

基于 2.5 维小型化设计的 UHF 频段高性能超材料吸波体

刘晓春^{1,2} 张文武^{1,2} 胡文秀¹ 贾明乾¹ 何小祥¹ 贲 德¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 211106; 2. 济南特种结构研究所, 济南, 250023)

摘要: 提出一种基于 2.5 维小型化设计的高性能超材料吸波体, 其吸波频带覆盖全球范围内超高频射频识别 (Ultrahigh-frequency radio frequency identification, UHF-RFID) 系统工作频段。该吸波体结构借助多个金属化过孔增加回路电长度进行小型化并拓展吸波带宽, 通过单独调节上下表面衰减电阻阻值缩小此过程中介质板厚度带来的极化差异。单元尺寸被缩小至 $13.6\text{ mm} \times 13.6\text{ mm}$, 约为中心频率波长的 $1/60$ 。仿真和实验结果表明, 该 2.5 维小型化高性能超材料吸波体在 $840\sim 960\text{ MHz}$ 的频带范围内平均吸收率超过 99%, 相比已公开文献, 95% 吸波带宽提高 45% 以上, 可用于改善受限空间中 RFID 系统的可靠性。

关键词: 超高频; 射频识别; 2.5 维小型化; 吸波体

中图分类号: TP391.4; O441.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)06-0864-06

High-Performance Metamaterial Microwave Absorber Based on 2.5-D Miniaturization Design in UHF Band

LIU Xiaochun^{1,2}, ZHANG Wenwu^{1,2}, HU Wenxiu¹, JIA Mingqian¹, HE Xiaoxiang¹, BEN De¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan, 250023, China)

Abstract: A high-performance metamaterial absorber based on 2.5-D miniaturization design is proposed in this paper, whose absorbing band covers the UHF radio frequency identification (RFID) operation band worldwide. The absorber uses metallized vias to increase electrical length and expand absorption bandwidth. Polarization difference caused by the thickness of the dielectric in this process can be reduced by adjusting resistance of the upper or lower layer separately. Size of the unit cell is miniaturized to $13.6\text{ mm} \times 13.6\text{ mm}$, about $1/60\lambda$ at the center frequency. Detailed simulation and experimental results show that the 2.5-D miniaturized high-performance metamaterial absorber has absorptivity of more than 99% among $840\sim 960\text{ MHz}$ on average. Compared with the results in published literature, the 95% absorption bandwidth is increased more than 45%. Thus, the absorber can be used to improve the reliability of RFID systems in restricted spaces.

Key words: ultrahigh-frequency; radio frequency identification (RFID) system; 2.5-D miniaturized; absorber

随着信息化社会的迅猛发展,被广泛应用在物联网领域中的射频识别(Radio frequency identification, RFID)技术由于其低成本高效率的优势,在供应链管理中的一系列物流环节起到举足轻重的

作用^[1]。RFID技术通过射频信号在空间的耦合实现无视觉接触的信息传递及目标识别,然而其稳定性和精确度严重受到多径效应的影响,如何避免误识别、提高识别效率成为RFID技术近年来的研究

收稿日期:2018-11-03;修订日期:2019-03-02

通信作者:何小祥,男,副教授,E-mail:eeexhe@nuaa.edu.cn。

引用格式:刘晓春,张文武,胡文秀,等. 基于 2.5 维小型化设计的 UHF 频段高性能超材料吸波体[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):864-869. LIU Xiaochun, ZHANG Wenwu, HU Wenxiu, et al. High-Performance Metamaterial Microwave Absorber Based on 2.5-D Miniaturization Design in UHF Band[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2019,51(6):864-869.

热点^[2]。

研究表明,使用超材料吸波体吸收环境中的反射电磁波,可以有效降低多径效应带来的影响,改善电磁环境,从而建立高可靠性的超高频RFID系统^[3]。文献[4]提出一种可用于RFID门禁系统的超薄吸波体,采用人工高阻表面,在915~928 MHz的频带内达到90%以上吸收率,单元尺寸为92 mm×92 mm。文献[5]提出的超高频射频识别(Ultrahigh-frequency radio frequency identification, UHF-RFID)频段超材料吸波体基于耶路撒冷十字结构,在865~868 MHz的工作频段有较高的吸收率,单元尺寸为86.5 mm×86.5 mm。文献[6]提出一种用于欧洲UHF-RFID频段多径现象抑制的超材料吸波体,其吸收峰值868 MHz处吸收率大于99%,单元尺寸为60 mm×60 mm。由于UHF-RFID系统的工作频段在900 MHz附近,而传统吸波体尺寸与波长相当,因此上述该频段的吸波体尺寸均较大,当不同极化、不同入射角度的电磁波入射时,吸波性能稳定性较差,必须进行小型化设计才能突破其尺寸问题带来的应用限制^[5]。目前,国内外研究学者已经对微波频段的小型化超材料吸波体进行了卓有成效的研究。文献[7]提出一种基于改进的Minkowski分形结构的小型化超材料吸波体,具有两个高吸收率(>99%)的吸收峰,但吸收带宽有限。文献[8]提出一种由金属带通频率选择表面(Frequency selective surface, FSS)和电阻表面组成的小型化吸波体,通过增加金属贴片在不同层间的分布电容进行小型化,在3 GHz以上的频带实现了宽带吸收。与这些较高微波频段的超材料吸波体相比,UHF-RFID频段更低,对应的超材料吸波体尺寸更大。文献[9]提出的UHF-RFID频段超材料吸波体采用带集总电阻的折叠金属线回路以提高小型化程度,一定入射角范围内,在860~960 MHz的工作频段吸收率大于90%,且将单元尺寸缩小至20 mm×20 mm($0.06\lambda \times 0.06\lambda$, λ 为谐振波长)。

本文将基于金属化过孔的2.5维小型化设计方法^[10]用于超材料吸波体,提出一种单元尺寸更小,角度稳定性更好,在工作频段内吸收率更高的结构。基于金属化过孔的设计方法可以在固定大小的单元内设计出电尺寸更长的回路,在频率选择表面的小型化设计中已被证实有效。而在吸波体的小型化设计中,地板到介质板上下表面的距离不同,金属化过孔的引入将带来极化稳定性的恶化,本文通过对上下表面衰减电阻的阻值调整,减小了2.5维小型化设计带来的极化差异。此外,金属化过孔的引入拓展了吸波体结构的吸波带宽。当电磁波垂直入射时,该吸波体在840~960 MHz的工

作频带内平均吸收率大于99%,且单元尺寸仅13.6 mm×13.6 mm($0.04\lambda \times 0.04\lambda$)。

1 单元设计

图1(a)为基于金属化过孔的2.5维小型化吸波体结构单元三维示意图。上下表面为加载贴片电阻的金属贴片,材质为铜,厚度为0.035 mm,电导率为 5.8×10^7 S/m。灰色部分为贴片电阻,阻值 $R_1=R_2=82 \Omega$, $R_3=R_4=100 \Omega$ 。上下表面之间为FR-4有耗介质材料,内部存在多个金属化过孔,厚度 $h_1=1.6$ mm,相对介电常数 $\delta=4.3$,损耗正切 $\tan=0.025$,下表面和底层地板之间有一层空气层,厚度 $h_2=25$ mm。

如图1(b)所示,环路被分解成多个离散贴片排列在介质基板上下表面(上层为红色、下层为黄色),通过使用金属化过孔(蓝色)将交替排列在介质基板两侧的贴片及电阻连接起来,形成一个完整的闭合回路。该吸波体整体呈中心对称,当不同极化方式的电磁波垂直入射时,吸收率仅有微小差异,这个差异可以通过对结构上下表面衰减电阻的调整来尽量减小。与传统方环吸波体相比,基于金属化过孔的2.5维设计从多个维度上折叠金属环路以获得更大电长度;与单层折叠金属线型吸波体

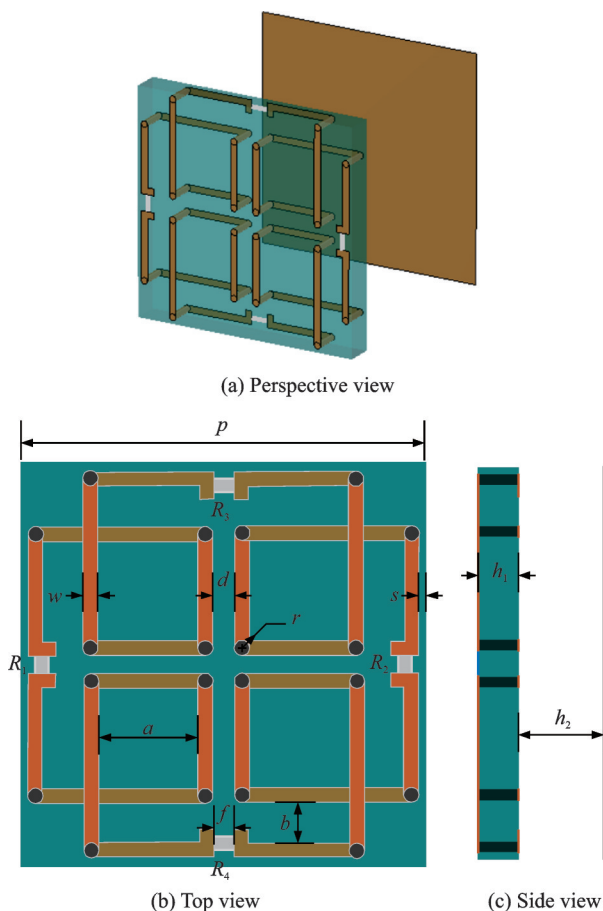


图1 单元结构图

Fig.1 Unit structure

相比,2.5维设计充分利用介质基板上下两层表面空间,在同样物理面积内实现超过单层折叠金属线方法设计下环路双倍的电长度,因此同一频率下,2.5维方法设计的吸波体结构单元尺寸将小于单层折叠金属线方法的1/2,极大提高了吸波体的小型化程度。该2.5维小型化设计的UHF-RFID频段高性能超材料吸波体的单元长宽为 $p=13.6\text{ mm}$,仅为0.04个谐振波长左右。结构的其余参数为: $w=0.4\text{ mm}$, $s=0.2\text{ mm}$, $a=3.5\text{ mm}$, $b=1.4\text{ mm}$, $d=1\text{ mm}$, $f=0.12\text{ mm}$, $r=0.1\text{ mm}$ 。

通过观察表面激起电流的大小与方向,可以更为直观地了解结构单元的工作原理。图2为两种极化方式下吸波体的表面电流分布图(软件处理数据时为达最佳呈现效果,标度在3.6~3.7每格)。当电磁波垂直入射时,金属贴片上的电子受激产生震荡,金属环路在工作频带内激起表面电流,电流被贴片电阻衰减,电磁能转化为热能,入射波被吸收。从表面电流分布图可以看出,TE极化下,电流流经吸波体单元上表面电阻 R_1, R_2 ,不经过吸波体单元下表面电阻 R_3, R_4 ;TM极化下,电流流经吸波体单元下表面电阻 R_3, R_4 ,不经过吸波体单元下表面电阻 R_1, R_2 。因此,两种极化下吸波体的性能

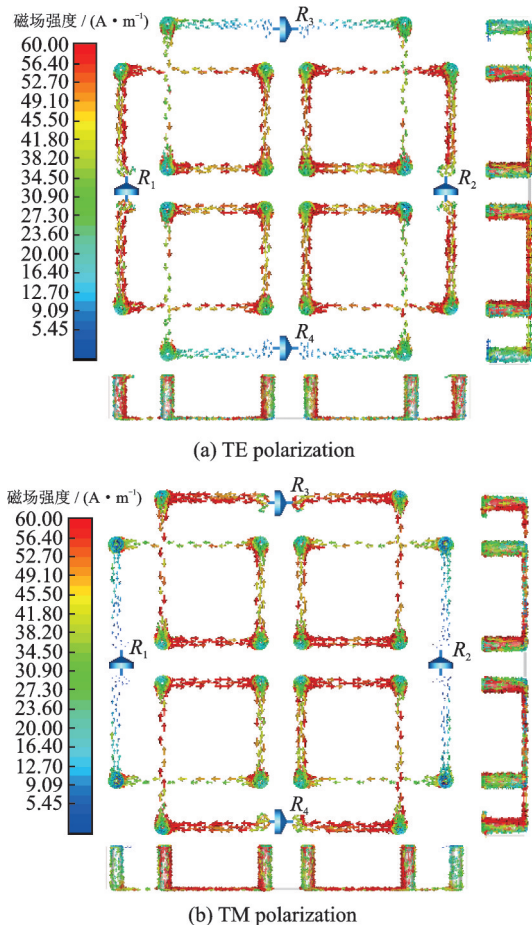


图2 吸波体单元的表面电流分布

Fig.2 Surface current distribution of absorber element

可以分别通过上下表面电阻单独进行调节。只有当电阻取到合适的阻值时,才能使吸波体阻抗和自由空间的阻抗匹配程度达到最佳,具体讨论将在后面给出。从侧视图图中可以看出,TE,TM两种极化下的电流都经过中间的金属化过孔,有效电流路径很大一部分重合在一起,这使吸波体结构尺寸进一步变小。

为了给出吸波体在给定金属图形和电参数下如何达到谐振的物理解释,建立了如图3所示的等效电路模型进行定性分析。当电磁波垂直入射时,吸波体上下表面外的自由空气等效为阻抗 Z_0 的输入输出端口电阻,金属贴片等效为一段连续的电感 L ,相邻单元间金属贴片的耦合作用等效为电容 C ,而单元内部贴片间距离较大,其耦合作用相对较小,在此忽略不计,底层背板等效为一段短路线。连接上下层的金属化过孔等效为补充电感 L_{via} ,相邻单元间金属化过孔的耦合作用等效为补充电容 C_{via} ,故金属化过孔的引入使结构获得更大的有效电感和耦合电容,这也有利于单元的小型化。

与传统方环吸波体类似,基于金属化过孔的2.5维小型化超材料吸波体可等效为一阶RLC串联回路。使用准静态模型分析软件ANSYSQ3D对离散的金贴片、竖直的金属过孔进行参数提取,并在射频电路仿真软件ADS中构建电路模型测试微调,最终得到: $L + L_{\text{via}} = 26.585\text{ nH}$, $C + C_{\text{via}} = 0.57\text{ pF}$, $Z_{\text{sub}} = 233.8\Omega$ 。图3为使用CST软件对该吸波体结构进行建模仿真,计算得到垂直入射时的吸收率曲线及使用ADS软件建立等效电路模型仿真的吸收率曲线,结果吻合良好。

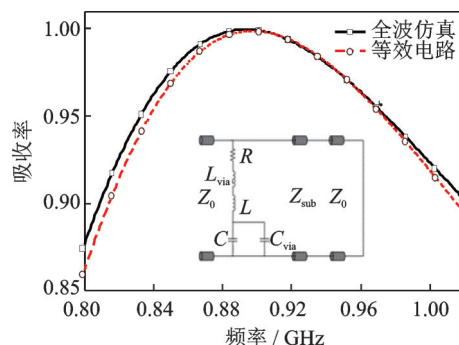


图3 等效电路模型及全波仿真的吸波率曲线

Fig.3 Equivalent circuit model and absorbing rate curve of full wave simulation

2 性能分析

在2.5维小型化设计过程中,由于地板到介质板上下表面的距离不同,金属化过孔的引入将影响吸波体阻抗与自由空间阻抗的匹配,带来一定极化差异。前面的表面电流分析中已经指出,该吸波体

TE/TM 极化下的吸收性能可由上下表面衰减电阻分别控制调整。图 4 给出了上层电阻 R_1, R_2 阻值变化时 TE 极化波垂直入射下的吸收率曲线,当 R_1, R_2 从 $82\ \Omega$ 增大到 $120\ \Omega$ 时,吸收峰逐渐向高频方向移动,当 $R_1=R_2=100\ \Omega$ 时,吸收峰值最高,此时吸波体阻抗和自由空间阻抗匹配达到最佳。图 5 为下层电阻不同阻值时两种极化波垂直入射下吸波体的吸收曲线,当 R_3, R_4 从 $68\ \Omega$ 增大到 $100\ \Omega$ 时,吸收峰逐渐向高频方向移动。表 1 为下层电阻不同阻值时两种极化方式下吸收峰的出现位置及差值比较,可以看出,当 $R_3=R_4=82\ \Omega$ 时,TE, TM 两种极化方式下的吸收峰位置达到一致,极化差异最小。

2.5 维小型化方法作为提高结构稳定性的手段

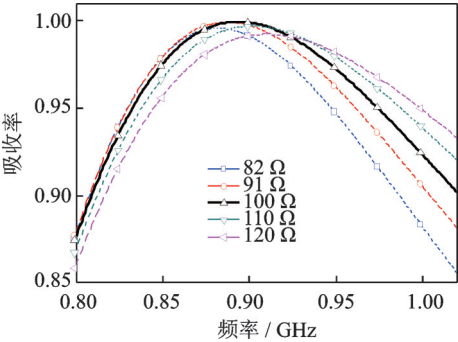


图 4 不同上层贴片电阻阻值 TE 极化波下的吸收率曲线
Fig.4 Absorptivity of TE polarization with different resistance values of upper layer

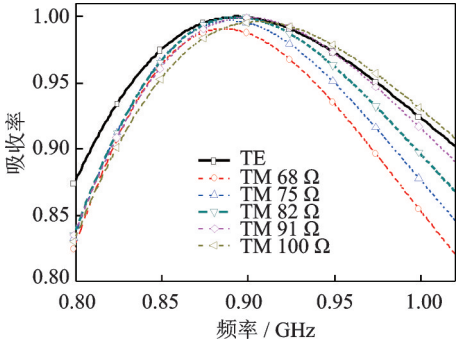


图 5 下层贴片电阻阻值对不同极化下吸收率曲线的影响
Fig.5 Effect of resistance value of lower layer on absorptivity under different polarizations

表 1 TE/TM 极化吸收峰的出现位置及差值
Tab.1 Position and difference of absorption peak in TE/TM polarization

| 阻值/ Ω | TE 吸收峰位置/MHz | TM 吸收峰位置/MHz | 两种极化下吸收峰位置的差值/MHz |
|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| 62 | 893 | 886 | 7 |
| 75 | 893 | 889 | 4 |
| 82 | 893 | 893 | 0 |
| 91 | 893 | 899 | 6 |
| 100 | 893 | 906 | 13 |

之一,可以降低不同入射角度电磁波对吸收体吸波性能的影响。图 6(a,b) 分别给出了该 2.5 维小型化吸波体在 TE/TM 极化模式不同入射角度下的吸收率曲线。从图 6(a)可以看出,在 TE 模式下,斜入射角 $\theta=30^\circ$ 时, $840\sim 960\ \text{MHz}$ 内该吸波体仍能保持 95% 以上的吸收率;从图 6(b)可以看出,入射角度对该吸波体 TM 模式下的吸收性能影响较大,斜入射角 $\theta=15^\circ$ 时, $840\sim 960\ \text{MHz}$ 内该吸波体仍能保持 90% 以上的吸收率;斜入射角 θ 增大到 30° 时,吸收率下降至 80% 左右,且吸收曲线明显向高频偏移。这是由于水平极化电场与吸波体平面相垂直,垂直极化电场分量与吸波体平面平行,故后者吸收率相对较高。此外,大角度入射条件下水平极化电场耦合削弱,电流路径相应减短,谐振频率向高频偏移。

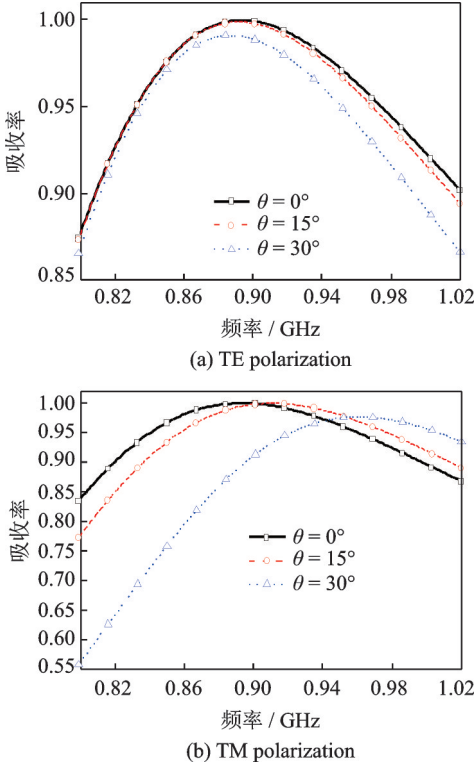


图 6 不同斜入射角度下该吸波体的吸收率曲线
Fig.6 Absorptivity at different angles of incidence

在吸波体的设计中,吸波带宽及吸收率是最为重要的性能指标,2.5 维设计方法中金属过孔的引入可以拓展吸波体吸收带宽,为了验证这一特性,使用 CST 软件对本文提出的 UHF-RFID 频段 2.5 维小型化吸波体和文献[9]提出的折叠金属线型小型化吸波体进行建模仿真,计算得到垂直入射时的吸收率曲线,并给出 TE/TM 极化下 2.5 维小型化吸波体与折叠金属线型小型化吸波体吸波带宽的对比,如图 7 所示。

以 TE 极化为例,折叠金属线型小型化吸波体

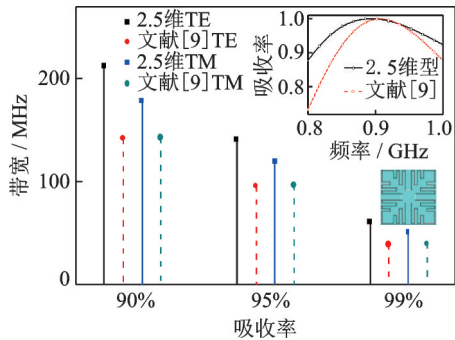


图 7 吸波带宽对比

Fig.7 Comparison of absorption bandwidth

在谐振频率为 910 MHz 处出现吸收峰值,峰值吸收率为 99.96%;吸收率在 99% 以上的频带范围为 888~928 MHz,吸收带宽为 40 MHz;吸收率在 95% 以上的频带范围为 863~960 MHz,吸收带宽为 97 MHz;吸收率在 90% 以上的频带范围为 845~987 MHz,吸收带宽为 142 MHz。本文所提

出的 2.5 维小型化吸波体在 894 MHz 处出现吸收峰值 99.97%,峰值吸收率更高;吸收率在 99% 以上的频带范围为 865~926 MHz,吸收带宽为 61 MHz,相比折叠金属线型小型化吸波体提升 52.5%;吸收率在 95% 以上的频带范围为 833~974 MHz,吸收带宽为 141 MHz,相比折叠金属线型小型化吸波体提升 45.4%;吸收率在 90% 以上的频带范围为 809~1 022 MHz,吸收带宽为 213 MHz,相比折叠金属线型小型化吸波体提升 50.0%。此外,折叠金属线型小型化吸波体单元长度为 20 mm,2.5 维小型化吸波体单元长度为 13.6 mm,单元尺寸缩小了 32%。

为了强调所提出的 2.5 维小型化超材料吸波体的优越性,表 2 列出了与文献中其他 UHF-RFID 频段吸波体的比较,可以看出,该 2.5 维小型化超材料吸波体具有极高的吸收率和更小的单元尺寸,在吸收性能与小型化方面优势明显。

表 2 本文与文献中其他结构的性能对比

Tab.2 Performance comparison of the proposed and other structures

| 吸波体 | 谐振频点/MHz | 吸收峰值/% | 95% 吸波带宽/MHz | 平均吸波率/% | 单元尺寸(λ) |
|-------|----------|--------|--------------|---------|-------------------|
| 文献[4] | 920 | 99.99 | 99 | 97 | 0.26 |
| 文献[5] | 868 | 99.90 | 109 | 60 | 0.25 |
| 文献[6] | 868 | 99 | 11 | 56 | 0.17 |
| 文献[9] | 904 | 99.96 | 97 | 97 | 0.06 |
| 本文 | 893 | 99.97 | 141 | 99 | 0.04 |

3 加工测试

为了验证该结构的吸收性能,进行了实物的加工与测试。所制作的吸波体实物的物理尺寸为 327 mm×327 mm(24×24 单元),采用厚度为 0.036 mm 的金属铜蚀刻在 FR4 有耗介质基板的上下表面,并将此面板与金属背板用 25 mm 的泡沫板进行隔离,构建出该结构。如图 8 所示,将实物样品固定在特制的吸波夹具中以减少边缘绕射带来的影响,将两个低增益对数周期天线(增益为 9 dBi,频率范围为 806~2 500 MHz)放置在同一侧以表征反射系数,并连接到矢量网络分析仪(Agi-

lent N5245 A),在微波暗室中对实物样品进行测试。反射系数的测量分两步进行。首先测量所加工的吸波体样本反射系数,然后将吸波体从吸波夹具中取出,记录反射系数以用于校准。

测试结果如图 9 所示,从图中可以看出,测试结果和仿真结果走向趋势基本一致,但是也有一些偏差。吸收峰出现在 899 MHz 处,较仿真结果偏高,860~960 MHz 工作频带内的吸收率达到 95% 左右,较仿真结果偏低,这可能是电阻元件焊点的加工精度造成的。从图中还可以看出,反射系数测

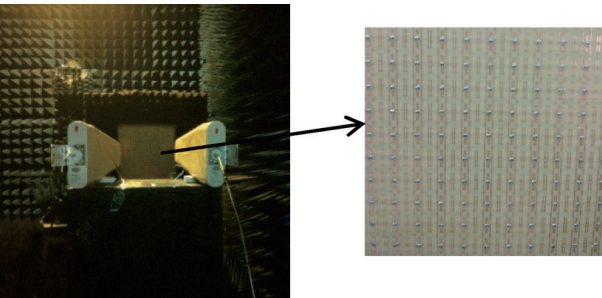


图 8 测试环境及实物样品

Fig.8 Test environment and sample

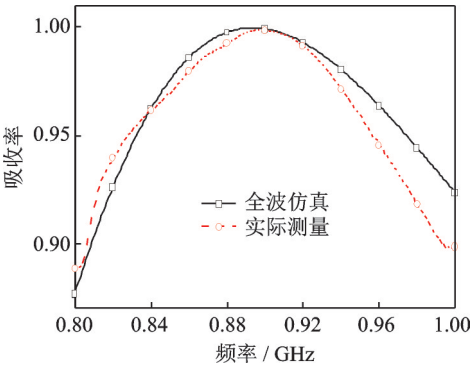


图 9 仿真与实际测量吸收率曲线

Fig.9 Absorptivity of simulation and practical measurement

试时天线摆放在同一侧,无法保证电磁波完全垂直入射,因此整体吸收率偏向斜入射下的仿真结果。

4 结 论

本文提出了一种基于2.5维小型化设计的UHF-RFID频段高性能超材料吸波体,单元尺寸缩小至 $1/60\lambda$,具有高度小型化特性。通过全波仿真、建立等效电路模型以及实物测试对该结构进行综合分析,结果表明,该小型化吸波体在840~960 MHz的UHF-RFID工作频带内平均吸收率超过99%,且具有较好的角度稳定性。在受限空间中UHF-RFID系统可靠性提升方向具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 蒋皓石,张成,林嘉宇.无线射频识别技术及其应用和发展趋势[J].电子技术应用,2005,31(5): 1-4.
JIANG Haoshi, ZHANG Cheng, LIN Jiayu. Radio frequency identification technology and its application and development trend[J]. Application of Electronic Technology, 2005, 31(5): 1-4.
- [2] ZUO Y. Survivable RFID systems: Issues, challenges, and techniques[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2010, 40(4): 406-418.
- [3] 庞建峰,马喜君,谢兴勇.电磁吸波材料的研究进展[J].电子元件与材料,2015(2): 7-12.
PANG Jianfeng, MA Xijun, XIE Xingyong. Research progress of electromagnetic absorbing materials[J]. Electronic Components and Materials, 2015(2): 7-12.
- [4] OKANO Y, OGINO S, ISHIKAWA K. Development of optically transparent ultrathin microwave absorber for ultrahigh-frequency RF identification system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60(8): 2456-2464.
- [5] COSTA F, GENOVESI S, MONIRCHIO A, et al. Perfect metamaterial absorbers in the ultra-high frequency range[C]//International Symposium on Electromagnetic Theory. Hiroshima; IEEE, 2013: 701-703.
- [6] VENNERI F, COSTANZO S, MASSA G D. Fractal-shaped metamaterial absorbers for multi-reflections mitigation in the UHF-band[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2018, 17(99): 255-258.
- [7] CHEN Q, BAI J, CHEN L, et al. A miniaturized absorptive frequency selective surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14): 80-83.
- [8] YU D, LIU P, DONG Y, et al. A novel miniaturized metamaterial absorber based on the modified Minkowski fractal structure[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Shenzhen: [s.n.], 2016: 567-569.
- [9] ZUO W, YANG Y, HE X, et al. A miniaturized metamaterial absorber for ultrahigh-frequency RFID system[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017, 16(99): 329-332.
- [10] HUSSAIN T, CAO Q, KAYANI J. Miniaturization of frequency selective surfaces using 2.5-dimensional knitted structures: Design and synthesis[J]. Trans Antennas Propag, 2017, 65(5): 2405-2412.

(编辑:刘彦东)