

基于超材料吸波体的低雷达散射截面微带天线设计*

杨欢欢[†] 曹祥玉 高军 刘涛 马嘉俊 姚旭 李文强

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2012年7月19日收到; 2012年10月22日收到修改稿)

设计了一种高吸波率、宽入射角、无表面损耗层的超材料吸波体,并将其用于微带天线的带内雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩. 实验结果表明: 设计的吸波体的厚度为 0.3 mm, 吸波率达 99.9%, 相比普通微带天线, 加载该吸波体后的天线在工作频带内法向 RCS 减缩都在 3 dB 以上, 最大减缩 16.7 dB, 单站 RCS 在 -30° — $+30^\circ$ 角域、双站 RCS 在 -90° — $+90^\circ$ 角域减缩超过 3 dB, 且天线辐射性能保持不变. 证实了该吸波体具有良好的吸波效果, 可以应用于微带天线的带内隐身.

关键词: 超材料吸波体, 微带天线, 雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.62.064103

1 引言

雷达吸波材料是有效吸收入射电磁波、显著降低目标回波强度的一类功能材料, 可以降低目标的雷达散射截面 (radar cross section, RCS), 从而提高其隐身性能. 传统的雷达吸波材料存在厚、重、稳定性差等缺点, 其应用受到了限制. 因此, 寻求和设计更适用的高性能吸波材料一直是材料学研究的热点. 2002年, Engheta^[1] 基于超材料 (metamaterial, MTM) 的亚波长结构可以突破物质本征自然规律限制的特征, 首次提出由 MTM 获得超薄吸收材料的思想, 并用含损耗的频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 加以实现, 但设计方法烦琐, 很难推广应用. 随后, 研究人员^[2,3] 又提出利用 MTM 的同相反射特性, 通过在材料表面加载集总电阻实现了超薄吸波结构, 但其加工工艺复杂, 也不利于实际应用. 2008年 Landy 等^[4] 基于 MTM 的电磁耦合谐振特性, 首次提出了由电谐振器、损耗型介质和金属微带线构成的具有“完美”吸收特性的吸波体. 与传统吸波材料和文献^[1—3] 设计的吸波体相比, 它具有结构简单、超薄超轻、无表面损耗层且易实现红外^[5] 及太赫兹频段^[6] 吸

波的特点, 因此该类吸波材料引起了科研人员的广泛关注并积极展开研究, 各种极化不敏感^[7-9]、宽入射角^[10-12]、多频段^[13-15] 和宽频带^[16,17] 的 MTM 吸波体不断被提出, 但对其应用的研究相对较少. 近来, 文献^[18, 19] 指出此类吸波体可以提高微带天线的辐射性能, 而吸波材料更常见的应用在于改善目标的散射性能, 但已有文献并没有就该特性进行分析.

天线的 RCS 减缩是目标隐身技术中的一个关键问题, 其难点在于减缩 RCS 的同时还必须保证天线最基本的辐射性能^[20,21]. 对天线的带外隐身, FSS 雷达天线罩已经可以很好地解决, 但对天线带内隐身来说, FSS 却不是一种有效的方法, 因此解决天线带内隐身是当前工程领域迫切的一项课题. 基于以上背景, 本文设计了一种厚 0.3 mm 的超材料吸波体, 并将其加载于微带天线周围, 利用该吸波体高吸波率和无表面损耗层的特点, 制备了一种兼有低带内 RCS 和良好辐射性能的微带天线. 仿真和实测结果均表明: 将设计的具有良好吸波效果的吸波体加载于微带天线后, 天线的辐射性能保持不变, 而其带内 RCS 在宽角域内得到显著降低.

* 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) 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.

[†] 通讯作者. E-mail: jianye8901@126.com

2 超材料吸波体设计与分析

设计的结构如图 1 所示, 图 1(a), (b) 分别为吸波体的正面、侧面视图. 该吸波体由三层构成: 上层挖空的方形金属片、底层的金属背板及间隔的损耗介质层. 其中, 金属均为铜, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ s/m, 介质层为 FR4, 介电常数 $\epsilon_r = 4.4$, 损耗角正切 $\tan \delta = 0.02$. 单元周期 $W_1 = 10$ mm, 金属贴片边长 $W_2 = 9.6$ mm, 挖去倾斜角为 45° 的方形边长 $W_3 = 4.2$ mm, 介质厚度 $h = 0.3$ mm (约为 0.0057λ , λ 是 5.64 GHz 对应的自由空间波长). 上层的金属片构成电谐振器, 并与底层的金属背板形成磁谐振器. 设计这种结构, 一是电、磁谐振器中心对称可以消除吸波的各向异性 [22], 二是全金属背板在保证透射率为零 (即 $|S_{21}|^2 = 0$) 的同时简化了加工工艺.

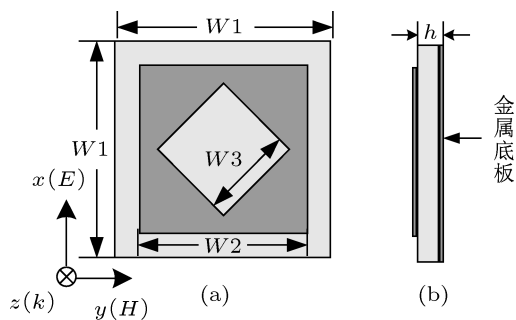


图 1 超材料吸波体单元示意图 (a) 正视图; (b) 侧视图

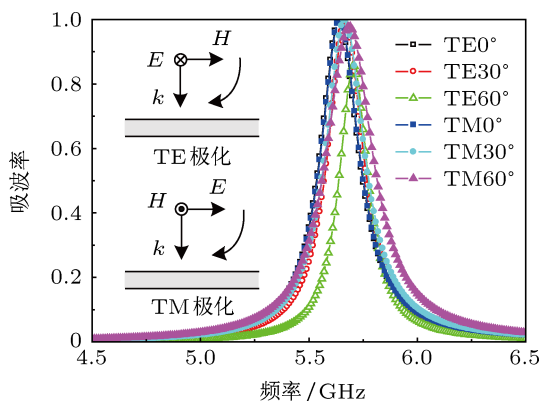


图 2 吸波率随入射角的变化

采用基于有限元法的软件 Ansoft HFSS 进行仿真, 得到 TE 和 TM 极化的入射波随入射角变化对吸波率 A ($A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2$) 的影响, 如图 2. 可以看出, 垂直入射时, 吸波率大于 50% 的带宽为 210 MHz, 在 5.64 GHz 达 99.9%, 入射角增大到 60° 时, 虽然吸波率有所降低, 但仍保

持在 85% 以上, 且对应的频率变化很小, 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, 因而可将其用于不同极化和宽角域的天线 RCS 减缩.

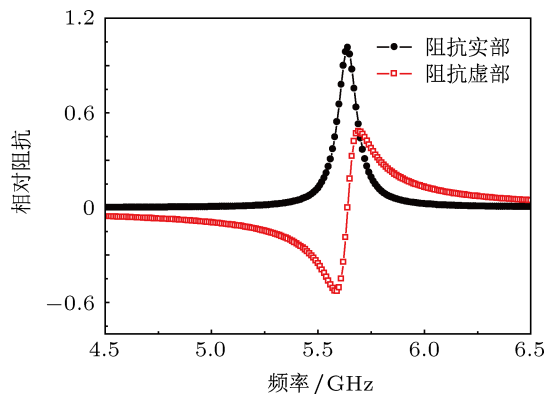


图 3 相对阻抗

吸波材料实现吸波必须具备两个条件, 即阻抗匹配和损耗特性. 对于设计的吸波体, 根据文献 [23] 的结论, 其相对阻抗 z 可由下式得到:

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (1)$$

等效折射率 n 为

$$n = \frac{1}{kh} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right], \quad (2)$$

其中, k 为波数, h 为吸波体厚度. 根据 (1) 式计算得到电磁波垂直入射时的相对阻抗如图 3, 5.64 GHz 时阻抗的实部近似为 1, 虚部接近为 0, 表明吸波体与自由空间实现了良好的阻抗匹配, 因而使反射波很小. 同时, 吸波体底层连续的金属薄膜保证了透射为零, 这样入射波只能被吸波体吸收. 同样由于 $S_{21} = 0$, 吸波体的等效折射率 n ($n = n_1 + in_2$) 不能由 (2) 式直接计算求得, 但折射率与散射参数之间满足下式 [13]:

$$e^{inkh} = e^{in_1kh} \cdot e^{-n_2kh} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}(z-1)/(z+1)}, \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 为使等式右边为 0, 折射率的虚部 n_2 应当非常大, 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 [13].

此外, 图 4 给出的吸波体在 5.64 GHz 的表面电流分布表明: 入射电磁波的电场分量与上层贴片上下两端的金属臂产生了电谐振 [19,24], 在外电场驱动下, 电荷沿水平方向谐振, 电场主要集中在金属环左右两边; 入射电磁波的磁场分量穿透上层金属,

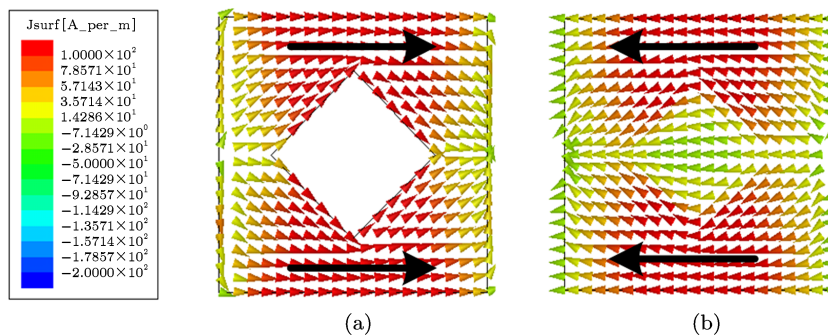


图4 电流分布图 (a) 金属贴片; (b) 金属底板

在上下两层金属之间产生垂直方向的磁谐振 [15], 相应地在上层金属贴片的上下端及对应的金属底板上激发出反向平行的电流, 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].

所设计吸波体的超薄特性, 直接将吸波体敷贴在微带天线的辐射贴片周围, 并与贴片保持一定的距离, 此时保证天线正常辐射, 而入射到天线上的电磁波则被吸波体吸收.

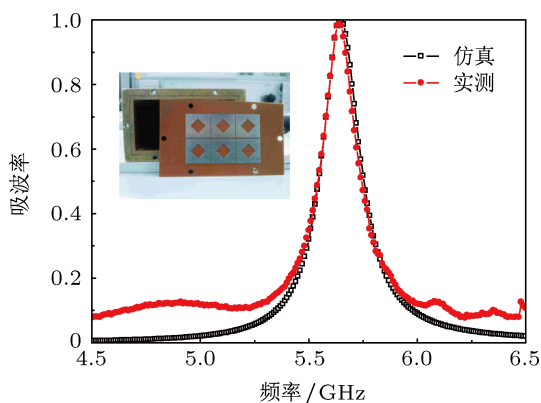


图5 吸波率实测仿真对比

为验证仿真结果的正确性, 利用电路板刻蚀技术制作了吸波体样件, 其实物如图 5 中插图, 采用波导法 [25] 测试了其 S_{11} , 并由公式 $A = 1 - |S_{11}|^2$ 得到了吸波率. 馈电波导采用 C 波段的标准波导 (国标型号: WJB-58), 宽边长 40.4 mm, 窄边长 20.2 mm, 矢量网络分析仪为 Agilent N5230C. 图 5 对比给出了实测与仿真 (设置与测试方法一致) 的吸波率曲线, 可以看出, 两者符合较好, 证实了该吸波体确实有较好的吸波效果, 可以用于天线的 RCS 减缩.

3.1 天线的辐射性能

以普通的微带天线为参考, 加载吸波体后得到的设计天线如图 6 所示. 天线贴片尺寸为 $20 \text{ mm} \times 15.4 \text{ mm}$, 介质板为聚四氟乙烯, 介电常数为 2.65, 厚 1 mm, 天线整体尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 超材料吸波体的参数与上节中描述相同, 吸波体的吸波频带覆盖了天线的工作带宽.

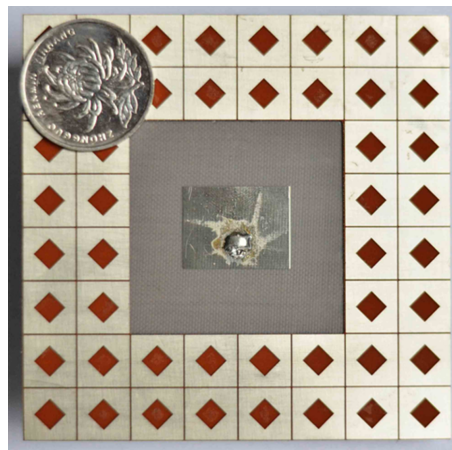


图6 设计微带天线实物图

3 加载超材料吸波体减缩微带天线 RCS

微带天线的散射包括结构项散射和模式项散射, 加载超材料吸波体减缩天线带内 RCS 主要是减小其结构项散射 (峰值常在天线法线方向). 利用

利用吸波材料减缩天线带内 RCS 的难点在于不降低天线辐射性能. 图 7 和图 8 比较了加载吸波体前后天线辐射性能的仿真结果和用矢量网络分析仪 (Agilent N5230C) 及远场测量法测试的结果. 从图 7 看到, 加载吸波体后微带天线的反射系数基本没有变化, 仿真和实测结果符合较好. 由于两天线实测的谐振频率都为 5.66 GHz, 图 8(a), (b) 比较

了该频点的辐射方向图,可以看出,图6的加载方式对天线方向图几乎没有影响,仿真与实测结果一致,其中略微的差异是由加工误差和测试环境造成的.

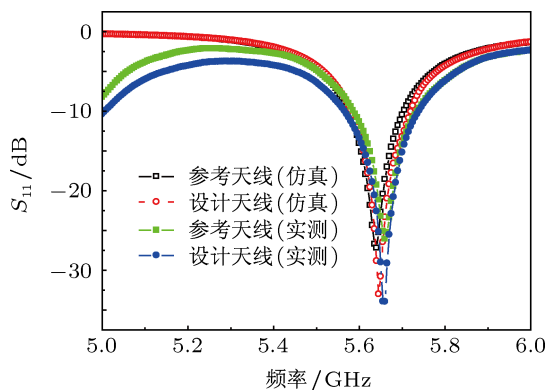


图7 天线的反射系数

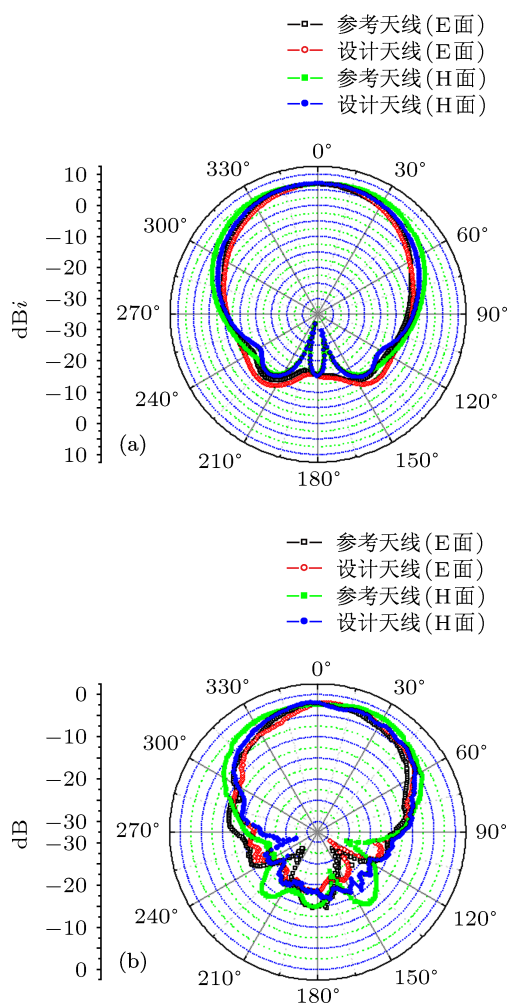


图8 天线的方向图 (a) 仿真; (b) 实测

3.2 天线的散射性能

图9(a)—(c)分别给出了TE和TM极化的平面波垂直入射和斜入射情况下天线法向的RCS.从图中可知,垂直入射时,在5—6GHz频段内,设计天线的RCS较参考天线均有减缩,两种极化下RCS最大减缩分别达16.7dB和14.3dB,在5.58—5.73GHz减缩均在3dB以上;当入射角 θ 分别为45°和60°时,对于TE极化,设计天线的RCS分别在5.6—5.89GHz和5.55—5.79GHz减缩超过3dB,对

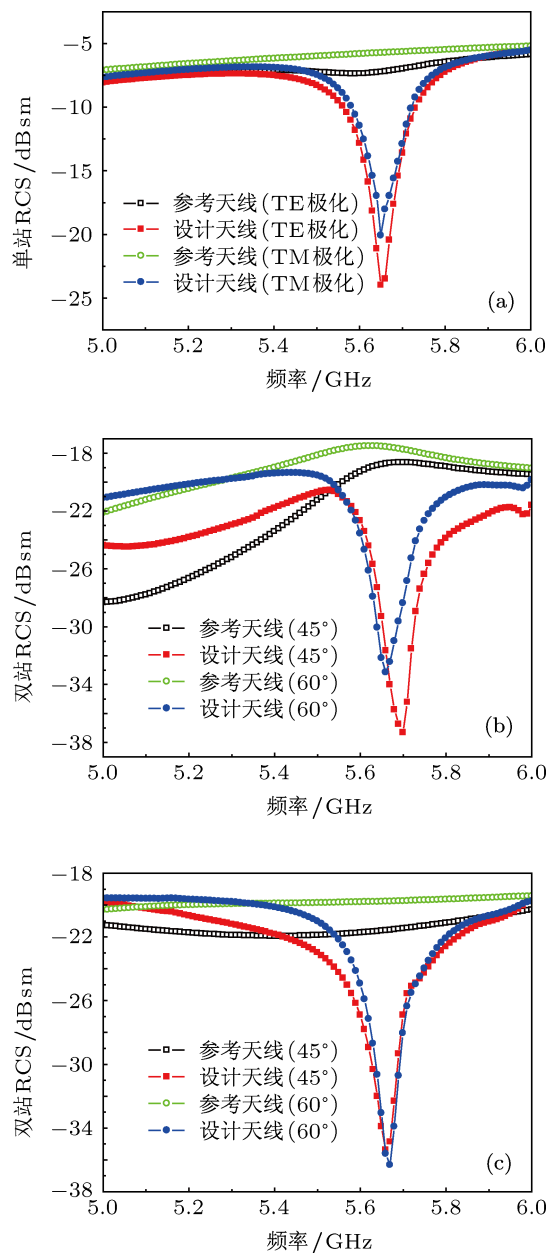


图9 两天线 RCS 随频率变化对比 (a) 垂直入射; (b) TE 极化斜入射; (c) TM 极化斜入射

于 TM 极化, RCS 减缩达 3 dB 以上的频段分别为 5.57—5.75 GHz 和 5.57—5.78 GHz. 从以上结果看出, 无论单站还是双站 RCS, 其减缩频带都完全覆盖了天线工作带宽, 且与超材料吸波体的吸波频带 (5.58—5.73 GHz) 一致, 说明 RCS 的减缩是由加载吸波体引起的. 此外, 天线对不同极化和斜入射波的 RCS 减缩结果同样验证了设计吸波体的极化和角度稳定性.

图 10(a) 为 TE 和 TM 极化的平面波从不同角度入射时, 天线在 5.66 GHz 的单站 RCS 曲线, 可以看出, 两种极化下设计天线较参考天线 RCS 减缩最大分别达 14.1 dB 和 13.2 dB, 且在 -30° — $+30^\circ$ 角域减缩均超过 3 dB. 图 10(b) 是在 5.66 GHz 不同极化的平面波垂直入射时, 天线在各个角度的 RCS, 可以看到, 在 -90° — $+90^\circ$ 角域, 设计天线的 RCS 均低于参考天线. 单站和双站 RCS 随角度变化的结果表明: 设计天线在较宽角域内保持了低 RCS 特性, 法向的 RCS 峰值得到显著降低. 这一结果也验证了设计吸波体的宽入射角和高吸波率特性.

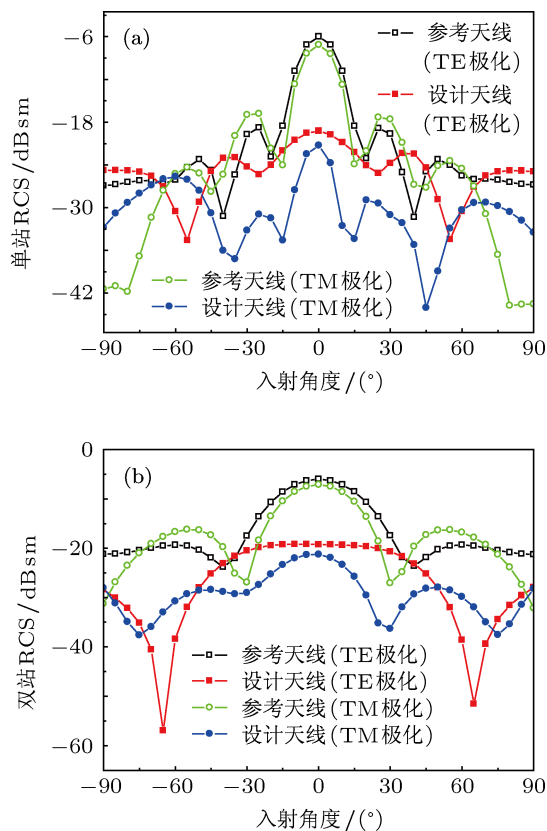


图 10 两天线 RCS 随角度变化对比 (a) 单站; (b) 双站

为证实吸波体对天线结构项散射的减小效果, 对加工的参考天线和设计天线均加载了匹配负载, 在开放的空间中, 用工作频段为 4.90—7.05 GHz 的喇叭天线分别照射加载后的两天线, 并通过矢量网络分析仪 Agilent N5230C 观察电磁波垂直入射时天线的反射率. 由于天线整体尺寸较小, 考虑到测量系统精度, 把待测天线放置在距喇叭天线 0.6 m 处, 此时入射波可近似看作平面波. 从图 11 中的测量结果看到, 加载吸波体后天线的反射率在 5.56—5.75 GHz 下降达 3 dB 以上, 下降最大达 10.6 dB, 实测结果与仿真得到的天线 RCS 减缩效果基本一致. 图中曲线的抖动主要是由测试条件的不完备造成的.

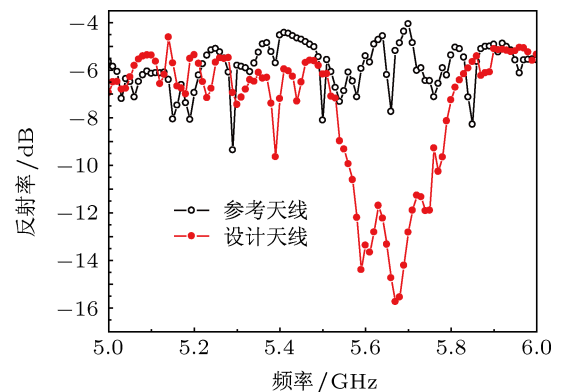


图 11 反射率测试结果

4 结论

本文设计了一种极化稳定、宽入射角的超材料吸波体, 并利用其超薄、高吸波率和无表面损耗层的特点, 提出将该吸波体用于微带天线的带内 RCS 减缩. 实验结果表明: 设计的吸波体厚度仅为 0.3 mm, 吸波率高达 99.9%, 与普通微带天线相比, 加载该吸波体后的天线辐射性能保持不变, 而其带内 RCS 对不同极化的入射波在较宽角域内都有较好的减缩效果, 这对研究微带天线带内 RCS 减缩具有重要的参考价值. 此外, 由于直接将超薄的超材料吸波体敷贴在天线周围, 不需对现有天线结构做任何改动, 因而该结构具有较好的工程实用性. 但同时也看到, 本文设计的吸波体带宽还较窄, 未来的研究将集中于增加其吸波带宽, 以实现宽带天线的带内 RCS 减缩.

- [1] Engheta N 2002 *IEEE Trans. Anten. and Propag. Society (AP2S) Int. Symp. and USNC/URSI National Radio Science Meeting* San Antonio, TX, USA 2012 p16
- [2] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q, Yuan N C 2008 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **7** 473
- [3] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2010 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **58** 1551
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [5] Liu N, Mesh M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342
- [6] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Zhou H, Wang J F 2010 *Prog. Electromag. Res. Lett.* **17** 171
- [7] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [8] 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]
- [9] Lee J Y, Yoon Y J, Lim S J 2012 *ETRI Journal* **34** 126
- [10] Marcus D, Thomas K, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033101
- [11] Luukkonen O, Filippo C, Agostino M, Sergei A T 2009 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **57** 3119
- [12] Wang B N, Koschny T, Soukoulis C M 2010 *Phys. Opt.* **24** 1
- [13] He X J, Wang Y, Wang J M, Gui T L 2011 *Prog. Electromag. Res.* **115** 381
- [14] Li H, Yuan L H, Zhou B, Shen X P, Cheng Q, Cui T J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 014909
- [15] 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]
- [16] Lee J, Lim S 2011 *Electron. Lett.* **47** 8
- [17] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 郑栋浩, 范越农, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]
- [18] Zhu Z K, Luo C R, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6152 (in Chinese) [朱忠奎, 罗春荣, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 6152]
- [19] 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]
- [20] 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]
- [21] Simone G, Filippo C, Agostino M 2012 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **60** 2327
- [22] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C 2007 *Phys. Rev. B* **75** 1102
- [23] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [24] Zhu W R, Zhao X P, Bao S, Zhang Y P 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 014204
- [25] Li L, Yang Y, Liang C H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702

Design of low-radar cross section microstrip antenna based on metamaterial absorber*

Yang Huan-Huan[†] Cao Xiang-Yu Gao Jun Liu Tao Ma Jia-Jun
Yao Xu Li Wen-Qiang

(Information and Navigation Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 19 July 2012; revised manuscript received 22 October 2012)

Abstract

A metamaterial absorber with high absorptivity, wide incident angle and no surface ullage layer is designed and applied to microstrip antenna to reduce its radar cross section (RCS). The results show that the absorber can exhibit an absorption of 99.9% with a thickness of 0.3 mm. Compared with the conventional microstrip antenna, the proposed antenna has an RCS reduction of more than 3 dB in the boresight direction in the working frequency band, and the largest reduction can reach 16.7 dB, the monostatic and bistatic RCS reduction are over 3 dB from -30° to $+30^\circ$ and -90° to $+90^\circ$ respectively, while the radiation performance is kept, which proves that the absorber has an excellent absorptivity and could be applied to microstrip antennas to achieve in-band stealth.

Keywords: metamaterial absorber, microstrip antenna, radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.62.064103

* 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 Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant Nos. SJ08-ZT06, 2012JM8003).

[†] Corresponding author. E-mail: jianye8901@126.com