

一种具有吸波和相位相消特性的共享孔径雷达吸波材料*

李文强 高军[†] 曹祥玉 杨群 赵一 张昭 张呈辉

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2013年12月8日收到; 2014年3月4日收到修改稿)

提出了共享孔径雷达吸波材料(shared aperture radar absorbing material, SA-RAM)的设计方法. 该方法将无源人工电磁媒质(metamaterials, MTM)的散射问题等效为有源阵列的辐射问题进行研究, 利用阵列天线原理对有限周期MTM单元构成的MTM子孔径的位置信息、幅度信息、相位信息进行优化设计, 实现具有不同功能的SA-RAM. 在此基础上, 设计了一种基于人工磁导体(artificial magnetic conductor, AMC)子孔径和完美吸波体(perfect metamaterial absorber, PMA)子孔径的SA-RAM, 该SA-RAM通过将AMC子孔径与PMA子孔径交错布阵, 实现了具有吸波和相位相消特性的SA-RAM. 仿真和实验结果表明, 该SA-RAM较金属板的后向雷达散射截面(radar cross section, RCS)在5.5—8.3 GHz都有明显的减缩, 在5.54 GHz处的减缩是由于PMA的高吸波率引起的, 在7.0 GHz处的减缩是由于AMC子孔径和PMA子孔径相位相消引起的. 研究结果对频域和空域隐身相结合的雷达吸波材料设计具有重要的指导意义.

关键词: 共享孔径雷达吸波材料, 人工磁导体, 完美吸波材料, 雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 73.50.-h

DOI: 10.7498/aps.63.124101

1 引言

雷达隐身技术是现代电子战的一项重要内容, 其中雷达吸波材料是应用最广泛的一种方法. 传统的雷达吸波材料大多是基于Salisbury吸收屏原理设计的^[1], 由于损耗层与底板距离 $1/4$ 波长, 限制了其工程应用. 人工电磁媒质(metamaterial, MTM)是最近十几年来电磁领域研究的热点课题, 它是一类具有奇特电磁特性的新型复合媒质^[2-5], 包括非均匀各向异性材料、左手材料(left-handed material, LHM)、电磁带隙结构(electromagnetic band gap, EBG)、人工磁导体(artificial magnetic conductor, AMC)等. 利用MTM的奇特电磁特性可以设计性能更优异的雷达吸波材料. 如利用MTM的同相反射特性可以克服Salisbury吸波屏 $1/4$

波长的厚度限制^[6,7]. 利用MTM的电磁谐振特性, 通过调控MTM结构单元等效媒质参数, 可以制备出对电磁波近100%吸收率的完美吸波体(perfect metamaterial absorber, PMA)^[8-15], 由于它具有超薄、高吸波率、无表面损耗层的特点, 使其在隐身领域具有更大的应用优势. 研究人员针对PMA的宽入射角、极化无关、多频带特性提出了大量的新结构. 2007年, Paquay等^[16]提出利用AMC和理想电导体(perfect electric conduct, PEC)反射电磁波相位相差 180° 的特点, 令AMC和PEC成棋盘式布局可以将垂直入射电磁波的最大散射方向有效地调节到反射面的对角线方向, 使目标的雷达散射截面(radar section cross, RCS)显著降低. 随后研究人员针对多频段、宽带的相位相消开展了大量的研究^[17-24]. 其中文献^[24]提出了基于非均匀级

* 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)、中国博士后科学基金(批准号: 2012T50878)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: gjgj9694@163.com

联方环的相位相消屏, 并基于阵列天线理论对该相位相消屏的散射方向图进行了预估, 这为研究人员采用阵列天线理论对MTM进行优化布阵设计提供了很好的思路.

共享孔径(shared aperture)技术是一种新的相控阵天线技术^[25-31], 它通过共享一副天线孔径来同时完成原先分别由不同天线完成的多种战术功能. 考虑到实现难度和应用的局限性, 通常采用孔径空分复用技术来实现共享孔径^[26]. 常规的孔径空分复用采用规则的孔径划分方法, 每个功能使用其中的一个子孔径, 且子孔径之和等于原孔径. 本文基于共享孔径天线的设计思想, 提出了共享孔径雷达吸波材料(shared aperture radar absorbing material, SA-RAM)的设计方法, 利用该方法将AMC子孔径与PMA子孔径交错布阵实现了具有吸波和相位相消特性的共享孔径雷达吸波材料. 研究结果对频域和空域隐身相结合的雷达吸波材料设计具有重要的指导意义.

2 SA-RAM设计理论

在文献[16]中, Maurice假设有有限多个AMC单元构成的AMC块的反射特性与周期边界条件下AMC单元的反射特性相同, 忽略有限大情况下边缘效应对结果的影响, 利用阵列天线的分析方法对AMC和PEC构成的棋盘相消屏的RCS特性进行了预估. 本文将MTM块作为共享孔径雷达吸波材料的子孔径, 首先建立一个二维的平面MTM阵列结构等效模型, 如图1所示. 假设每个点代表子孔径单元的中心, 可以将每个子孔径的位置信息、反射相位和反射幅度设置为变量, 则任意子孔径单元 (m, n) 的散射阵因子为

$$\begin{aligned} f_{mn}(\theta, \varphi) &= f_{xmn}(\theta, \varphi) f_{ymn}(\theta, \varphi) e^{j\varphi_{mn}} \\ &= e^{jm\psi_x} e^{jn\psi_y} e^{j\varphi_{mn}}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\psi_x = k\Delta x \sin \theta \cos \varphi,$$

$$\psi_y = k\Delta y \sin \theta \sin \varphi,$$

φ_{mn} 为该点的反射相位信息.

将每个子孔径的散射阵因子叠加, 可得MTM阵列的散射阵因子方向图函数

$$f = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn}(\theta, \varphi)$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jm\psi_x} e^{jn\psi_y} e^{j\varphi_{mn}}. \quad (2)$$

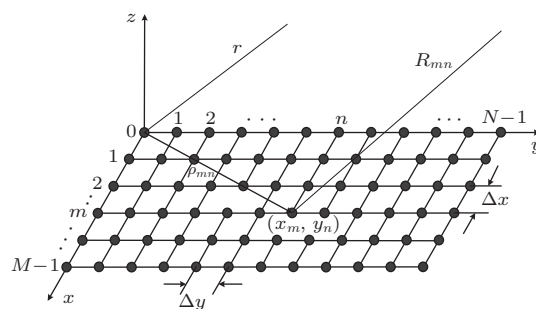


图1 MTM等效二维平面阵结构示意图

考虑用矩阵的形式来代替MTM子孔径的位置信息, 以任意三种 4×4 的MTM阵列为例, 写出 I_1, I_2, I_3 的矩阵表达式:

$$\begin{aligned} I_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ I_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \\ I_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中1代表PEC子孔径, 其反射幅度为1、反射相位为 180° ; 2代表AMC子孔径, 其反射幅度为1、反射相位为 0° ; 0代表PMA子孔径, 由于PMA可以达到近100%的吸波率^[8], 因此其子孔径的幅度趋于0, 反射相位为 0° . I_1 为全PEC面, I_2 为AMC子孔径与PEC子孔径交错布阵后的MTM相位相消屏, I_3 为AMC子孔径、PEC子孔径、PMA子孔径交错稀疏布阵后的共享孔径雷达吸波材料(SA-RAM). 假设子孔径间距为 λ , 则三种情况下的三维散射阵因子方向图如图2所示, 由图2(a)可以看出, 全PEC面的散射主瓣垂直于PEC面; 由图2(b)可以看出, MTM相位相消屏的散射主瓣被打散到反射

面的对角方向, 其结果与文献[16]中棋盘相消屏的散射方向图一致; 由图2(c)可以看出, 由于PMA子孔径的吸波效果使SA-RAM的散射峰值大幅度地减缩, 且由于PEC子孔径和AMC子孔径的相位相消作用使SA-RAM的散射波束主要集中在反射屏的一个轴线方向上。

根据上述设计思想, 通过对子孔径的位置、反射相位、反射幅度的优化设计可以实现具有不同功能的共享孔径雷达吸波材料。

3 SA-RAM结构设计及仿真分析

3.1 结构设计

本文设计的SA-RAM是由AMC子孔径和PMA子孔径交错布阵实现, 如图3所示。AMC子孔径是由 5×5 的贴片型AMC单元构成, AMC单元介质正面是方形贴片结构, 介质背面是金属底板, 其结构尺寸如图3(b)所示, 单元周期 $a_1 = 9$ mm, 贴片边长 $b_1 = 8$ mm, 中介质厚度为2 mm, 介电常数2.65, 电损耗角正切0.001。PMA子孔径是由 5×5 的斜十字缝隙PMA单元构成, 斜十字缝隙PMA单元介质正面是刻蚀斜十字缝隙的电谐振贴片结构, 介质背面是金属底板, 其结构尺寸如图3(c)

所示, 单元周期 $a_2 = 9$ mm, 贴片边长 $b_2 = 8$ mm, 缝隙长度 $l = 7.5$ mm, 缝隙宽度 $w = 1.6$ mm, 中介质厚度为0.5 mm, 介电常数4.4, 电损耗角正切0.02。

仿真软件采用基于有限元方法的HFSS14.0, 利用主/从边界和Floquet端口模拟无限周期单元, AMC单元和PMA单元的仿真结果如图4和图5所示。由图4可以看出, AMC单元在7 GHz处的反射幅度为1, 反射相位为0; 由图5可以看出, PMA单元在5.54 GHz处的反射幅度趋向于0, 反射相位为0。

平面波垂直照射时, SA-RAM与相同尺寸大小的金属板随频率变化的RCS曲线如图6所示, 可以看出在5.54和7 GHz处有两个明显的RCS减缩点。

3.2 机理分析

根据第二节中共享孔径雷达吸波材料的设计思想, 本文设计的SA-RAM的等效矩阵可以写为

$$I = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, 2代表AMC子孔径, 0代表PMA子孔径。由图4和图5可知, 在5.54 GHz处AMC子孔径的反

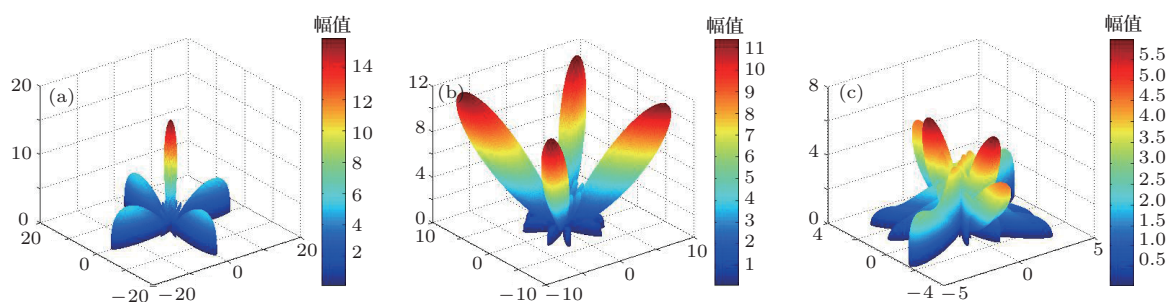


图2 (网刊彩色) 三维散射阵因子方向图 (a) PEC面; (b) MTM相位相消屏; (c) SA-RAM

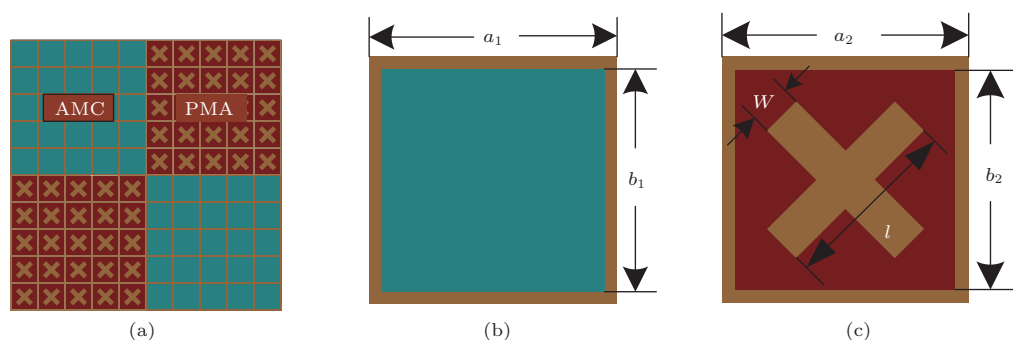


图3 (网刊彩色) (a) SA-RAM结构; (b) AMC单元结构; (c) PMA单元结构

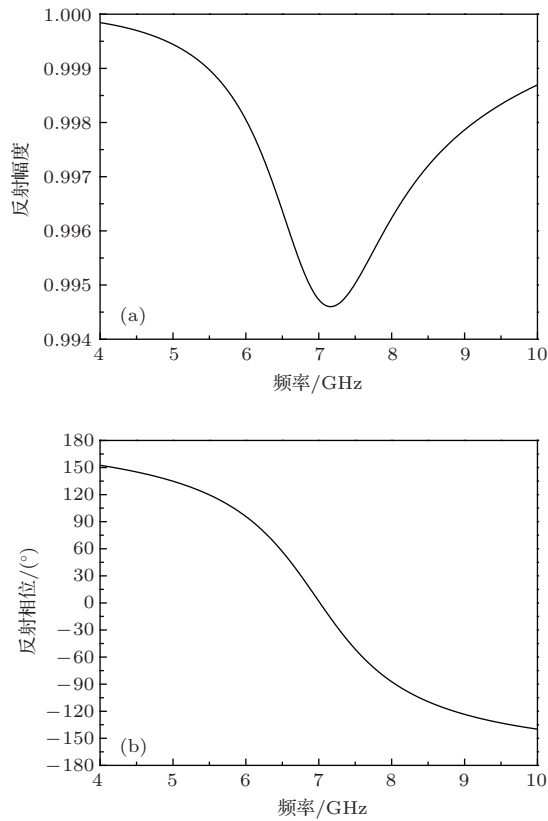


图4 AMC单元仿真图 (a) 反射幅度; (b) 反射相位

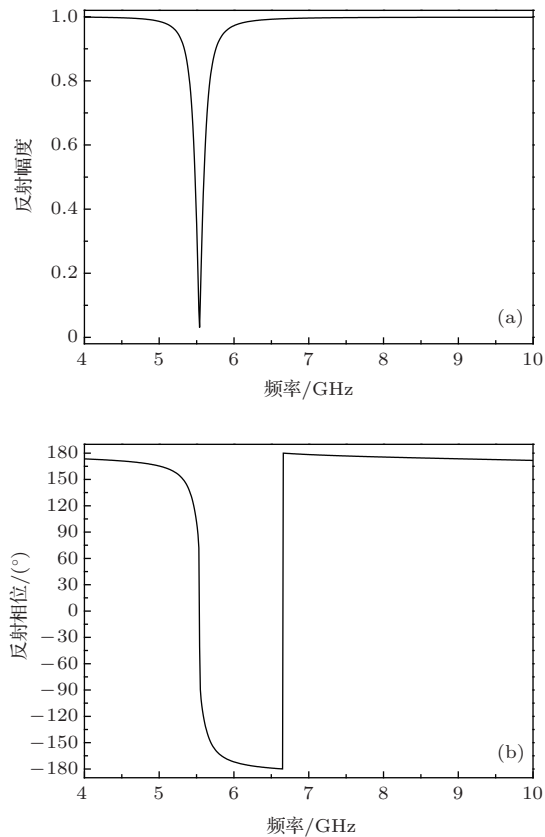


图5 PMA单元仿真图 (a) 反射幅度; (b) 反射相位

射幅度为1, 反射相位为120°, PMA子孔径的反射

幅度为0, 反射相位为0, 则散射阵因子方向图类似于沿SA-RAM对角方向的二元线阵方向图, 如图7(a)所示. 由图4和图5可知, 在7 GHz处AMC子孔径的反射幅度为1, 反射相位为0°, PMA子孔径的反射幅度为1, 反射相位为180°, 此时的SA-RAM的散射峰值被打散到对角线的方向, 如图7(b)所示. 利用Ansoft HFSS仿真的三维散射方向图如图8所示, 可以看出图8的仿真结果和理论分析取得了很好的一致.

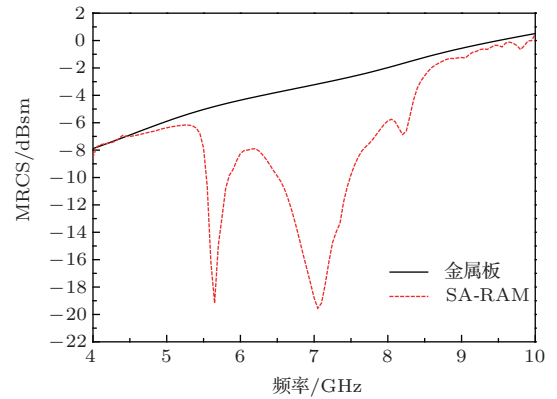


图6 (网刊彩色) SA-RAM与金属板的RCS曲线对比

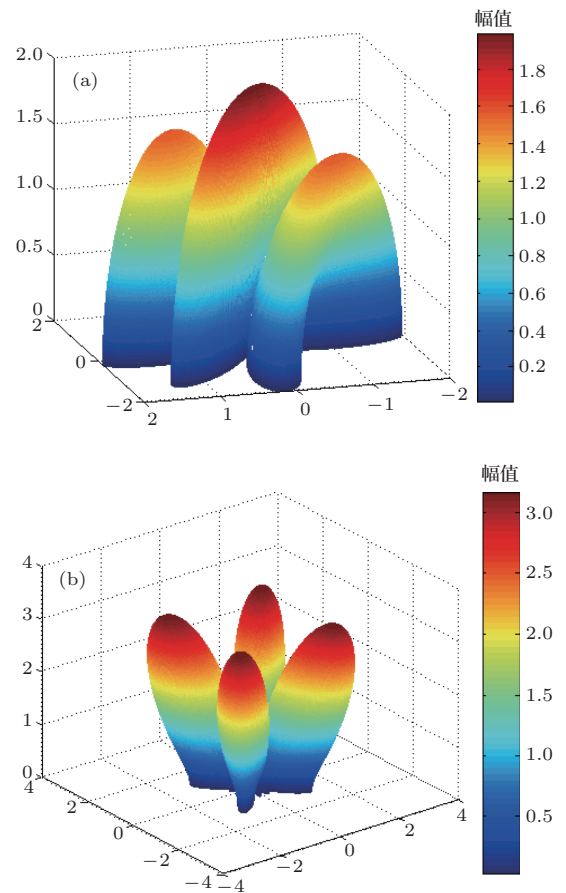


图7 (网刊彩色) 散射阵因子方向图 (a) 5.54 GHz; (b) 7 GHz

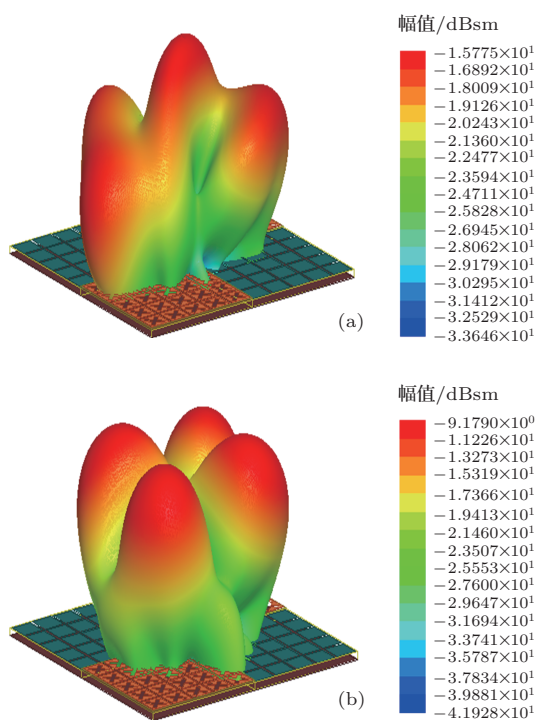


图8 (网刊彩色) 三维散射方向图 (a) 5.54 GHz;
(b) 7 GHz

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PMA单元的底层为金属板, 故没有透射, 即 $|S_{21}|^2 = 0$, 则 $A = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - R$. PMA单元的吸波率仿真结果如图9所示, 可以看出, 在5.54 GHz处实现了近100%的吸波. 实现吸波需满足两个条件, 一是阻抗匹配, 二是损耗吸收. 图10是利用等效媒质的 S 参数反演法[32,33]计算得到的阻抗曲线. 可以看到, 在吸收峰处, PMA与自由空间都有很好的阻抗匹配, 尤其在5.54 GHz, 阻抗的实部非常接近377 Ω , 虚部近似为0, 表明电磁波可以几乎无反射地透入设计PMA中. 设PMA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[34]. 而折射率与散射参数关系满足[34] $S_{21}^{-1} = e^{-in_1kd} e^{n_2kd}$. 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地吸收[35]. 由于PMA单元的完美吸波特性和AMC单元则将入射电磁波全反射出去, 因此PMA子孔径的功率损耗密度远远大于AMC子孔径的功率损耗密度, 如图11(a)所示. 在7 GHz处, PMA单元的反射幅度为1, 反射相位为180°类似于理想导体, 而AMC单元此时反射幅度为1, 反射相位为0°, 此时PMA

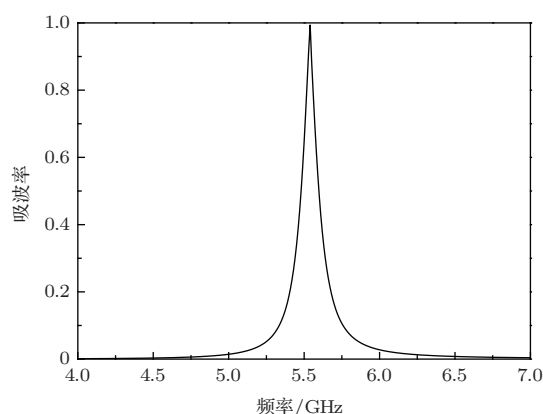


图9 吸波率曲线

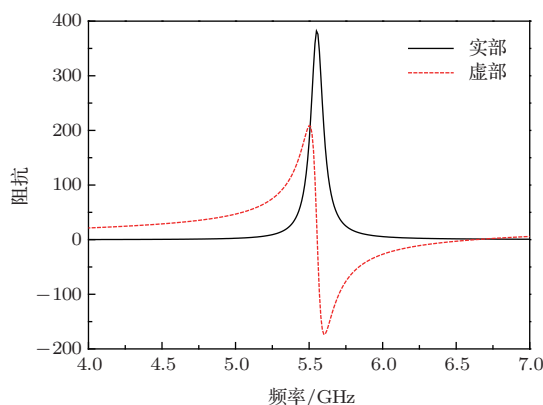


图10 (网刊彩色) 阻抗曲线

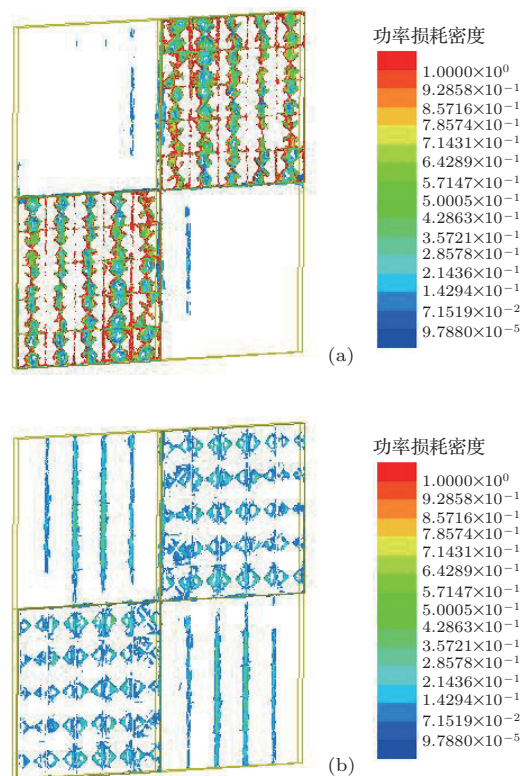


图11 (网刊彩色) 功率损耗密度 (a) 5.54 GHz;
(b) 7 GHz

子孔径和 AMC 子孔径实现了相位相消, 散射方向图类似于二维平面阵列的差方向图, 如图 8(b) 所示. 由于 PMA 和 AMC 都将能量反射到空间中去, 因此 SA-RAM 的功率损耗密度都很小, 如图 11(b) 所示.

由上述的分析可知, SA-RAM 在 5.54 GHz 处的强减缩点是由 PMA 的吸波作用产生的, 而在 7 GHz 处的强减缩点是由 PMA 和 AMC 的相位相消的作用产生的.

3.3 参数分析

当 $b_2 = 8$ mm, b_1 的取值从 7.5 mm 变化到 8.5 mm, AMC 单元的反射相位曲线和 SA-RAM 的 RCS 曲线如图 12 所示. 从图中可以看出, 随着 b_1 的增大, AMC 的反射相位曲线由高频向低频移动, 同时 SA-RAM 的第二减缩点由高频向低频移动, 且由于 b_1 保持不变, 因此第一个减缩点保持不变. 当 $b_1 = 8$ mm, b_2 的取值从 7.5 mm 变化到 8.5 mm, PMA 单元的吸波率曲线和 SA-RAM 的 RCS 曲线

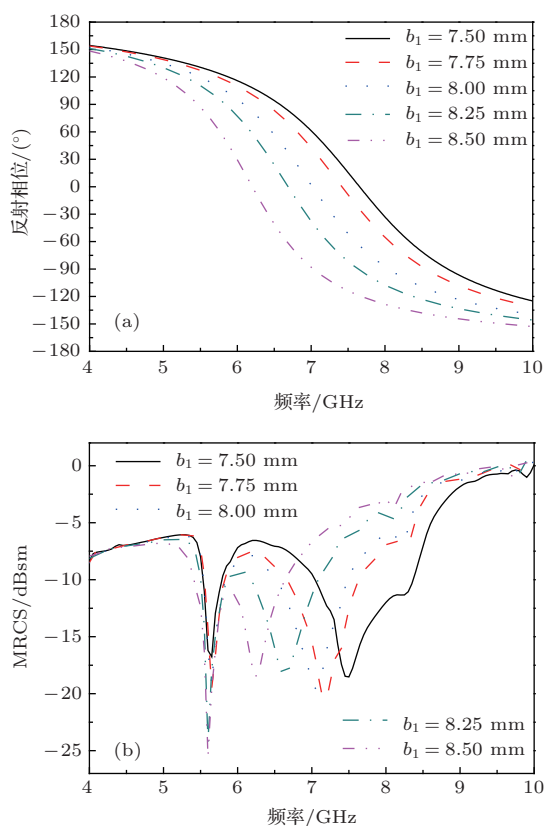


图 12 (网刊彩色) $b_2 = 8$ mm, $b_1 = 7.5\text{--}8.5$ mm, AMC 单元的反射相位曲线和 SA-RAM 的 RCS 曲线 (a) AMC 单元结构参数与反射相位的关系; (b) SA-RAM 单元结构参数与 RCS 的关系

如图 13 所示. 从图中可以看出, 随着 b_2 的增大, PMA 的反射相位曲线由高频向低频移动, 则 SA-RAM 的第一减缩点由高频向低频移动. 同时随着 b_2 的改变, 引起了 PMA 相位曲线的改变, 导致了 PMA 和 AMC 的相位差发生改变, 因此略微有所改变. 参数分析的结果与理论分析取得了很好的一致.

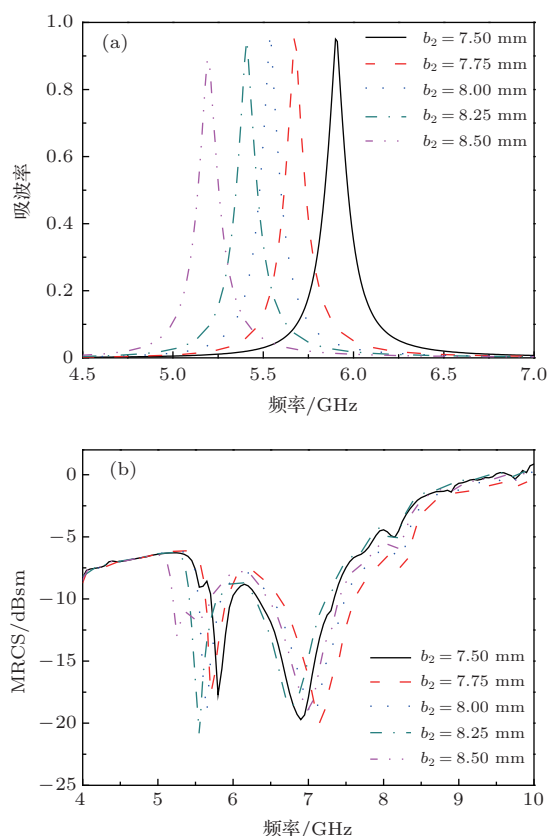


图 13 (网刊彩色) $b_1 = 8$ mm, $b_2 = 7.5\text{--}8.5$ mm, PMA 单元的吸波率曲线和 SA-RAM 的 RCS 曲线 (a) PMA 单元结构参数与吸波率的关系; (b) SA-RAM 单元结构参数与 RCS 的关系

4 SA-RAM 实验验证

采用印刷电路板技术加工出的 SA-RAM 结构样品如图 14 所示, 大小为 450 mm × 450 mm × 2.5 mm, 其单元尺寸与图 3 中仿真参数相同. 结合文献 [14, 21] 中所用的测试方法, 在微波暗室中对 SA-RAM 的反射率进行测量. 利用矢量网络分析仪 (Agilent N5230A) 分别测量 SA-RAM 以及 SA-RAM 相同大小金属板的反射信号, 将其变换到时域, 用距离门截取高于背景的目标区, 然后逆变换回频域, 即得到了两者的反射率. SA-RAM 和相同大小金属板的反射率曲线对比如图 15 所示, 与

图6中的仿真结果对比可以发现, SA-RAM反射率的工作频段以及其随频率变化的趋势与仿真结果是一致的. 其中测试的反射率与仿真结果值大小的差异主要是由于加工误差、测试环境并不具备紧缩场条件、待测物体与发射接收装置的相位中心一致度、入射信号角度偏差等误差引起的. 但是总体来说, 通过多次测试对比, 测试的数据与仿真结果符合较好, 验证了该SA-RAM对垂直入射电磁波具有较好的后向RCS减缩作用.

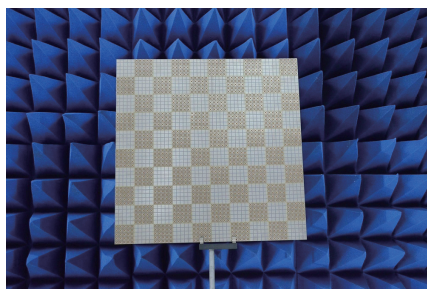


图14 (网刊彩色) 实物图

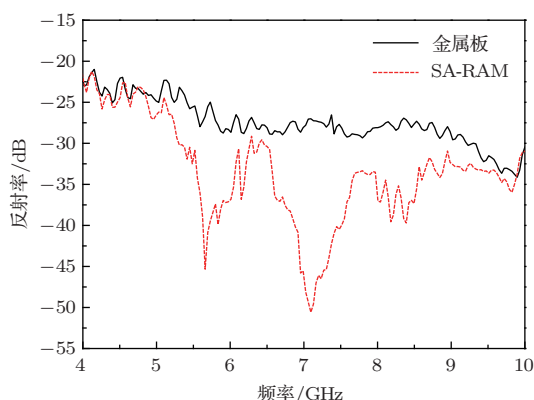


图15 (网刊彩色) 测试的反射率曲线

5 结 论

本文提出了共享孔径雷达吸波材料的设计方法, 该方法利用阵列天线原理研究人工电磁媒质的散射问题, 通过对人工电磁媒质子孔径的位置信息、幅度信息、相位信息进行优化设计, 实现具有不同功能的共享孔径雷达吸波材料. 利用该方法将AMC子孔径与PMA子孔径交错布阵, 实现了具有吸波和相位相消特性的共享孔径雷达吸波材料. 仿真和实验结果表明, 该SA-RAM的后向RCS较金属板在5.5—8.3 GHz都有明显的减缩, 在5.54 GHz处的减缩是由于PMA的高吸波率引起的, 在7.0 GHz处的减缩是由于AMC子孔径和

PMA子孔径相位相消引起的. 本文研究结果对频域和空域隐身相结合的雷达吸波材料设计具有重要的指导意义.

参考文献

- [1] Ronald L F, Michael T M 1988 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **36** 1443
- [2] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, Alexopoulos N G, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2059
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [4] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [5] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [6] Gao Q, Yin Y, Yan D B 2005 *Electron. Lett.* **41** 3
- [7] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q, Yuan N C 2008 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **7** 473
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [9] Marcus D, Thomas K, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033101
- [10] Huang Y J, Wen G J, Li J, Zhong J P, Wang P, Sun Y H, Gordon O, Zhu W R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 117801
- [11] Li H, Dibakar R C, Suchitra R, Matthew T R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 101102
- [12] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z 2013 *Appl. Phys. B* **111** 483
- [13] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 1479
- [14] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [15] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Li X F, Zhai X 2014 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **26** 111
- [16] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3630
- [17] Simms S, Fusco V 2008 *Electron. Lett.* **44** 316
- [18] Zhang Y, Mittra R, Wang B Z, Huang N T 2009 *Electron. Lett.* **45** 484
- [19] Fu Y Q, Li Y Q, Yuan N C 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 712
- [20] Yao X, Cao X Y, Gao J, Yang Q 2012 *Prog. Electromag. Res. Lett.* **32** 11
- [21] Lu L, Qu S B, Ma H, Xia S, Xu Z, Wang J F, Yu F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 034206 (in Chinese)[鲁磊, 屈绍波, 马华, 夏颂, 徐卓, 王甲富, 余斐 2013 物理学报 **62** 034206]
- [22] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Yao X, Ma J J, Li S J, Yang H H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154204 (in Chinese)[赵一, 曹祥玉, 高军, 姚旭, 马嘉俊, 李思佳, 杨欢欢 2013 物理学报 **62** 154204]
- [23] Edalati A, Sarabandi K 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 747
- [24] Hwang R B, Tsai Y L 2012 *AIP Advances* **2** 012128
- [25] Axness T A, Coffman R V, Kopp B A, O'Hare K W 1996 *Johns Hopkins APL Technical Digest* **17** 285

- [26] Fourikis N 2000 *Advanced Array Systems, Applications and RF Technologies* (California: A Harcourt Science and Technology Company) p111
- [27] Chu Q X, Ma H Q, Zheng H L 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 3391
- [28] Mauricio S B, Jackson R W, Frasier S 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote* **50** 1283
- [29] Zhong S H, Sun Z, Kong L B 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 4157
- [30] Naishadham K, Li R L, Yang L 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 606
- [31] Smith T, Gothelf U, Kim O S, Breinbjerg O 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 661
- [32] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [33] Szabo Z, Park G H, Hedge R 2010 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **58** 2646
- [34] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [35] He X J, Wang Y, Wang J M, Gui T L 2011 *Prog. Electromag. Res.* **115** 381

A kind of shared aperture radar absorbing material with absorber and phase cancellation characteristics*

Li Wen-Qiang Gao Jun[†] Cao Xiang-Yu Yang Qun
Zhao Yi Zhang Zhao Zhang Cheng-Hui

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

(Received 8 December 2013; revised manuscript received 4 March 2014)

Abstract

A method of designing a kind of shared aperture radar absorbing material (SA-RAM) is presented, in which method the scattering problem of passive metamaterial (MTM) is converted into the radiation problem of active array. Multifunctional SA-RAM is realized by optimizing the position, amplitude, and phase of the MTM subarray composed of finite MTM structures based on the array theory. An SA-RAM with absorber and phase cancellation characteristics is fulfilled by interleaving artificial magnetic conductor (AMC) subarray and perfect metamaterial absorber (PMA) subarray. Simulation and experimental results demonstrate that the backscattering radar cross section (RCS) of SA-RAM is smaller than that of the metal plate in a frequency range of 5.5–8.3 GHz. Especially, the RCS reduction is caused by high absorbance at 5.54 GHz and by phase cancellation between AMC subarray and PMA subarray at 7.0 GHz. The idea can help to design radar absorbing material, which combines frequency stealth with space stealth function.

Keywords: shared aperture radar absorbing material, artificial magnetic conductor, perfect metamaterial absorber, radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 73.50.-h

DOI: 10.7498/aps.63.124101

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

[†] Corresponding author. E-mail: gjgj9694@163.com