

基于宽带吸波体的低雷达散射截面平面印刷磁电偶极子天线设计

兰俊祥 曹祥玉* 高军 郑月军 张晨

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文设计了一种工作于 X 波段的平面印刷磁电偶极子天线, 并设计了一种加载集总电阻的宽入射角、极化不敏感、宽频带吸波体(WBMA)。当平面波垂直入射时, 吸波体在 7.2~12.6 GHz 范围内的吸波率大于 90%, 入射角增加至 45° 时仍能在 X 波段保持 90% 以上的吸波率。通过将 WBMA 加载在天线四周, 实现了天线雷达散射截面(RCS)的大幅缩减。实测和仿真结果表明: 不同极化波垂直入射时, 天线单站 RCS 减缩 3 dB 带宽为 6.6~14.4 GHz, 最大减缩量达 23.8 dB。中心频点 10 GHz 处, TE 极化波照射时, 双站 RCS 能实现 $\pm 90^\circ$ 角域内的减缩, TM 极化波照射时, 在 $\pm 35^\circ$ 角域内实现了减缩, 同时天线辐射性能几乎保持不变。

关键词: 磁电偶极子天线; 雷达散射截面; 宽带吸波体; X 波段

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1122-08

DOI: 10.11999/JEIT170721

Low Radar Cross Section of Planar Printed Magneto-electric Dipole Antenna Based on Wide-band Metamaterial Absorber

LAN Junxiang CAO Xiangyu GAO Jun ZHENG Yuejun ZHANG Chen

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

Abstract: A broadband planar printed Magneto-Electric (ME) dipole antenna and a Wide-Band Metamaterial Absorber (WBMA) with polarization-insensitive and wide-angle absorption are designed for X band application. The absorber exhibits absorptivity above 90% from 7.2 GHz to 12.6 GHz under normal incidence. When the incident angle increases to 45° , the absorptivity is still above 90% at X band. By applying the absorber around the antenna, the RCS of antenna is reduced significantly. Simulated and experimental results show a monostatic RCS reduction above 3 dB from 7.2 GHz to 12.6 GHz, and the peak reduction is up to 23.8 dB under different polarized waves. At the center working frequency of 10 GHz, the bistatic RCS decreases significantly from -90° to $+90^\circ$ under TE polarized wave and from -35° to $+35^\circ$ under TM polarized wave while the radiation performance remains unchanged basically, which proves that the absorber has great absorptivity.

Key words: Magneto-Electric (ME) dipole antenna; Rader Cross Section (RCS); Wide-Band Metamaterial Absorber (WBMA); X band

1 引言

磁电偶极子天线是由 Luk 等人^[1]于 2006 年首次提出, 这种天线是把一个磁偶极子和一个电偶极子结合在一起, 通过两个互补型方向图的叠加实现了 E 面、H 面几乎完全重合的磁电偶极子天线设计。磁电偶极子天线以其宽带、低后瓣、宽半功率波瓣宽度等优势, 尤其是其 E 面和 H 面辐射方向图可以

保持稳定、一致的特性, 在近些年得到了快速发展。各种类型的磁电偶极子天线不断被提出^[2-4], 贴片型磁电偶极子天线的设计与实现, 给减缩其雷达散射截面(Rader Cross Section, RCS)提供了新的思路, 文献[5]通过加载人工磁导体材料, 并与天线共形, 有效地减缩了天线带内外的 RCS。文献[6]通过在接地板上开槽, 有效减缩了其带内的 RCS。

2002 年, Engheta^[7]基于亚波长结构可以突破物质本征自然规律特性的限制, 首次提出了超材料吸波体的设计概念与思想。2008 年 Landy 等人^[8]根据超材料的电磁谐振特性, 首次成功设计并制作出一种基于超材料媒质的“完美超材料吸波体”, 从而引起了国内外研究人员的广泛关注。随着宽入射角^[9,10], 极化不敏感^[11,12], 宽频带^[13-16]等具有良好特

收稿日期: 2017-07-19; 改回日期: 2017-12-21; 网络出版: 2018-01-29

*通信作者: 曹祥玉 gigi9694@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271100, 61471389, 61501494), 陕西省自然科学基金(2017JM6025)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271100, 61471389, 61501494), The Natural Science Foundational of Shannxi Province (2017JM6025)

性的完美吸波体的相继出现，其应用范围也得到了扩展。

宽带吸波体 (Wide-Band Metamaterial Absorber, WBMA) 已被设计并应用于微带天线的 RCS 减缩^[7]，但在宽带天线上的应用相对较少。本文设计了一种极化稳定且宽入射角的 WBMA，其吸波率大于 90% 的带宽覆盖了整个 X 波段。通过共形的方式，将其加载在宽带磁电偶极子天线周围，设计制作了 WBMA 磁电偶极子天线。仿真与实测结果表明：通过加载这种新型 WBMA，在天线的工作频段内，RCS 有了明显的减缩，最大减缩量达 23.8 dB，并且天线的辐射性能几乎不变，很好地实现了天线的宽频域宽角域 RCS 减缩。

2 WBMA 设计与分析

设计的结构如图 1 所示，图 1(a)、图 1(b) 分别为 WBMA 的正面、侧面视图。该 WBMA 由上层加载集总电阻的旋转风车金属贴片、中间有耗介质基板和底层全金属地板组成。通过优化缩减金属臂之间的空隙，可增加等效电容值，有利于吸波体的小型化设计。其中白色部分为金属铜，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 $\tan\delta = 0.02$ ，黑色部分为 91Ω 贴片电阻。金属结构的电磁谐振和集总电阻的热损耗是吸波体的主要原因，通过优化调节各部分的结构参数使吸波体在谐振频率点处 $\epsilon(\omega) = \mu(\omega)$ ，从而实现与自由空间的阻抗匹配，有效降低入射波的反射率。利用介质层的损耗和集总电阻的吸收，尤其是欧姆电阻的消耗，实现了对入射电磁波的强烈吸收，以及对吸波带宽的扩展。

吸波体的吸波率可表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2$ (反射率 $R(\omega) = |S_{11}(\omega)|^2$ ，透射率 $T(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$)。由于本结构采用的是全金属地板，故 $T(\omega) = 0$ ，吸波率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$ 。本文采用基于有限元法的高

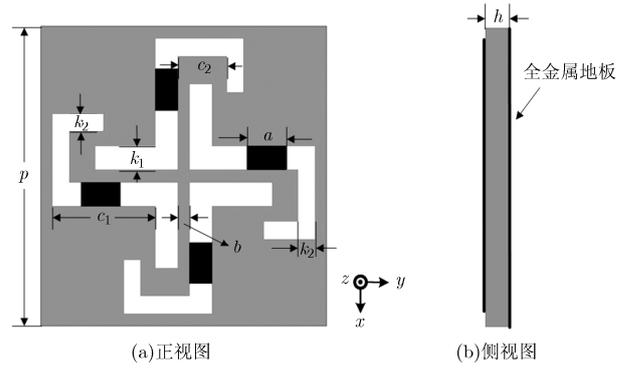


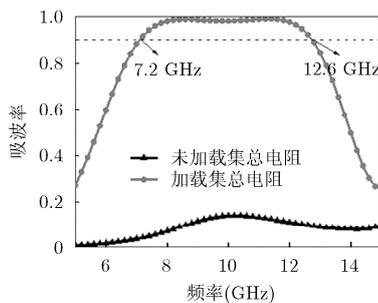
图 1 超材料宽带吸波体单元示意图

业软件 Ansoft HFSS 进行仿真，单元大小 p 为 0.33λ 即 10 mm，高度 $h = 3$ mm，通过对吸波体参数的仿真优化，得到其他参数最优值： $k_1 = 0.8$ mm， $k_2 = 0.6$ mm， $c_1 = 3$ mm， $c_2 = 1.7$ mm， $a = 1.4$ mm， $b = 0.4$ mm。

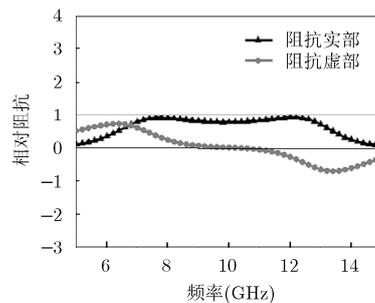
由仿真得到在未加载集总电阻和加载集总电阻后的吸波率曲线如图 2(a)，可知，加载电阻后，单元在 X 波段的吸波率始终大于 97.8%，在 7.2~12.6 GHz 范围内吸波率大于 90%，较未加载电阻时的吸波率有了大幅度的改善，同时表 1 对比了文献[13-15]与本文 WBMA 的吸波特性，就宽频带范围内保持高吸波率而言，所设计的结构具有一定的优势。

等效阻抗定义如式(1)，反射率与等效阻抗的关系如式(2)，相对阻抗的定义如式(3)，故可将反射率用相对阻抗表示为式(4)，为了保证反射率为 0，则相对阻抗的实部应为 1，虚部为 0。如图 2(b) 给出了该 WBMA 结构的相对阻抗，其实部在吸波频带内均在 1 附近上下波动，而虚部则在 0 上下浮动，同样表明了在该带宽范围内，该吸波体实现了较好的阻抗匹配。

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



(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

图 2 吸波体的特性曲线

表 1 本文所设计 WBMA 与文献[13~15]中的对比

	吸波带宽 (GHz)	相对带宽 (%)	单元大小 (mm)	单元电尺 寸(λ)
文献[13]	3.1~6.8	74.7	45	0.75
文献[14]	8.12~12.39	43.9	7.1	0.24
文献[15]	4.8~13	92.1	17.5	0.53
本文	7.2~12.6	54.5	10	0.33

$$R = \frac{z - \eta_0}{z + \eta_0} \tag{2}$$

$$z_e = z/\eta_0 \tag{3}$$

$$R = \frac{z_e - 1}{z_e + 1} \tag{4}$$

电阻值对吸波体吸波率的影响如图 3，电阻值为 50 Ω 时，有 2 个吸波峰值；随着电阻值增大到 91 Ω ，两个吸波峰值逐渐靠拢，吸波带宽得到扩展；电阻继续增大到 130 Ω 时，只出现 1 个吸波峰值。可见电阻值对吸波带宽影响较大，电阻值具有最优解，经过优化，选择最后的电阻值为 91 Ω 。图 4 给出了在不同极化波，不同入射角下的吸波率，可知在斜入射 45° 范围内，都能实现 X 波段 90% 以上的吸波率，实现了宽入射角吸波。

此外，吸波体在 10 GHz 处的表面电流分布如图 5 所示，同样表明：加载集总电阻后，上表面激励产生的电流强度大幅度衰减，入射电磁波的反射

得到了很好的抑制，加载电阻有效地吸收了雷达波，该吸波体具有良好的减缩 RCS 的作用。

3 天线结构设计

本文设计了一种工作于 X 波段的平面印刷磁电偶极子天线，天线结构如图 6 所示。本结构采用了对称设计方式，U 型金属贴片通过印刷电路板的形式直接印刷在材质为 FR4，介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切 $\tan \delta = 0.02$ 的介质板上面，整个天线采用“T”型渐变耦合馈线结构，天线的馈线结构位于导电通孔顶部，形成了共面波导传输线并实现了 50 Ω 的输入阻抗特性，提高了天线的匹配特性，这种馈线结构同时激励电偶极子和磁偶极子，实现了电偶极子和磁偶极子方向图的叠加。两侧的 U 型金属贴片是电偶极子部分，两个金属过孔分别将两个平面辐射贴片和金属地板相连，其作用相当于磁偶极子部分。通过“T”型馈电结构，将能量耦合给金属辐射贴片，通过金属贴片传递给金属柱，进而连接到下侧地板，再连接到另一侧的金属柱，形成类似于环形电流的磁偶极子。通过优化具体参数使电偶极子和磁偶极子同时工作在同一频段，实现两者组合成一体。由于电偶极子的 E 面和磁偶极子的 H 面相同；磁偶极子的 H 面和电偶极子的 E 面相同，叠加后，可实现 E 面和 H 面几乎完全相同的磁电偶极子天线设计。

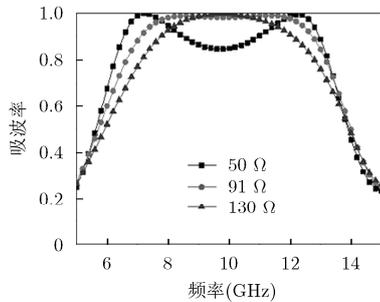


图 3 不同电阻值下的吸波率

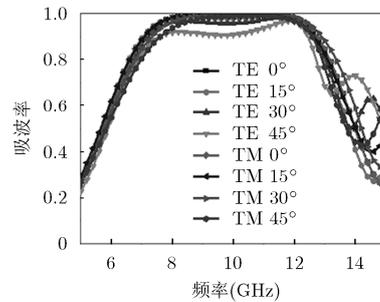
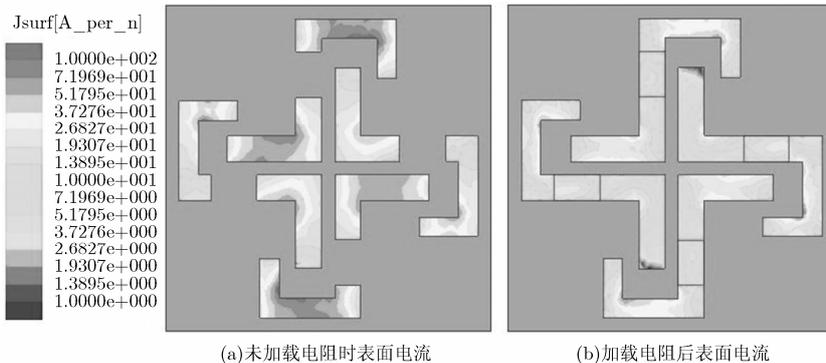


图 4 不同极化波、不同入射角下的吸波率



(a)未加载电阻时表面电流 (b)加载电阻后表面电流

图 5 吸波体单元在 10 GHz 处表面电流分布

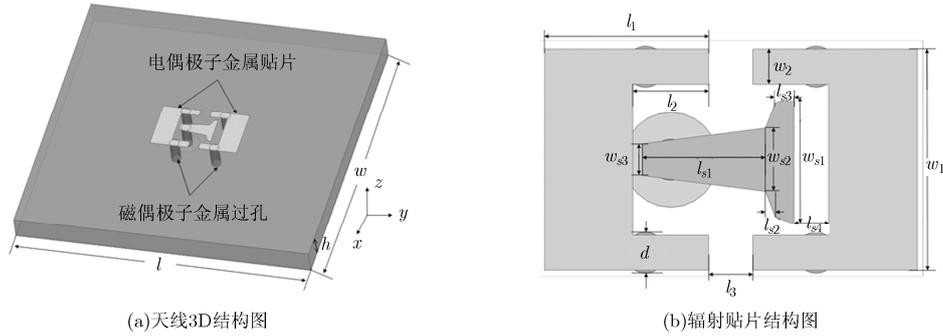


图 6 磁电偶极子天线

天线介质边长为 40 mm，厚 3 mm，电尺寸大小为 1.33λ ，天线整体的贴片大小为 $11.8\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ，其他相关具体参数列于表 2 中。

4 加载 WBMA 磁电偶极子天线设计

通过与参考天线介质板和地板复用的方式将 WBMA 单元加载在天线周围，为了保证天线的辐射性能，单元与天线贴片之间留有一定的距离，同时考虑到 WBMA 单元大小，故在包括天线辐射贴片在内留存大小为两个单元的距离即 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，本设计在大小为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的天线四周加载一圈吸波单元，如图 7 所示。

4.1 天线辐射性能

经仿真分析得到天线 S_{11} 曲线和增益曲线如图 8，可知，天线的工作带宽为 $8.0\sim 12.2\text{ GHz}$ ，相对带宽为 42.8%，完全覆盖了 X 波段。加载吸波体后的天线带宽同样为 $8.0\sim 12.2\text{ GHz}$ ，加载前后对天线的工作带宽没有影响。对比加载吸波体前后天线增

益曲线，在 $8.0\sim 8.6\text{ GHz}$ 频率范围内，增益有所下降， $8.6\sim 11.0\text{ GHz}$ 增益略有增加，在 $11.0\sim 12.0\text{ GHz}$ ，增益几乎不变，相对整个工作带宽而言，加载后的天线最低增益仍然大于参考天线增益。因此，加载吸波体后，天线仍能保持良好的增益性能。

图 9-图 11 分别给出了参考天线与加载天线在频率 8 GHz, 10 GHz 和 12 GHz 处主极化与交叉极

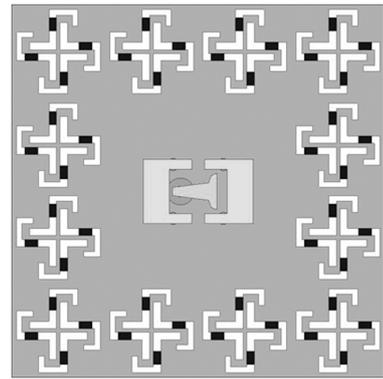


图 7 加载 WBMA 天线结构图

表 2 磁电偶极子天线具体参数数值

天线参数	l	h	l_1	l_2	l_3	w	w_1	w_2
参数值(mm)	40	3	5.2	2.4	1.4	40	7	1.1
天线参数	l_{s1}	l_{s2}	l_{s3}	l_{s4}	w_{s1}	w_{s2}	w_{s3}	d
参数值(mm)	3.9	0.3	0.6	1.1	4	2	1	1.3

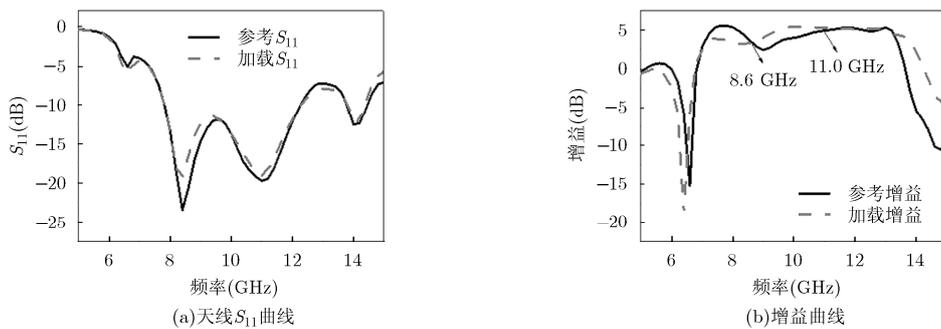


图 8 加载前后天线辐射特性曲线

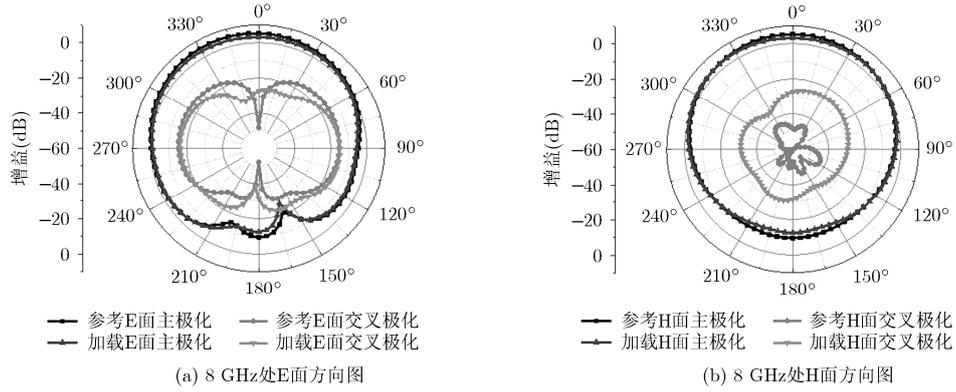


图 9 天线 8 GHz 仿真方向图

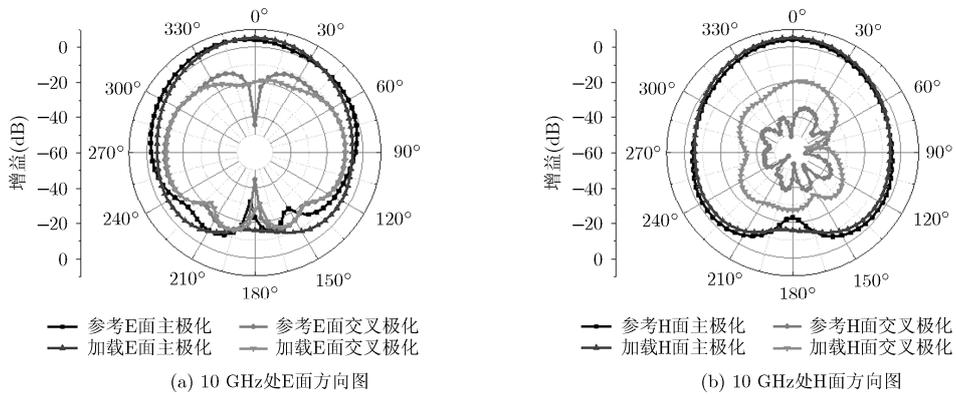


图 10 天线 10 GHz 仿真方向图

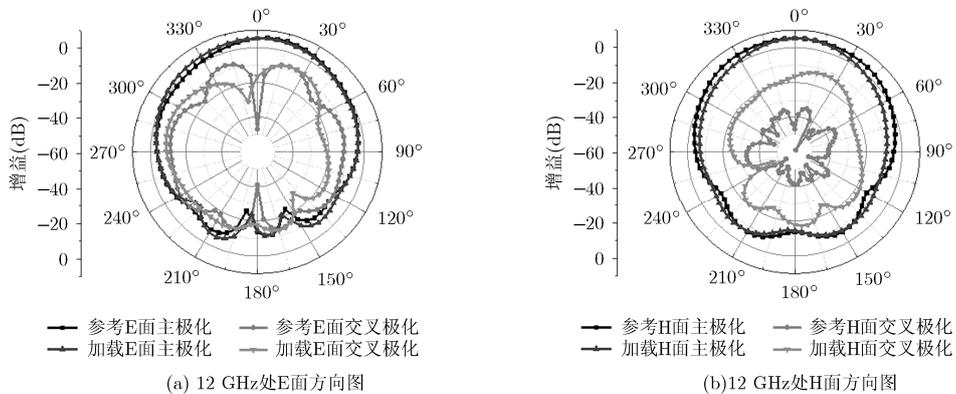


图 11 天线 12 GHz 仿真方向图

化方向图。由辐射方向图比对可知，加载吸波体前后，天线 E 面，H 面主极化辐射方向图几乎一致，交叉极化非常小，半功率波瓣宽度几乎不变。实验结果表明，加载吸波体后，天线的辐射性能得到保持。

4.2 天线的散射性能

图 12(a)给出了加载吸波体前后的天线在 TE 极化和 TM 极化平面波垂直入射时天线的法向 RCS。根据图中曲线可知，当平面波垂直入射时，无论是 TE 极化还是 TM 极化的平面波，加载 WBMA 后，

天线的 RCS 均有不同程度的减缩。TE 极化下在 8.4~12.6 GHz 频带内 RCS 减缩量达 10 dB 以上，在 X 波段减缩量始终大于 7 dB，最大减缩量达 23.8 dB；TM 极化下在 8.4~11.0 GHz 频带内 RCS 的减缩超过 10 dB，在 X 波段减缩量均大于 3 dB，最大减缩量为 15.1 dB。图 12(b)给出了天线在斜入射 30° 时的镜像双站 RCS，即观察角度为 -30° 方向的 RCS，由图可知，无论是 TE 极化还是 TM 极化，在 6.0~15.0 GHz 之间均实现了不同程度的减缩，

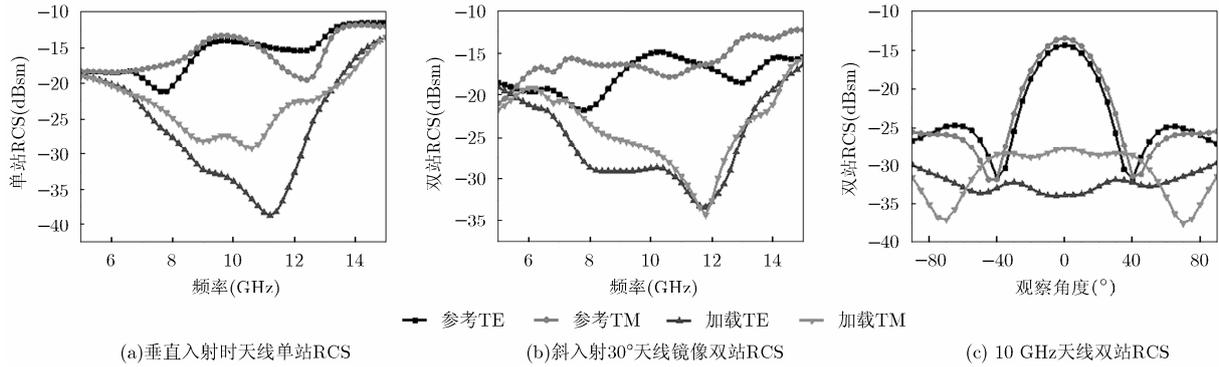


图 12 天线散射性能曲线

在整个 X 波段实现了不低于 7 dB 的减缩。因此，在斜入射时仍有较宽频域的 RCS 减缩。

图 12(c)为天线在中心频率 10 GHz 处不同观察角度处的双站 RCS 曲线图。由图可知：在较宽角度范围内，天线双站 RCS 均有大幅度的缩减。其中 TE 极化平面波垂直照射时， $\pm 90^\circ$ 范围内均有 RCS 减缩效果，实现了近乎全角域的减缩；TM 极化下在 $\pm 35^\circ$ 角域内有不同程度的减缩。再次验证了 WBMA 的宽角域吸波特性和整体而言，加载 WBMA 后，天线 RCS 减缩显著。

5 加工实测

对所仿真的磁电偶极子天线进行了实际测试，并利用 Agilent N5230C 矢量网络分析仪对天线的辐射特性进行了测试，天线的反射损耗如图 13 所示，参考天线带宽为 7.9~12.0 GHz，加载天线带宽为 7.9~11.9 GHz，加载后天线带宽变化不大。天线归一化方向图如图 14-图 16 所示，加载前后，天线主极化方向图几乎完全重合，由实测数据可知，加载吸波体的天线辐射特性与参考天线辐射特性几乎保

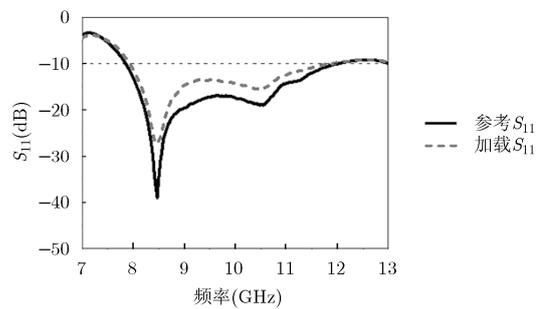


图 13 实测的 S_{11} 曲线

持一致。实测与仿真之间存在的误差主要是由加工误差和测试环境造成的。

6 结论

本文设计了一种极化稳定、宽入射角，宽频带的超材料吸波体，并将其应用于减缩工作于 X 波段的平面印刷磁电偶极子天线的 RCS。实验结果表明：其减缩频带完全覆盖了天线的整个工作带宽，且带内实现了大幅度减缩，验证了吸波体的加载对天线 RCS 的减缩起到了很大的作用。此外，天线在不同极化波照射下，在不同的角度范围内都实现了 RCS 的减缩，实现了天线的宽角域宽频带的隐身。

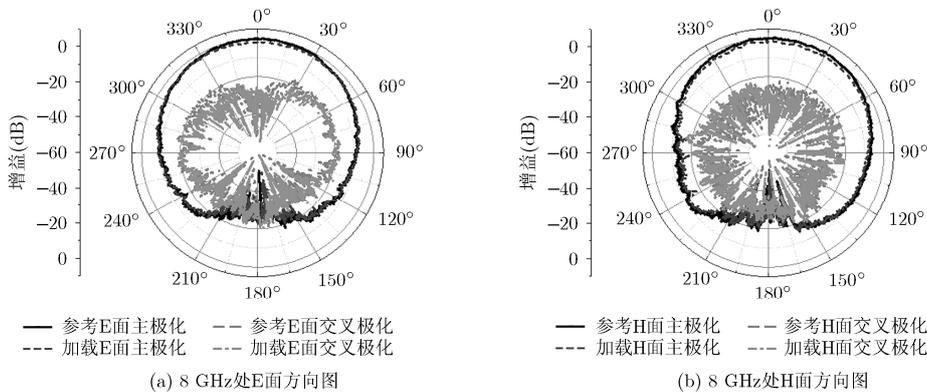


图 14 天线 8 GHz 实测方向图

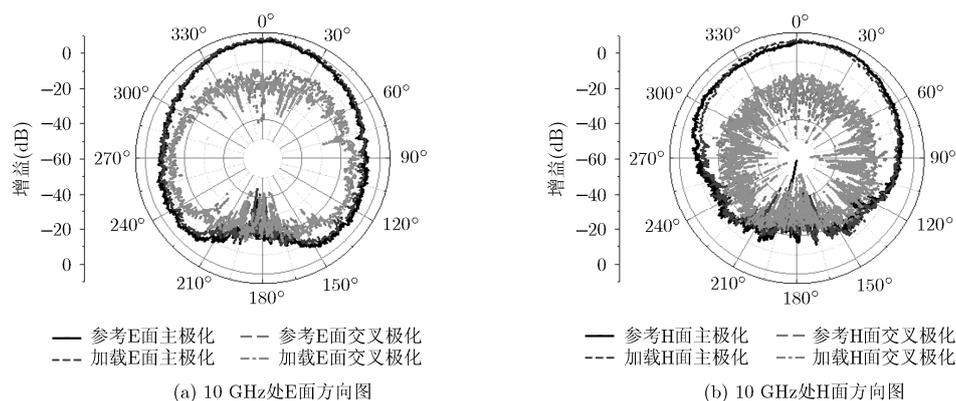


图15 天线 10 GHz 实测方向图

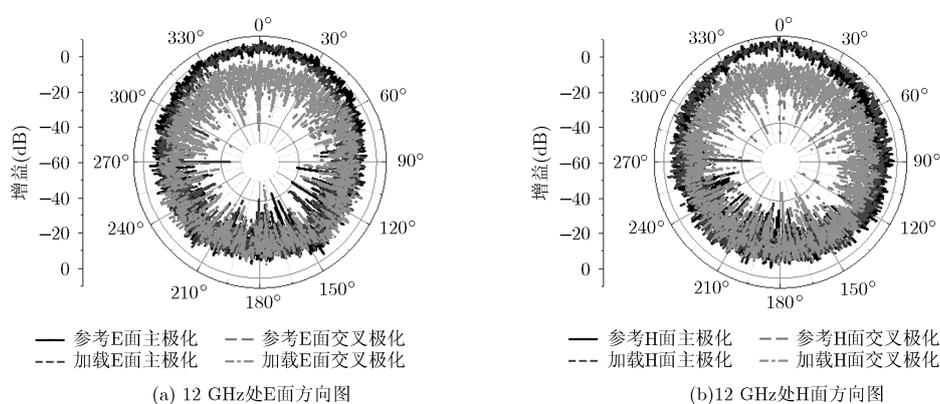


图16 天线 12 GHz 实测方向图

参考文献

- [1] LUK K M and WONG H. A new wideband unidirectional antenna element[J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2006, 1(1): 35-44.
- [2] DING Cheng and LUK K M. A low-profile magneto-electric dipole antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 15(4): 1642-1644. doi: 10.1109/LAWP.2016.2519942.
- [3] LI Mingjian and LUK K M. A wideband circularly polarized antenna for microwave and millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(4): 1872-1879. doi: 10.1109/TAP.2014.2298246.
- [4] ABDOLMEHDI Dadgarpour, MILAD Shrif Sorkherizi, and AHMED Kishk. High efficient circularly polarized magneto-electric dipole antennas for 5G applications using dual-polarized split-ring resonator lens[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(8): 4263-4267. doi: 10.1109/TAP.2017.2708091.
- [5] 张晨, 曹祥玉, 高军, 等. 低 RCS 宽带磁电偶极子贴片天线设计[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(4): 1012-1015. doi: 10.11999/JEIT150897.
- [6] ZHANG Chen, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Low RCS and broadband ME dipole antenna loading artificial magnetic conductor structures[J]. *Radioengineering*, 2017, 26(1): 1-7. doi: 10.13164/RE.2017.0001.
- [7] ENGHETA N. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces[C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Antonio, TX, USA, 2002: 392-395. doi: 10.1109/APS.2002.1016106.
- [8] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [9] LI Long and LÜ Zhiyong. Ultra-wideband polarization-insensitive and wide-angle thin absorber based on resistive metasurfaces with three resonant modes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(5): 055104. doi: 10.1063/1.4997468.
- [10] ZHONG Huiteng, YANG Xuexia, TAN Chong, *et al.* Triple-band polarization-insensitive and wide-angle metamaterial array for electromagnetic energy harvesting[J]. *Applied*

- Physics Letters*, 2016, 109(25): 253904. doi: 10.1063/1.4973282.
- [11] AGARWAL M, BEHERA A K V, and MESHRAM M K. Wide-angle quad-band polarization-insensitive metamaterial absorber[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(5): 340–342. doi: 10.1049/EL.2015.4134.
- [12] SHANG Shuai, YANG Shizhong, TAO Lu, *et al.* Ultrathin triple-band polarization-insensitive wide-angle compact metamaterial absorber[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(7): 075203. doi: 10.1063/1.4958660.
- [13] AN Shaonan, XU Haibing, ZHANG Yulu, *et al.* Design of a polarization-insensitive wideband tunable metamaterial absorber based on split semi-circle ring resonators[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(2): 2342–2348. doi: 10.1063/1.4993717.
- [14] SAPTARSHI Ghosh, SOMAK Bhattacharyya, DEVKINANDAN Chaurasiya, *et al.* An ultra-wideband ultra-thin metamaterial absorber based on circular split rings[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1172–1175. doi: 10.1109/LAWP.2015.2396302.
- [15] HE Yun, JIANG Jianjun, CHEN Mi, *et al.* Design of an adjustable polarization-independent and wideband electromagnetic absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(10): 105103. doi: 10.1063/1.4943593.
- [16] CHENG Zhang, QIANG Cheng, JIN Yang, *et al.* Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 143511. doi: 10.1063/1.4979543.
- [17] 李文惠, 张介秋, 屈绍波, 等. 基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 084101. doi: 10.7498/APS.64.084101.
- LI Wenhui, ZHANG Jieqiu, QU Shaobo, *et al.* Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 084101. doi: 10.7498/APS.64.084101.
- 兰俊祥: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为微带天线、磁电偶极子天线、电磁散射理论等.
- 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, 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.
- 郑月军: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为天线设计、人工电磁材料等.
- 张晨: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为微带天线、人工电磁材料等.