

一种超薄吸波材料及其在缝隙天线中的应用

杨欢欢* 曹祥玉 高军 刘涛 姚旭 李文强
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文设计了一种超薄雷达吸波超材料,从等效电路和表面电流、电场分布分析了其吸波机理,并将其应用于波导缝隙天线的带内雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)减缩。该吸波材料仅由两层金属及中间的有耗介质板组成,厚度约为 $\lambda/175$,最大吸波率达99.9%,且具有入射角和极化稳定吸波特性的。将该吸波材料加载到波导缝隙天线上,实验结果表明:加载后的天线,回波损耗和增益几乎不变,在 $-21^\circ \sim 21^\circ$ 角域,天线带内RCS减缩均在3 dB以上,法线方向RCS减缩最大超过17 dB。

关键词: 吸波材料; 超薄; 缝隙天线; 雷达散射截面减缩

中图分类号: TM15

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2790-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00676

An Ultra-thin Metamaterial Absorber and Its Application in Reducing RCS of Slot Antenna

Yang Huan-huan Cao Xiang-yu Gao Jun Liu Tao Yao Xu Li Wen-qiang
(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: An ultra-thin metamaterial absorber is designed and applied to reducing in-band Radar Cross Section (RCS) of waveguide slot antenna. The absorber is consisted solely of two metallic layers separated by a lossy dielectric spacer. In spite of its very thin structure, almost $\lambda/175$, the absorber achieves a maximum absorptivity of 99.9% and shows an excellent absorption stability performance with respect to different polarizations and incidence angles. By analyzing equivalent circuit and simulating the the electric field distribution, current distribution on patch and metallic ground plane at the resonance frequency, its physical mechanism of absorption of the electromagnetic wave is theoretically investigated. Experimental results show that the application of the absorber to waveguide slot antenna has hardly influence on antenna's radiation performance, while the in-band RCS reduction of antenna is above 3 dB from -21° to 21° , and the most reduction value exceeds 17 dB at the boresight direction.

Key words: Metamaterial absorber; Ultra-thin; Slot antenna; Radar Cross Section Reduction (RCSR)

1 引言

2008年, Landy等人^[1]提出了一种超薄、结构简单、吸波率接近100%的超材料吸波体,并实验验证了其良好的吸波效果,引起研究人员的极大兴趣并积极展开研究,其电磁特性也不断得到改善,如提高入射角稳定性^[2-4]、极化稳定性^[5-7]、增加吸波频带(双带/多带)^[8-10]和扩展吸波带宽^[11,12]等。这类吸波体的工作机理是通过优化设计超材料的结构模型,调控超材料单元的电谐振和磁谐振,使 $\epsilon(\omega) = \mu(\omega)$,实现吸波材料与自由空间的阻抗匹配,降低

入射波的反射率,并利用结构单元的介质损耗和欧姆损耗实现对电磁波的强烈吸收。与文献[13-15]提出的基于超材料的吸波材料相比,这类吸波体最大的优势在于不需加载集总电阻作为损耗层,就可实现接近100%的吸波率。

吸波材料最重要的应用方向之一是目标隐身,但已有研究文献都仅分析了此类新型吸波材料的吸波特性,却没有具体分析其在雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)减缩中的应用。尤其在当前天线带内RCS减缩成为研究的难点和热点^[16],降低天线的RCS对于减小目标系统的总RCS具有重要意义。而此类吸波材料超薄、高吸波率和无表面损耗层的特点,使其非常适合于隐身天线的设计。针对此问题,本文设计了一种高吸波率、极化不敏感、宽入射角的超薄吸波材料,从等效电路和表面电流、

2012-05-31收到,2012-09-03改回

国家自然科学基金(60671001, 61271100),陕西省自然科学基金研究重点项目(2010JZ010),陕西省自然科学基金基础研究项目(SJ08-ZT06)和陕西省科技攻关项目(2012JM8003)资助课题

*通信作者: 杨欢欢 jianye8901@126.com

电场分布两个角度分析了其吸波机理，并将其用于波导缝隙天线设计，在保证天线辐射性能的同时，减缩天线带内 RCS。

2 超薄吸波材料设计与分析

2.1 结构设计与分析

如图 1 所示，设计的吸波材料是在金属基底上周期刻蚀方形金属贴片而构成的 3 层式结构。上层金属贴片的中心被挖去一旋转了 45° 角的方形，下层为完整的金属板，中间的介质基板为环氧玻璃布板(FR4)，介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切 $\tan \delta = 0.02$ 。这样对称地设计结构，可以使其对任意极化的入射波都能产生谐振。其他结构参数为：单元周期 $W_1 = 10$ mm，金属环边长 $W_2 = 9.6$ mm，挖掉方形边长 $W_3 = 4.2$ mm，介质厚度 $h = 0.3$ mm(约为 $\lambda/175$ ， λ 是 5.64 GHz 的自由空间波长)。

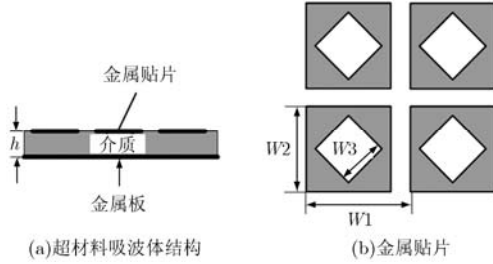


图1 超材料吸波体结构示意图

依据传输线理论，建立该结构的等效电路模型如图 2。当电磁波垂直入射到吸波体表面时，表面阻抗可以等效为容性的贴片阵、损耗层和感性的地板并联，分别用 Z_s 、 Y_s 表示表面阻抗和导纳，则

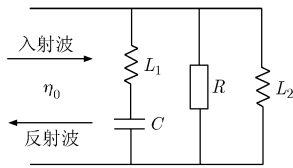


图2 等效电路图

$$Y_s = \frac{1}{j\omega L_1 + 1/j\omega C} + \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_2} \quad (1)$$

式中 ω 为入射波的角频率， L_1 和 C 分别为贴片的等效电感和电容， R 为介质和欧姆损耗， L_2 为金属背衬介质层的等效电感，可由式(2)计算^[15]：

$$L_2 = Z_m^{\text{TE(TM)}} \tan(\beta h) / \omega \quad (2)$$

其中 $Z_m^{\text{TE}} = (\omega \mu_r \mu_0) / \beta$ 和 $Z_m^{\text{TM}} = \beta / (\omega \epsilon_r \epsilon_0)$ 表示 TE、TM 极化时电介质基板的本征阻抗， $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2} = \omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r} / c_0$ ， c_0 为真空中波速。

$$Z_s = \frac{1}{Y_s} = \frac{j\omega R L_2 (1 - \omega^2 L_1 C)}{R(1 - \omega^2 L_1 C - \omega^2 L_2 C) + j\omega L_2 (1 - \omega^2 L_1 C)} \quad (3)$$

当 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2)C}}$ 时，即

$$1 - \omega^2 L_1 C - \omega^2 L_2 C = 0 \quad (4)$$

图 2 所示的电路发生谐振，此时

$$Z_s = R \quad (5)$$

设自由空间波阻抗为 η_0 ，对于垂直入射的平面波，吸波体的表面反射系数为

$$R_1 = \frac{Z_s - \eta_0}{Z_s + \eta_0} \quad (6)$$

可以看出，通过适当地设计吸波体的结构模型，使谐振时吸波体的损耗 R 与 η_0 相匹配，即可实现入射波零反射，而吸波体底层连续的金属薄膜保证了无透射，进入吸波体的电磁波在损耗 R 的作用下将被完全吸收。

2.2 实验验证

定义反射率 $R_e = |S_{11}|^2$ ，透射率 $T = |S_{21}|^2$ ，这里 $|S_{21}|^2 = 0$ ，则吸波率 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2$ 。采用基于有限元法的 Ansoft HFSS12 软件进行建模。对于 TE 和 TM 极化的入射波，仿真得到的吸波率随入射角变化曲线如图 3。可见，当两种极化的平面波垂直入射时，吸波率在 5.64 GHz 均达到最高值 99.9%，随入射角增大到 60° ，吸波率峰值仍保持在 85% 以上，尤其对 TM 极化吸波率曲线非常稳定，说明该结构的吸波性能具有极化不敏感和宽入射角特性。图 4 比较了该结构对垂直入射波的仿真和用波导法^[17]实测的吸波率，可以看出，仿真和实测吻合较好，证实了其吸波效果。

图 5 给出了电磁波垂直入射时，吸波体上下表面在谐振点的电场和电流分布。表面电场分布表明：入射电磁波的电场分量与上层贴片左右两侧的金属臂产生了电偶极子响应^[18]，在贴片的两端形成了两个电极(如图 5(a))，同时，这两个电极又与金属地板强烈的耦合(如图 5(b))，形成了类似于 LC 的谐振回路，从而产生了电谐振；表面电流分布表明：入射电磁波的磁场分量穿透上层金属，在上下两层金属之间产生水平方向的磁谐振^[18]，相应地在上层金属贴片的上下端及对应的金属地板上激发出反向平行的电流(如图 5(c)-5(d))，电谐振和磁谐振同频产生，使得吸波体能够几乎 100% 地吸收入射波的电场和磁场能量^[19]。

3 利用超薄吸波材料减缩缝隙天线 RCS

利用吸波材料减缩天线带内 RCS 的关键在于

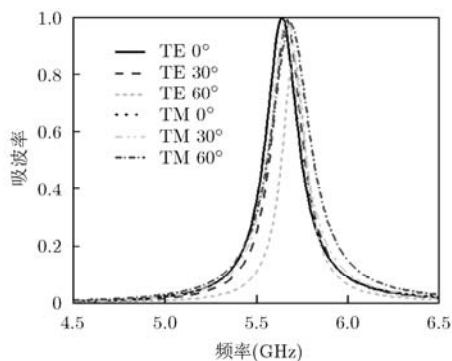


图3 吸波率随入射角的变化

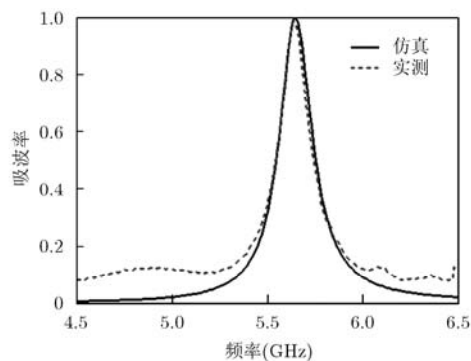


图4 吸波率实测仿真对比

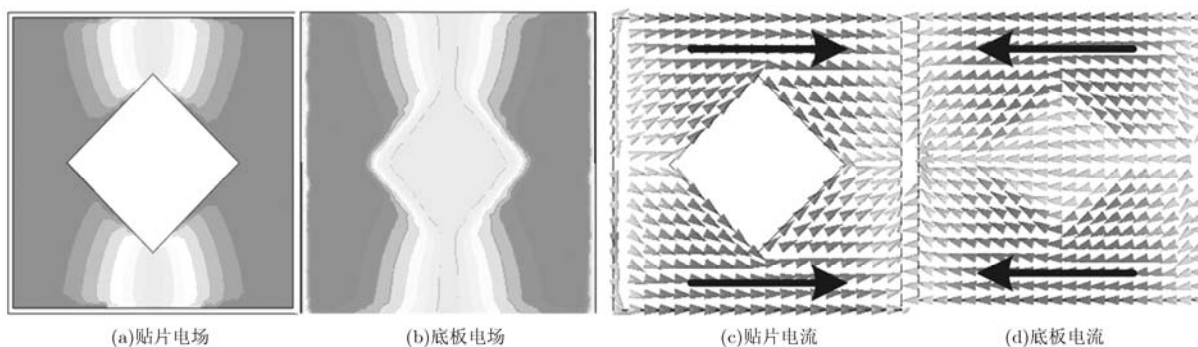


图5 电场电流分布图

不影响其辐射性能。为实现这一点,在设计加载方式时,使吸波材料与天线辐射缝隙之间保持一定的距离,如图6所示。天线的口径为 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,缝隙尺寸为 $26\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,馈电波导采用C波段的标准波导(国标型号:WJB-58),宽边长 40.4 mm ,窄边长 20.2 mm 。

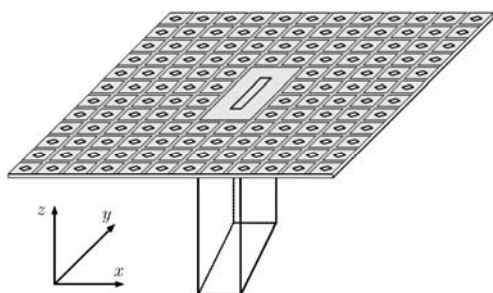


图6 加载吸波材料天线示意图

表1比较了加载吸波材料前后天线辐射性能的仿真结果。从表中数据可知,采用图6所示的加载方式,对天线的回波损耗和增益影响都不大,表明保证了天线的辐射性能。为证实这一点,加工了实际的天线,并将采用电路板刻蚀技术制作的吸波材料按图6进行加载,其实物照片如图7。利用Agilent N5230C 矢量网络分析仪和远场测量法,分别观测

了加载前后天线的回波损耗曲线、归一化方向图,结果对比如图8。可见,加载吸波材料后,天线辐射性能得到了较好的保持,结果与表1基本吻合,只是谐振频率向高频偏移了 20 MHz ,分析认为这是由于加工误差所致。实验结果进一步证实了设计的正确性。

表1 天线辐射性能仿真结果

| 比较对象 | 谐振频率 (GHz) | -10 dB 带宽(GHz) | 增益(dBi) |
|------|---------------|----------------|---------|
| 加载前 | 5.63 | 5.46~5.83 | 6.04 |
| 加载后 | 5.62 | 5.44~5.81 | 6.02 |

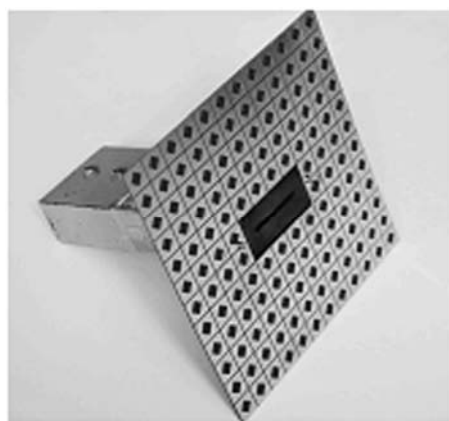


图7 加载吸波材料天线实物图

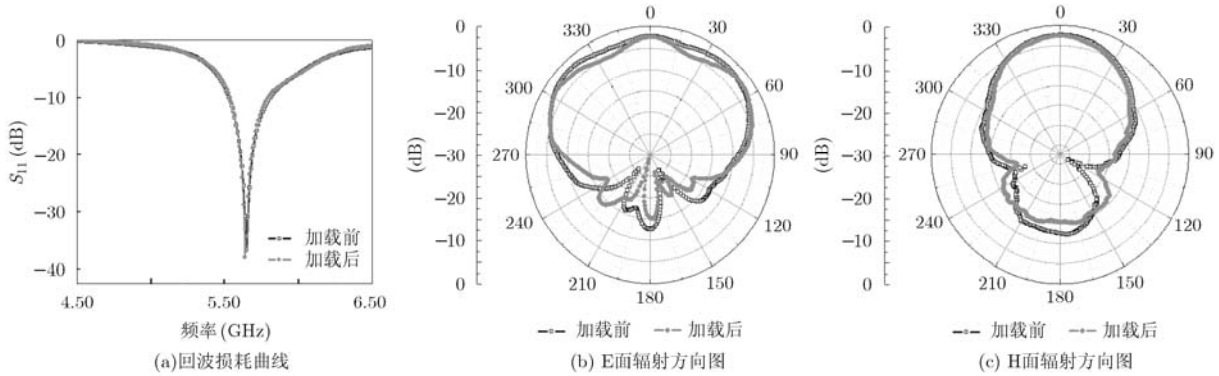


图8 实测结果对比

分别用 TE 和 TM 极化的平面波照射天线，图 9 给出了法线方向单站 RCS 的减缩曲线。可以看到，在 5~6 GHz 频段内，天线 RCS 均有减缩，对于 TE 极化的情况，RCS 在 5.48~5.68 GHz 减缩达 3 dB 以上，最大减缩 13.9 dB；对于 TM 极化的情况，RCS 在 5.48~5.71 GHz 减缩达 3 dB 以上，最大减缩 14.8 dB。图 10 对比给出了平面波从不同角度照射加载前后天线的 RCS 结果。从图中结果可知，加载吸波材料对天线法线方向 RCS 抑制明显，两种极化下 RCS 减缩分别达 16.2 dB 和 17.6 dB，且对 TE 和 TM 极化，RCS 分别在 $-21^{\circ}\sim 21^{\circ}$ 和 $-21^{\circ}\sim 23^{\circ}$ 减缩超过 3 dB。RCS 减缩效果验证了设计吸波材料的稳定性。

4 结束语

本文设计了一种最大吸波率达 99.9%、厚度仅为 $\lambda/175$ 且具有极化不敏感、宽入射角特点的雷达吸波材料，并从等效电路和电场、电流分布两个角度分析了其吸波机理。将这种材料加载到波导缝隙天线上，结果表明：与加载前相比，天线的回波损耗和增益几乎不变，对 TE 极化和 TM 极化入射波，在 $-21^{\circ}\sim 21^{\circ}$ 角域，天线带内 RCS 减缩均在 3 dB 以上，法线方向 RCS 减缩最大超过 17 dB。验证了这种新型吸波超材料可以用于波导缝隙天线的带内同极化隐身。

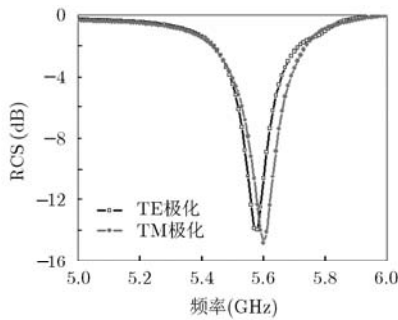


图9 两天线扫频RCS对比

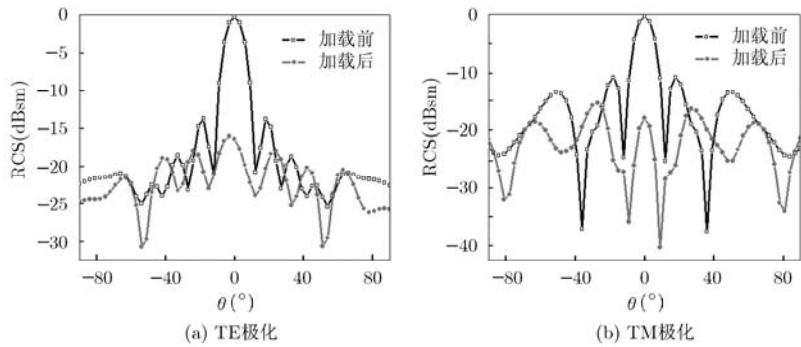


图10 两天线扫角RCS对比

参 考 文 献

[1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 2074021-2074024.

[2] Tao Hu, Bingham C M, Strikwerda A C, *et al.* Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. *Physical Review B*, 2008, 78(24): 2411031-2411034.

[3] Zhu B, Wang Z, Huang C, *et al.* Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, 101: 231-239.

[4] Luukkonen O, Costa F, Monorchio A, *et al.* A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3119-3125.

[5] Gu Chao, Qu Shao-bo, Pei Zhi-bin, *et al.* The design of a quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 0378011-0378015.

[6] Ma Y, Chen Q, Grant J, *et al.* A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial Absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 945-947.

[7] Lee J, Yoon Y, and Lim S. Ultra-thin polarization

- independent absorber using hexagonal interdigital metamaterial[J]. *ETRI Journal*, 2012, 34(1): 126-129.
- [8] Tao Hu, Bingham C M, Pilon D, *et al.* A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(22): 2251021-2251025.
- [9] Li M H, Yang H L, Hou X W, *et al.* Perfect metamaterial absorber with dual bands[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, 108: 37-49.
- [10] Li Hui, Yuan Li-hua, Zhou Bin, *et al.* Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 0149091-0149098.
- [11] Lee J and Lim S. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(1): 8-9.
- [12] Luo Hao, Wang Tao, Gong Rong-zhou, *et al.* Extending the bandwidth of electric ring resonator metamaterial absorber[J]. *Chinese Physical Letters*, 2011, 28(3): 0342041-0342044.
- [13] Kernd J and Werner D H. A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 38(1): 61-64.
- [14] Li You-quan, Zhang Hui, Fu Yun-qi, *et al.* RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, 7: 473-476.
- [15] Costa F, Monorchio A, and Manara G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(5): 1551-1558.
- [16] 龚琦, 张帅, 龚书喜, 等. 利用高阻抗表面减缩天线雷达散射截面的新方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, 39(3): 134-140.
- Gong Qi, Zhang Shuai, Gong Shu-xi, *et al.* Application of the high impedance surface for RCS reduction of antenna[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(3): 134-140.
- [17] Li Long, Yang Yang, and Liang Chang-hong. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(6): 0637021-0637025.
- [18] Luo H, Cheng Y Z, and Gong R Z. Numerical study of metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-square patches[J]. *The European Physical Journal B*, 2011, 81: 387-392.
- [19] He X J, Wang Y, Wang J M, *et al.* Dual-band terahertz metamaterial absorber with polarization insensitivity and wide incident angle[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011, 115: 381-397.
- 杨欢欢: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为电磁超材料、电磁散射理论、天线设计等.
- 曹祥玉: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等.
- 高 军: 男, 1962年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电磁散射理论、电磁超材料、天线设计等.