根据上文理论分析，改变标签边长 r 和线宽 w 的大小，标签的谐振频率将发生频移，利用谐振点的偏移产生不同的编码状态，提出了新的编码方法，在不增加标签尺寸的前提下，标签编码容量在原有的基础上提升 2 倍。

以标签 1 为例，控制最外环的边长 r_1 分别为 150，160 和 170 μm 时，分别对应编码状态为“01，

10,11”,当此处没有谐振结构时,对应编码状态为“00”,通过控制结构参数变化,每个谐振器都有 4 个不同的编码状态分别为“00”,“01”,“10”和“11”。

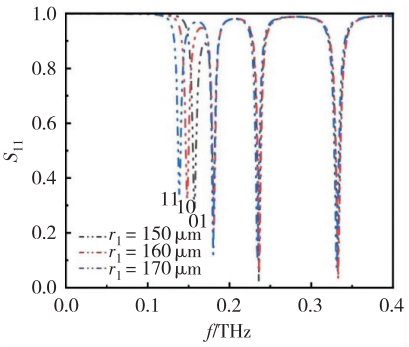


图 11　边长改变引起的频移编码

相比于现有增加编码容量的方法,对谐振峰的偏移量进行进一步编码来增加编码容量,不仅提高了编码密度,而且保证了尺寸的紧凑。根据上述的编码方法,每个谐振器将编码 2 bit,4 个谐振器则编码 8 bit。

6　标签可靠性分析

6.1　标签极化稳定性分析

评价超表面标签性能的一个重要指标参数是在不同的偏振模式下是否能有相同的频率响应。图 12 展示了 TM 和 TE 极化模式下的反射系数曲线。可以看到,在不同的谐振模式下,共振频率点并没有改变,TM 和 TE 模式有相同的频率响应。

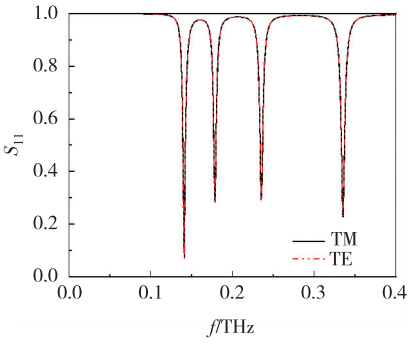


图 12　不同极化模式下的反射响应

因此,所提出的超表面标签是偏振不敏感的。其原因是所设计的结构具有高度对称性。偏振不敏感的特性将使所设计的“八边形”嵌套结构标签在实际应用中具有更好的鲁棒性。

6.2　标签入射角稳定性分析

如果标签的入射角稳定性差,那么当标签相对于读取器的位置发生变化时,标签的反射响应可能会有不同,从而影响标签的检测识别。因此评价超表面标签性能的另外一个重要指标参数是入射角稳定性。从图 13 可以看出当斜入射角在 45°以内时,反射系数频点基本没有变化,仅在 f_3 和 f_4 之间出现一个新的谐振峰,但其深度较低,对检测识别影响不大,因此所设计的标签角度稳定性在 45°左右。

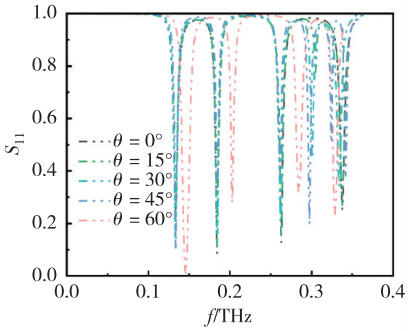


图 13　不同入射角下的反射响应

7　结论

本文提出一款基于“对称八边形”结构的超表面标签,其工作频率覆盖 0.1～0.5 THz,标签面积仅为 0.25 mm^2,具有较高的编码密度。该标签在 45°左右展现出良好的角度稳定性,具有偏振不敏感的特性,能够满足标签识别准确性的要求,具有良好的编码性能。此外,提出了一种频移编码规则,通过改变谐振结构参数来引入频移,不仅提高了编码密度,而且还保证了尺寸的紧凑性,能够更灵活地满足实际应用需求,在医疗和工业部件、汽车零件和硅芯片等微小物体上具有很好的应用前景。

参考文献:

[1]　赵军辉. 射频识别技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[2]　罗春彬,彭　龑,易　彬. RFID 技术发展与应用综述[J]. 通信技术,2009,42(12):112-114.
Luo Chunbin, Peng Yan, Yi Bin. Overview on RFID technology and application[J]. Communications Technology, 2009, 42(12): 112-114.

[3]　Lozano-Nieto A. RFID Design Fundamentals and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.

[4]　刘　莉,巩运军. 基于 RFID 防伪追溯包装的研究[J]. 中国印刷,2015(8):92-93.
Liu Li, Gong Yunjun. Research on anti-counterfeiting and traceability packaging based on RFID[J]. China Print, 2015 (8): 92-93.

[5]　Shan H, Peterson Ⅲ J, Hathorn S, et al. The RFID connection: RFID technology for sensing and the Internet of

Things[J]. IEEE Microwave Mag., 2018, 19(7): 63-79.

[6] Rouchdi Y, Haibi A, El Yassini K, et al. RFID application to airport luggage tracking as a green logistics approach[C]// 2018 IEEE 5th Inter. Congress on Information Science and Technology (CiSt), 2018: 642-649.

[7] Mandel C, Schβler M, Nickel M, et al. Higher order pulse modulators for time domain chipless RFID tags with increased information density [C]// 2015 European Microwave Conference (EuMC), 2015: 100-103.

[8] Tariq N, Riaz M A, Shahid H, et al. Orientation independent chipless RFID tag using novel trefoil resonators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122398-122407.

[9] Vena A, Babar A A, Sydänheimo L, et al. A novel near-transparent ASK-reconfigurable inkjet-printed chipless RFID tag[J]. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 2013, 12: 753-756.

[10] 曹 灿, 张朝晖, 赵小燕, 等. 太赫兹时域光谱与频域光谱研究综述[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2688-2699.
Cao Can, Zhang Zhaohui, Zhao Xiaoyan, et al. Review of terahertz time domain and frequency domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2688-2699.

[11] 丁 丽, 丁 茜, 叶阳阳, 等. 室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 114-121, 149.
Ding Li, Ding Xi, Ye Yangyang, et al. Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 114-121, 149.

[12] Nasr M, Richard J T, Skirlo S A, et al. Narrowband metamaterial absorber for terahertz secure labeling[J]. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 2017, 38: 1120-1129.

[13] 陈晓辉, 张海岩. 频率选择表面的研究与应用现状[J]. 材料导报, 2013, 27(19): 52-54.
Chen Xiaohui, Zhang Haiyan. The present research state of the frequency selective surface[J]. Materials Reports, 2013, 27(19): 52-54.

作者简介:

马 勇(1980—),男,博士,副研究员,重庆邮电大学量子信息技术实验室主任,从事太赫兹器件与技术、光量子器件与技术的研究,已发表 SCI/EI 论文 65 篇;

马晓燠(1983—),男,重庆市人,博士,研究领域为自适应光学、微纳光学、光学测量;

黎人溥(1988—),男,重庆市人,博士,研究领域为光学测量。