

基于超材料的吸波体设计及其波导缝隙天线应用*

刘涛[†] 曹祥玉 高军 郑秋容 李文强

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

(2012年2月1日收到; 2012年3月5日收到修改稿)

设计了一种基于超材料电磁特性的吸波体, 并将其应用于波导缝隙天线. 该吸波体是由两层金属及其中间的有耗介质组成, 上层金属是由刻蚀交叉缝隙的贴片形成的电谐振器, 下层金属不刻蚀, 作为整个金属地板. 通过优化结构参数, 得到了一种极化不敏感、宽入射角的超薄吸波体, 吸波率达到 99.1%, 厚度只有约 0.01λ . 将该吸波体应用与波导缝隙天线, 在 5.48—5.7 GHz 工作频段内, 天线雷达散射截面减缩都在 3 dB 以上, 在圆锥方向的 -25° — $+25^\circ$ 范围的角度上, 天线雷达散射截面减缩均在 5 dB 以上, 雷达散射截面减缩最大超过 12 dB, 而天线前向增益仅降低了 0.53 dB. 实验结果与仿真结果符合得较好, 证实了该吸波体具有好的天线雷达散射截面减缩效果, 可以应用于天线目标的隐身.

关键词: 波导缝隙天线, 超材料, 吸波体, 雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

1 引言

自从 2008 年 Landy 等^[1]发表了题为“Perfect Metamaterial Absorber”的文章后, 基于超材料 (metamaterial) 的吸波体就引起了研究人员极大的兴趣, 新的吸波体不断被提出, 其电磁特性也不断得到改进, 如改善入射角稳定性^[2-5]、极化稳定性^[5-8]、增加吸波频带 (双带/多带)^[8-12] 和扩展吸波带宽^[13-18]. 与文献 [19, 20] 提出的基于超材料的吸波材料相比, 此类新型吸波材料最大的优势就是不需要加载集总电阻作为损耗层就可实现几乎 100% 的吸波率. 它的工作机理就是通过优化设计超材料结构模型, 调控超材料结构单元的磁谐振和电谐振, 使 $\varepsilon(\omega) = \mu(\omega)$, 实现吸波材料和自由空间的阻抗匹配, 降低入射电磁波反射率, 利用结构单元的欧姆损耗和介质损耗实现对电磁波的强烈吸收.

吸波材料最重要的应用方向之一就是目标隐身, 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, 却没有具体分析吸波体的雷达散射界面 (radar cross section, RCS) 特性及其在天线 RCS 减缩中的应用. 值得提出的是, 文献 [21] 研究了此类吸波材料在改善微带天线增益和定向性中的应用, 但并没有分析吸波材料对降低天线 RCS 这一最重要的应用点. 针对此问题, 本文提出了一种结构简单、极化不敏感和宽入射角的超薄超材料吸波体, 重点分析了其在波导缝隙天线 RCS 减缩中的应用. 研究结果有利于认识此类新型吸波材料在电磁隐身领域的应用价值.

2 吸波性能仿真分析

超材料吸波体单元如图 1. 上层金属结构是刻蚀交叉缝隙的贴片电谐振结构, 缝隙倾斜角为 45° 和 135° , 由于结构的对称性, 使得对于任意极化方向的入射波都可产生谐振. 下层金属不做刻蚀, 保留为完整的地平面, 中间的介质为 FR4, 介电常数 4.4, 电损耗角正切 0.02, 介质厚度 $t = 0.5$ mm.

* 中国博士后科学基金 (批准号: 20100481497)、陕西省自然科学基金研究重点项目 (批准号: 2010JZ010) 和陕西省自然科学基金基础研究 (批准号: SJ08-ZT06) 资助的课题.

[†] E-mail: lt9571@163.com

其他结构参数如图 1 所示, 周期 $p = 9 \text{ mm}$, 方形贴片宽度 $w_1 = 8 \text{ mm}$, 缝隙长 $l = 7.5 \text{ mm}$, 缝隙宽 $w_2 = 1.6 \text{ mm}$.

定义反射率 $R = |S_{11}|^2$, 透射率 $T = |S_{21}|^2$, 则吸波率 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - R - T$, 由于图 1 中材料的底层为金属板, 故没有透射, 即 $|S_{21}|^2 = 0$, 则 $A = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - R$. 仿真软件采用基于有限元方法的 HFSS12.0, 模型采用主/从边界和弗洛盖端口来模拟无限周期单元. TE 和 TM 极化的入射波随入射角变化对吸波性能的影响如图 2(a) 和 (b). 可看到, 在不同极化波入射且入射角增大到 60° 情况下, 吸波率保持在 85% 以上, 最大达到了 99.1%, 虽然吸波率有所变化, 但谐振点 5.58 GHz 位置变化很小, 表现了良好的极化稳定性和入射角稳定性. 相比 TE 极化波, TM 极化波具有更好的入射角稳定性. 垂直入射时吸波率在 50% 以上的带宽有 220 MHz (5.46—5.68 GHz). 整个结构厚度只有

约 0.01λ , λ 为 5.58 GHz 的波长.

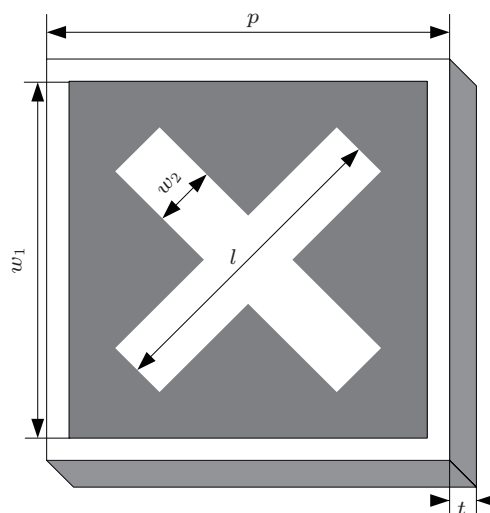


图 1 超材料吸波体单元

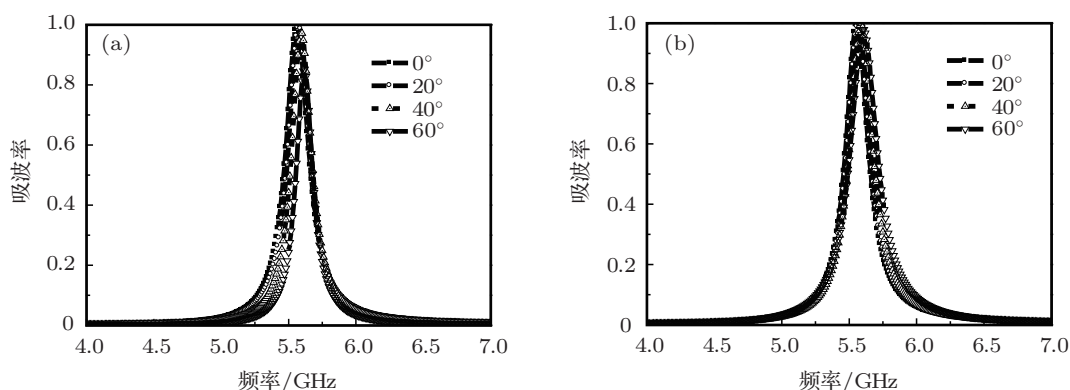


图 2 不同极化时吸波率随入射角的变化 (a) TE 极化; (b) TM 极化

3 加载吸波体的波导缝隙天线仿真分析

3.1 天线结构

图 3 为加载吸波体的波导缝隙天线结构模型. 为了让天线的 RCS 减缩更加明显, 在波导端头缝隙的上下部分布 6 层吸波体单元, 在其左右两侧布置了 5 层吸波体单元. 整个吸波体地面的尺寸为 $135 \text{ mm} \times 135 \text{ mm}$ ($2.5\lambda \times 2.5\lambda$, λ 为 5.55 GHz 时的自由空间波长). 吸波体的参数和材料与上节中仿真设置一致. 缝隙天线的结构参数为: 缝隙长度 $L = 25.6 \text{ mm}$, 宽度 $W = 2 \text{ mm}$. 馈电波导

采用 C 波段的标准波导 (国标型号: WJB-58), 宽边 $a = 40.4 \text{ mm}$, 窄边 $b = 20.2 \text{ mm}$. 为了引导天线的电磁波尽可能地向外辐射, 吸波体与天线的缝隙之间必须留出一定的空间, 同时也起到了减少吸波材料和缝隙之间的耦合作用.

3.2 仿真分析

3.2.1 反射损耗

从图 4 中可以看出, 加载吸波体后, 天线的反射损耗 S_{11} 仍然较好, 谐振频率 5.55 GHz 朝低频方向稍微移动, 表明吸波体对天线辐射影响很小. 分析认为, 这是由于波导缝隙和吸波体的相互耦合导

致的. 可以采用两种方式调节天线的谐振频率, 一是通过加大吸波体和波导之间的距离以减小耦合, 二是调节波导缝隙的尺寸.

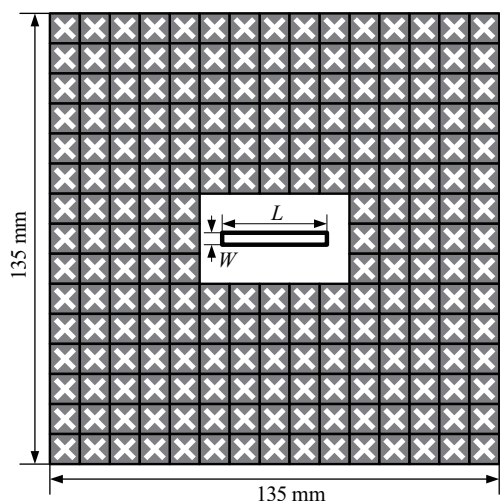


图3 加载吸波体的波导缝隙天线

3.2.2 天线方向图

由于吸波体在 5.58 GHz 有最好的吸波效果, 所

以我们仿真得到了两天线在该频点的方向图, 如图 5. 可以看出, 加载吸波体后, 天线的 E 面方向图比金属接地板的方向图波纹起伏要小, H 面方向图基本没有变化, 增益最大值由原来的 5.97 dB 减小到 5.44 dB, 减小了 0.53 dB. 另外可以看到, 天线的后瓣并没有减小, 这表明该吸波体并不具备抑制表面波的能力, 从而不能减小电磁波在天线边缘的绕射, 因此加载吸波体的天线的后瓣没有得到改善.

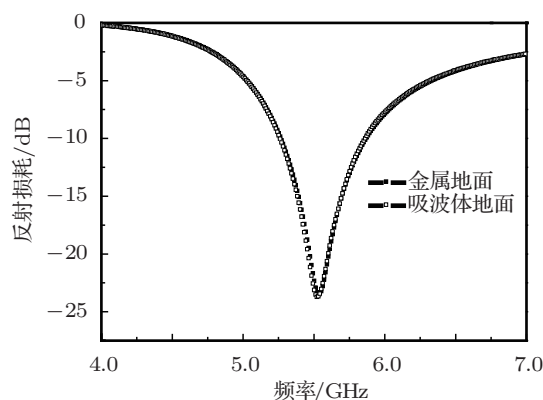


图4 反射损耗仿真结果

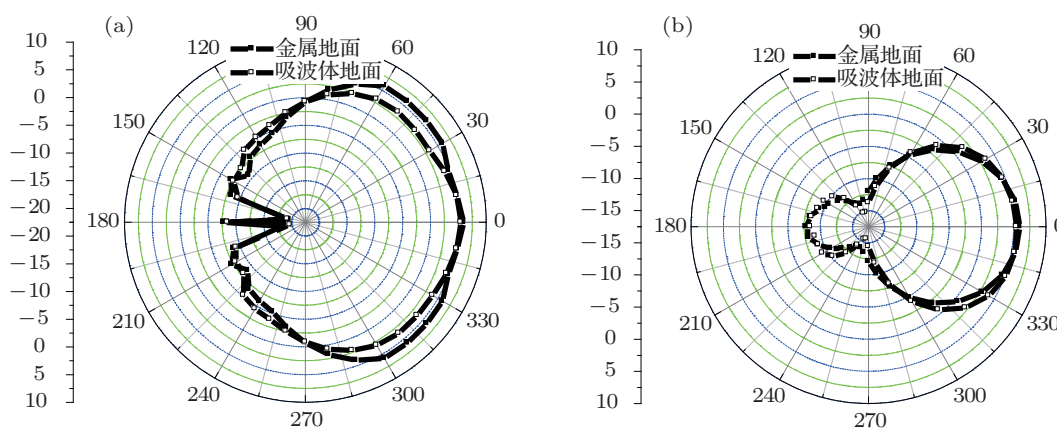


图5 方向图仿真结果比较 (a) E 面; (b) H 面

3.2.3 天线 RCS

图 6 给出了不同极化时天线的 RCS. 由图 6(a) 和 6(b) 看到, 不管水平极化还是垂直极化, 在 5.48—5.7 GHz 工作频段内, 加载吸波材料的波导缝隙天线的 RCS 减缩都在 3 dB 以上, 在 5.58 GHz 时 RCS 减缩分别达到最大值 16.6 dB 和 20.3 dB. 由图 6(c) 和 6(d) 看到, 5.58 GHz 时

在 -25° — $+25^\circ$ 角度范围内, 两种天线 RCS 差值均在 5 dB 以上, 在鼻锥方向最大分别达到 12.76 dB 和 12.08 dB.

图 7 给出了天线散射场分布. 由图 7 比较可以看出, 加载吸波体地面的散射场明显小于金属地面散射场. 图 6 和 7 的仿真结果表明, 在加载吸波体后, 波导缝隙天线对于垂直极化和水平极化波都具有良好的低 RCS 性能.

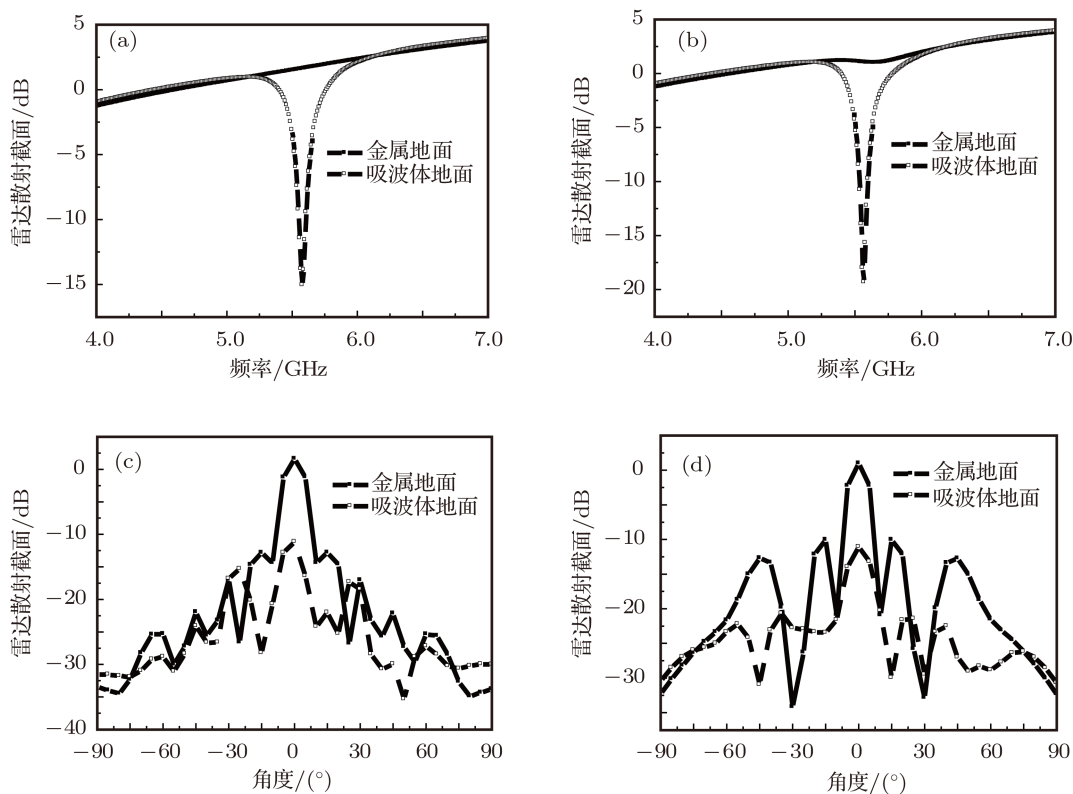


图6 波导缝隙天线的RCS仿真 (a), (c) 水平极化; (b), (d) 垂直极化

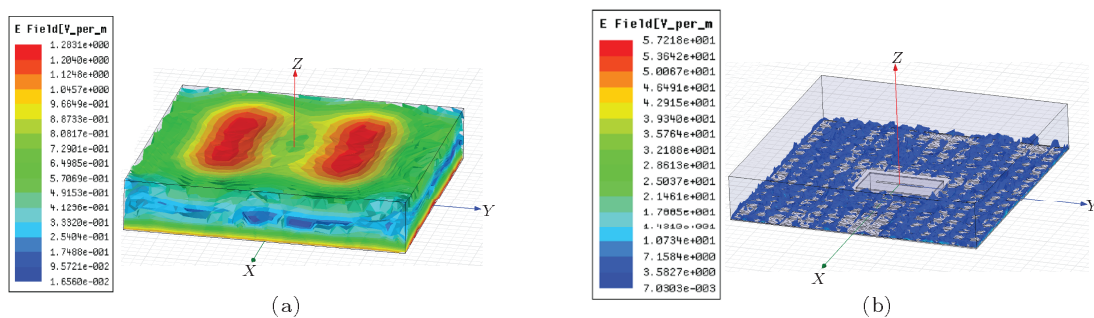


图7 天线散射场分布 (a) 金属地面; (b) 吸波体地面

4 加工样品及测量结果分析

4.1 吸波体

为了验证仿真结果的正确性, 我们使用普通的印制电路板技术加工了吸波材料的实物, 如图8. 由于加工单位材料所限, 介质的属性与之前的仿真略有不同, 介电常数改为4.1, 损耗角正切为0.02. 采用波导法进行测量^[22], 将与波导端口等大的材料

置于波导端口上, 并用螺丝固定, 测量此时的 S_{11} , 再根据吸波率的定义即可求出吸波率. 馈电波导采用C波段的标准波导(国标型号: WJB-58), 宽边 $a = 40.4 \text{ mm}$, 窄边 $b = 20.2 \text{ mm}$, 矢量网络分析仪为Agilent N5230C.

图9所示为测量结果与重新仿真的结果(介质属性改为与实际加工的一致, 并且仿真设置也与测量方法一致)对比, 可以看出, 测试结果与仿真结果符合得非常好, 表明交叉缝隙吸波体确实

有良好的吸波效果, 在 5.75 GHz 时实测吸波率达到了 98.8%. 吸波率在 50% 以上的带宽有 220 MHz (5.64—5.86 GHz). 与最初仿真结果比较可以看到, 介电常数的减小使得吸波体最大吸波频点向高频偏移了 200 MHz 左右.

4.2 波导缝隙天线

4.2.1 反射损耗

图 10 为加工的波导缝隙天线. 图 10(a) 中天线接地面为理想导体面, 图 10(b) 为采用吸波体代替理想导体面的实物. 加工实物与仿真模型结构尺寸一致. 图 11 给出了波导缝隙天线加载金属接地面和吸波体接地面的反射损耗 S_{11} 测试曲线. 从图 11 中可以看出, 加载吸波体后, 波导缝隙天线的 S_{11} 基本没有变化, 天线仍然具有较好的匹配特性, 说明吸波体的加载没有给天线的辐射造成大的影响. 与图 4 仿真结果比较, 天线的谐振频率由 5.55 GHz 偏移到了 5.75 GHz, 向高频稍微移动了 200 MHz, 分析认为这是由于加工误差引起的, 但恰好与吸波体最大吸波频点偏移一致, 对实验结果也没有显著影响.

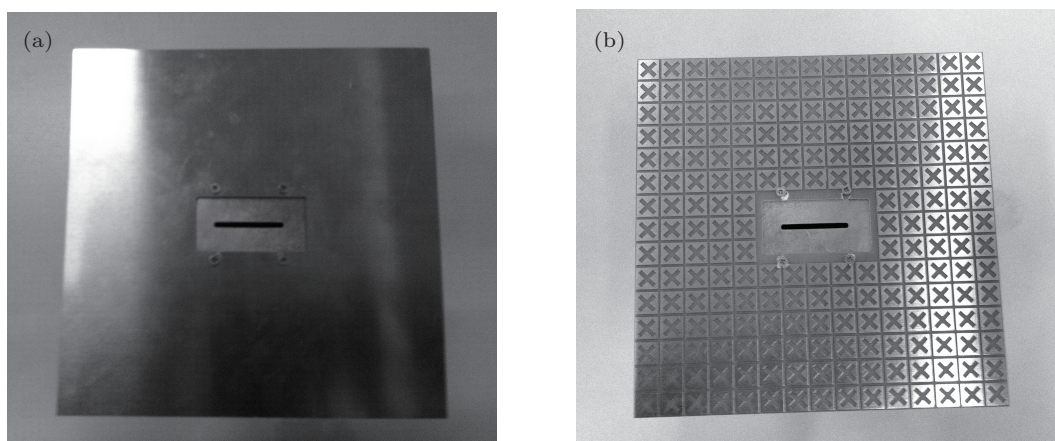


图 10 波导缝隙天线 (a) 金属接地面; (b) 吸波材料接地面

4.2.2 天线方向图

从图 11 中可以看出, 天线加载吸波体前后, 反射损耗曲线在 5.8 GHz 具有相同的反射损耗值 -21.78 dB, 取该频率点测试天线的方向图, 因为此时天线具有相同的输入功率. 天线的方向图测试

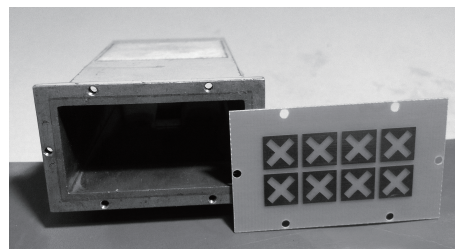


图 8 加工的吸波体实物及测试波导

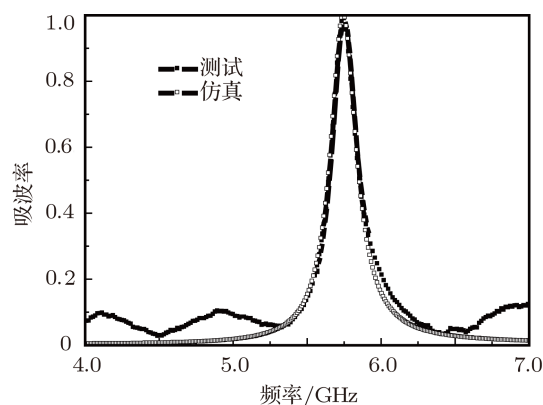


图 9 测量结果与仿真结果的比较

结果如图 12. 可以看出, 测试的方向图形状与仿真结果是比较一致的, 加载吸波材料后, 天线增益降低了 0.66 dB.

4.2.3 天线的散射

由于实验条件所限, 我们只能通过单个宽带单

脊波导喇叭(1—18 GHz)垂直照射天线得到的反射损耗曲线观察吸波材料对入射电磁波的吸收情况,如图 13. 天线加载金属地面和吸波材料地面的反射损耗曲线如图 14, 可以看到, 在 5.75 GHz 左右频带内, 相比金属地面, 喇叭天线照射加载吸波材料接地面的反射损耗有 5 dB 以上的降低, 这表明在该频带内吸波材料地面对入射波有强烈的吸收, 从而造成喇叭天线反射损耗有显著降低, 进一步证实了吸波材料对入射电磁波有良好的吸收效果, 可以降低天线的 RCS. 实验条件的不完备使得测试曲线不够光滑.

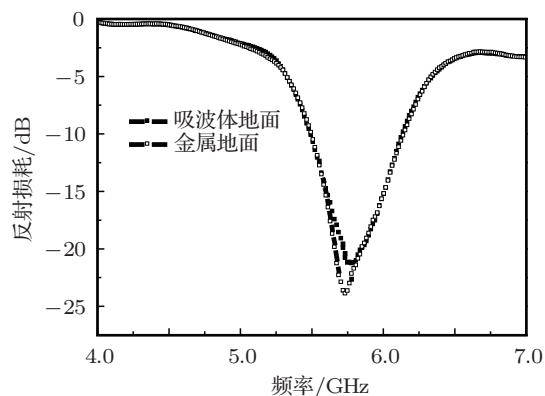


图 11 反射损耗测试曲线

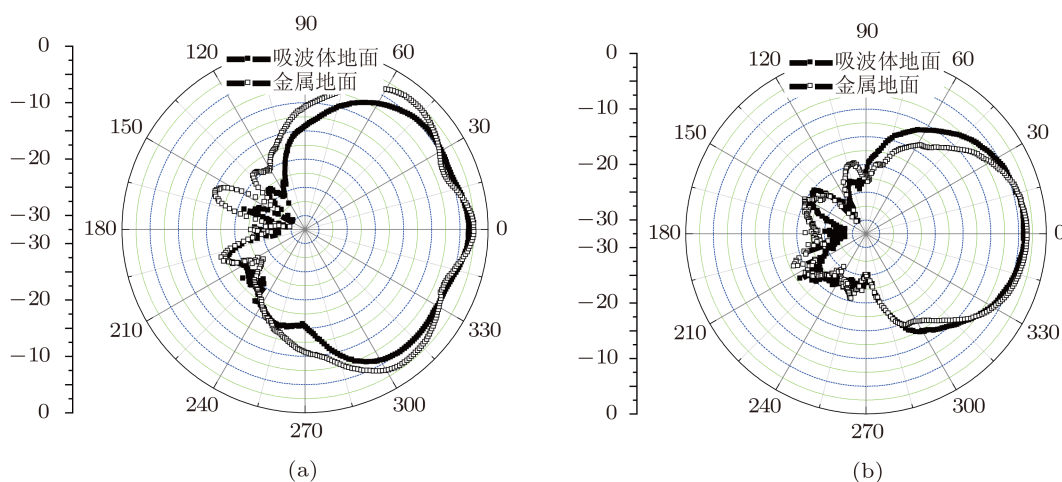


图 12 测试方向图比较 (a) E 面; (b) H 面

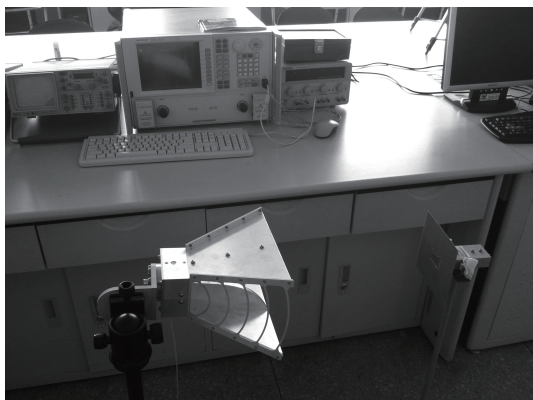


图 13 天线散射测试配置

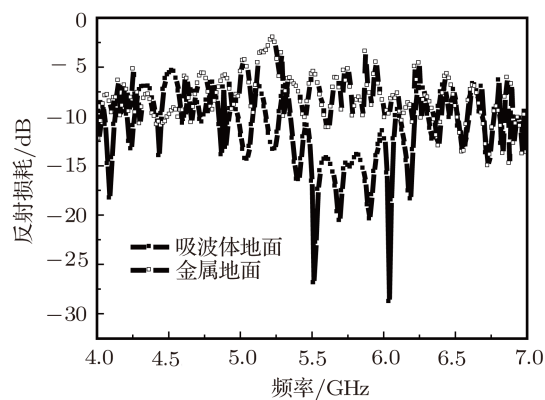


图 14 波导缝隙天线的反射损耗曲线

5 结论

基于超材料电磁谐振特性的“完美吸波材料”是一类新型的吸波材料, 相比已有吸波材料, 它具有高吸波率、极化稳定、宽入射角、超薄和加工简单的特点, 在隐身领域具有潜在的应用价值. 本文设计了一种此类新型的吸波材料, 吸波率达到 99.1%, 厚度只有约 0.01λ . 将其应用与波导缝隙

天线的 RCS 减缩, 在 5.48—5.7 GHz 工作频段内, 天线雷达散射截面减缩都在 3 dB 以上, 在鼻锥方向的 -25° — $+25^\circ$ 范围的角度上, 天线 RCS 减缩均在 5 dB 以上, RCS 减缩最大超过 12 dB, 而天线前向增益仅降低了 0.53 dB. 实验结果与仿真结果符合得较好, 证实了该吸波体具有好的天线 RCS 减缩效果, 这对推动此类新型吸波材料在电磁隐身领域的应用具有重要的意义.

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Hu T, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla W J, Averitt R D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103
- [3] Marcus D, Thomas K, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033101
- [4] Luukkonen O, Filippo C, Agostino M, Sergei A T 2009 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **57** 3119
- [5] Zhu B, Wang Z, Huang C, Feng Y, Zhao J, Jiang T 2010 *Progress in Electromagnetics Research* **10** 231
- [6] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [7] 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]
- [8] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R 2011 *Opt. Lett.* **36** 945
- [9] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [10] Hu T, Bingham C M, Pilon D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [11] Li M H, Yang H L, Hou X W, Tian Y, Hou D Y 2010 *Progress in Electromagnetics Research* **108** 37
- [12] Li H, Li H Y, Zhou B, Shen X P, Cheng Q, Cui T J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 014909
- [13] Ye Y Q, Jin Y, He S L 2010 *Opt. Soc. Am. B* **27** 498
- [14] Luo H, Wang T, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034204
- [15] Lee J, Lim S 2011 *Electron. Lett.* **47** 8
- [16] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B-I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [17] Fan J, Cai G Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6084 (in Chinese) [樊京, 蔡广宇 2010 物理学报 **59** 6084]
- [18] 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]
- [19] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Bai P, Peng W D, Lin B Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 柏鹏, 彭卫东, 林宝勤 2011 物理学报 **60** 087801]
- [20] Li Y Q, Fu Y Q, Yuan N C 2009 *Microwave and Optical Technology Letters* **51** 1175
- [21] Bao S, Luo C R, Zhao X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014101 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 赵晓鹏 2011 物理学报 **60** 014101]
- [22] Yang Y, Li L, Liang C H 2011 *Proceedings of Antenna Annual Conference of China, Nanjing, Oct. 18–21, 2011* p812 (in Chinese) [杨阳, 李龙, 梁昌洪 2011 全国天线年会 南京 p812]

Design of metamaterial absorber and its applications for waveguide slot antenna*

Liu Tao[†] Cao Xiang-Yu Gao Jun Zheng Qiu-Rong Li Wen-Qiang

(Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 1 February 2012; revised manuscript received 5 March 2012)

Abstract

A metamaterial absorber is designed and applied to the waveguide slot antenna. The absorber is composed of two metallic layers separated by a lossy dielectric spacer. The top layer consists of etched oblique cross-gap patch set in a periodic pattern and the bottom one is of a solid metal. By fine adjusting the geometric parameters of the structure, we can obtain a polarization-insensitive, wide-incident-angle ultra-thin absorber that has an absorption of 99.1% and a thickness of only 0.01λ . The absorber is applied to the waveguide slot antenna. The radar cross section (RCS) of antenna is reduced by 3 dB or more in the operation band from 5.48 GHz to 5.7 GHz, and by 5 dB or more in the boresight direction from -25° to $+25^\circ$, and the most reduction value exceeds 12 dB, but the forward gain of antenna reduces only 0.53 dB. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which verifies that the absorber has a good characteristic of RCS reduction and can be applied to the stealth of antenna.

Keywords: waveguide slot antenna, metamaterial, absorber, radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

* Project supported by the Postdoctor Foundation of China (Grant No. 20100481497), the Key Program of the Natural Science Foundation of Shannxi Province, China (Grant No. 2010JZ010), and the Natural Science Basic Research of Shannxi Province, China (Grant No. SJ08-ZT06).

[†] E-mail: lt9571@163.com