

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导缝隙阵列天线

李文强 曹祥玉 高军 赵一 杨欢欢 刘涛

Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber

Li Wen-Qiang Cao Xiang-Yu Gao Jun Zhao Yi Yang Huan-Huan Liu Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计

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

物理学报.2015, 64(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084101>

基于石墨烯的可调谐太赫兹光子晶体结构

Tunable terahertz photonic crystal structures containing graphene

物理学报.2015, 64(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.074101>

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>

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>

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导 缝隙阵列天线*

李文强 曹祥玉[†] 高军 赵一 杨欢欢 刘涛

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2014年10月13日收到; 2014年11月4日收到修改稿)

提出利用超材料吸波体减缩波导缝隙阵列天线带内雷达散射截面的设计方法. 设计具有超薄(厚度仅为 0.01λ , λ 为吸波体中心频率对应波长)、无表面损耗层和高吸波率的超材料吸波体, 将其加载到波导缝隙天线E面方向辐射缝隙间的金属表面上, 并与辐射缝隙保持一定的间距. 该加载方式没有破坏天线的口径馈电振幅分布, 并利用超材料吸波体对电磁波的强吸收特性降低了天线阵的结构模式项散射. 仿真和实验结果表明, 加载超材料吸波体后天线阵的反射系数、增益、波瓣宽度保持不变, 在 x 极化和 y 极化条件下, 波导缝隙阵列天线的带内雷达散射截面减缩量均在6 dB以上, 且在 -25° — $+25^\circ$ 范围内天线雷达散射截面均有明显的减缩, 鼻锥方向减缩超过10 dB. 该研究成果对阵列天线雷达散射截面减缩具有重要的借鉴意义和工程应用价值.

关键词: 超材料吸波体, 波导缝隙阵列天线, 雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.64.094102

1 引言

隐身技术是现代战争中提高战机等作战平台突防能力和安全性能的重要手段, 世界上越来越多的国家正在重视和发展隐身技术^[1]. 通过改变外形和使用雷达吸波材料等技术手段^[2-5]已经可以有效减小平台的雷达散射截面积(radar cross section, RCS), 但是天线作为一个主动辐射源和强散射体, 其隐身性能是制约战机等作战平台总体隐身性能提高的瓶颈. 平板缝隙天线阵以其结构紧凑、功率容量大、口径利用率高、容易实现窄波束、高增益和低副瓣特性等优点, 被广泛应用于雷达和微波通信系统, 尤其在机载火控雷达、导弹寻的等方面有着其他天线无法替代的优势. 但其较大的金属面会产生很强的后向散射, 例如典型的机载脉冲

多普勒雷达的平板缝隙天线阵RCS可高达20—30 dBsm, 这无疑对整个战机系统的隐身带来致命灾难. 为了抑制这类天线的后向强散射, 通常采用阵面倾斜安装、增加频率选择雷达天线罩、天线腔内表面涂敷吸波材料等方法对天线隐身进行折中设计^[1], 然而, 倾斜安装虽然将镜面强散射偏移出威胁区域但却是以牺牲辐射性能为代价的, 采用频率选择雷达天线罩只能抑制带外RCS, 对工作频段内的RCS却无能为力, 天线腔内表面涂敷吸波材料不仅增加系统的复杂度, 而且会导致天线增益和辐射效率严重下降. 因此如何在保证天线阵正常辐射性能的前提下, 实现带内隐身是目前的研究热点和难点. 文献^[6]利用电磁带隙结构(electromagnetic band gap, EBG)的同相反射特性克服衍射效应给传统吸波材料带来的厚度限制, 通过在单元结构之

* 国家自然科学基金(批准号: 60671001, 61271100, 61471389)、陕西省自然科学基金研究重点项目(批准号: 2010JZ010)、中国博士后科学基金(批准号: 2012T50878)、陕西省自然科学基金项目(批准号: SJ08-ZT06, 2012JM8003) 和空军工程大学信息与导航学院博士创新基金(批准号: KGD103201402) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: gjgj9694@163.com

间加载电阻构成吸波材料,使其与天线共面实现天线带内 RCS 减缩,但是这种结构不易加工,且由于损耗电阻的加载对天线的增益还是有一定的影响.

2008 年,由 Landy 等^[7]提出的超材料吸波体 (metamaterial absorber, MA) 可通过结构设计调控材料的等效媒质参数 (ϵ_{eff} 和 μ_{eff}),使吸波体的等效阻抗与自由空间阻抗匹配,利用电磁谐振器对入射波的电磁分量产生耦合实现对入射电磁波的完全吸收.随着研究深入,各种具有极化稳定^[8,9]、宽角度^[10,11]、多频带^[12,13]、宽频带特性^[14,15]的吸波体设计纷纷见诸报道,这类新型吸波体具有超薄、高吸波率和无表面损耗层的优点,且易于加工实现,这在隐身领域具有更大的应用优势.文献^[16]将这类吸波体加载在波导端头天线辐射缝隙周围,有效降低了辐射口径的后向散射.文献^[17]和文献^[18]将这类吸波体用于微带天线,分别研究了其对微带天线的辐射和散射性能的改善作用.而其在阵列天线 RCS 减缩中的应用尚未见报道.因此本文以典型平面波导缝隙阵列天线作为研究对象,将 MA 加载到阵列天线辐射口面的金属区域,在不影响天线辐射性能的前提下,利用 MA 对入射波的强吸收降低阵列天线后向散射,实现了具有低 RCS 特性的新型波导缝隙阵列天线设计.

2 RCS 减缩机理分析

雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 是目标在平面波照射下在给定方向上返回散射能量的一种度量.根据雷达散射截面的定义,天线的 RCS 可表达为^[19]

$$\sigma = |\sqrt{\sigma^{\text{st}}} + \sqrt{\sigma^{\text{an}}} e^{mj\varphi}|^2, \quad (1)$$

式中, σ^{st} 是结构模式项 RCS, 其散射机理与普通散射体的散射机理相同, σ^{an} 是天线模式项 RCS 它是由于负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射而产生的散射场, φ 为二者间的相位差. σ^{st} 可通过天线结构的数值计算得到, 而 σ^{an} 可通过天线的辐射特性及匹配状态直接获得. 对于辐射源与接收机位于同一位置的单站散射来说, 天线模式项雷达散射截面 $\sigma_{\text{M}}^{\text{an}}$ 可表示为^[20]

$$\sigma_{\text{M}}^{\text{an}} = G^2 \mu^2 \Gamma^2 \lambda^2 / 4\pi, \quad (2)$$

其中, G 表示天线的增益, μ 表示辐射源和接收机与目标天线的极化匹配状态, λ 为入射/接收电磁波

的波长, Γ 表示负载反射系数. 由 (2) 式可知, $\sigma_{\text{M}}^{\text{an}}$ 正比于目标天线增益的平方. 考虑到天线在工作频带内已经具有良好的匹配特性, 若想在保证天线辐射性能的条件下减缩天线的带内 RCS, 主要从降低天线带内结构模式项 RCS 的角度出发.

对于 MA, 定义反射率 $R = |S_{11}|^2$, 透射率 $T = |S_{21}|^2$, 则吸波率

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - R - T, \quad (3)$$

其中

$$|S_{11}|^2 = \frac{|\mathbf{E}_r|^2}{|\mathbf{E}_i|^2}. \quad (4)$$

目标的 RCS 可由下式计算:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2}. \quad (5)$$

当 MA 的 T 等于 0 时,

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{E}_r. \quad (6)$$

将 (6), (4), (3) 式分别代入 (5) 式可得

$$\begin{aligned} \sigma &= \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_r|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 |S_{11}|^2 \\ &= \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 (1 - A). \end{aligned} \quad (7)$$

对于理想金属板, 可以认为 $A = A_{\text{pec}} = 0$, 则可得 MA 与金属板相比的 RCS 减缩量 $\Delta\sigma$ 和其吸波率 A 的关系为

$$\Delta\sigma = -10 \lg(1 - A) (\text{dB}). \quad (8)$$

因此将 MA 加载到阵列天线辐射口面以代替传统的金属面, 利用 MA 的高吸波率减缩天线结构模式项散射进而实现天线总的 RCS 的减缩.

3 样品设计与仿真

3.1 MA 设计

设计的 MA 单元如图 1 所示, 单元周期 $P = 15$ mm, 上层贴片宽度 $W = 13.6$ mm、在贴片中心蚀刻长度 $L = 14.2$ mm、缝隙宽 $S = 2.72$ mm 的斜十字缝隙电谐振结构, 由于该结构具有良好的旋转对称性, 保证了 MA 对于任意极化方向的入射波都可产生谐振. 下层为全金属底板. 上层贴片和下层金属地板采用电导率为 5.8×10^7 S/m 的铜质金属贴片, 厚度为 0.03 mm (远大于微波频段典型的肌肤

深度, 以保证电磁波的无透射). 中间的介质层采用介电常数为 4.2 的聚酰亚胺, 电损耗角正切为 0.02, 介质厚度 $h = 1 \text{ mm}$ (厚度仅为 $0.01\lambda_{3.2\text{GHz}}$).

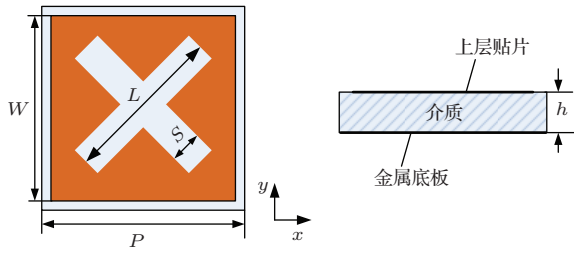


图 1 MA 单元示意图

Fig. 1. Configuration of the MA unit cell.

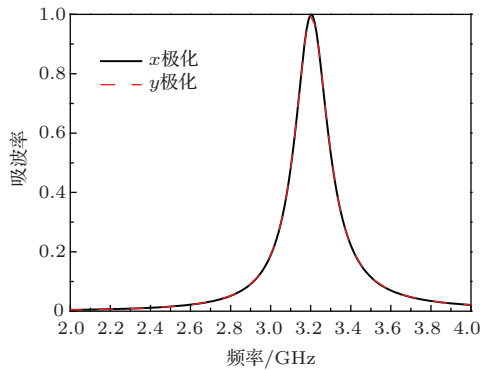


图 2 两种极化条件下的吸波率曲线

Fig. 2. Curve of absorptivity under two polarizations.

由于设计的 MA 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 HFSS14.0, 利用 Master/slave 边界和 Floquet 端口模拟无限周期单元, 设定电磁波垂直照射材料表面, 图 2 给出了 x 极化和 y 极化条件下 MA 的吸收率曲线, 由图可以看出, 在 3.20 GHz 处 MA 的吸收率达到了 99.9%, 在 3.15—3.25 GHz 之间吸波率均在 80% 以上. 实现吸波需满足两个条件: 一是阻抗匹配, 二是损耗吸收. 图 3 是利用等效媒质的 S 参数反演

法 [21,22] 计算得到的 MA 的相对阻抗曲线. 可以看到, 在 3.20 GHz 处相对阻抗的实部近似为 1, 虚部近似为 0, 说明 MA 与自由空间实现了很好的阻抗匹配, 因此照射在 MA 表面的电磁波可以几乎无反射地进入 MA 内部. 设 MA 的等效折射率为 $n(n = n_1 + in_2)$, 其虚部 n_2 反映了 PMA 对电磁波的衰减程度即损耗 [23]. 而折射率与散射参数的关系满足 [23]: $S_{21}^{-1} = e^{-in_1kd} e^{n_2kd}$. 若要使透射率 $T = |S_{21}|^2 = e^{-2n_2kd}$ 趋向于 0, 则必须满足折射率的虚部 n_2 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 [24].

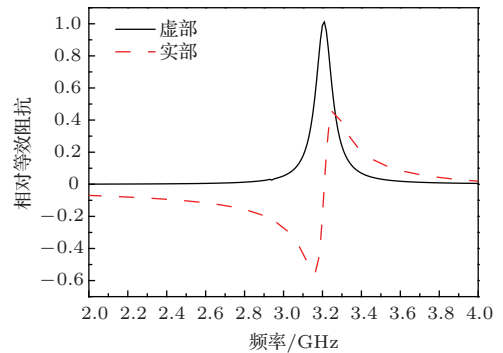


图 3 相对阻抗曲线

Fig. 3. Curve of the relative impedance.

图 4 给出了 3.20 GHz 时 MA 上层贴片和底层金属的表面电场和表面电流分布, 由图 4(a) 看出在入射电磁波电场分量的作用下, 贴片水平方向的两端汇聚了两个电极, 激励起了电偶极子谐振 [25], 电荷主要集中在十字缝隙贴片和相应底板的左右两边; 由图 4(b) 可以看出, 入射电磁波的磁场分量在上层贴片和金属底板之间激励起了磁谐振 [26], 相应地在上层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 MA 能够几乎 100% 地吸收入射波的电场和磁场能量 [17]. 为了更好的理解 MA 的吸波机理,

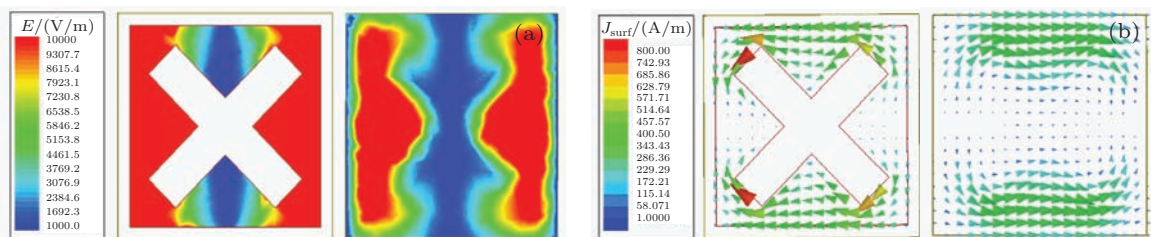


图 4 (网刊彩色) 上层贴片和底层金属的表面电场和表面电流分布图 (a) 表面电场; (b) 表面电流

Fig. 4. (color online) Surface current and electric field distribution on the patch and the metal ground plane.

(a) Surface current distribution; (b) surface electric field distribution.

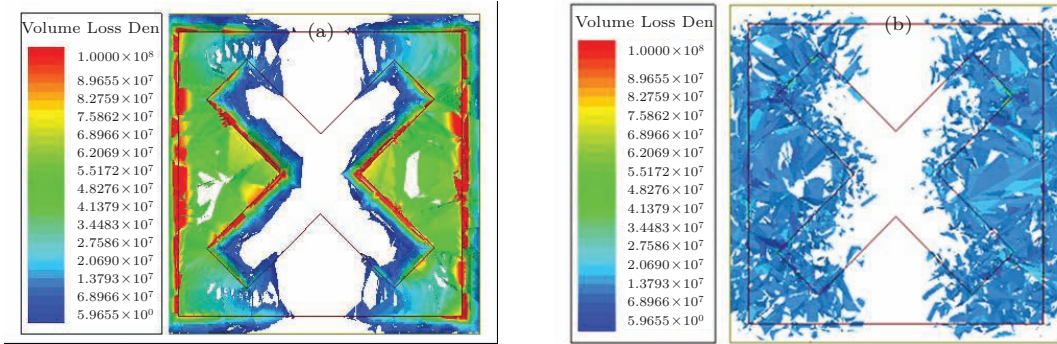


图5 (网刊彩色) 体功率损耗密度图 (a) 仅有耗介质; (b) 仅有耗金属

Fig. 5. (color online) The distributions of the volume power loss density. (a) Only the lossy dielectric; (b) Only the lossy metal.

图5给出了两种情况下MA的体功率损耗密度图, 图5(a)给出了采用损耗介质(介电常数为4.4, 损耗角正切为0.02)和无耗金属贴片情况下MA的体功率损耗密度, 图5(b)给出了采用无耗介质(介电常数为4.4, 损耗角正切为0)和有耗金属贴片(电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m)情况下MA的体功率损耗密度. 由图5(a)和(b)可以看出, 仅有耗介质的MA的体功率损耗密度远大于仅有耗金属的体功率损耗密度, 因此MA的高吸波率主要是由于介质损耗引起的而不是金属的欧姆损耗引起的.

3.2 加载MA的波导缝隙阵列天线

图6给出了设计的 8×10 单元非对称单脊波导缝隙阵列天线结构示意图, 单根线阵中有10个缝隙, 满足三角分布(SLL = 20 dB, $n = 5$), 口径面长为606 mm, 宽为402 mm, 其他尺寸参数为单元缝隙长度SL = 43.5 mm, 单元缝隙宽度SW = 4 mm, 缝隙横向间距 $dx = 60.2$ mm, 缝隙纵向间距 $dy = 50.28$ mm, 以及脊波导横截面尺寸参数 $wa = 42.28$ mm, $wb1 = 22.76$ mm, $wb2 = 28.16$ mm, $wc = 17.89$ mm, 脊的高度以波导的中心面为对称面,

馈电部分采用同轴Banlun馈电. 由于该天线的结构形式具有较大的金属平面, 这会在天线的法线方向造成很强的结构模式项散射, 因此天线阵E面方向辐射缝隙间的空隙加载MA, 利用MA对电磁波的强吸收特性降低天线阵的镜面强散射, 为了不破坏天线的口径馈电振幅分布, 将不在H面方向辐射缝隙间的空隙加载MA. 同时加载MA时与辐射缝隙保持一定的间距以减少MA和缝隙之间的耦合作用, 保证电磁波尽可能地向外辐射, 加载MA前后天线的实物样件如图7所示.

图8给出了仿真的加载MA前后天线阵的反射系数曲线对比图, 由图可以看出, 加载前天线阵的谐振中心频率为3.20 GHz, 工作带宽为3.17—3.25 GHz. 加载MA后天线阵反射系数基本没有变化, 谐振中心频率在3.20 GHz处, 工作频率为3.16—3.25 GHz, 表明加载MA对天线阵谐振性能影响很小. 图9给出了3.20 GHz处加载MA前后波导缝隙阵列的辐射方向图, 由图可以看出, 加载MA后天线阵E面和H面的方向图基本都没有变化. 表1比较了天线加载MA前后工作频带内上

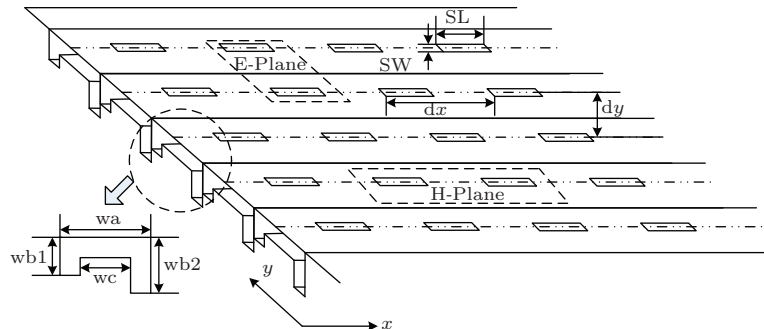


图6 8×10 单元非对称单脊波导缝隙阵列天线的结构示意图

Fig. 6. Geometry of Asymmetric ridged waveguide slot antenna array with 8×10 units.

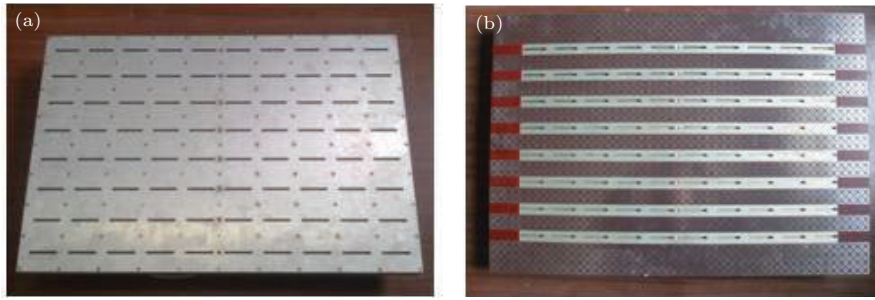


图7 波导缝隙阵列天线实物 (a) 加载前; (b) 加载后

Fig. 7. Photographs of waveguide slot antenna array. (a) without MA; (b) with MMA.

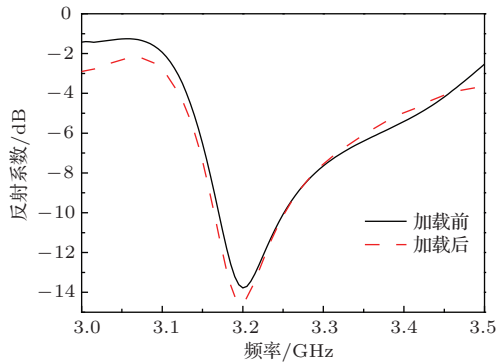


图8 反射系数曲线

Fig. 8. Curve of Reflection coefficients.

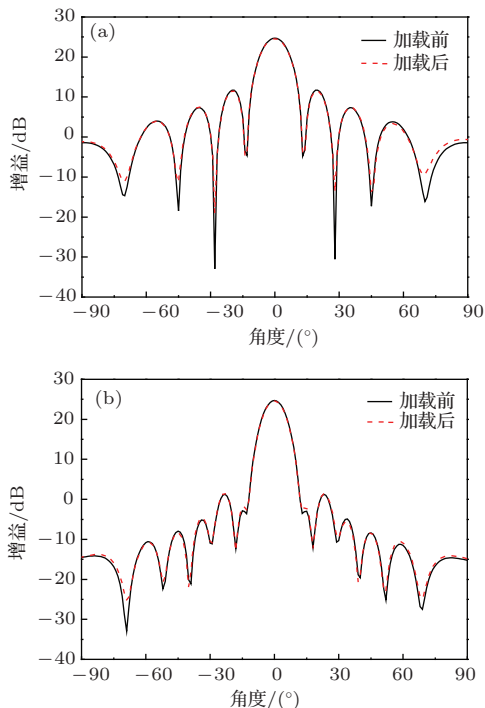


图9 仿真的辐射方向图对比 (a) E面; (b) H面

Fig. 9. Comparison of simulated radiation patterns of waveguide slot antenna array. (a) E-plane; (b) H-plane.

边频、下边频和中心频点处仿真的增益值, 由表可以看出, 加载MA后天线的增益在整个工作频带内

得到了很好保持. 上述结果表明, MA 的合理加载基本不影响天线原有的辐射性能.

表1 波导缝隙阵列天线加载MA前后仿真增益值

Table 1. Comparison of simulated gain of waveguide slot antenna array with and without MA.

频率 f /GHz	增益 G /dBi		ΔG /dB
	加载前	加载后	
3.17	24.32	24.45	+0.07
3.20	24.71	24.56	-0.15
3.25	24.23	24.41	+0.18

在 x 极化和 y 极化条件下 (坐标系如图6所示), 平面电磁波垂直照射阵列天线时 RCS 随频率变化曲线如图10所示. 当入射波极化为 x 方向时, 由于入射电磁波不能激励起缝隙电压, 此时未加载MA的波导缝隙天线阵的散射主要是波导金属表面的散射贡献, 此时其散射特性类似于金属平板的散射特性, 加载MA后的波导缝隙天线由于MA的高吸波率在3.20 GHz处的RCS减缩量达到了9.57 dB, 如图10(a)所示. 当入射波极化为 y 方向时, 由于入射电磁波激励起了缝隙电压, 此时未加载MA的波导缝隙天线阵的散射主要是由缝隙阵列的散射贡献, 此时其散射特性类似于一般阵列天线的散射特性, 加载MA后的波导缝隙天线在3.20 GHz处的RCS减缩量达到了9.36 dB, 如图10(b)所示, 根据之前的辐射性能仿真可知, 由于天线的辐射性能没有发生改变, 天线模式项散射并没有因为MA的加载而降低, 因此在 y 极化入射波条件下的RCS减缩主要是由于MA的高吸波率减缩了结构模式项散射引起的. 在两种极化条件下天线阵RCS的减缩规律与MA吸波率曲线的规律基本一致, 与(8)式理论分析减缩量值的差异是由于MA加载的周期结构不连续造成的.

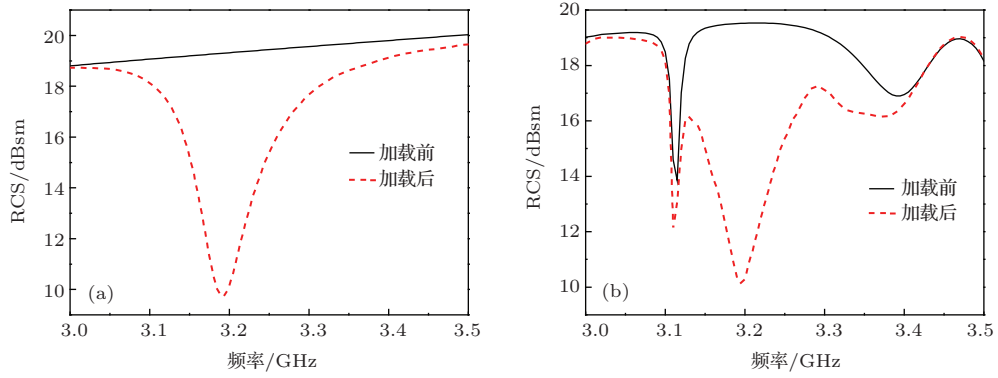


图 10 波导缝隙阵列天线 RCS 随频率变化曲线 (a) x 极化; (b) y 极化

Fig. 10. The RCS as a function of frequency of waveguide slot antenna array. (a) x polarization; (b) y polarization.

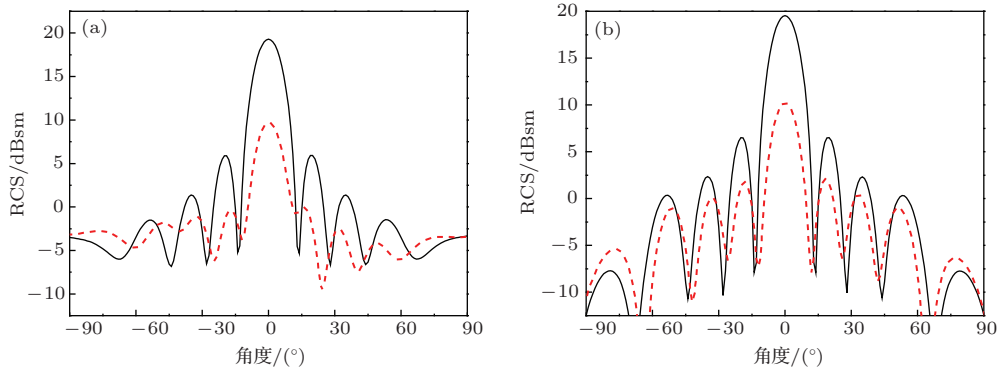


图 11 波导缝隙阵列天线 RCS 随角度变化曲线 (a) x 极化; (b) y 极化

Fig. 11. The RCS as a function of angle of waveguide slot antenna array. (a) x polarization; (b) y polarization.

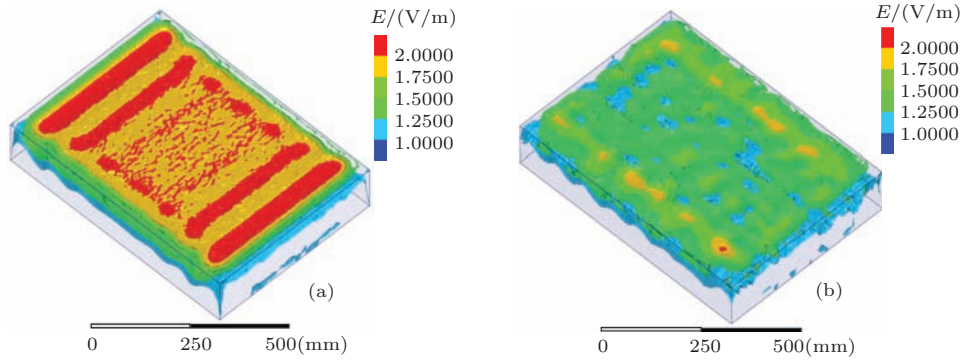


图 12 (网刊彩色) 波导缝隙阵列天线空间散射场分布 (a) 加载前; (b) 加载后

Fig. 12. (color online) The scattering field distribution of ridged waveguide slot antenna array. (a) without MMA; (b) with MMA.

图 11 给出了两种极化条件下, 在 3.20 GHz 处天线阵的 RCS 随角度变化的曲线. 由图可以看出, 无论 x 极化还是 y 极化情况, 加载 MA 后阵列天线在 $\pm 25^\circ$ 范围内 RCS 均有所减缩, 鼻锥方向 RCS 减缩量可以达到 9.5 dB. 图 12 给出了 3.20 GHz 时加载 MA 前后阵列天线的空间散射场分布, 从图中可以看出加载 MA 后天线后向散射场得到了显著的抑制, 表明设计的 MA 可以有效降低波导缝隙阵列

天线的 RCS.

4 实验验证

4.1 辐射性能测试

利用 Agilent N5230C 矢量网络分析仪测试加载 MA 前后阵列天线的反射系数如图 13 所示. 由图可以看出, 加载 MA 前后阵列天线的反射系数

基本符合, 说明MA的加载没有影响天线的匹配特性. 与图8给出的仿真结果相比, 实测的结果略向低频偏移, 谐振频率为3.17 GHz, 工作频带为3.15—3.20 GHz, 结果的偏差主要是由于波导缝隙天线的加工误差引起的.

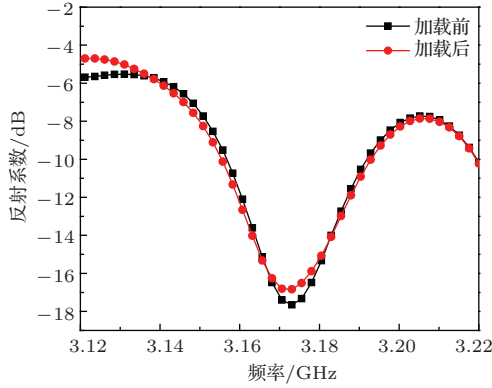


图13 阵列天线反射系数

Fig. 13. Reflection coefficients of waveguide slot antenna array.

图14给出了天线测试的暗室环境和待测天线固定方式, 为了降低天线支撑物对测试结果的影响, 搭建泡沫塔, 将测试样品固定于泡沫底座以保持竖直. 测试方法采用模拟自由空间法测试, 用



图14 波导缝隙阵列天线测试平台 (a) 暗室测试环境; (b) 待测样品固定

Fig. 14. Measurement circumstance of waveguide slot antenna array. (a) Anechoic chamber; (b) test sample set up.

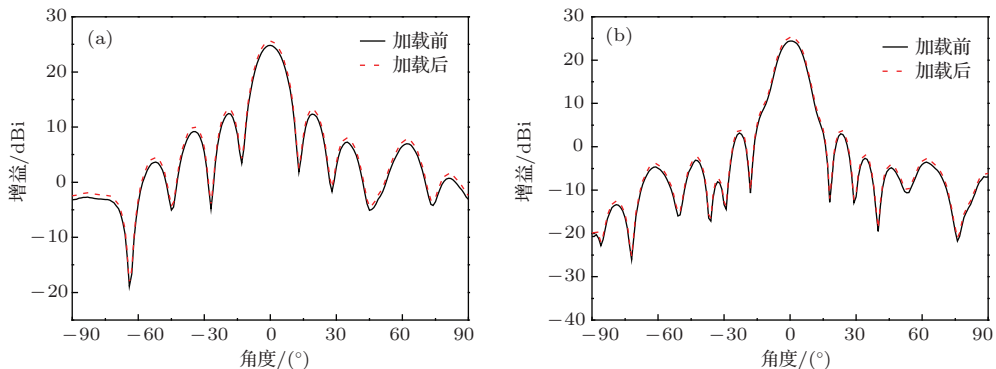


图15 阵列天线方向图 (a) E面; (b) H面

Fig. 15. Radiation patterns of waveguide slot antenna array. (a) E-plane; (b) H-plane.

紧缩场提供平面波作为辐射场, 被测天线作为接收天线, 用方位转台控制接收天线的方位, 天线增益采用与标准增益喇叭相比较的方法测试. 从图15给出的阵列天线方向图可知, 加载MA前后对天线的主辐射波束几乎没有影响. 表2比较了天线加载MA前后工作频带内上边频、下边频和中心频点处测试的增益值. 对比可知, 加载MA后天线增益不仅没有下降反而略有提高, 分析原因: 一是由于吸波体的厚度超薄且不含表面损耗层从而不吸收天线辐射能量, 二是抑制了天线工作时激励起的表面波^[17]和缝隙之间的耦合. 以上实验结果验证了加载MA后阵列天线的辐射性能能够得到很好保持.

表2 波导缝隙阵列天线加载MA前后实测增益值

Table 2. Comparison of measured gain of waveguide slot antenna array with and without MA.

频率 f /GHz	增益 G /dBi		ΔG /dB
	加载前	加载后	
3.15	24.74	25.51	+0.77
3.17	24.81	25.58	+0.77
3.20	24.35	24.94	+0.59

4.2 散射性能测试

采用国军标“室内场缩比目标雷达散射截面测试方法”测试天线散射性能,用精确已知的RCS定标体完成对测量系统的频响误差校准,在测量过程中采用距离选通门等处理技术,以降低背景电平,提高测量精度.图16给出了不同极化波垂直入射下天线阵RCS随频率变化曲线,与仿真结果相比实测的RCS减缩频段略向低频偏移,但与天线的实测工作频段相符合.由图16(a)可知,在波导缝隙阵列天线的工作频段内,加载吸波体前的RCS为21 dBsm左右,而加载吸波体后阵列天线在3.136—3.204 GHz频带范围内RCS减缩达-6 dB,覆盖了天线的工作频段,在3.156 GHz RCS减缩量

最大达9.45 dB,此时的天线RCS仅为12.5 dBsm.由图16(b)可知,由于入射波与天线同极化激励其了缝隙电压且MA沿 y 方向上排布不连续,造成阵列天线RCS存在一定波动,但在3.132—3.20 GHz频带范围内RCS减缩达-6 dB,仍然覆盖了天线的工作频段,且在3.164 GHz减缩最大达9.14 dB,此时天线RCS仅为7.6 dBsm.为验证加载MA后阵列天线的空域隐身效果,测量了在3.16 GHz处阵列天线RCS随入射波角度变化情况,如图17所示,在两种极化条件下在天线口径面法线方向RCS减缩量达到10.55 dB,在 $\pm 20^\circ$ 之间均有明显的减缩效果,进一步验证了MA在减缩阵列天线RCS中的有效性.

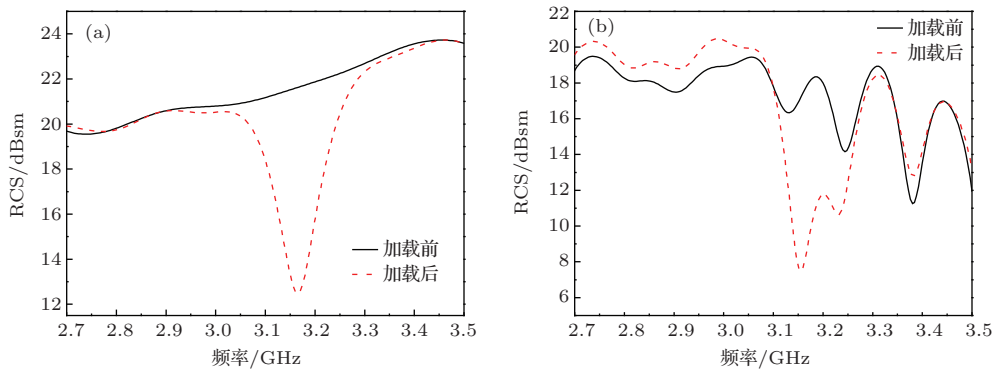


图16 阵列天线随频率变化曲线 (a) x 极化; (b) y 极化

Fig. 16. The measured RCS as a function of frequency of waveguide slot antenna array. (a) x polarization; (b) y polarization.

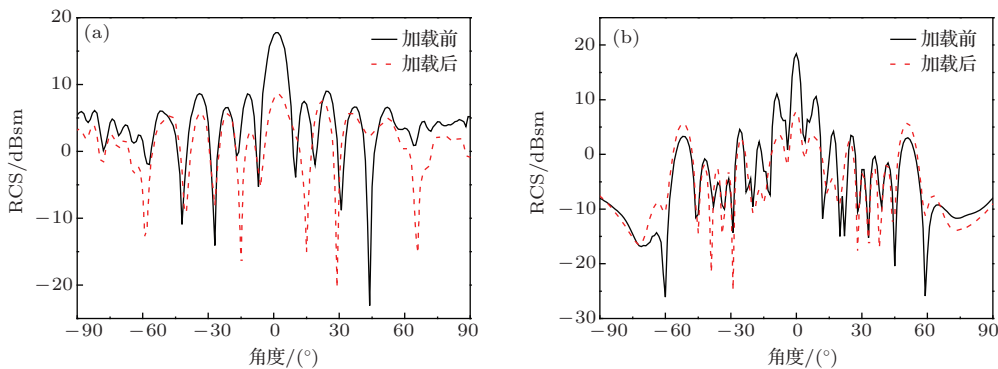


图17 阵列天线随入射波角度变化曲线 (a) x 极化; (b) y 极化

Fig. 17. The simulated RCS as a function of angle of waveguide slot antenna array. (a) x polarization; (b) y polarization.

5 结论

目前利用超材料降低天线RCS的研究大多集中在单元天线方面,而针对应用更加广泛的大型阵

列天线的RCS减缩方案鲜有提出.本文提出利用具有超薄、无表面损耗层和高吸波率的超材料吸波体实现波导缝隙阵列天线带内RCS减缩的设计方法.仿真和实验结果表明,加载超材料吸波体后在保证天线阵的正常辐射特性的情况下,使波导缝

隙阵列天线的后向RCS在工作频带内降低6 dB以上, 鼻锥方向RCS减缩超过10 dB. 该设计方法结合频率选择表面的带外RCS缩减技术将具有广泛的工程的应用价值.

参考文献

- [1] Sang J H 2013 *Low-observable Technologies of Aircraft* (First Edition) (Beijing: Aviation Industry Press) p1 (in Chinese) [桑建华 2013 飞行器隐身技术 (第1版) (北京: 航空工业出版社) 第1页]
- [2] Jiang W, Liu Y, Gong S X, Hong T 2009 *IEEE Antenn. and Wireless Propag. Lett.* **8** 1275
- [3] Zhou H, Qu S B, Lin B Q, Wang J F, Ma H, Xu Z, Peng W D, Bai P 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 3040
- [4] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Li W Q 2013 *Electronics Letters* **49** 1312
- [5] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 163
- [6] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q, Yuan N C 2008 *IEEE Antenn. and Wireless Propag. Lett.* **7** 473
- [7] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [8] Tuong P V, Lam V D, Park J W, Choi E H, Nikitov S A, Lee Y P 2013 *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* **11** 89
- [9] Ghosh S, Bhattacharyya S, Kaiprath Y, Srivastava K V 2014 *Journal of Applied Physics* **115** 681063
- [10] Zhai H Q, Li Z H, Li L, Liang C H 2013 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **55** 1606
- [11] Huang X J, Yang H L, Yu S Q, Wang J X, L M H 2013 *Journal of Applied Physics* **113** 213516
- [12] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [13] You J B, Lee W J, Won D, Yu K 2014 *Optics Express* **22** 8339
- [14] Viet D T, Hien N T, Tuong P V, Minh N Q, Trang P T, Le L N, Lee Y P, Lam V D 2014 *Optics Communications* **322** 209
- [15] Li W C, Qiao X J, Luo Y, Qin F X, Peng H X 2014 *Applied Physics A* **115** 229
- [16] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.* **61** 2327
- [17] 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]
- [18] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Ma J J, Yao X, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064103 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 马嘉俊, 姚旭, 李文强 2013 物理学报 **62** 064103]
- [19] Hu S M, Chen H H, Law C L, Shen Z X, Zhu L, Zhang W X, Dou W B 2007 *IEEE Antenn. and Wireless Propag. Lett.* **6** 70
- [20] Yang S T, Ling H 2013 *IEEE Antenn. and Wireless Propag. Lett.* **12** 35
- [21] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [22] Szabo Z, Park G H, Hedge R 2010 *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* **58** 2646
- [23] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [24] He X J, Wang Y, Wang J M, Gui T L 2011 *Progress In Electromag. Research* **115** 381
- [25] Zhu W R, Zhao X P, Bao S, Zhang Y P 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 014204
- [26] Shen X P, Cui T J, Ye J X 2012 *ActaPhys. Sin.* **61** 058101 (in Chinese) [沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥 2012 物理学报 **61** 058101]

Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber*

Li Wen-Qiang Cao Xiang-Yu[†] Gao Jun Zhao Yi Yang Huan-Huan Liu Tao

(School of Information and Navigation of AFEU, Xi'an 710077, China)

(Received 13 October 2014; revised manuscript received 4 November 2014)

Abstract

A method of reducing the in-band radar cross section (RCS) of waveguide slot array antenna by utilizing a metamaterial absorber (MA) is presented. A novel ultra-thin (the thickness is only 0.01λ , λ is the wavelength corresponding to the MA resonant frequency) MA with high absorptivity and no surface lossy layer is designed; the absorber is composed of two metallic layers separated by a lossy dielectric spacer. The top layer consists of an etched oblique cross-gap patch set in a periodic pattern and the bottom one is a solid metal. Effective impedance of MMA will match the free space impedance by adjusting the dimensions of electric resonant component and magnetic resonant component in the unit cell, and so the reflection will be minimized. Meanwhile, the MMA can obtain a resonant loss to fulfill the high absorption. By finely adjusting the geometric parameters of the structure, we obtain the MA with absorption 99.9%, and its absorbing mechanism being interpreted by analyzing surface current, surface electric field, and volume power loss density distribution, respectively. The metallic area between slots in E plane direction of waveguide slot array antenna is covered by MA, and a distance between the radiating slot and the MA is suitably arranged. Antenna radiation performance is kept in good order because this arrangement does not destroy the amplitude distribution of antenna aperture, and the high absorptivity of MA that contributes the reduction of structure mode scattering. Simulation and experimental results demonstrate that the array antenna loaded with MA gets more than 6 dB RCS reduction both in the x - and y -polarized incident conditions; and the RCS of antenna has obviously a reduction from -25° to $+25^\circ$, the most reduction value exceeds 10 dB in the boresight direction, while the reflectance, gain and beam width are guaranteed. This idea has an important significance and engineering application for the RCS reduction of array antenna.

Keywords: metamaterial absorber (MA), waveguide slot array antenna, radar cross section (RCS)

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.64.094102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60671001, 61271100, 61471389), the Key Program of Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JZ010), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012T50878), the Natural Science Basic Research of Shanxi Province, China (Grant Nos. SJ08-ZT06, 2012JM8003), and the Doctoral Innovation Foundation of Information and Navigation college of AFEU, China (Grant No. KGD103201402).

[†] Corresponding author. E-mail: gjg9694@163.com