物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计

李文惠 张介秋 屈绍波 袁航盈 沈杨 王冬骏 过勐超

Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber

Li Wen-Hui Zhang Jie-Qiu Qu Shao-Bo Yuan Hang-Ying Shen Yang Wang Dong-Jun Guo Meng-Chao

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 64, 084101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084101
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084101
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导缝隙阵列天线
Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber
物理学报.2015, 64(9): 094102 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094102

二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证
Design and verification of a two-dimensional wide band phase-gradient metasurface
物理学报.2015, 64(9): 094101 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094101

共享孔径人工电磁媒质设计及其在高增益低雷达散射截面天线中的应用
Design of shared aperture metamaterial and its applications for high gain and low radar cross section antenna
物理学报.2015, 64(5): 054101 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054101

基于多导体传输线理论的差模激励新型线束串扰模型研究
New differential-mode-source cable bundle crosstalk model based on multiconductor transmission lines theory
物理学报.2015, 64(4): 044102 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044102

磁电耦合超材料本构矩阵获取方法的研究
A method of retrieving the constitutive parameter matrix of magnetoelectric coupling metamaterial
物理学报.2015, 64(4): 044101 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044101

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计*

李文惠 张介秋† 屈绍波 袁航盈 沈杨 王冬骏 过勐超

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2014 年 9 月 20 日收到; 2014 年 10 月 26 日收到修改稿)

利用加载集总电阻的方式设计出一种极化稳定且宽入射角的宽带超材料吸波体 (wide-band metamaterial absorber, WBMA), 在平面波垂直入射时, 其吸波半波功率带宽达 12.7 GHz, 吸波率大于 90% 的带宽达 10.42 GHz, 峰值吸波率达 99.9%. 将其与微带天线共基板共接地板的方式加载, 制备出 WBMA 微带天线, 实现了天线宽频域内雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 大幅缩减. 仿真与实测结果表明: 将 WBMA 加载于微带天线后, 天线的前向增益提高了 0.53 dB, 整体辐射特性基本保持不变; 在不同极化波下, 天线的工作频带带内和带外等宽频域 (6.95—17.91 GHz) 内的单站 RCS 缩减大于 3 dB 以上, 最大缩减值达 21.2 dB; 在天线的中心频点 8 GHz 处 ±48° 的宽角域内, 双站 RCS 缩减效果明显, 很好地实现了天线的宽频域大角度的隐身设计.

关键词: 宽带超材料吸波体, 微带天线, 雷达散射截面缩减

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Ba, 73.20.Mf **DOI:** 10.7498/aps.64.084101

1 引 言

2002 年, Engheta [1] 基于超材料的奇异特性首次提出了超材料吸波体的设计理念. 时隔 6 年, Landy 等 [2] 根据超材料的电磁谐振特性, 首次成功制备出一种基于超材料媒质的“完美超材料吸波体”, 其吸波峰值接近 100%, 从而引起了国内外研究人员的极大兴趣. 随着研究的不断深入, 各种极化稳定 [3,4]、宽入射角 [5,6]、双频/多频带 [7,8] 和宽频带等 [9,10] 特性的超材料吸波体相继被提出, 并被作为一种新型雷达吸波材料而广泛应用于探测器、目标隐身及天线雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 缩减设计等 [11−14].

微带天线由于具有低剖面、体积小、重量轻、方便加工且易于共形等优点 [15] 而被广泛运用于飞行器的通信系统中, 然而作为信号的发射与接收装置, 天线的辐射却大大增加了飞行器的 RCS, 从而降低了飞行器的隐身性能. 因此, 如何缩减天线的 RCS 成为飞行器隐身设计的关键 [16−18]. 刘涛等 [19] 首次提出了一种交叉缝隙结构的完美吸波体, 通过将吸波体粘贴在波导缝隙天线四周, 利用吸波体的吸波频带与天线的工作频带重合特性, 实现了天线的带内 RCS 缩减. 随后, 研究人员相继设计出各种单一频带的吸波体, 并分别加载于微带天线及倾斜波束天线 [20,21] 四周, 成功实现了天线带内 RCS 的大幅缩减. 然而, 上述文献中所提到的吸波体由于其吸波频带均较窄, 与天线共形后 RCS 缩减范围也都仅局限于天线的工作频带范围内. 同时, 文献中的吸波体均采用人工胶沾贴敷的方式与天线共形, 工艺复杂且容易引入人为误差. 因此, 如何同时实现天线工作频带带内与带外等宽频域

* 国家自然科学基金 (批准号: 61331005, 61471388, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023)、中国博士后科学基金 (批准号: 2013M532131, 2013M532221)、航空科学基金 (批准号: 20123196015, 20132796018) 和陕西省基础研究计划 (批准号: 2013JM6005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangjiq0@163.com

© 2015 中国物理学会 Chinese Physical Society

内RCS的缩减及天线与吸波体的一体化共形成为提高飞行器隐身设计的关键.

基于以上背景, 本文通过加载集总电阻的方式设计出一种极化稳定且宽入射角的宽带超材料吸波体(wide-band metamaterial absorber, WBMA). 在平面波垂直入射时, 其吸波半波功率带宽达12.7 GHz, 吸波率大于90%的带宽达10.42 GHz, 峰值吸波率达99.9%. 将其与微带天线共基板共接地板的方式加载, 制备出WBMA天线. 仿真与实测结果表明: 将WBMA加载于微带天线后, 天线的前向增益提高了0.53 dB, 整体辐射特性基本保持不变. 其工作频带带内外等宽频域内的RCS均得到了显著的缩减, 很好地实现了天线的宽频域隐身设计.

2 WBMA设计与分析

本文所设计的WBMA单元结构如图1所示, 由上层加载集总电阻的开口金属方环、中间有耗介质基板和底层全金属背板组成. 其中金属部分为铜, 电导率$\sigma = 5.8\times10^7$ s/m, 介质基板采用Rogers 4003, 介电常数为3.38, 损耗角正切为0.0027. 该WBMA结构吸波特性主要是依赖金属结构的电磁谐振和集总电阻的热损耗, 通过调节各部分的结构参数使WBMA结构在谐振频点处的等效介电常数$\varepsilon_{\rm r}$与等效磁导率$\mu_{\rm r}$近似相等. 此时, 吸波体与自由空间近似阻抗匹配, 使入射电磁波的反射率最小. 为使吸收最大, 还需抑制透射传输, 使得入射波的能量被基板的介质损耗和金属的欧姆损耗消耗掉. 而加入集总电阻使谐振产生的表面电流流经集总电阻后产生热损耗, 吸收更多的入射电磁波能量, 进而拓宽了吸波体的吸波频带, 实现宽带吸波.

根据等效理论[22,23]可知, 吸波体的反射率$R(\omega) = |S_{11}|^2$, 透射率$T(\omega) = |S_{21}|^2$, 则吸波体的吸波率$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$(其中, S_{11}为反射系数, S_{21}为传输系数). 对于加载全金属接地板的吸波体, 其透射率$T(\omega) = 0$. 因此, 该吸波体的吸波率$A(\omega)$可简化为$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$. 令吸波体的相对阻抗$Z(\omega) = Z_{\rm Re}(\omega) + {\rm i}Z_{\rm Im}(\omega)$(其中, $Z_{\rm Re}(\omega)$为相对阻抗实部, $Z_{\rm Im}(\omega)$为相对阻抗虚部). 当自由空间的平面波垂直入射时, 其表面反射率$R(\omega) = \dfrac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0}$(其中$Z_0$为自由空间的相对阻抗, 且$Z_0 = 1$). 因此, 要使吸波率$A(\omega) = 1$, 则反射率$R(\omega) = 0$, 即$Z(\omega) = Z_0 = 1$, 则

$$\begin{cases} Z_{\rm Re}(\omega) = 1, \\ Z_{\rm Im}(\omega) = 0, \end{cases} \tag{1}$$

此时$\varepsilon_{\rm r} = \mu_{\rm r}$. 因此, 要使吸波体的吸波率$A(\omega)$越大, 其相对阻抗实部$Z_{\rm Re}(\omega)$应越接近于1, 虚部$Z_{\rm Im}(\omega)$应越接近于0. 而WBMA的表面阻抗$Z(\omega)$的大小与吸波体的结构参数和集总电阻的阻值相关, 可通过优化仿真得到最佳值, 使吸波体的吸波频带最宽.

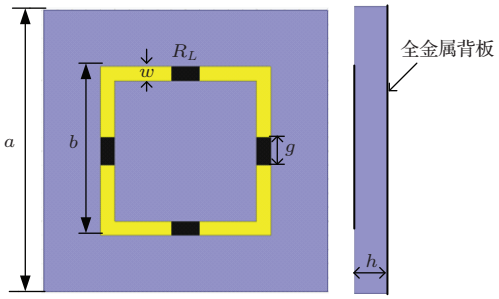


图1 (网刊彩色) WBMA单元结构

Fig. 1. (color online) The structure of WBMA unit.

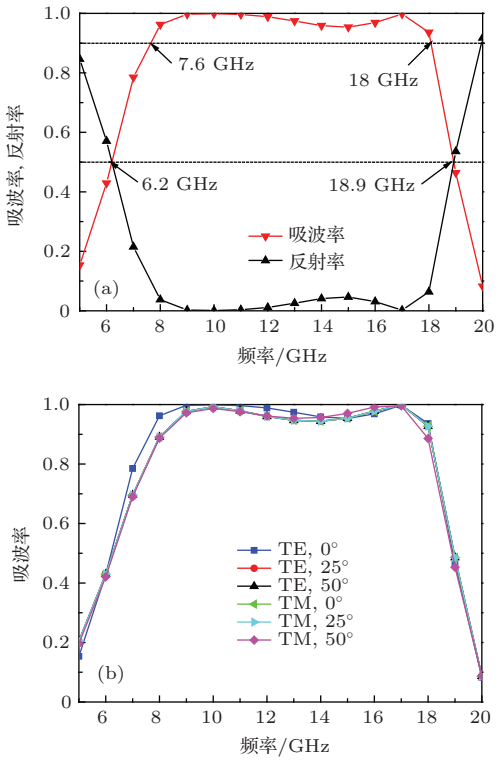


图2 (网刊彩色) WBMA单元的吸波率、反射率曲线 (a) 吸波率和反射率的关系; (b) 不同极化波、不同入射角下的吸波率

Fig. 2. (color online) The curve of WBMA unit's absorptivity and reflectivity. (a) The relationship between absorptivity and reflectivity; (b) the absorptivity under different polarized waves with different incident angles.

本文采用基于有限元的Ansoft HFSS15.0软件对吸波体的结构进行仿真优化, 最终确定出最佳的结构参数: $a = 10$ mm, $b = 6.51$ mm, $w = 0.53$ mm, $g = 0.98$ mm, $h = 2.45$ mm, $R_L = 140\ \Omega$. 由仿真得到WBMA的吸波率与反射率之间的关系如图2 (a)所示, 吸波半波功率带宽达12.7 GHz (6.2—18.9 GHz), 吸波率大于90%的带宽达10.4 GHz (7.6—18 GHz), 吸波峰值达99.9%. 图2 (b)为仿真得到的不同极化波、不同入射角下吸波体的吸波性能. 由图2 (b)可知, 由于结构的轴对称性, 吸波体在横向电极化波(TE)和横向磁极化波(TM)下, 在0°—50°范围内都保持着很好的强吸波特性, 体现了WBMA 的极化稳定性和宽入射角特性.

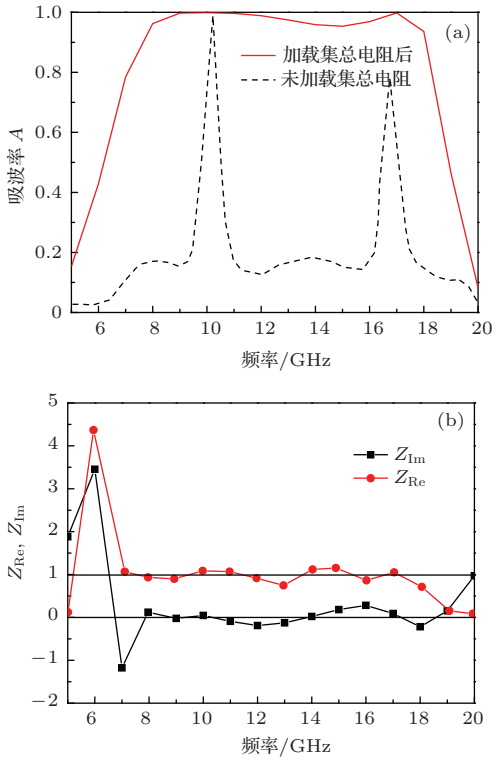


图3 (网刊彩色) WBMA的吸波率和阻抗曲线 (a)加载集总电阻前后吸波率的变化; (b)加载集总电阻后的相对阻抗

Fig. 3. (color online) The curve of WBMA's absorptivity and impedance. (a) The variation of the absorptivity before and after loading lumped resistance; (b) the relative impedance after loading lumped resistance.

图3 (a)给出了加载集总电阻前后吸波体吸波率的变化. 由图3 (a)可知, 加载了集总电阻后, 吸波频带被极大地拓宽, 究其原因主要是: 加载集总电阻后, 入射电磁波与吸波体结构在较宽的频带内产生强烈的电磁谐振并激励出感应电流, 这些电流流经集总电阻后, 被其以热损耗的形式消耗掉, 从而增强了吸波体的吸波能力, 拓宽了整个吸波频带. 而加载集总电阻后, 也促使了整个WBMA的表面等效阻抗在较宽的频带内与自由空间的相对阻抗相匹配, 如图3 (b)所示, 相对阻抗实部在7.6—18 GHz之间都在1附近波动, 而虚部则在0上下波动, 再次验证了(1)式的推导.

3 WBMA天线设计

3.1 WBMA天线结构设计

为了保持天线结构的紧凑性, 吸波体与微带天线采用共基板和共接地板方式加载. 同时, 为了保证加载吸波体后天线的辐射性能保持不变, 采取了在离天线辐射单元四周一定距离处刻蚀吸波体结构. 如图4所示, 天线尺寸为50 mm × 50 mm, 其基板与吸波体的基板一致. 天线工作频率为8 GHz, 根据经验公式可计算出天线辐射单元尺寸为11.42 mm × 7.46 mm, 而吸波体的尺寸与前面设计的一致. 天线采用同轴接头背馈式激励.

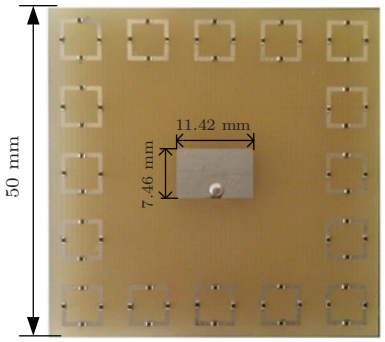


图4 (网刊彩色) WBMA天线结构图

Fig. 4. (color online) The structure of WBMA antenna.

3.2 仿真分析

3.2.1 辐射性能对比

利用Ansoft HFSS15.0软件分别仿真了加载WBMA前后天线的S_{11}曲线和辐射方向图. 由图5可知: 加载WBMA前后, 天线的工作频率几乎没有变化, −10 dB带宽约为380 MHz (7.81—8.19 GHz), 中心谐振频点为8 GHz.

图6给出了加载吸波体前后, 天线的E面和H面辐射方向图的对比情况. 由图6可见: 加载吸波体后, 天线的整体辐射特性基本保持不变, 而前向增益稍微提高了0.53 dB. 究其原因主要是, 采用共基板共接地板的方式加载WBMA后, 使得天线的接地板稍有扩大, 从而使其前向辐射增益提高.

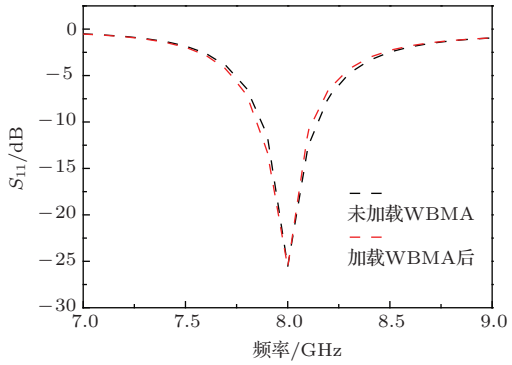


图5 (网刊彩色) 加载吸波体前后天线 S_{11} 曲线对比

Fig. 5. (color online) The comparison of the S_{11} between unloading and loading the absorber.

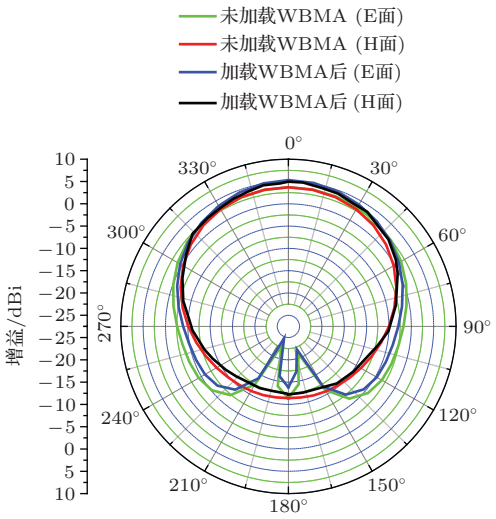


图6 (网刊彩色) 加载 WBMA 前后天线辐射方向图对比

Fig. 6. (color online) The comparison of the radiation pattern between unloading and loading the WBMA.

3.2.2 散射性能对比

图7给出了不同极化波下天线的单站RCS缩减的仿真结果. 从图7可以看出, 加载WBMA 后, 不管在TE和TM极化波下, 天线的RCS缩减3 dB以上的带宽均约为10.96 GHz (6.95—17.91 GHz), 不仅覆盖了天线的工作频带(7.81—8.19 GHz), 而且在天线工作频带外也实现了宽频域大幅度的缩减, 最大缩减值达21.2 dB (11.4 GHz处). 而在天线的工作频带内, 均有7 dB以上的缩减, 天线中心频点8 GHz处分别缩减了8.9 dB (TE波下)和8.5 dB (TM波下). 由此再次验证了WBMA的极化稳定性和宽频域高性能吸波特性. 图8给出了天线工作频率8 GHz 处双站RCS的缩减情况. 由图8可知: 在±48°范围内双站RCS均有大幅缩减, 再次验证了WBMA的宽角域吸波特性.

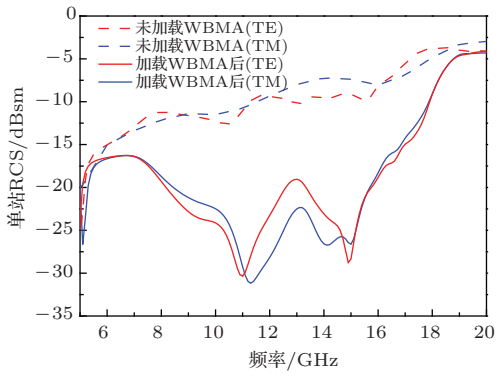


图7 (网刊彩色) 天线单站 RCS 仿真对比

Fig. 7. (color online) The comparison of antenna's monostatic RCS simulation results under different conditions.

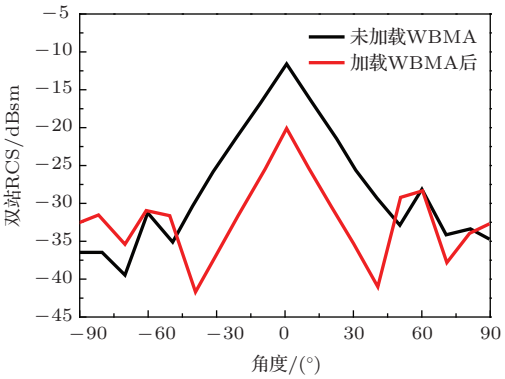


图8 (网刊彩色) 天线双站 RCS 仿真对比 (8 GHz)

Fig. 8. (color online) The comparison of antenna's bistatic RCS (8 GHz) simulation results between unloading and loading the WBMA.

4 实物加工和测量

为了验证设计和仿真的合理性, 本文采用了印制电路板的方式加工了WBMA天线, 如图4所示. 在微波暗室环境下(图9), 利用矢网仪(Anritsu

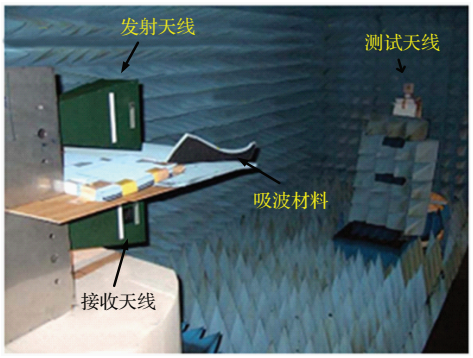


图9 (网刊彩色) 微波暗室测试现场

Fig. 9. (color online) The test environment of microwave anechoic chamber.

MZ7808 A) 测试WBMA天线的S_{11}曲线; 用两个宽带标准喇叭天线采用自由空间法测量天线的辐射方向图和RCS特性.

4.1 WBMA天线辐射性能测量

由图10可以看出, 加载WBMA后, 天线的实测工作频带和仿真频带基本相符, 天线的中心频点相比仿真时偏移了大约26 MHz, 分析其原因主要是由于基板介电常数偏差及测试误差所造成的. 图11为实测得到的天线的E面和H面辐射方向图. 由图11可知, 天线的实测方向图与仿真结果基本一致, 说明加载WBMA后, 对天线的辐射性能基本没有影响. 测试曲线的抖动主要是因为测量环境的误差造成.

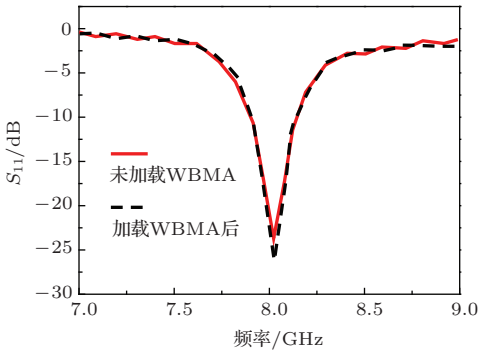


图10 (网刊彩色) WBMA天线S_{11}实测结果

Fig. 10. (color online) The measurement results of WBMA antenna's S_{11}.

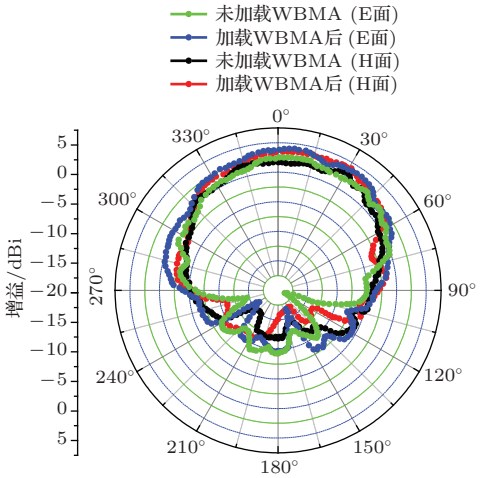


图11 (网刊彩色) WBMA天线实测辐射方向图

Fig. 11. (color online) The measurement results of WBMA antenna's radiation pattern.

4.2 WBMA天线RCS测量

图12为天线在TE和TM极化波下的单站RCS测试曲线. 由图12可知: 在不同极化波下, 相比参考天线, WBMA天线不仅在其工作频带范围内有7 dB以上的缩减, 在其工作频带外宽频域(7.1—17.8 GHz)内也均有大幅的缩减, 说明加载WBMA后其发挥了很好的吸波功效. 但实测的缩减频带范围略小于吸波体的半波功率带宽(6.2—18.9 GHz), 分析其原因主要是因为实际加工时吸波体只采用了单行单列, 而非仿真时的无限周期结构所造成的. 图13测试了在天线的中心频点8 GHz处天线的双站RCS特性. 由图13可以看出, 在±46°范围内, WBMA天线的RCS缩减明显, 实测结果与仿真结果基本一致. 由此可见, 加载WBMA后, 天线在较宽频域和较宽角域内RCS缩减效果明显, 很好地实现了天线在宽频域内的隐身效果.

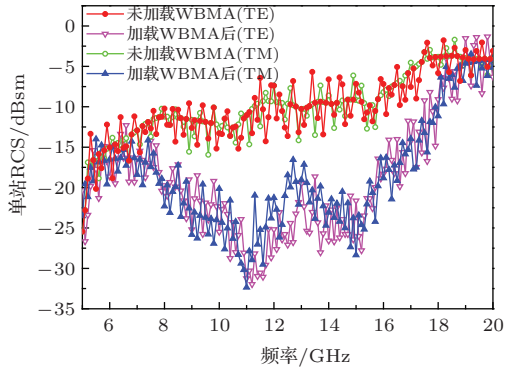


图12 (网刊彩色) WBMA天线单站RCS实测图

Fig. 12. (color online) The measurement results of WBMA antenna's monostatic RCS.

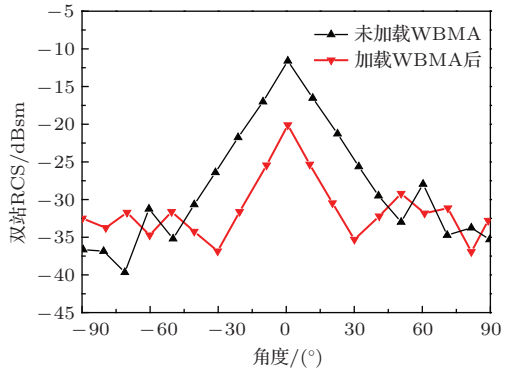


图13 (网刊彩色) WBMA天线的双站RCS实测对比(8 GHz)

Fig. 13. (color online) The measurement results of WBMA antenna's bistatic RCS (8 GHz).

5 结 论

本文利用加载集总电阻的方式设计出一种极化稳定且宽入射角的WBMA, 在平面波垂直入射时, 吸波半波功率带宽达12.7 GHz, 吸波率大于

90% 的带宽达 10.42 GHz, 峰值吸波率达 99.9%. 将其与微带天线共基板共接地板的方式共形, 制备出 WBMA 天线. 仿真与实测结果表明: 将 WBMA 加载于微带天线后, 天线的前向增益稍微提高了 0.53 dB, 整体辐射特性基本保持不变. 在不同极化波下, 天线的工作频带带内外等宽频域 (6.95—17.91 GHz) 内的单站 RCS 均得到了显著的缩减, 最大缩减值达 21.2 dB. 而双站 RCS 在 ±48° 范围内也有明显的缩减, 很好地实现了天线的宽频域大角度的隐身设计. 由于 WBMA 具有较宽频域内的高吸波特性, 因此, 亦可将其用于超宽带天线的隐身设计中.

参考文献

[1] Engheta N 2002 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting* San Antonio, USA, June 12–16, 2002 p16

[2] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402

[3] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 037801

[4] Ghosh S, Bhattacharyya S, Kumar V S 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 104503

[5] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131

[6] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177403

[7] Li H, Li H Y, Zhou B, Shen X P, Cheng Q, Cui T J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 014909

[8] Wang W J, Wang J F, Yan M B, Lu L, Ma H, Qu S B, Chen H Y, Xu C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174101 (in Chinese) [王雯洁, 王甲富, 闫明宝, 鲁磊, 马华, 屈绍波, 陈红雅, 徐翠莲 2014 物理学报 **63** 174101]

[9] Won H C, Jae H S, Tae H S, Woo Y L, Won J L, Chun G K 2014 *Electron. Lett.* **50** 292

[10] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801

[11] Pan W B, Huang C, Chen P, Ma X L, Hu C G, Luo X G 2014 *IEEE Trans. Antennas. Propag.* **62** 945

[12] Liu Y H, Zhao X P 2014 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **13** 1473

[13] Wang F W, Jiang W, Hong T, Xue H, Gong S X, Zhang Y Q 2014 *IET Microw. Antennas Propag.* **8** 491

[14] Yang S T, Ling H 2013 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **12** 35

[15] Zhang J, Liu K C, Zhang X F 1988 *The Theory and Engineering of Microstrip Antenna* (Beijing: National Denfence Industry Press) p2 (in Chinese) [张钧, 刘克诚, 张贤峄 1988 微带天线理论与工程 (北京: 国防工业出版社) 第 2 页]

[16] Chen H Y, Hou X Y, Deng L J 2009 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **8** 1231

[17] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2327

[18] Costa F, Genovesi S, Monorchio A 2012 *Progr. Electromagn. Res.* **126** 317

[19] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, 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]

[20] Miao Z L, Huang C, Zhao Q, Pu M B, Ma X L 2012 *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) International Conference* Shenzhen, China, May 5–8, 2012 p1

[21] 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]

[22] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104

[23] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617

Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber*

Li Wen-Hui Zhang Jie-Qiu† Qu Shao-Bo Yuan Hang-Ying Shen Yang
Wang Dong-Jun Guo Meng-Chao

(*College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

(Received 20 September 2014; revised manuscript received 26 October 2014)

Abstract

We design a wide-band metamaterial absorber (WBMA) with stable polarization and wide incident angle by loading a lumped resistance. The full-width at half-maximum of the absorber is 98%, the bandwidth of absorbing rate of more than 90% reaches 10.42 GHz, and the peak absorbing rate is 99.9% in the normal wave incidence. Loading the WBMA around the microstrip antenna by sharing the same substrate and ground plane, we fabricate the WBMA antenna, whose radar cross section (RCS) sharply decreases in the wide frequency range. Simulation and experimental results show that the antenna's radiation pattern is almost unchanged: just only the former gain improves 0.53 dB after loading the WBMA. Under different polarized waves, the antenna's monostatic RCS reduction is more than 3 dB within the working frequency band and beyond the working frequency band (6.95–17.91 GHz), the maximum value is 21.2 dB. The bistatic RCS decreases significantly from -48° to 48° at the middle working frequency (8 GHz), which well achieves the antenna stealth at the wide-band frequency and wide angle.

Keywords: wide-band metamaterials absorbing, microstrip antenna, radar cross section reduction

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Ba, 73.20.Mf **DOI:** 10.7498/aps.64.084101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 61331005, 61471388, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2013M532131, 2013M532221), the Aviation Science Foundation of China (Grant Nos. 20123196015, 20132796018), and the Fundamental Research Project of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM6005).

† Corresponding author. E-mail: zhangjiq0@163.com