# 用于航空电磁防护和智能隐身的光 黑琴 学透明柔性宽带吸波器的试验研究

吴杨慧,王俊杰,赖森锋,朱晓波,顾文华\*

南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘 要:本文设计了一种可用于航空器电磁防护和智能隐身的光学透明的宽带超材料柔性吸波器。该吸波器采用三明治结构,使用透明导电材料氧化铟锡(ITO)代替金属作为顶层表面谐振结构和底层铺地所用材料,透明柔性材料聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)作为介质层,可以在2.0~5.2GHz内达到85%以上的吸收率。试验测试吸收谱结果与仿真结果相符合。同时,HFSS软件仿真结果显示该吸波器对极化角度不敏感,且入射角度低于30°时,吸收率变化很小,在实际应用中有很好的灵活性。该透明柔性宽带微波吸波器精确覆盖了常用的WiFi频段,可有效减小移动电子设备等常见干扰源对飞机造成的电磁干扰。

关键词:宽带,吸波器,透明,超材料,极化不敏感

### 中图分类号:O436.2 文献标识码:A

电子设备的迅猛发展为我们的日常生活带来了许多便 利和好处,但是同时它们所引起的电磁污染问题也日益严 重<sup>[1,2]</sup>。尤其对飞机等航空器来说,电磁干扰对机上电子设 备的影响巨大,轻则干扰飞行员通信设备的正常使用,导致 无法完成任务或干扰正常航行,重则导致航空器装备失灵 等故障,造成无法挽回的人员伤亡和财产损失<sup>[3,4]</sup>。电磁干 扰一般分为自然干扰和人为干扰。其中人为干扰对飞机影 响更加频繁且难以避免,尤其是2.4GHz等常用开放频段。 由于2.4GHz频段属于全球通用的开放频段,广泛应用于各 种商用产品包括WiFi、Zigbee、Bluetooth甚至微波炉等电子 器件。这一频段产生的电磁污染无孔不入,尤其面对目前 多家航班允许机中使用移动电话的情况,因此迫切需要研 发有针对性的吸波器来净化飞机电磁环境<sup>[5-7]</sup>,提高飞机在 高空作业中的安全性和稳定性。

相比传统的电磁吸波器(如 Salisbury 吸收屏、Jaumann 吸收层等),透明柔性电磁超材料吸波器因为吸波率高、频带 宽、厚度薄、光学透明度高、可挠性好等优点成为目前研究和 发展电磁防护和智能隐身技术的热点之一。由表面谐振单

### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.013

元一介质一金属背板形成的三明治结构是超材料电磁吸波 器的典型组成结构。该结构中,表面谐振单元使得吸波器的 表面等效阻抗与自由空间阻抗相匹配,从而减少吸波器表面 的反射。介质层起着损耗入射到吸波器内部的电磁波的作 用,而底部背板的作用在于减少电磁波的透射,因此电磁超 材料吸波器可以将入射电磁波进行吸收。早期超材料吸波 器的研究重点主要集中在单频点吸波,近年来正从单频点吸 收发展到双频点吸收<sup>[8,9]</sup>,并扩展到多带吸收和宽带吸收<sup>[10]</sup>。 宽带吸收的吸波器在实际民用和军用领域中均有很大的应 用价值,可能的应用领域包括电磁干扰、电磁兼容等,在超级 镜头<sup>[11,12]</sup>、隐身斗篷<sup>[13]</sup>、传感器<sup>[14]</sup>和太阳能电池<sup>[15]</sup>等器件的设 计上有着重要的应用。满足实际应用的电磁超材料宽带吸 波器一直是近年来电磁吸收领域的研究热点<sup>[16]</sup>。

因为对材料特性要求严苛,同时实现光学透明和微波 宽带吸收比较困难<sup>[17,18]</sup>,而且低频段吸波器厚度减小很困 难,这导致针对WiFi所使用的低频段(2~5GHz)的透明宽 带吸波器的研究仍然很少。本文提出并制备了结构为氧化 铟锡—聚对苯二甲酸乙二醇酯—氧化铟锡(ITO-PET-ITO)

收稿日期:2019-01-14;退修日期:2019-01-08;录用日期:2019-02-25

基金项目: 航空科学基金(2017ZF59005);国家自然科学基金(61627802);中央高校基本科研专项资金(30917012202);江苏省重点研发项目 (BE2018728)

<sup>\*</sup>通信作者.Tel.: 025-84315431 E-mail: guwenhua@njust.edu.cn

引用格式: Wu Yanghui, Wang Junjie, Lai Senfeng, et al. Experimental study on optically transparent flexible broadband absorber for aviation electromagnetic protection and intelligent stealth[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 70-74. 吴杨慧, 王俊杰, 赖 森锋,等. 用于航空电磁防护和智能隐身的光学透明柔性宽带吸波器的试验研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(05): 70-74.

的光学透明吸波器,在2.0~5.2GHz的频带内实现了高吸收 (吸收率大于85%)。这一频段有效覆盖了当前常用WiFi 所在频率(2.4GHz和5GHz附近),可以在航空器的电磁防 护、智能隐身等多种场合进行应用。

# 1 仿真与设计

本文所设计的ITO-PET-ITO结构的吸波器的结构示意图 如图1所示,吸波器由顶层的ITO谐振结构、中间的PET介质 层以及底层的ITO三层组成。图1中,ITO和PET分别用红色 和灰色表示。优化后的单元结构的周期尺寸为p=40mm, t=10.25mm,其中t代表介质层PET的厚度,PET的介电常数  $c_i$ =3。顶层和底层ITO薄层均采用磁控溅镀工艺镀在厚度为 125µm的PET薄膜上,其厚度为h=185nm±5nm,面电阻为 8 $\Omega$ 。顶层ITO谐振结构为轴对称结构,由一个开口环和一个 叠加方块结构组合而成,如图1所示,其几何参数为a=10mm, b=4mm,c=4mm,d=8mm。单元结构周期重复排布,覆盖整个 样品表面,最终制备的样品的尺寸为310mm×290mm。





电磁波入射到吸波器后,其能量会被反射、透射和吸收,吸波器应当追求尽量高的能量吸收率。吸波器对电磁 波的吸收率可以用式(1)表示:

 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$  (1) 式中: $R(\omega)$ 为反射率, $T(\omega)$ 为透过率; $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 分别表征电场 的反射系数和透射系数。本文所设计的吸波器中,背板层 是被良导体材料ITO完全覆盖,因此透过率 $T(\omega) = |S_{21}|^2 =$ 0。所以式(1)可以简化成:

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$$
 (2)

记吸波器的输入阻抗为Z<sub>in</sub>,则反射系数可以表示为:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$
(3)

式中: $Z_0$  = 377 $\Omega$ ,为自由空间的特征阻抗。吸波器设计的 目的就是要通过优化单元结构的参数以使 $Z_{in}$ = $Z_0$ ,尽量使 得阻抗匹配以得到反射率为0,进而接近得到吸收率为1的 完美吸收效果。

假设电磁波垂直吸波器表面入射,通过HFSS和ADS软件 分别仿真得到上述吸波器的吸收率谱曲线,如图2(a)所示。由 仿真结果可以发现,吸波器的吸收率在2.0~5.2GHz范围内均 大于85%,实现了高效率吸收。HFSS和ADS分别得到的吸收 率曲线基本一致,都有三个吸收峰,分别在2.49GHz,3.73GHz 和4.97GHz三个谐振频率点处,其吸收率最接近于1,可以说 明设计的吸波器在此三个频率点处阻抗匹配较好。使用ADS 软件模拟计算该吸波器等效电路的等效阻抗,并将实部和 虚部分开,对自由空间阻抗进行归一化,即可得到该超材料





(a) HFSS与ADS分别仿真的吸波器吸收率谱曲线对比图

(b) ADS 仿真得到的吸波器归一化等效阻抗的实部和虚部曲线

### 图2 吸波器的阻抗匹配结果

Fig. 2 Impedance matching results of the absorber

吸波器的归一化复阻抗与频率的关系,如图2(b)所示。从 图2(b)中可以看到,在2.49GHz、3.73GHz和4.97GHz三个 频率点处,归一化的等效阻抗的实部约为1,虚部约为0。 其中4.97GHz处的等效阻抗虚部略大于0,阻抗匹配略差于 前两个频率点,这也与图2(a)中所示第三个谐振频率点的 吸收率略低于前两个谐振点的吸收率的结果一致。图2(b) 的阻抗匹配结果与图2(a)中吸波器的仿真结果相符合,说 明使用等效阻抗匹配的方法来设计宽带吸波器是一个简明 易懂和行之有效的办法。



(a) 吸收率仿真与试验结果对比图



(b) 吸波器显示较高的透明度

图3 吸波器的试验结果与实物图

Fig. 3 Experimental results and the sample photo of the absorber

# 2 试验分析

在对上述超材料吸波器进行测试时,使用两个1~18 GHz 的标准喇叭天线分别作为信号发射器和接收器。保持喇叭天 线距离吸波器的距离>2D<sup>2</sup>/λ以满足远场条件,其中D是吸波 器的物理尺寸的最大值(此处为310mm),λ是工作波长。测



(c) 吸波器在不同的电磁波入射角度下的吸收率谱曲线对比图

图4 极化角度和斜入射角度对吸收率的影响

Fig. 4 Effect of different polarization angles and oblique incidences on absorption

量过程中,先用同样面积的金属铜板放在同样位置作为参考 反射平面<sup>[19]</sup>。通过矢量网络分析仪(Agilent N5244A)测量得 到吸波器的反射率,再用式(2)计算得到吸收率。图3(a)为吸 波器的吸收率谱曲线的仿真与试验对比图。如图3(a)所示, 测试结果与仿真结果基本一致,试验误差来源包括吸波器制 备的工艺误差、信号源和环境噪声的影响以及测试误差等原 因。实际样品的照片如图3(b)所示,其中将透明的吸波器置 于一张印有校徽和学院标志的A4白纸上,可以很清楚地透过 吸波器看到纸上的内容,表明吸波器的透过率良好。

实际应用中电磁波通常是以一定的角度入射到吸波器表面, 并具有一定的极化角度。如图4(a)所示,极化角度φ为电场方向 与x轴之间的夹角,斜入射角度θ为电磁波传播方向与z轴之间的 夹角。因为表面谐振结构为几何轴对称结构,所以吸波器吸收效 率对极化角度不敏感。当入射角度θ=0°时,改变极化角度θ,仿 真得到的吸收率谱曲线如图4(b)所示。从图4(b)中可以看出,极 化角度对吸收率的影响较小,尤其是在2.0~3.5GHz频段,其吸收 率几乎不随极化角度的改变而改变。当极化角度φ=0°时,改变 入射角度θ,仿真得到的吸收率谱曲线如图4(c)所示。当θ<30° 时,吸收率的变化仍然较小,θ>30°时,吸收率渐渐随着入射角度 的增大而降低,吸收效果变差。在实际应用中,斜入射角度在30° 以内的情况已经能够满足大多数情况下的应用。所以,本文所设 计的吸波结构能够满足不同的斜入射角度下的性能要求。

## 3 结论

本文针对减小手机信号对飞机上电子设备造成的电磁 干扰等实际应用的迫切需要,设计并制备了厚度为 10.25mm、吸收频带在2.0~5.2GHz的低频透明宽带吸波器, 可用作航空器上的电磁防护和隐身材料,达到减小人为电 磁污染对飞机电磁干扰等目的。ADS、HFSS仿真结果和试 验结果相符合。对吸波器的等效阻抗匹配分析显示,多频 点阻抗匹配是达到宽带高吸收的重要方法。此吸波器对电 磁波的极化角度和入射角度不敏感,可以满足实际应用的 需求。此吸波器的吸收频段覆盖了常用WiFi所在的频率 范围,可在众多实际吸波应用场合中做出贡献。

### 参考文献

- Havas M. The Role of Electromagnetic Pollution in Cancer Promotion[J]. Clinics in Oncology, 2017, (1278):1-3.
- Yang C, Li H, Cao Q, et al. Reconfigurable shield by active frequency selective surface for LTE 2.1GHz and WiFi 2.45GHz
   [C]// Asia-Pacific Microwave Conference, IEEE,2015.
- [3] 李素琴,李喜民,刘刚.飞机用电磁屏蔽橡胶材料[J].化工新 型材料,2014,42(1):177-178.

Li Suqin, Li Ximin, Liu Gang. Electromagnetic shielding

rubber material for aircraft[J]. New Chemical Materials,2014, 42(1):177-178.(in Chinese)

[4] 张永刚,孔鹏,李歧林.浅谈直升机电子设备的防护技术[C]// 第四届长三角科技论坛航空航天与长三角经济发展分论坛 暨第三届全国航空维修技术学术年会,2007.

Zhang Yonggang, Kong Peng, Li Qilin. Discussion on the protection technology of helicopter electronic equipment [C]// The 4th Yangtze River Delta Science and Technology Forum Aerospace and Yangtze River Delta Economic Development Sub-forum and the 3rd National Aviation Maintenance Technology Academic Annual Conference, 2007. (in Chinese)

- [5] 刘顺华,刘军民,董星龙.电磁波屏蔽及吸波材料[M].北京: 化学工业出版社,2007.
  Liu Shunhua, Liu Junmin, Dong Xinglong. Electromagnetic wave shielding and absorbing materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [6] 桑建华,周海,陈颖闻. 隐身技术推动新一代飞行器发展[J]. 航空科学技术,2002(03):15-18.
   Sang Jianhua, Zhou Hai, Chen Yingwen. Stealth technology promotes the development of new generation aircraft[J]. Aeronatical Science & Technology, 2002(03): 15-18. (in Chinese)
- [7] 陈亚莉.新一代隐身材料前景广阔[J]. 航空科学技术,2015(12):63-65.

Chen Yali. The prospect of a new generation of stealth materials is broad [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015(12): 63-65. (in Chinese)

- [8] Bernard D F C, Lu W, Huang Y, et al. Superresolution imaging using a 3D nanolens made up of bulk nanowires metamaterials [C]// APS March Meeting. American Physical Society, 2010.
- [9] Tao H, Bingham C M, Pilon D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010(43):1-5.
- [10] Jianhua W, Weiping Q. Terahertz dual-band nearly perfect absorbers based on combined of two types of FSS elements [C]// IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications, 2012.
- [11] Sun J, Liu L. An extremely broadband metamaterial absorber based on destructive interference[J]. Optics Express, 2011, 19 (22):21156-21162.
- [12] Ma C, Liu Z. A super resolution metalens with phase compen

sation mechanism[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(18):1-3.

- [13] Smith D R, Pendry J B, Mock J J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801):977-980.
- [14] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. Nano Letters, 2010, 10 (7): 2342-2348.
- [15] Hao J, Zhou L,Qiu M. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials[J]. Physical Review B, 2011, 83(16): 1-12.
- [16] Lai S, Wu Y, Wang J, et al. Optical-transparent flexible broadband absorbers based on the ITO-PET-ITO structure[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(6): 1585.
- [17] Liu P, Yao Z, Zhou J, et al. Small magnetic Co-doped NiZn ferrite / graphene nanocomposites and their dual-region

microwave absorption performance[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016(4):9738-9746.

- [18] Pullar R C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(7): 1191-1334.
- [19] Sood D, Tripathi C C. Broadband ultrathin low-profile metamaterial microwave absorber[J]. Applied Physics A, 2016, 122(332):1-7. (责任编辑 王为)

# 作者简介

吴杨慧(1994-)女,博士研究生。主要研究方向:电磁场 与微波技术。 顾文华(1976-)男,博士生导师。主要研究方向:微纳光 电子器件。 Tel: 025-84315431 E-mail:guwenhua@njust.edu.cn

# Experimental Study on Optically Transparent Flexible Broadband Absorber for Aviation Electromagnetic Protection and Intelligent Stealth

Wu Yanghui, Wang Junjie, Lai Senfeng, Zhu Xiaobo, Gu Wenhua\* School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

**Abstract:** An optical-transparent broadband metamaterial flexible absorber that can be used for aircraft electromagnetic protection and intelligent stealth is designed in this paper. The absorber used the typical sandwich structure, and the transparent and conductive material Indium Tin Oxide (ITO) was used as the surface resonance structure and the ground, and the transparent material Polyethylene terephthalate (PET) was used as the dielectric layer. After structure optimization, the transparent broadband absorber showed high absorption (>0.8) from 2.0 GHz to 5.2 GHz. The experiment data showed good agreement with the simulation results. At the same time, the HFSS software simulation results showed that the absorber was not sensitive to the polarization angle, and the absorption changed little when the incident angle was lower than 30°, thus can satisfy versatile application requirements in practice. The transparent flexible broadband microwave absorber accurately covers the commonly used WiFi frequency band, and can effectively reduce the electromagnetic interference caused by common interference sources such as mobile electronic devices to the aircraft.

Key Words: broadband; absorber; transparent; metamaterial; polarization insensitive

Received: 2019-01-14; Revised: 2019-01-08; Accepted: 2019-02-25

\*Corresponding author.Tel.: 025-84315431 E-mail: guwenhua@njust.edu.cn

**Foundation item:** Aeronautical Science Fundation of China (2017ZF59005); National Natural Science Foundation of China (61627802); Fundamental Research Fund for Central Universities (30917012202); Jiangsu Province Key Research and Development Project (BE2018728)