

## 基于电磁谐振分离的宽带低雷达截面超材料吸波体\*

杨欢欢<sup>†</sup> 曹祥玉 高军 刘涛 李思佳 赵一 袁子东 张浩

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2013年5月31日收到; 2013年6月28日收到修改稿)

基于超材料的电磁谐振特性, 设计、制作了一种极化无关的宽带低雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 超材料吸波体. 通过场分布和反演法分析了其吸波机理, 利用波导法和空间波法测试了其吸波率和 RCS 特性. 理论分析表明: 在平面波的作用下, 该吸波体对某一吸波频率在不同的位置分别提供电谐振和磁谐振, 对不同的吸波频率, 利用不同的介质层提供主要的能量损耗, 从而有效减弱了电磁耦合, 保证了宽频带的强吸收特性. 实验结果表明: 设计的三层结构吸波体吸波率达 90% 以上的带宽是单层结构的 4.25 倍, RCS 减缩 10 dB 以上的带宽为 5.1%, 其单元尺寸为  $0.17\lambda$ , 厚度仅为  $0.015\lambda$ . 该吸波体的低 RCS 特性还具有极化无关、宽入射角的特点, 且通过改变吸波体的夹层结构可以实现工作带宽的灵活调节.

**关键词:** 超材料吸波体, 雷达散射截面, 宽带, 电磁谐振

**PACS:** 41.20.Jb, 73.50.-h

**DOI:** 10.7498/aps.62.214101

## 1 引言

超材料 (metamaterial, MTM) 是一类新型人工电磁材料, 具有同向反射、负折射、完美透镜等许多奇异的电磁特性<sup>[1-4]</sup>. 基于超材料的电磁谐振和损耗特性制备的吸波体可以实现对特定频率电磁波的“完美”吸收, 这一设计由 Landy 等人<sup>[5]</sup>于 2008 年最先提出并实现. 和传统吸波材料相比, 这种吸波体最突出的优点在于无表面损耗层、结构简单、超薄超轻且频率易于拓展<sup>[6-8]</sup>, 这使其在天线隐身领域表现出极大的应用优势. 近来, 文献<sup>[9-11]</sup>针对天线带内隐身的难点, 提出将此类吸波体用于线极化及圆极化天线, 有效解决了天线带内低雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 和良好辐射性能之间的矛盾. 但是吸波带宽较窄的不足严重限制了吸波体的应用范围.

近年来, 研究人员围绕此类超材料吸波体的宽入射角<sup>[12-15]</sup>、极化无关<sup>[16-19]</sup>、双(多)带<sup>[20-23]</sup>及可调谐<sup>[24-26]</sup>特性提出了大量的新结构, 而对拓展其带宽的研究相对较少. 文献<sup>[27, 28]</sup>将不同尺

寸的谐振单元共面级联, 通过吸波频带的线性组合展宽了带宽. 但受单元间场耦合的影响, 这种方法得到吸波体的吸波率往往有所下降, 且单元尺寸的显著增大不利于实际应用. 文献<sup>[29]</sup>利用十字形单元组成夹层结构, 在太赫兹频段拓展了吸波频带, 其单元尺寸达  $0.36\lambda$ , 没有进行试验验证. 文献<sup>[30]</sup>基于树枝状结构, 通过多谐振共面级联和夹层设计在微波段拓宽了吸波带宽, 该设计单元尺寸较大且结构复杂. 文献<sup>[31, 32]</sup>利用特殊的结构在一定范围内展宽了吸波频带, 但该方法的可拓展性不强.

此外, 吸波体最显著的应用方向是电磁隐身, 而上述研究都仅分析了此类新型吸波体的吸波性能, 却没有具体分析其 RCS 减缩特性, 且当前的研究大多以拓展半功率带宽为目标. 本文通过分析 RCS 减缩与吸波体吸波率的关系, 得出满足隐身应用需求的吸波体吸波率应在 90% 以上的结论, 并基于电磁谐振分离的思想, 采用简单的方环夹层结构实现了吸波率达 90% 以上带宽的有效拓展, 通过场分布和反演法分析了其吸波机理, 利用波导法和空间波法分别测试了其吸波率和 RCS 减缩效果. 理

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60671001, 61271100)、陕西省自然科学基金基础研究重点项目 (批准号: 2010JZ010)、中国博士后科学基金 (批准号: 2012T50878) 和陕西省自然科学基金基础研究项目 (批准号: SJ08-ZT06, 2012JM8003) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: jianye8901@126.com

论分析和测试结果表明: 在入射电磁波的作用下, 对于某一吸波频率, 吸波体在不同的位置分别提供电、磁谐振, 对于不同的吸波频率, 分别由不同的介质层提供主要的能量损耗, 从而有效减弱了电磁耦合, 保证了吸波体的宽带高吸波特性的. 设计的三层结构吸波体单元尺寸为  $0.17\lambda$ , 厚度仅为  $0.015\lambda$ , 而其 RCS 减缩达 10 dB 以上的带宽为 5.1%, 是单层结构的 4.25 倍, 且具有极化无关、宽入射角的特点. 此外, 由于该吸波体具有超薄特性, 因此利用四层、五层甚至更多层相同或者不同的单元结构可以实现更宽频带的高效吸波, 表现出较强的灵活性.

## 2 吸波体的吸波率与 RCS 减缩

定义反射率  $R = |S_{11}|^2$ , 透射率  $T = |S_{21}|^2$ , 则对于以金属板为底层 ( $|S_{21}|^2 = 0$ ) 的吸波体, 吸波率  $A$  满足

$$A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2, \quad (1)$$

其中

$$R = |S_{11}|^2 = \frac{|E^r|^2}{|E^i|^2}, \quad (2)$$

上标 i, r, s 分别代表入射、反射和散射.

以  $\sigma$  表示目标的 RCS,  $d$  表示测试距离, 则

$$\sigma = \lim_{d \rightarrow \infty} 4\pi d^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2}, \quad (3)$$

对于垂直入射下的单站 RCS

$$E^s = E^r, \quad (4)$$

将 (4), (2), (1) 式分别代入 (3) 式得

$$\sigma = \lim_{d \rightarrow \infty} 4\pi d^2 (1 - A), \quad (5)$$

对于理想金属板,  $A = A_{\text{pec}} = 0$ , 则可得吸波体吸波率  $A$  与 RCS 减缩量 (RCSR)  $\Delta\sigma$  满足

$$\Delta\sigma = -10\lg(1 - A)\text{dB}, \quad (6)$$

图 1 给出了  $\Delta\sigma$  随  $A$  变化的曲线. 可以看出, 当吸波率为 50% 时, 理想情况下的 RCSR 仅有 3 dB, 随着吸波率的增加, RCSR 迅速上升, 当吸波率达 90% 时, RCSR 为 10 dB. 可见, 实际中, 对于隐身要求较高的场合, 半功率的吸波效果并不能满足需求, 为了获得较好的 RCS 减缩效果, 设计吸波体时, 其吸波率应大于 90%.

## 3 宽带超材料吸波体设计与分析

### 3.1 宽带吸波体设计

本文设计的超材料吸波体由四层金属结构组成, 中间被三层介质板隔开, 其单元透视图如图 2 所示. 其中, 金属均为铜, 电导率  $\sigma_{\text{cu}} = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 介质板为 FR-4, 介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02, 其他结构参数见表 1.

对于设计的吸波体, 底层连续的金属板保证了透射为 0, 因此, 其吸波率  $A$  满足 (1) 式. 设  $\eta_0$  为自由空间波阻抗,  $Z_{\text{MA}}(\omega)$  为设计吸波体的等效阻抗, 则

$$R = \frac{(\text{Re}[Z_{\text{MA}}(\omega)] - \eta_0)^2 + (\text{Im}[Z_{\text{MA}}(\omega)])^2}{(\text{Re}[Z_{\text{MA}}(\omega)] + \eta_0)^2 + (\text{Im}[Z_{\text{MA}}(\omega)])^2}.$$

可以看出, 当  $Z_{\text{MA}} = \eta_0$  时,  $R = 0, A = 1$ , 即实现了吸波体对电磁波的“完美”吸收. 此外, 超材料结构具有亚波长特性, 因而可以用等效媒质理论对其进行分析. 当吸波体的等效介电常数  $\epsilon(\omega)$  和等效磁导率  $\mu(\omega)$  满足  $\epsilon(\omega) = \mu(\omega)$  时,  $Z_{\text{MA}} = \eta_0$ . 而等效媒质参数由吸波体的物理参数唯一决定, 因此通过单元结构的优化, 即可实现对入射电磁波的超强吸收.

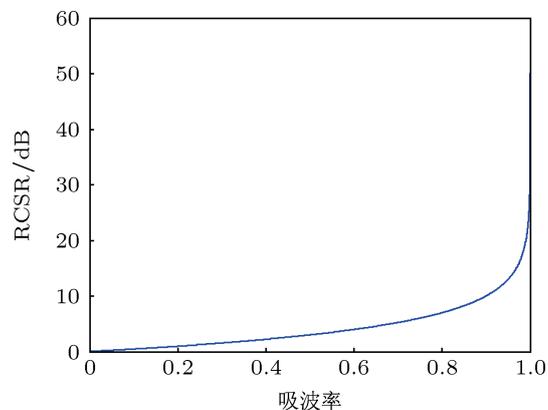


图 1 吸波率与 RCSR 的关系曲线

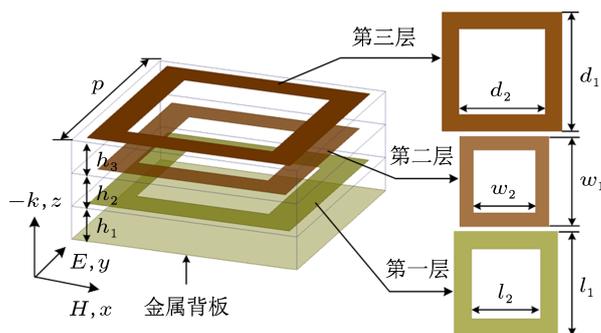


图 2 设计吸波体单元示意图

表 1 结构尺寸 (单位: mm)

样品	$p$	$l_1$	$l_2$	$h_1$	$w_1$	$w_2$	$h_2$	$d_1$	$d_2$	$h_3$
设计吸波体	10.2	9.1	6.3	0.3	8.67	6.17	0.3	9.32	6.72	0.3
单层吸波体	10.2	9.8	5	0.3	—	—	—	—	—	—

采用基于有限元法的高频电磁软件 Ansoft HFSS 进行全波仿真. 图 3 给出了不同情形下吸波体的吸波率曲线. 从图 3(a) 可以看出, 当电磁波垂直入射时, 设计吸波体在 4.81 GHz, 4.91 GHz 和 5.02 GHz 现出三个明显的强吸收峰, 最大吸波率达 99%, 吸波率在 90% 以上的频带为 4.79—5.04 GHz, 带宽达 5.1%, 而相同单元周期的单层吸波体 (结构参数见表 1) 在 5.3—5.36 GHz 吸波率大于 90%, 带宽为 1.2%, 仅为设计吸波体的 1/4.25. 图 3(b) 给出的不同极化角下的吸波率曲线表明, 随着极化角从 0° 逐渐增加到 80°, 吸收峰的频率和幅度都几乎不变, 这说明夹层设计没有改变吸波体的极化无关特性. 图 3(c) 是吸波体对 TE 和 TM 极化波在不同入射角下的吸波率曲线. 可以看出, 对于 TE 极化, 随着入射角的增大, 吸波率曲线变化很小, 当入射角达 50° 时, 吸波率仍保持在 80% 以上, 对于 TM 极化, 吸波率曲线同样十分稳定, 这表明设计吸波体的吸波性能具有宽入射角特性.

为验证设计吸波体的宽带强吸收效果, 采用印刷电路板技术, 用厚度为 0.3 mm 的 FR-4 双面板制作出底层结构, 然后用同样厚度的 FR-4 单面板制作出顶层和中间层结构, 其实物如图 4 中插图, 最后利用粘合剂将之前制作的样品粘结成吸波样件. 利用波导法 [23,33] 测试了样件的反射系数, 并根据吸波率的计算公式推算出了吸波率曲线. 馈电波导采用 C 波段的标准波导 (国际型号为 BJ48, 波导的内截面尺寸为 47.55 mm × 22.15 mm, 工作频率为 3.94—5.99 GHz), 矢量网络分析仪为 Agilent N5230C. 从图 4 的比较可以看出, 测试和仿真结果总体符合较好, 吸波率的峰值略有偏差, 这主要源于三个因素: 一是样件制作中, 在不同的夹层间采用了黏合剂, 引入了空气和黏合剂构成的中间层; 二是严格意义上讲, 波导法测试得到的响应对应于 TE 极化波激励, 而仿真值对应 TEM 波激励; 三是加工误差及使用板材的偏差.

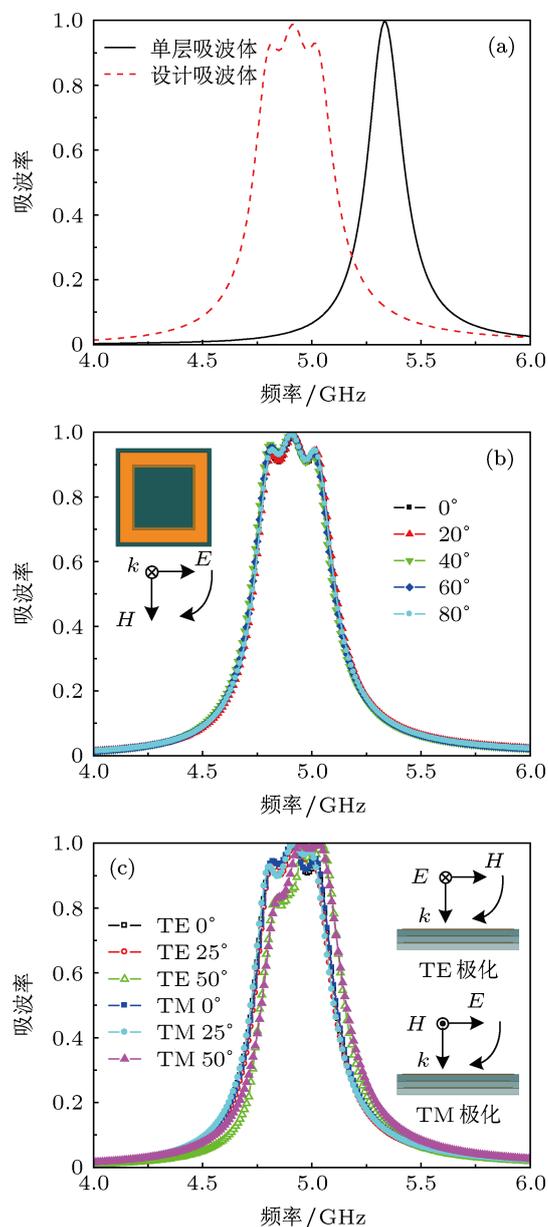


图 3 吸波率曲线 (a) 垂直入射; (b) 不同极化角; (c) 不同入射角

### 3.2 吸波机理分析

为了分析宽带强吸收产生的物理机理, 以 4.91 GHz 为例监测了吸波频率处的表面电场和电流分布, 如图 5 所示. 作为对比, 同时给出了单层吸波体在强吸收频点处的场分布结果. 从图 5(a) 的电场分布可以看出, 对于单层吸波体, 与入射波电场分量发生耦合作用的主要是方环结构, 而从电流

分布图可以看到, 方环与地板共同作用与磁场分量发生耦合; 对于设计的夹层结构吸波体, 由图 5(b) 可知, 在 4.91 GHz, 顶层环主要与电场分量耦合, 提供电谐振, 而提供磁谐振的则主要是中间的两个环, 这样吸波体在不同的位置分别提供电、磁谐振, 更有利于减小相互间的影响, 使电磁耦合同时达到最强, 从而将更多的电磁能量局限在吸波体中. 图 6 给出了设计吸波体在三个吸收峰处的体功率损耗密度. 可以看到, 对应三个吸收峰分别由不同的介质层提供主要的能量损耗, 表明通过夹层结构的设计有效地实现了不同频率处损耗位置的分离, 这进一步确保了即使在频率非常靠近的情况下仍能形

成三个明显的强吸收峰.

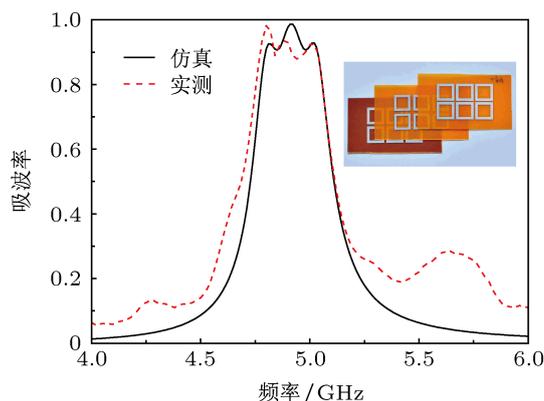


图 4 吸波率仿真测试对比

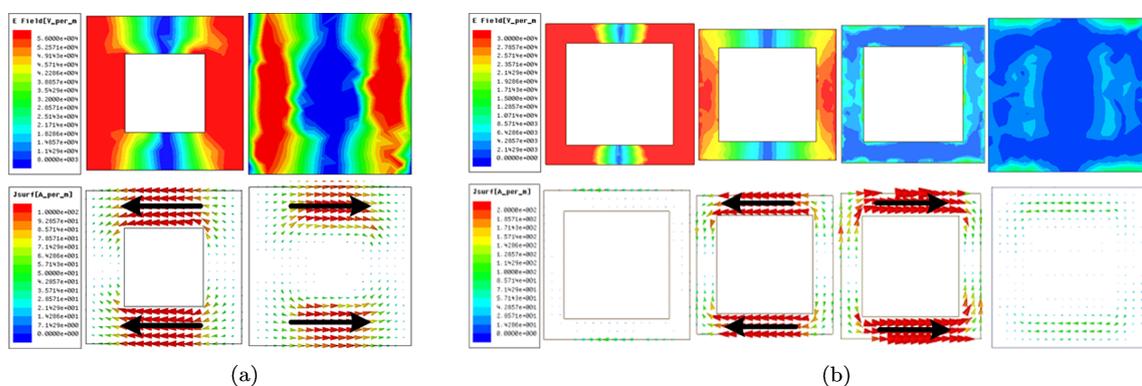


图 5 表面电场、电流分布 (a) 单层吸波体 ( $f = 5.33$  GHz); (b) 设计吸波体 ( $f = 4.91$  GHz)

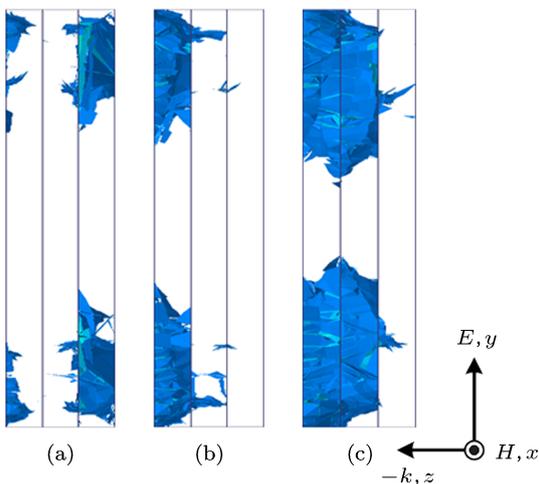


图 6 功率损耗密度 (a) 4.81 GHz; (b) 4.91 GHz; (c) 5.02 GHz

阻抗匹配是吸波体实现高吸收的前提. 图 7 是利用反演法<sup>[34]</sup> 计算得到的相对阻抗曲线. 可以看到, 在三个吸收峰处, 吸波体与自由空间都有很好的阻抗匹配, 尤其在 4.91 GHz, 相对阻抗的实部非常接近 1, 虚部近似为 0, 表明电磁波可以几乎无反射地透入设计吸波体中. 设吸波体的等效折射率为  $n$  ( $n = n_1 + in_2$ ), 其虚部  $n_2$  反映了吸波体对电磁波

的衰减程度即损耗<sup>[16]</sup>. 而折射率与散射参数之间满足<sup>[19]</sup>

$$e^{ink_0t} = e^{-n_2k_0t} \cdot e^{in_1k_0t} = S_{21}/(1 - S_{11}(z - 1)/(z + 1)).$$

由等式右边为 0 可知, 折射率的虚部  $n_2$  非常大, 这就保证了电磁波在吸波体中传输时将被最大程度的吸收<sup>[19]</sup>.

为进一步明确损耗的来源, 仿真得到了不同情形下的吸波率曲线如图 8 所示. 对于有耗介质, 当把所有的铜 (有耗) 用理想导体 (PEC) 代替后, 吸波率曲线几乎不变, 而固定铜不变, 将所有的介质换成无耗的情况下, 吸波率急剧下降, 最大值仅有 16.1%, 以上结果说明设计吸波体的损耗主要源于介质层. 此外, 仅将第三层介质用无耗基板替换后, 4.91 GHz 处的吸波峰值下降最为明显, 表明该频率吸收峰的出现主要依赖第三层介质的损耗, 这与图 6(b) 的体功率损耗密度分布情况完全一致.

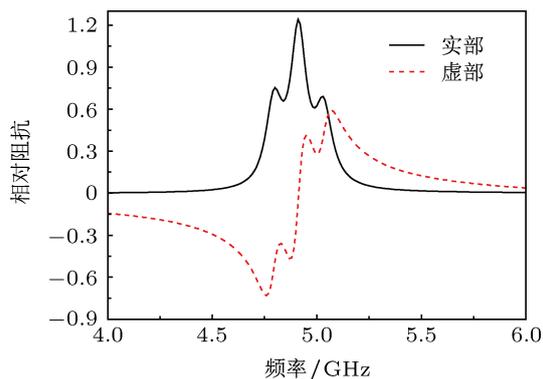


图7 相对阻抗

### 3.3 RCS 特性

将设计吸波体单元排列成  $10 \times 10$  的吸波板, 用平面波进行照射, 得到了其后向 RCS 减缩特性, 并将结果与由 (6) 式得到的计算值比较如图 9(a) 所示. 可以看到, 仿真得到的 RCS 减缩在 10 dB 以上的频段为 4.75—5.04 GHz, 与计算值 (4.79—

5.04 GHz) 略有偏差. 这主要是由仿真的吸波体为有限单元, 而计算时模拟的是无限周期造成的. 从图 9(b) 还可以看出, 随着垂直照射波极化角的增加, RCS 减缩效果几乎不变, 表明设计吸波体的低 RCS 特性具有极化无关的特点.

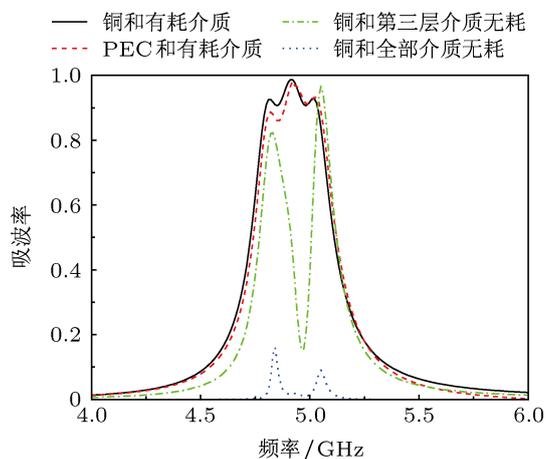


图8 不同情形下的吸波率

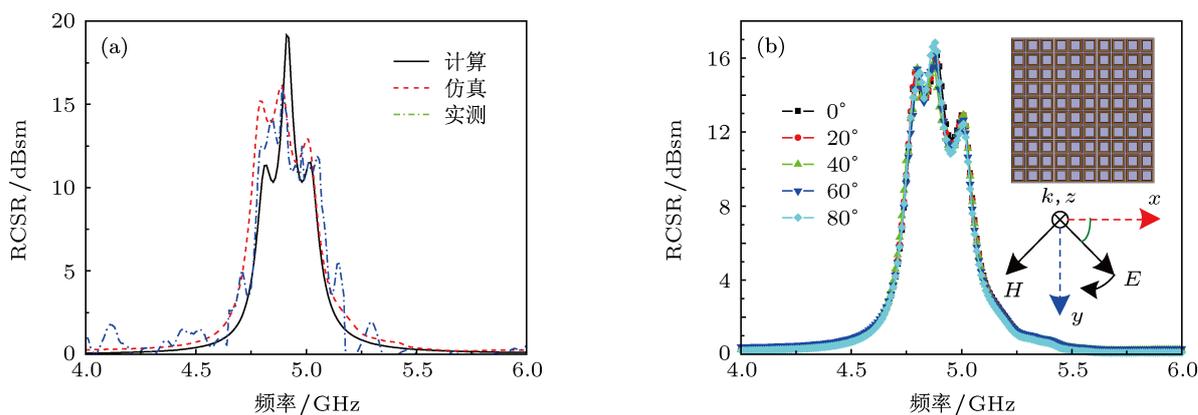


图9 RCS 减缩量对比 (a) 计算、仿真与测试; (b) 不同极化角

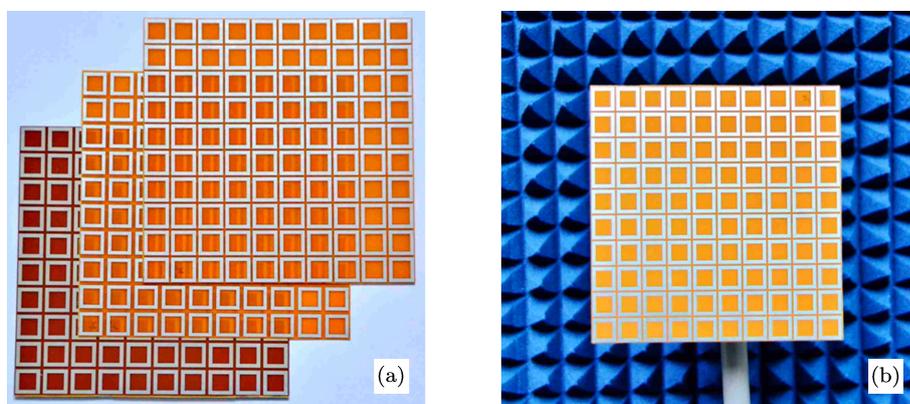


图10 (a) 加工样品; (b) 测试示意图

按照仿真参数, 实际加工了吸波板, 如图 10(a) 所示, 并用粘合剂粘接成最终设计的吸波体如图 10(b). 在微波暗室中, 利用两个完全相同的脊波导喇叭天线 (工作频段为 1—18 GHz) 和矢量网络分析仪 Agilent N5230C 搭建空间波法测试系统 [35], 其中为了保证远场条件, 测试距离设定为 1 m. 将制作的吸波板和同样尺寸的金属板依次置于天线的中心, 测试得到了 RCS 减缩曲线. 考虑到加工误差和制作偏差, 由图 9(a) 可知, 实测与仿真结果符合较好, 这同样验证了设计的有效性.

图 9(a) 表明吸波板在 4.75—5.04 GHz RCS 减缩超过 10 dB, 且在 4.89 GHz 减缩效果最好. 图 11 进一步给出了 TE 极化下 4.75 GHz, 4.89 GHz 和 5.04 GHz 的 RCS 随观察角变化的结果. 图 11(a) 为

单站 RCS, 可以看到, 几乎在  $-90^\circ$ — $+90^\circ$  的整个角域内, 设计吸波板在三个频率下较金属板都有 RCS 减缩效果, 其 RCS 最大值保持在  $-15$  dB 以下, 尤其在 4.89 GHz 法线方向的 RCS 峰值得到显著抑制. 图 11(b) 是平面波垂直入射时, 吸波板在各个角度的 RCS, 可以看出, 三个频率下的 RCS 也都有明显的减缩效果, 且对于 4.89 GHz, 在  $-66^\circ$ — $+64^\circ$  RCS 减缩量都在 10 dB 以上. 这些结果表明, 设计吸波体因其强吸波效果在宽频带内对宽角域均呈现出良好的低 RCS 特性. 图 12 对比了设计吸波板和金属板在 4.89 GHz 的空间散射场分布, 可以清楚地看到, 吸波板的散射场要小得多. 这更直观地证实了设计吸波体的低 RCS 特性.

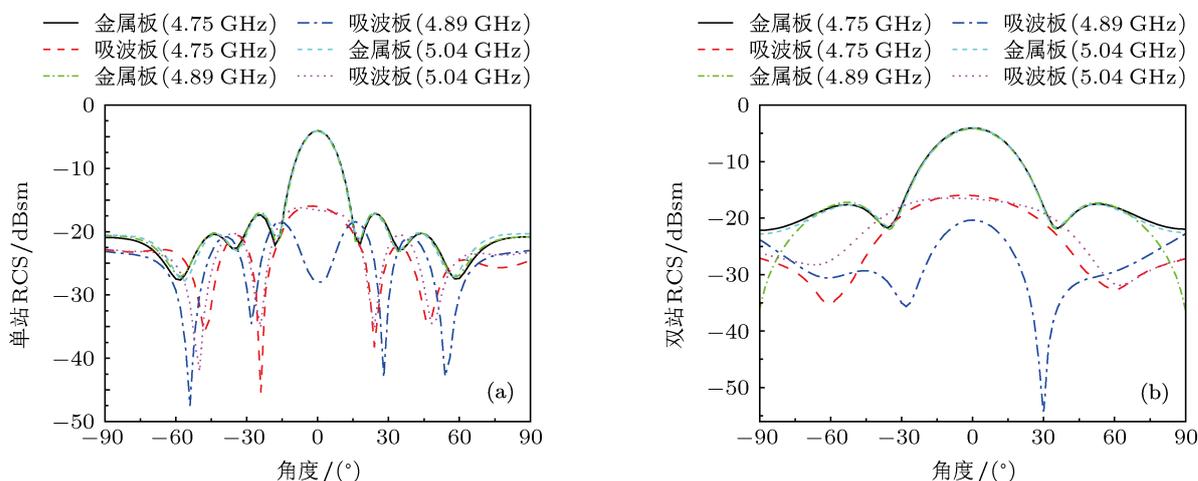


图 11 RCS 随观察角变化曲线 (a) 单站; (b) 双站

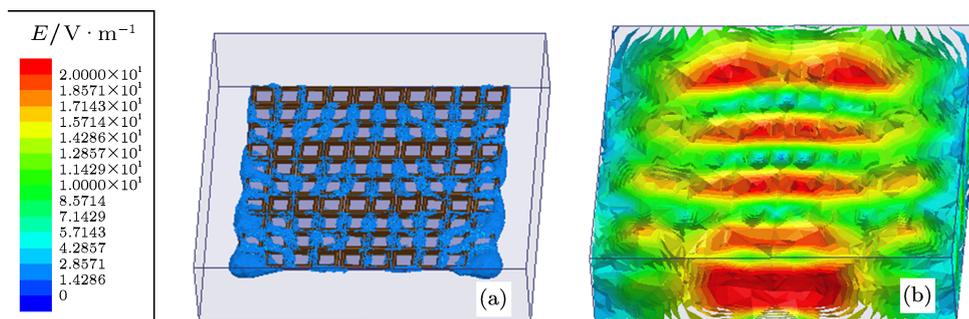


图 12 空间散射场分布 ( $f = 4.89$  GHz) (a) 设计吸波体; (b) 金属板

### 4 结论

本文设计并制备了一种宽带低 RCS 超材料吸波体. 首先, 通过分析吸波体吸波率与 RCS 减缩的关系, 得出对隐身要求较高场合的吸波体吸波率应

在 90% 以上的结论, 然后, 利用超材料的电磁谐振特性, 基于谐振分离的思想, 通过方环夹层结构实现了吸波率达 90% 以上带宽的有效拓展. 理论分析表明: 设计吸波体对某一吸波频率在不同的位置分别提供电谐振和磁谐振, 对不同的吸波频率, 利用

不同的介质层提供主要的能量损耗,从而有效减弱了电磁耦合,保证了对电磁波的宽频强吸收.实验结果表明:三层方环吸波体吸波率在90%以上的带宽是单层吸波体的4.25倍,RCS在4.75—5.04 GHz减缩超过10 dB,相对带宽达5.1%.该吸波体单元尺寸较小,仅有 $0.17\lambda$ ,厚度超薄,仅为 $0.015\lambda$ ,因此

可以利用四层、五层甚至更多层相同或者不同的单元结构实现更宽频带的高效吸波,表现出较强的灵活性.此外,该吸波体设计简单,在很宽的入射角内对不同极化的入射波都保持了良好的低RCS特性,具有较强的实用性和应用前景.

- [1] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, Alex'opolous N G, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2059
- [2] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [4] Li W Q, Cao X Y, Gao J, Liu T, Yao X, Ma J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154102 (in Chinese) [李文强,曹祥玉,高军,刘涛,姚旭,马嘉俊 2012 物理学报 **61** 154102]
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [6] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, Reiten M T, Luo S N, Uaylor A J, Chen H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 154
- [7] Wang J, Chen Y T, Hao J M, Yan M, Qiu M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 074510
- [8] Lin C H, Chern R L, Lin H Y 2011 *Opt. Express* **19** 415
- [9] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q Y, Li W Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184101 (in Chinese) [刘涛,曹祥玉,高军,郑秋容,李文强 2012 物理学报 **61** 184101]
- [10] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Ma J J, Yao X, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064103 (in Chinese) [杨欢欢,曹祥玉,高军,刘涛,马嘉俊,姚旭,李文强 2013 物理学报 **62** 064103]
- [11] Li S J, Cao X Y, Gao J, Liu T, Yang H H, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124101 (in Chinese) [李思佳,曹祥玉,高军,刘涛,杨欢欢,李文强 2013 物理学报 **62** 124101]
- [12] Tao H, Landy N I, Bingham C M 2008 *Opt. Express* **16** 7181
- [13] Marcus D, Thomas K, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033101
- [14] Luukkonen O, Filippo C, Agostino M, Sergei A T 2009 *IEEE Trans. on Anten. and Propag.* **57** 3119
- [15] Wang B N, Koschny T, Soukoulis C M 2010 *Phys. Optics* **24** 1
- [16] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [17] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Ma H, Lin B Q, Bai P, Peng W D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107801 (in Chinese) [顾超,屈绍波,裴志斌,徐卓,马华,林宝勤,柏鹏,彭卫东 2011 物理学报 **60** 107801]
- [18] Lee J Y, Yoon Y J, Lim S J 2012 *ETRI Journal* **34** 126
- [19] He X J, Wang Y, Wang J M, Gui T L 2011 *Progress In Electromag. Research* **115** 381
- [20] Li H, Yuan L H, Zhou B, Shen X P, Cheng Q, Cui T J 2011 *Journal of Applied Phys.* **110** 014909
- [21] Shen X P, Cui T J, Ye J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058101 (in Chinese) [沈晓鹏,崔铁军,叶建祥 2012 物理学报 **61** 058101]
- [22] Su B, Gong B Y, Zhao X P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144203 (in Chinese) [苏斌,龚伯仪,赵晓鹏 2012 物理学报 **61** 144203]
- [23] Li L, Yang Y, Liang C H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
- [24] Zhu B, Huang C, Feng Y 2010 *Progress In Electromag. Research* **24** 121
- [25] Yang Y J, Huang Y J, Wen G J, Zhong J P, Sun H B, Gordon O 2012 *Chin. Phys. B* **21** 038501
- [26] Zhu W R, Huang Y J, Rukhlenko I D, Wen G J and Premaratne M 2012 *Opt. Express* **20** 6616
- [27] Luo H, Cheng Y Z, Gong R Z 2011 *Eur. Phys. J. B* **81** 387
- [28] Luo H, Wang T, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 03420411
- [29] Ye Y Q, Jin Y, He S L 2009 *Phys. Opt.* **11** 1
- [30] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石,罗春荣,张燕萍,赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [31] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Zhou H, Wang J 2010 *Progress In Electromag. Research* **17** 171
- [32] Lee J Y, Lim S J 2011 *Electro. Lett.* **47** 8
- [33] Huang Y J, Wen G J, Li J, Zhong J P, Wang P, Sun Y H, Gordon O, Zhu W R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 117801
- [34] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [35] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. on Anten. and Propag* **61** 2327

# Broadband low-RCS metamaterial absorber based on electromagnetic resonance separation\*

Yang Huan-Huan<sup>†</sup> Cao Xiang-Yu Gao Jun Liu Tao Li Si-Jia  
Zhao Yi Yuan Zi-Dong Zhang Hao

(School of Information and Navigation of AFEU, Xi'an 710077, China)

(Received 31 May 2013; revised manuscript received 28 June 2013)

## Abstract

We have designed and fabricated a broadband low radar cross section (RCS) metamaterial absorber with polarization-independent characteristic based on electromagnetic resonance. The absorbing mechanism is investigated by means of electric as well as magnetic field distributions and retrieval algorithm. Absorbing and RCS properties of this absorber are performed by waveguide experiment and free space measurements, respectively. Theoretical analysis indicates that the absorber can produce electric and magnetic resonances in different locations for fixed frequency, while for different frequencies, it can provide energy losses in different dielectric layers, which effectively lowers the electromagnetic couplings and consequently keep the strong absorbing properties in a wide frequency range. Experimental results show that the designed absorber with 3-layer structure achieves a frequency range which is 4.25 times as that of 1-layer absorber with absorptivity above 90%, its relative bandwidth for RCS reduction above 10dB is 5.1%. The cell size and thickness of the designed absorber are very small, i.e., 0.17 and 0.015 of the working wavelength. Thus the low-RCS property of the absorber is wide-angle and polarization-independent. In addition, the working frequency range of the absorber can be adjusted by properly designing the layers.

**Keywords:** metamaterial absorber, radar cross section (RCS), broadband, electromagnetic resonance

**PACS:** 41.20.Jb, 73.50.-h

**DOI:** 10.7498/aps.62.214101

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60671001, 61271100), the Key Program of Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JZ010), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012T50878), and the Natural Science Basic Research of Shanxi Province, China (Grant Nos. SJ08-ZT06, 2012JM8003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jianye8901@126.com