

# 基于吸波超材料的宽带 RCS 缩减设计与仿真

戴光磊

杜伦大学(英国)工程学院

DOI:10.12238/acair.v2i2.7381

**[摘要]** 电磁超材料吸波体是一种可以有效吸收电磁波并将其转化为其他能量的电磁器件。但因其谐振机制的制约,吸波频段相对较窄。针对上述问题,本文提出了一种超宽带光学透明超材料吸波体。具体内容: (1)首先介绍了超材料吸波体的定义、特性等。(2)针对超材料吸波体单元结构进行设计与优化仿真。(3)针对超材料吸波体阵列结构在特定频点下的雷达散射截面进行仿真分析。

**[关键词]** 超材料; 光学透明; 雷达散射截面; 超宽带

**中图分类号:** O43 **文献标识码:** A

## Design and simulation of wideband RCS reduction based on absorbing metamaterials

Guanglei Dai

Durham University (UK) School of Engineering

**[Abstract]** Electromagnetic metamaterial absorber is an electromagnetic device that can effectively absorb electromagnetic waves and convert them into other energy. But the absorption frequency band is relatively narrow due to the constraints of its resonance mechanism. In order to solve the above problems, an ultra-wideband optically transparent metamaterial absorber is proposed. The contents of this article include:(1) Firstly, the definition and characteristics of metamaterial absorbers are introduced.(2) The design and optimization simulation of the metamaterial absorber element structure were carried out.(3) The radar scattering cross section of the metamaterial absorber array structure at a specific frequency point was simulated and analyzed.

**[Key words]** Metamaterials; Optical transparency; Radar scattering cross-section; Ultra-wideband

### 1 研究背景和意义

超材料研究从提出至今已有20余年,得到了迅猛的发展。超材料是一类具有自然材料所没有的特殊电磁性质的人工材料,它的电磁特性并不主要取决于材料的本征属性,而是取决于超材料单元结构的形状、尺寸以及电磁参数<sup>[1]</sup>。近年来,超材料因其在微波段及太赫兹频段的完美吸收、极化控制等方面的广泛应用而备受关注。

作为军事领域一项突出的研究,隐身技术的重要性毋庸置疑。隐身技术实现的关键在于降低目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)。近年来学者致力于作战平台及武器的隐身,从传统的修形技术、阻抗加载技术发展新型的人工电磁超材料技术。由于超材料谐振机制的局限,吸波材料吸收带宽普遍较窄,会制约其实际应用。通常需要减小雷达散射截面来提升隐身技术。因此本文基于吸波超材料技术,设计一款吸波式宽带RCS缩减器,利用S参数反演的方法分析了超材料吸波器(Metamaterial Absorber, MMA)的吸波性能。此外,还在MMA的基础上设计了阵列模型,与同样尺寸的金属板进行了比较,获得在

入射波垂直入射时特定频点下的远场RCS方向图,进一步证明吸波特性。

### 2 超材料与雷达散射截面概述

#### 2.1 超材料概述

超材料指具有特殊电磁性质的人工复合材料,又被称为左手材料、超构材料等。也就是说超材料是通过调节传统材料的组成成分、单元尺寸等,进而构造出自然界物质所不具备电磁性质的人工材料<sup>[2,3]</sup>。伴随着超材料的出现,人类可以在遵循客观规律的情况下,通过构建特殊的周期性单元结构,来获得自然材料所不具有的电磁性质。与此同时,它也为传统电磁学研究开启了新的道路,在电子、军事、医学等众多领域产生了极其重大的影响<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 雷达散射截面

雷达散射截面指目标对于雷达入射波的有效散射截面面积,是雷达技术中的重要概念。它是一种以人为假想面积为衡量尺度的,描述目标后向散射特性的散射截面,通常用符号 $\sigma$ 表示。对于散射体的衡量分为两类,即单站RCS和双站RCS。其中,雷达信号的发射机与接收机位于同一位置时得到的散射称之为单站RCS。当

发射机与接收机位于不同位置时,它们之间会有一个夹角为 $\gamma$ 的双站角,在这种情况下得到散射体的散射称之为双站RCS<sup>[5]</sup>。

### 3 单元模型结构与仿真

#### 3.1 单元结构设计

本文利用CST设计了一种具有超宽带和透明柔性性质的超材料吸波体,首先对单元结构的参数进行优化,其次分析吸波体的吸波性能。模型单元基于“三明治结构”,选取材料由上至下依次为PVC、ITO、PET、PVC、PET、ITO,如图3.1所示。其中PVC是聚氯乙烯,为微黄色半透明状,能使吸波体具有良好的透光性;ITO指氧化铟锡,具有透光性和导电性,使可见光透过,薄膜的方块电阻是其重要指标之一,能够影响吸波体的等效输入阻抗,从而拓宽频段;PET指苯二甲酸乙二醇酯,电绝缘性优良,尺寸稳定性很好。在该结构中,厚度为 $h_{ITO}$ 的ITO薄膜被切割为孔状,并覆盖在中间层厚度为 $h_{PET}$ 的PET薄膜的表面,和PET共同组成谐振结构,如图3.2所示。PET层覆盖有网格状ITO夹在厚度分别为 $h_1$ 和 $h_2$ 的PVC介电层中。另一个ITO覆盖的厚度为 $h_{PET}$ 的均匀PET层附着在PVC的底部作为金属底。

这里ITO薄膜表面电阻选择 $R_s=125\ \Omega\ \text{sq}^{-1}$ ,背面为 $6\ \Omega\ \text{sq}^{-1}$ 。PET和PVC层的相对介电常数和损耗角正切分别为 $\epsilon_{PET}=2.86$ 和 $\tan\delta_{PET}=0.053$ , $\epsilon_{PVC}=3.00$ 和 $\tan\delta_{PVC}=0.014$ 。图3.1、3.2中单元的几何尺寸由CST中的频域求解器优化。最终参数选择结果如表3.1所示。

表3.1 单元结构参数

参数	$p$	$l_1$	$l_2$	$h_1$	$h_2$	$h_{PET}$	$h_{ITO}$	$r_1$	$r_2$
数值(mm)	8.5	7.2	1.4	4.75	1.48	0.125	0.005	4.25	3.5

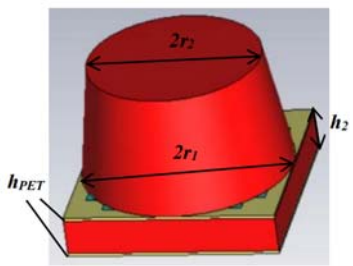
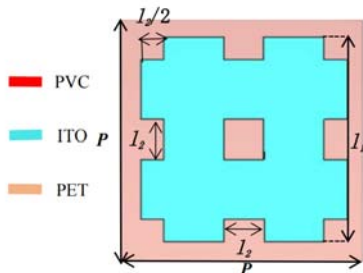


图3.1 MMA的晶胞图



#### 3.2 覆盖有图案化ITO的PET薄膜

#### 3.2数值仿真及结果分析

在TE模式下,电磁波的电场沿y轴方向,磁场沿x轴方向;在

TM模式下则相反。仿真发现,改变MMA的PVC层高度、圆台半径、ITO阻值等参数对吸波性能有一定影响。因此通过参数扫描的方式,不断仿真调试,从而优化S参数,提高吸波性能。

图3.3绘制了MMA晶胞在法向入射时TE偏振下的 $|S_{11}|$ 、 $|S_{21}|$ 参数,由图可以看出交叉极化中MMA的散射系数比共极化小40~60dB。

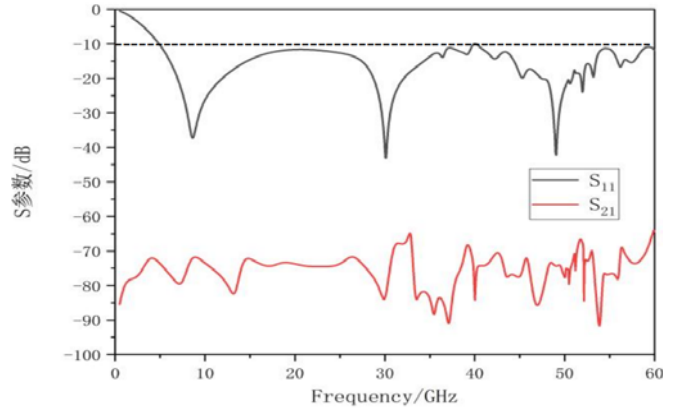


图3.3 TE偏振时的反射系数S11和S21

在仿真过程中, TM或TE偏振波沿具有开放边界的z方向垂直入射到MMA上,而x、y方向设置为晶胞边界以模拟无限周期结构。MMA的吸波率可以根据反射系数和透射系数的关系计算为 $A(\omega)=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ 。之后再计算吸波率,绘制出MMA在不同偏振角 $\phi$ 从0°(TE偏振)到90°(TM偏振)变化的入射波下模拟吸波率的曲线,如图3.4所示。结果表明,由于提出的MMA是中心对称结构,所以它在垂直入射下对偏振不敏感。此外,MMA的整体吸收率在4.84~60GHz的频率范围内超过90%,表现出170%的吸收带宽,覆盖了多个波段。

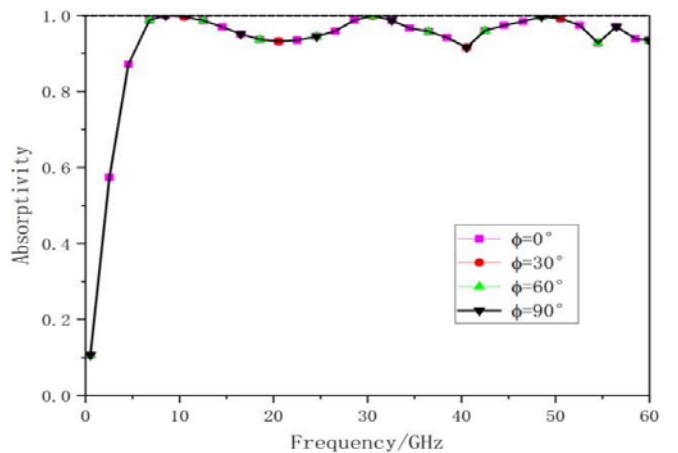


图3.4 法向入射时具有不同偏振角的MMA的模拟吸收率

### 4 阵列结构与仿真结果分析

#### 4.1阵列结构设计

这里的阵列由 $10 \times 10$ 个MMA晶胞(晶胞的几何形状与图3.1.1相同)组成。为了方便比较,还设计了与吸波器同尺寸的金属板进行对比分析。

## 4.2 数值仿真及结果分析

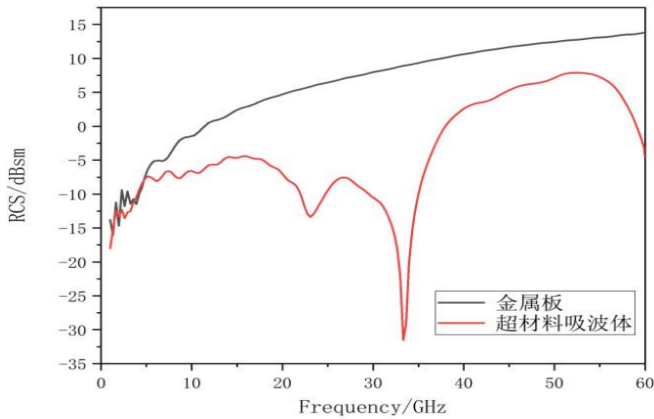


图4.1 金属板和MMA的单站RCS曲线

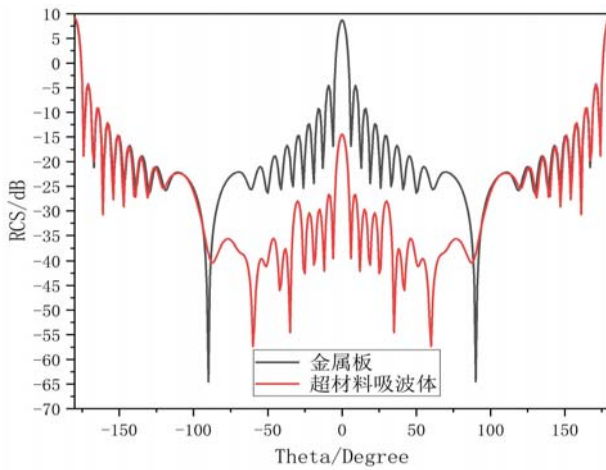


图4.2 垂直入射时32GHz下金属板和吸波器的散射方向图

图4.1绘制了平面金属板和MMA的单站RCS曲线。频率在32GHz时,RCS缩减性能较好,因此重点讨论在32GHz频率时垂直入射下的MMA及金属板RCS的散射情况,如图4.2。据观察,当散射角 $\theta$ 在 $\pm 90^\circ$ 变化时,32GHz下MMA的RCS明显降低,与 $\phi=0^\circ$ 时的金属板相比降低20dB左右。数据表明通过更换单元结构,可以进一步拓宽工作频段,实现宽带RCS缩减。

## 5 总结与展望

由于具有体积小、重量轻和吸波性能好等优点,近年来超材料受到了广泛关注。目前基于ITO的光学透明MMA已经克服了大部分吸波限制,但如何同时实现宽频带、高吸收率、高光学透明度以及偏振不敏感等特点,仍面临极大的挑战。为此本文设计了一种光学透明和偏振不敏感的MMA,在4.84GHz至60GHz的频率范围内实现了高于90%的吸波率。但由于时间和自身能力的限制,其中仍然存在许多问题,需要在今后的工作中进行深入的探讨和研究。

## [参考文献]

- [1]卢攀.一种基于电磁超材料的天线RCS缩减设计[C]//2021年全国天线年会论文集,2021:1849-1852.
- [2]薛光.应用于超宽带RCS缩减的电磁超材料研究[D].南京理工大学,2018.
- [3]王霞,张冉冉,吕浩.超材料的发展及研究现状[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2016,37(02):119-126.
- [4]胡亚杰,宋坤,罗洋.超材料研究进展概论[J].科技经济市场,2018,(03):21-23.
- [5]王帅.用于宽带RCS缩减的电磁超表面研究[D].西安电子科技大学,2019.