

# 覆盖整个UHF频段的吸波结构

吴昌英, 高 阳, 马承乾, 冯富森林

(西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

**摘要:** 设计了一种覆盖整个特高频(Ultra-High Frequency, UHF)频段的超宽带吸波结构. 利用了磁性材料的磁导率随频率减小而增大的特性, 降低了吸波结构性能对频率的敏感性; 结合等效电路方法, 引入电损耗, 进一步改善了吸波结构的低频性能. 在整个UHF频段测量了羰基铁粉的介电常数和磁导率, 采用遗传算法优化了等效电路参数, 采用全波仿真软件优化了结构参数, 在低频端对所加工的吸波结构的反射系数进行了测量. 测量结果、仿真结果和等效电路结果吻合良好. 所设计的吸波结构的相对带宽超过164%, 厚度为最低工作频率波长的2.9%.

**关键词:** 吸波结构; UHF频段; 超宽带; 羰基铁粉; 遗传算法

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)02-0421-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220125

## An Absorbing Structure Covering the Whole UHF Band

WU Chang-ying, GAO Yang, MA Cheng-qian, FENG Fu-sen-lin

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** An ultra-wideband absorbing structure covering the whole ultra-high frequency (UHF) band is provided in this paper. The permeabilities of magnetic materials increase with the decrease of frequency. Therefore, the absorber is less susceptible to frequency. The performance of the absorber at low frequencies is further improved by introducing resistive loss. The permittivity and permeability of carbonyl iron powder are measured by vector network analyzer, the equivalent circuit parameters are optimized by genetic algorithm, and the structure parameters are optimized by full-wave EM simulator, all in whole UHF band. The absorber is measured at low frequencies. The measured, simulated, and equivalent circuit results show a good agreement. The absorber presents an absorption rate over 90% within a fractional absorption bandwidth over 164%, and it has a thickness of  $0.029\lambda$  at the lowest frequency.

**Key words:** absorbing structure; UHF band; ultra-wideband; carbonyl iron powder; genetic algorithm

### 1 引言

自第二次世界大战以来, 雷达技术得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 雷达发射天线发射的电磁信号遇到目标物体会发生散射, 而散射的电磁信号会再传回雷达接收天线, 这些散射信号中包含了目标物体的位置、形状、姿态等重要信息. 因此, 雷达可以快速对目标物体进行侦察和定位. 与雷达技术共同发展的还有隐身技术. 雷达隐身技术就是采用一些特殊的技术手段来降低目标的雷达截面积, 从而提高反侦察能力. 目前, 雷达隐身技术主要有以下几种方法: 外形隐身技术、对消技术、采用吸波材料实现隐身的技术和采用等离子体实现隐身的技术.

采用吸波材料实现隐身的原理是, 使入射波尽可能地全部进入吸波材料, 然后通过电磁损耗, 将电磁能

量转化成热能散掉, 无法形成有效的回波, 以此达到隐身的目的. 吸波材料的特性阻抗必须与自由空间的阻抗匹配, 否则当入射波照射后会发生反射, 入射波无法进入吸波材料, 影响其吸波性能<sup>[2]</sup>. 从成型工艺和实现方式上来讲, 吸波材料通常可以分为涂覆型和结构型两大类. 涂覆型吸波材料通常都是复合材料, 它是将吸收剂与粘结剂按照一定比例混合而成的, 可以同时具备多种损耗机制. 结构型吸波材料通常是通过人工设计特定形状和电路结构, 将其置于某种介质基板上来实现吸波效果的. 结构型吸波材料一般有 Salisbury 屏、Jaumann 屏、几何渐变吸波体、蜂窝吸波结构和周期性吸波结构等<sup>[2-14]</sup>. 从材料的角度来考虑, 纳米结构<sup>[15-18]</sup>、固态等离子体<sup>[19]</sup>、二氧化钒<sup>[20]</sup>和石墨烯<sup>[21]</sup>等还产生了新的吸波机理.

吸波材料的吸波性能与其电厚度密切相关. 当吸

收率和带宽一定时,吸波材料的电厚度有个最薄的理论极限<sup>[22]</sup>. 频率越低,则吸波结构越厚,以至于目前大多数吸波材料都工作在吉赫兹,甚至太赫兹<sup>[23]</sup>. 文献[24]采用紧耦合技术设计的吸波结构虽然只有  $0.117\lambda_L$ , 由于其工作在 230~1 183 MHz, 物理厚度仍然达到了 152.5 mm. 具有较高磁导率的磁性材料可以有效提高吸波结构的电厚度或降低物理厚度, 并引入了磁损耗, 因此可以表现出良好的吸波性能<sup>[25-28]</sup>.

特高频(Ultra-High Frequency, UHF)频段的频率范围为 300~3 000 MHz. 其最低频率的波长达到 1 m. 为了有效降低吸波结构的厚度, 本文采用磁性材料作为介质, 并在结构设计中引入电损耗, 利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化等效电路参数, 研制了厚度为  $0.029\lambda_L$ 、覆盖整个 UHF 频段的吸波结构. 本文提出的

吸波结构的优势主要体现在:(1)利用了磁性材料的磁导率随频率减小而增大的特性,降低了吸波结构性能对频率的敏感性;(2)结合等效电路方法,引入电损耗,进一步改善了吸波结构的低频性能.

## 2 设计理论

本文设计的吸波结构为一种周期性的平面分层结构. 单元结构如图 1 所示, 层 1、层 5 和层 8 为盛放羰基铁粉的 PLA+盒体, 层 2 为地平面, 层 3 和层 6 为羰基铁粉, 层 4 和层 7 为氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)电阻膜. 两层羰基铁粉的厚度分别为  $h_1$  和  $h_2$ . 羰基铁粉的相对介电常数和相对磁导率分别为  $\epsilon_{r1}$  和  $\mu_{r1}$ . 在进行结构设计时羰基铁粉的相对介电常数和相对磁导率采用本文第 4 部分的测量值. 三层 PLA+的厚度  $h_3$  均为 1 mm, 相对介电常数为  $\epsilon_{r2} = 2.54$ .

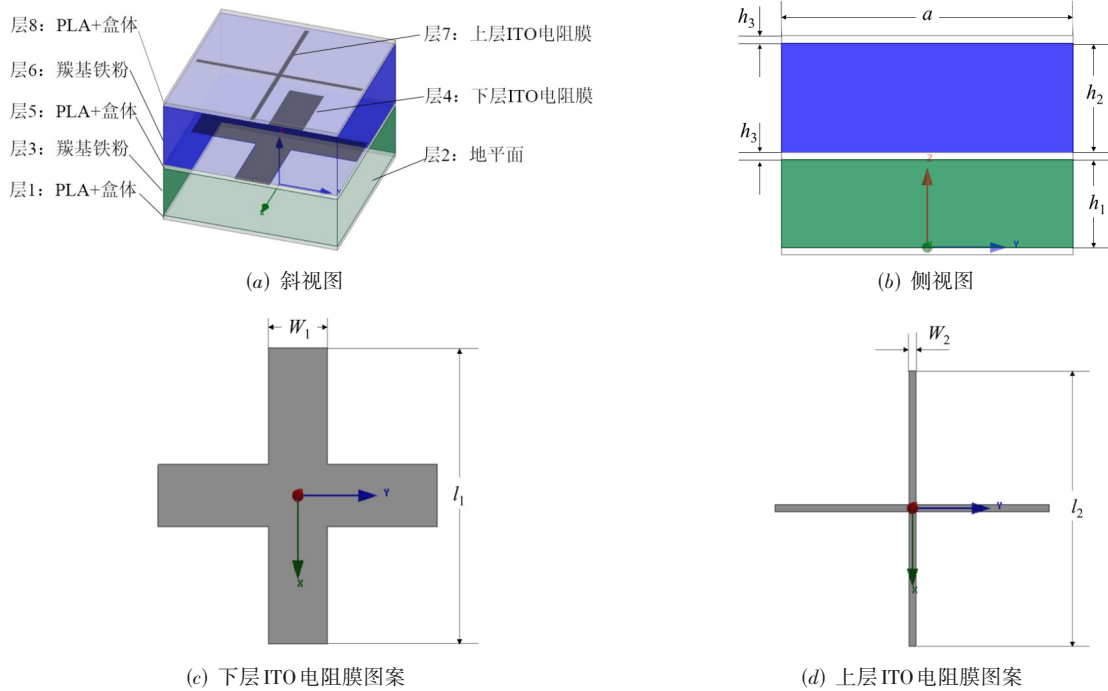


图1 所设计的吸波结构

采用等效电路法可以计算图 1 中吸波结构的吸波性能. 图 2 为图 1 中吸波结构的等效电路. 图 1 中层 4 和层 7 的 ITO 电阻膜的等效电路参数分别为  $R_1, L_1, C_1, R_2, L_2$  和  $C_2$ . 根据等效电路理论可以计算图 2 中不同位置的输入阻抗分别为

$$Z_1 = Z_{01} \text{th}(\gamma_1 h_1) \quad (1a)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{\text{ITO1}} Z_1}{Z_{\text{ITO1}} + Z_1} \quad (1b)$$

$$Z_3 = Z_{02} \frac{Z_2 + jZ_{02} \tan(\beta_2 h_3)}{Z_{02} + jZ_2 \tan(\beta_2 h_3)} \quad (1c)$$

$$Z_4 = Z_{01} \frac{Z_3 + Z_{01} \text{th}(\gamma_1 h_2)}{Z_{01} + Z_3 \text{th}(\gamma_1 h_2)} \quad (1d)$$

$$Z_5 = \frac{Z_{\text{ITO2}} Z_4}{Z_{\text{ITO2}} + Z_4} \quad (1e)$$

$$Z_{\text{in}} = Z_{02} \frac{Z_5 + jZ_{02} \tan(\beta_2 h_3)}{Z_{02} + jZ_5 \tan(\beta_2 h_3)} \quad (1f)$$

其中,

$$Z_{01} = Z_0 \sqrt{\mu_{r1}/\epsilon_{r1}}, Z_{03} = Z_0 \sqrt{\epsilon_{r2}},$$

$$\gamma_1 = j\beta_0 \sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}}, \beta_2 = \beta_0 \sqrt{\epsilon_{r2}}, \beta_0 = 2\pi f/c,$$

$$Z_{ITO1} = R_1 + j2\pi fL_1 + \frac{1}{j2\pi fC_1},$$

$$Z_{ITO2} = R_2 + j2\pi fL_2 + \frac{1}{j2\pi fC_2}.$$

从整个吸波结构上方看进去的反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2)$$

其中,  $Z_0 = 377 \Omega$  为将空气等效为传输线的特性阻抗.

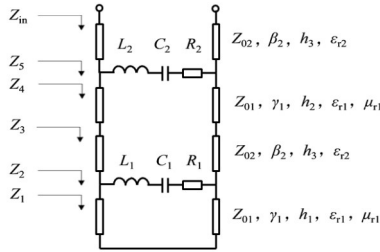


图2 吸波结构的等效电路

在设计时需要优化 2 层 ITO 的 6 个等效参数以及碳基铁粉的 2 个厚度共 8 个参数, 才能得到最优的反射系数带宽. 遗传算法可以很好地对这种多变量非线性问题进行优化<sup>[29]</sup>. 优化的目的是满足整个 UHF 频段反射系数小于 -10 dB 时, 吸波结构的厚度最小. 构造的最优化问题为

$$\min(h_1 + h_2)$$

$$\text{s.t. } \max_f(20\lg|\Gamma|) < -10 \quad (3)$$

采用遗传算法, 如图 3 所示, 对最优化问题式(3)进行优化, 得到的最优参数见表 1. 按照表 1 中的数据, 绘制出的反射系数曲线为图 4. 从表 1 和图 4 可以看出, 当吸波结构的总厚度为  $h = h_1 + h_2 + 2h_3 = 29 \text{ mm}$  时, -10 dB 的反射系数带宽可以覆盖整个 UHF 频段.

表 1 采用遗传算法得到的最优等效电路参数

参数	$h_1$	$h_2$	$R_1$	$L_1$
优化值	12 mm	15 mm	180 $\Omega$	19 nH
参数	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$
优化值	1.8 pF	3 010 $\Omega$	39 nH	0.2 pF

圆柱导线电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right) \quad (4)$$

其中,  $l$  为导线的长度,  $r$  为导线的半径. 在计算 ITO 膜的等效电感时, 近似认为导线长度  $l$  为吸波结构单元的边长  $a$ ,  $l = a = 40 \text{ mm}$ ; 导线半径  $r$  近似认为是电阻膜宽度  $W$  的一半,  $2r = W$ . 根据表 1 中的等效电感值, 采用式(4)即可计算出下层和上层 ITO 电阻膜的宽度分别为 7 mm 和 0.6 mm.

等效电阻由 ITO 膜的长度和宽度以及表面电阻决

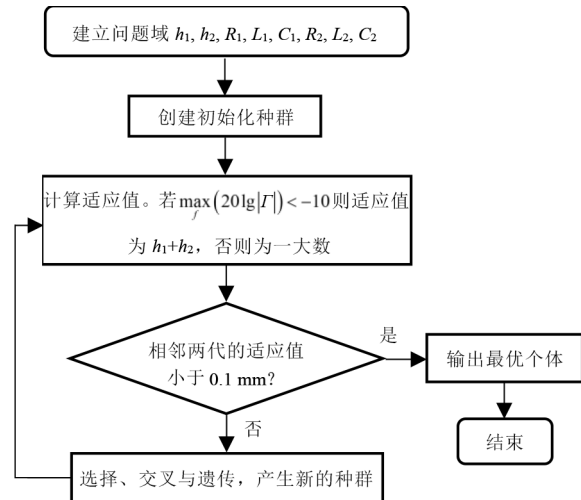


图3 遗传算法优化流程图

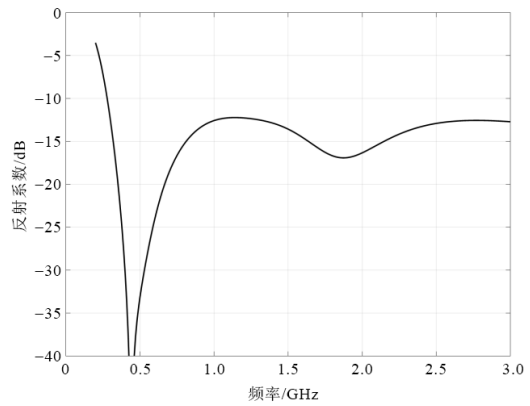


图4 按照最优等效电路参数绘制的反射系数曲线

定. 等效电阻为

$$R = R_s \frac{l}{W} \quad (5)$$

其中,  $R_s$  为 ITO 电阻膜的表面电阻. 根据表 1 中的等效电阻值以及由等效电感所计算出的 ITO 尺寸, 采用式(5)即可计算出下层和上层 ITO 电阻膜所需的表面电阻值分别为 37  $\Omega/\text{sq}$  和 45  $\Omega/\text{sq}$ .

等效电容由相邻单元之间 ITO 电阻膜的间隙和宽度以及周围的介质决定. 当介质参数和 ITO 电阻膜宽度确定之后, 等效电容只由相邻单元之间的间隙决定. 由于等效电容的计算公式很复杂, 间隙将由全波仿真来确定. 由于在应用式(4)和式(5)计算等效电路参数时也做了近似和简化, 因此 ITO 电阻膜的宽度也由仿真进一步决定.

### 3 仿真结果

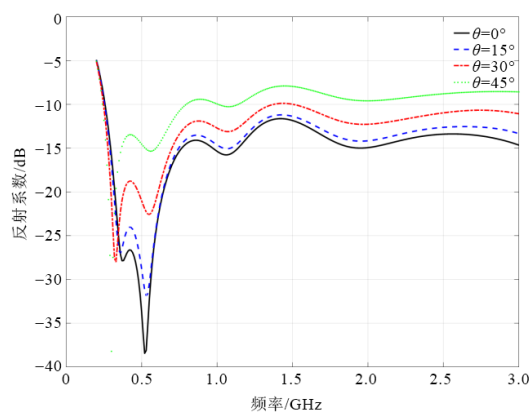
将理论计算出的参数作为初值, 采用 Ansoft HFSS 软件进行优化仿真, 使用两组主从边界模拟无限大阵列进行仿真. 在优化的过程中, 需要调整的参数只有两

层 ITO 电阻膜的宽度和长度,而其他参数是不变的. 羰基铁粉的厚度  $h_1$  和  $h_2$  按照遗传算法优化出的结果. 单元的尺寸  $a=40$  mm,单元的总厚度为 29 mm. 羰基铁粉的相对介电常数和相对磁导率采用本文第 4 部分的测量值. ITO 的表面电阻值  $R_s$  则在理论值的附近选取市场上可购买到的表面电阻值  $40 \Omega/\text{sq}$ . 优化出的吸波结构参数为表 2.

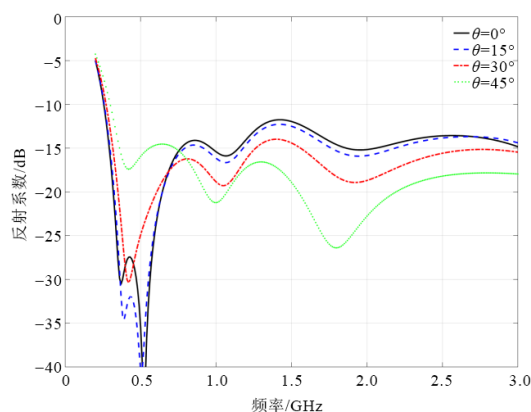
本文所设计的吸波结构为旋转对称形式. 因此当

表 2 优化出的 ITO 电阻膜尺寸参数 单位: mm

参数	$W_1$	$l_1$	$W_2$	$l_2$
优化值	8	38	1	38



(a) TE 波



(b) TM 波

图 5 全波仿真的反射系数曲线

## 4 实测结果

本文对羰基铁粉的介电常数和磁导率在 0.2~3 GHz 采用传输线法进行了测量. 为了便于测量粉体材料,本文设计了带状线测量夹具,并采用多线 TRL 法进行校准<sup>[30]</sup>. 校准和测量夹具的照片如图 6 所示. 测量出的相对介电常数和磁导率如图 7 所示. 从图 7 可以看出,随着频率的降低,羰基铁粉的磁导率逐渐升高. 磁导率的这种特性可以降低吸波结构高频端和低频段的电尺寸差距,有利于扩展吸波结构的带宽. 在低频端羰基铁粉的介电常数和磁导率的虚部都比较小. 虚部代表了损耗,因此纯粹羰基铁粉在低频的吸波性能比较差. 这也是本文采用 ITO 电阻膜引入了额外的电损耗来改善低频吸波性能的原因.

图 8 为加工出的 7 个单元的 ITO 电阻膜. 采用 3D 打印技术打印出可容纳 7 个单元的 PLA+ 盒体,将加工的 ITO 电阻膜贴在盒体内壁,在 PLA+ 盒体的两个部分填满了羰基铁粉. 将加工好的吸波结构放置在微带空气线内进行测量,如图 9 所示. 微带线的导带和地平面为理想电壁,之间的吸波结构可以等效为上下无限延

入射角  $\theta=0^\circ$  时,即电磁波垂直入射时,吸波结构的反射系数与入射波的极化无关,也不会产生极化改变. 仿真出的 -10 dB 反射系数起始频率为 0.26 GHz,终止频率大于 3 GHz. 当斜入射时,吸波结构对 TE 波和 TM 波的反射系数会有些差别. 图 5 给出了 TE 波和 TM 波的反射系数随频率变化的曲线. 从图 5 可以看出,当入射角  $\theta$  超过  $30^\circ$  时 TE 波反射系数在高频端超过了 -10 dB,低频端的性能一直保持良好的;当入射角  $\theta$  逐渐增大时 TM 波的起始频率逐渐升高,高频端的性能一直保持良好的. 从图 5 可以看出两种极化波随入射角  $\theta$  增大时性能有所差别. 这是由于一种极化波的电场和界面始终平行,一种极化波的电场和界面形成一定角度.

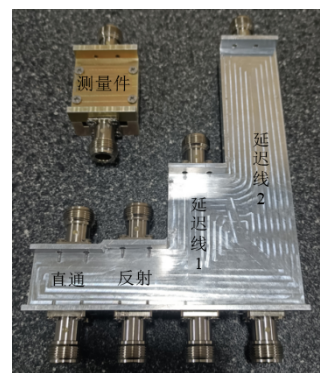


图 6 校准和测量夹具的照片

拓. 在水平方向,7 个单元之外的场近似为零,可以忽略不计.

采用 T4R 方法对微带空气线进行校准<sup>[31]</sup>. T4R 校准需要 1 个直通校准件和 4 个反射校准件. 将短路板放置在微带空气线的 4 个不同的位置即可方便实现 4 个反射校准件. 该方法非常适合对微带空气线进行校准. 校准参考面和吸波结构的地平面一致. 本文所采用的微带空气线的导带宽度为 197 mm,高度为 40 mm,特性

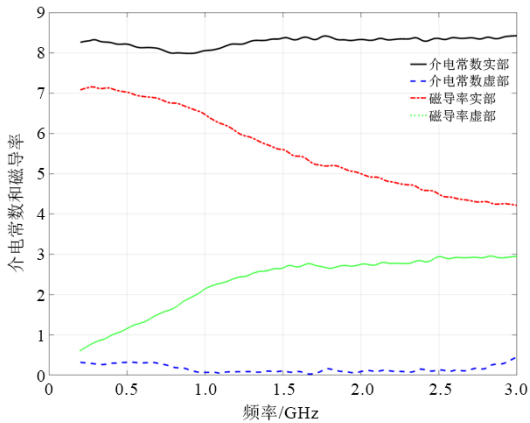


图7 测量出的碳基铁粉的介电常数和磁导率



图8 加工的两层ITO电阻膜



图9 在微带空气线内测量吸波结构的反射系数

阻抗为  $50 \Omega$ , 工作频率范围为  $0.2 \sim 1 \text{ GHz}$ . 频率过高, 微带线的辐射损耗较大, 并且可能产生高次模. 因此本文在  $0.2 \sim 1 \text{ GHz}$  的频段对所设计的吸波结构性能进行实测验证.

校准之后, 采用图9的放置方式对吸波结构进行测量. 测量的反射系数如图10所示. 测量出的  $-10 \text{ dB}$  反射系数起始频率为  $0.3 \text{ GHz}$ , 终止频率超过  $1 \text{ GHz}$ . 吸波

结构的厚度为最低工作频率波长  $\lambda_L$  的  $2.9\%$ . 在图10中, 也将测量结果与仿真结果和等效电路结果进行了比较. 虽然在高频段由于受等效参数和加工误差的影响, 三者的变化趋势不同, 但反射系数都小于  $-10 \text{ dB}$ , 因此可以说三者吻合良好. 从图10中低频段三者的吻合程度以及高频段的仿真结果来推测, 本文设计的吸波结构的反射系数可以在整个 UHF 频段小于  $-10 \text{ dB}$ , 相对带宽超过了  $164\%$ .

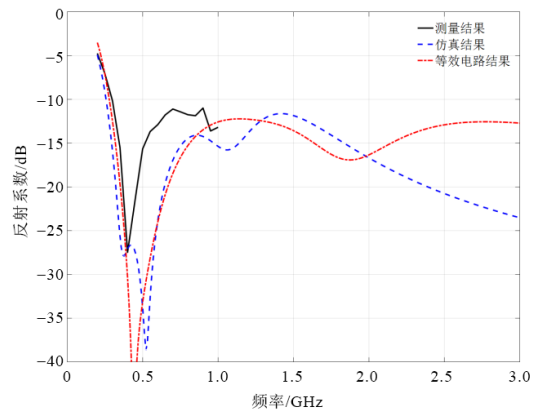


图10 吸波结构反射系数的测量结果、仿真结果和等效电路结果

为了评估本文设计的吸波结构的吸波性能, 表3对比了其他文献中几种吸波结构的吸波性能. 可以看出纯粹采用电性材料的吸波结构虽然有很宽的相对带宽, 但和最低工作频率波长  $\lambda_L$  相比, 厚度都比较大. 采用磁性材料之后, 吸波结构的电厚度增大, 物理厚度明显降低. 本文设计的吸波结构在带宽和厚度两个方面都具有明显的优势. Rozanov 给出了吸波结构所能达到的性能极限<sup>[22]</sup>. 按照文献[22]中的式(9), 可推导出吸波结构在给定厚度情况下所能实现的相对带宽极限为

$$BW_{\text{Rozanov}} = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{(f_{\text{max}} + f_{\text{min}})/2} < 2 - \frac{2}{1 + \frac{86}{\lambda_{\text{min}} |\Gamma_0|} \sum_i \mu_{s,i} d_i} \quad (6)$$

为了对各吸波结构性能进一步评估, 在表3中也给出了各文献所实现的带宽与按照式(6)计算出的各吸

表3 本文吸波结构与部分文献中吸波结构的性能对比

对比文献	发表年份	起始频率/GHz	终止频率/GHz	相对带宽/%	厚度 $\lambda_L$	FoM/%	
电性材料	文献[12]	2021	0.63	6.550	165	0.126	90
	文献[21]	2021	0.23	1.183	135	0.117	80
	文献[13]	2022	11.87	45.280	117	0.086	78
	文献[14]	2022	1.14	14.200	170	0.093	93
磁性材料	文献[25]	2017	4.00	15.000	116	0.031	85
	文献[26]	2017	4.00	18.000	127	0.029	70
	文献[27]	2022	2.00	8.000	120	0.033	65
	文献[28]	2022	0.76	4.920	146	0.031	85
	本文	2024	0.30	>3.000	>164	0.029	88

波结构 Rozanov 极限带宽的比值,即

$$FoM = \frac{BW_{\text{Realized}}}{BW_{\text{Rozanov}}} \times 100\% \quad (7)$$

## 5 结论

本文利用磁性材料的磁导率随频率降低而增减的特点并引入电损耗,设计了一款超宽带的极化不敏感的吸波结构. 该吸波结构的-10 dB 带宽覆盖了整个 UHF 频段,而且在 UHF 频段之上仍具有良好吸波的可能,相对带宽超过 164%. 吸波结构的厚度为 29 mm,为最低工作频率波长的 2.9%. 与现有的吸波结构相比,本文设计的吸波结构在厚度和带宽上都具有明显的优势.

## 参考文献

- [1] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. Radar Cross Section[M]. 2nd ed. Raleigh: SciTech Publishing Inc., 2004.
- [2] 陈雪刚, 叶瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2011, 26(5): 449-457.  
CHEN X G, YE Y, CHENG J P. Recent progress in electromagnetic wave absorbers[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(5): 449-457. (in Chinese)
- [3] SAVILLE P, HUBER T, MAKEIFF D. Fabrication of organic radar absorbing materials: A report on the TIF project [R]. Vancouver: Defense R&D, 2005: 124.
- [4] 林宝勤, 魏伟, 达新宇, 等. 一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体[J]. 电子学报, 2014, 42(3): 607-610.  
LIN B Q, WEI W, DA X Y, et al. A novel ultra-broadband metamaterial absorber based on multilayer resistance films[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(3): 607-610. (in Chinese)
- [5] 于家傲, 彭世蕤, 李有权, 等. 基于特征基函数的柱面共形吸波超材料的优化设计[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 671-677.  
YU J A, PENG S R, LI Y Q, et al. Design of cylindrical conformal composite absorbing metamaterial via characteristic basis function method[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 671-677. (in Chinese)
- [6] YUAN X J, ZHANG C, CHEN M J, et al. Wideband high-absorption electromagnetic absorber with chaos patterned surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(1): 197-201.
- [7] WEI P S, CHIU C N, WU T L. Design and analysis of an ultraminiaturized frequency selective surface with two arbitrary stopbands[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(5): 1447-1456.
- [8] TIRKEY M M, GUPTA N. Broadband polarization-insensitive inkjet-printed conformal metamaterial absorber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(6): 1829-1836.
- [9] PAYNE K, XU K, CHOI J H, et al. Multiphysics analysis of plasma-based tunable absorber for high-power microwave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7624-7636.
- [10] LUO G Q, YU W L, YU Y F, et al. A three-dimensional design of ultra-wideband microwave absorbers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(10): 4206-4215.
- [11] BALCI O, POLAT E O, KAKENOV N, et al. Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6628.
- [12] KIM S, NAM S. Ultra-wideband and wide-angle insensitive absorber based on TCDA-under-tightly coupled dipole array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5682-5690.
- [13] TIRKEY M M, GUPTA N. A novel ultrathin checkerboard inspired ultrawideband metasurface absorber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(1): 66-74.
- [14] SHI T, TANG M C, YANG J N, et al. A low-profile and ultrawideband capacitive circuit absorber empowered by enlarged unit periodicity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 551-555.
- [15] 张克立, 从长杰, 郭光辉, 等. 纳米吸波材料的研究现状与展望[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(6): 680-684.  
ZHANG K L, CONG C J, GUO G H, et al. Current status and prospect of nano absorbing materials[J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 2003, 49(6): 680-684. (in Chinese)
- [16] 李世涛, 乔学亮, 陈建国. 纳米复合吸波材料的研究进展[J]. 宇航学报, 2006, 27(2): 317-322.  
LI S T, QIAO X L, CHEN J G. Nano-composite electromagnetic wave absorbers[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(2): 317-322. (in Chinese)
- [17] LI W W, ZHAO L Y, DAI Z H, et al. A temperature-activated nanocomposite metamaterial absorber with a wide tunability[J]. Nano Research, 2018, 11(7): 3931-3942.
- [18] LIU P J, CHEN S X, YAO M, et al. Double-layer absorbers based on hierarchical MXene composites for microwave absorption through optimal combination[J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(11): 1481-1491.

- [19] ZHANG H F, ZHANG H, YAO Y, et al. A band enhanced plasma metamaterial absorber based on triangular ring-shaped resonators[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 5700610.
- [20] SONG Z Y, WANG K, LI J W, et al. Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7148-7154.
- [21] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [22] ROZANOV K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(8): 1230-1234.
- [23] 任英楠, 曹斌照, 李禹蓉, 等. 基于  $\text{VO}_2$  圆环结构的温控宽带超材料吸波器[J]. 电子学报, 2021, 49(1): 171-176.
- REN Y N, CAO B Z, LI Y R, et al. A temperature-controlled broadband metamaterial absorber based on the vanadium dioxide rings[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(1): 171-176. (in Chinese)
- [24] WU C Y, LU S P, YANG Z, et al. A UWB absorber based on the TCA concept in the UHF band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 4132-4136.
- [25] DENG T W, LI Z W, CHEN Z N. Ultrathin broadband absorber using frequency-selective surface and frequency-dispersive magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 5886-5894.
- [26] YUAN W, CHEN Q, XU Y S, et al. Broadband microwave absorption properties of ultrathin composites containing edge-split square-loop FSS embedded in magnetic sheets[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 278-281.
- [27] ZHENG L, YANG X Z, GONG W, et al. Ultralow thickness-bandwidth ratio magnetic absorber with printed FSS for S&C bands[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 576-580.
- [28] HOSSAIN M I, NGUYEN-TRONG N, ABBOSH A M. Broadband magnetic absorber based on double-layer frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 410-419.
- [29] 甘治平, 官建国, 邓惠勇, 等. 用遗传算法设计宽带薄层微波吸收材料[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 918-920.
- GAN Z P, GUAN J G, DENG H Y, et al. Design of broadband, thin-layer radar absorbing materials using genetic algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6):

918-920. (in Chinese)

- [30] MARKS R B. A multiline method of network analyzer calibration[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(7): 1205-1215.
- [31] LEWANDOWSKI A, WIATR W, GU D Z, et al. A multi-reflect-thru method of vector network analyzer calibration [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(3): 905-915.

#### 作者简介



**吴昌英** 男, 1977年4月出生于陕西省西安市. 博士. 现为西北工业大学电子信息学院副教授. 主要研究方向为微波测量与天线技术研究.

E-mail: aaawucy@nwpu.edu.cn



**高阳** 男, 1993年3月出生于陕西省商洛市. 西北工业大学硕士. 主要研究方向为微波测量与天线技术研究.

E-mail: yanggao@mail.nwpu.edu.cn



**马承乾** 男, 1997年6月出生于陕西省渭南市. 西北工业大学硕士. 主要研究方向为微波测量与天线技术研究.

E-mail: mglookout@outlook.com



**冯富森** 男, 1995年7月出生于陕西省安康市. 西北工业大学硕士. 主要研究方向为微波测量与天线技术研究.

E-mail: 309491009@qq.com