

# 一种兼有高增益和宽带低散射特征的波导缝隙天线设计\*

赵一† 曹祥玉 张迪 姚旭 李思佳 杨欢欢 李文强

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2013年8月27日收到; 2013年9月23日收到修改稿)

设计了一种同时具备高增益和宽带低散射特征的波导缝隙天线. 将蚀刻有互补开口谐振环的方形贴片人工磁导体正交布阵得到宽带低雷达截面积(RCS)反射屏并以之代替原天线的全金属反射板, 通过优化反射屏的加载方式, 在展宽天线工作频带、提高天线增益的同时, 实现了宽频域范围内天线鼻锥方向RCS减缩. 实测结果表明: 加载低RCS反射屏的缝隙天线工作带宽增加了100 MHz, 前向增益提高了3.2 dB, 在5.52—6.63 GHz范围内RCS减缩量达10 dB以上, 减缩带宽达到20%.

**关键词:** 波导缝隙天线, 增益改善, 雷达截面减缩, 宽带

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf

**DOI:** 10.7498/aps.63.034101

## 1 引言

随着隐身技术的不断发展, 辐射性能已经不再是天线的唯一的要素, 雷达散射截面(radar cross section, RCS)正逐步成为衡量天线性能的又一重要指标<sup>[1]</sup>. 近年来, 一些具有低RCS特性的天线设计纷纷见诸报道<sup>[2-10]</sup>, 然而通常的设计在改善散射性能的同时往往造成天线的增益、工作带宽等辐射性能退化, 如何使天线的辐射和散射性能同时得到改善是当前设计的难点.

2007年出现的人工磁导体复合表面<sup>[11]</sup>为解决这一问题提供了可行的方案. 该表面由人工磁导体(AMC)和理想电导体(PEC)复合而成, 其基本原理是利用AMC和PEC两部分的电磁反射相互抵消, 形成后向的反射零陷. 由于该表面不吸收能量而是将其反射到其他方向, 因此应用到天线中可以降低天线后向散射. 又由于AMC在谐振时表现出高阻抗, 可以有效抑制天线口径面上的表面波, 因此天线的增益同时得到提升. 基于以上原理, 文

献<sup>[12]</sup>在波导端头缝隙天线周围加载方环形复合表面, 使得天线RCS最大减缩量达到-20 dB, 同时增益提高1.7 dB. 文献<sup>[13]</sup>在文献<sup>[12]</sup>的基础上, 通过优化分析缝隙天线口径场分布特点, 设计出了AMC与PEC相间隔的棋盘形复合表面, 使得天线增益进一步提升. 文献<sup>[14]</sup>通过将条带状复合表面与微带天线阵一体化设计, 在降低天线后向散射的同时减小了天线单元间的互耦. 然而, 由于复合表面依靠AMC的同相反射, 而AMC同相反射区间较窄, 因此这些基于复合表面的天线设计RCS减缩频带也相对较窄, 不能满足现实需要.

为进一步提升天线散射性能展宽天线RCS减缩带宽, 本文将具有极化选择特性的CSRR-AMC正交布阵组成宽带低RCS反射屏并代替原天线的纯金属表面, 利用不同极化下CSRR-AMC的相位差消除天线的后向散射. 同时, 基于CSRR-AMC的高阻抗特性抑制辐射缝隙周围的表面波提高天线增益, 使天线的辐射和散射性能同时得到改善. 测试结果表明: 本文提出的缝隙天线前向增益提高

\* 国家自然科学基金(批准号: 60671001, 61271100)、陕西省自然科学基金研究重点项目(批准号: 2010JZ010)和陕西省自然科学基金研究项目(批准号: SJ08-ZT06, 2012JM8003)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 519763316@qq.com

3.2 dB, 带宽展宽 100 MHz, 同时鼻锥方向 RCS 减缩 10 dB 以上带宽达到 20%, 为高增益宽带低 RCS 天线设计提供了一种简单易行的方案.

## 2 加载宽带低 RCS 反射屏的缝隙天线

### 2.1 宽带低 RCS 反射屏模型

首先, 给出两种不同 AMC 组合而成的低 RCS 反射屏模型如图 1 所示.

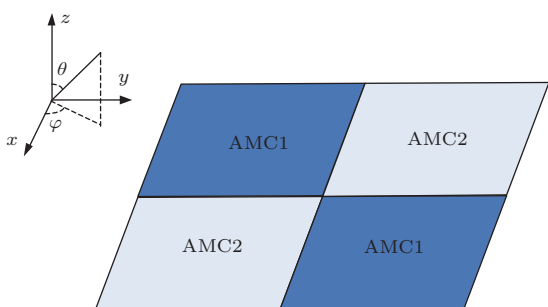


图 1 推广的棋盘型低 RCS 反射屏模型

假设 AMC1 与 AMC2 在电磁波照射下产生幅度相同的电场, 两种结构等效辐射场可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{AMC1}} = A \cdot e^{j\varphi_1}, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_{\text{AMC2}} = A \cdot e^{j\varphi_2}, \quad (2)$$

其中  $A$  为表面产生的电场幅度;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别是 AMC1 和 AMC2 结构的反射相位. 等效的辐射总

场可以表示为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{AMC1}} \cdot \text{AF1} + \mathbf{E}_{\text{AMC2}} \cdot \text{AF2}, \quad (3)$$

式中, AF1 和 AF2 为阵因子当电磁波垂直入射, 有

$$\text{AF1} = \text{AF2} = 2. \quad (4)$$

将 (1), (2), (4) 式代入 (3) 式并化简得到

$$\mathbf{E} = 2A \cdot (e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}). \quad (5)$$

将各单元等幅同相情况下的反射场表示为  $\mathbf{E}_0$ , 则有

$$\mathbf{E}_0 = 4A \cdot e^{j\varphi_1}. \quad (6)$$

若要使棋盘模型较单元同相情况下电磁波反射能量减小 10 dB 以上, 即

$$|\mathbf{E}|^2 / |\mathbf{E}_0|^2 \leq -10 \text{ dB}. \quad (7)$$

将 (5), (6) 式代入上式得

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \leq -0.8. \quad (8)$$

由此得到 AMC1 与 AMC2 相位差范围

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ. \quad (9)$$

因此, 只要 AMC1 与 AMC2 的相位差满足上述关系, 就能实现棋盘结构在电磁波垂直入射情况下 RCS 减缩 10 dB 以上, 从而可以拓展带宽. 简单起见, 通常取  $180^\circ \pm 30^\circ$  范围内的相位差为有效相位差, 对应的频率范围称为有效相位差频段.

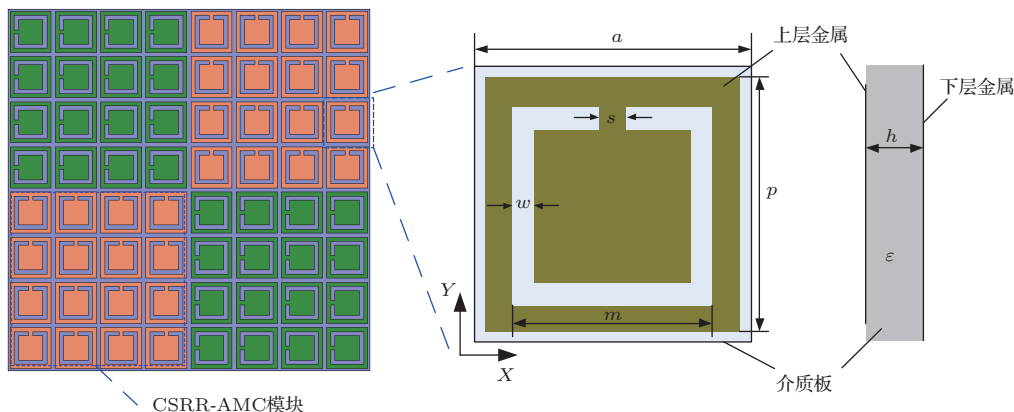


图 2 CSRR-AMC 正交阵列和单元结构

图 2 给出了由 CSRR-AMC 正交布阵得到的低 RCS 反射屏及 CSRR-AMC 单元. 由于 CSRR-AMC 结构的非对称性, 在  $X$  极化平面波(电场方向平行于  $X$  轴)和  $Y$  极化平面波(电场方向平行于

$Y$  轴)照射下, CSRR-AMC 将表现出不同的反射相位特征, 即 CSRR-AMC 是一种对入射波极化方式敏感的人工磁导体. 对于给定极化的入射波而言, 相互正交的 CSRR-AMC 可以等效为两种不同的

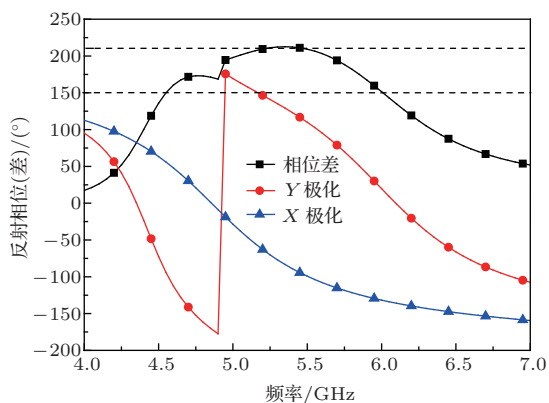


图3 反射相位(差)曲线

AMC. 通过合理设计 CSRR-AMC 单元结构使不同极化下的反射相位满足 (9) 式中的关系, 并且将 CSRR-AMC 块按照图 2 所示正交排布则可以实现宽频率范围相位对消, 降低鼻锥方向散射能量. 经优化后的 CSRR-AMC 单元的具体尺寸如下: 单元周期  $a = 10 \text{ mm}$ , 贴片边长  $p = 9 \text{ mm}$ , CSRR 边长  $m = 6 \text{ mm}$ , 缝隙宽度  $w = 0.6 \text{ mm}$ , 在平行  $X$  轴的一边开口, 宽度为  $s = 0.5 \text{ mm}$ , 介质板厚度

$h = 3 \text{ mm}$ , 介电常数为 2.65, 上下表面为金属层. 利用 Ansoft HFSS 软件中的 Floquet 端口和主从边界模拟无限周期结构, 通过仿真得到在不同极化波垂直照射下 CSRR-AMC 结构的反射相位, 如图 3 所示. 从图中的信息结合之前的理论推导可知, 在 4.55—6 GHz 之间为有效相位差频段, 在该频域内 RCS 满足 10 dB 以上的减缩量, 相对带宽达到 27.5%.

## 2.2 加载宽带低 RCS 反射屏的缝隙天线

加载宽带低 RCS 反射屏缝隙天线是用上节提出的宽带低 RCS 反射屏代替普通金属板作为波导缝隙天线的辐射口径面而构成的新型天线. 图 4 给出了不同加载方式的缝隙天线结构. 其中, (a) 为金属表面的原始天线, (b) 和 (c) 为两种加载不同排列方式反射屏的缝隙天线, 图中箭头代表 CSRR-AMC 模块的放置方向. 根据上一节的理论分析可知, 加载反射屏可消除金属面鼻锥方向的 RCS 峰值, 使天线整体 RCS 下降.

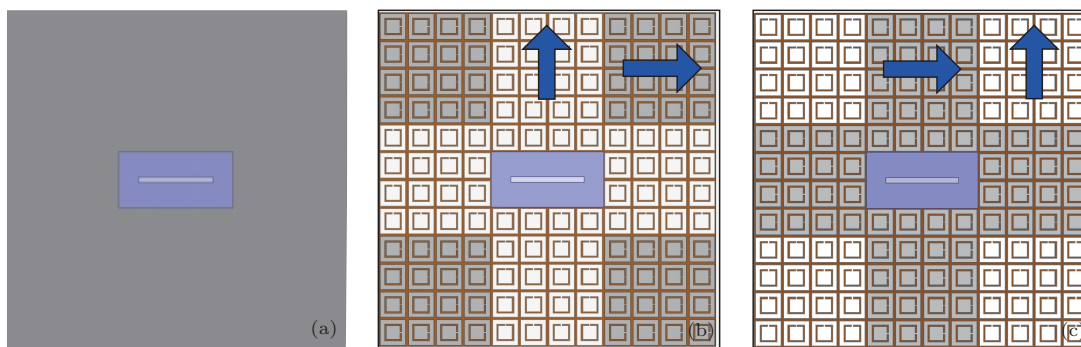


图4 三种不同加载形式的缝隙天线 (a) 方式 A; (b) 方式 B; (c) 方式 C

为验证以上分析, 图 5 给出了三种加载方式天线在垂直入射平面波照射下的 RCS 曲线. 从图中可以看出, 与原始天线相比, 加载材料后的天线均表现出良好的 RCS 减缩效果, 且加载方式对 RCS 减缩范围影响不大, 除个别频点外, RCS 减缩 10 dB 以上频带为 4.35—6.05 GHz, 与之前获得的有效相位差频段符合较好. 以加载图 4(c) 为例观察天线后向散射情况, 图 6 给出了平面波垂直照射下的天线的立体散射方向图, 由于加载材料后反射能量被分散到鼻锥以外的各个方向上, 因此鼻锥方向上 RCS 得到大幅缩减, 与之前的理论分析结果一致.

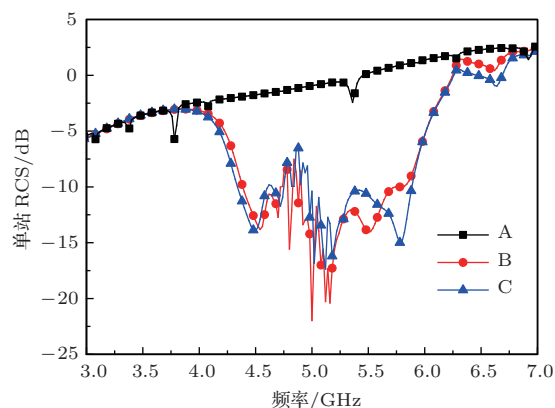


图5 仿真 RCS 曲线

接下来对三种结构的缝隙天线的辐射性能加以比较, 图7和图8分别给出了它们的反射系数和增益曲线. 与原始金属面天线A相比, 加载方式B对天线工作带宽影响不大, 而加载方式C的天线工作频带得到明显展宽, 这是由于加载反射屏后辐射缝隙与周围材料发生耦合改变了缝隙的阻抗匹配所致<sup>[15]</sup>; 增益方面, 加载方式B的H面最大辐射方向发生偏转, 主辐射方向增益略有下降; 而加载方式C使天线主辐射方向波束宽度变窄, 使前向增益有较大提升, 表1给出了各加载方式缝隙天线的具体辐射性能.

为解释反射屏提高天线增益性能的机理, 对

表1 天线辐射性能比较

加载方式	A	B	C
中心频率/GHz	5.65	5.67	5.67
工作带宽/%	4.8	6.5	8.6
前向增益/dBi	6.26	5.42	9.35

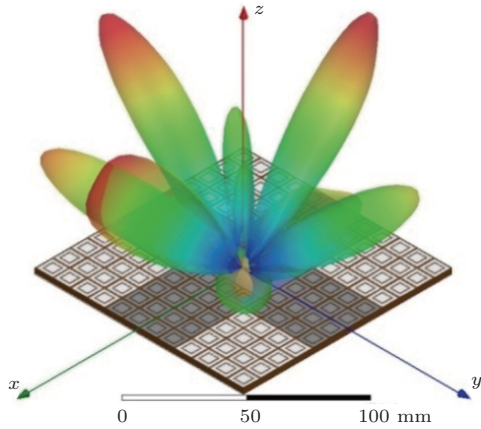


图6 后向散射方向图

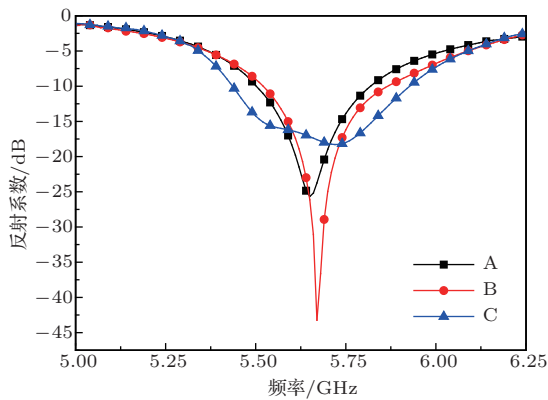


图7 天线反射系数仿真

CSRR-AMC做进一步研究. 从天线模型可知, 当天线辐射时, 电磁波平行于CSRR-AMC表面传播, 电场垂直于CSRR-AMC表面. 这时的CSRR-AMC表现出高阻表面特性, 抑制了表面波的传播, 天线的侧向辐射减弱, 主辐射方向能量得到加强. 由于CSRR-AMC是非对称结构, 因此对于不同来波方向的入射波其阻抗特性是不同的, 这就造成不同排布方式之间方向图的差异. 为验证以上分析, 采用直接传输法<sup>[16]</sup>获取CSRR-AMC的电磁带隙范围, 建立如图9所示的模型. 建立一个矩形波导,

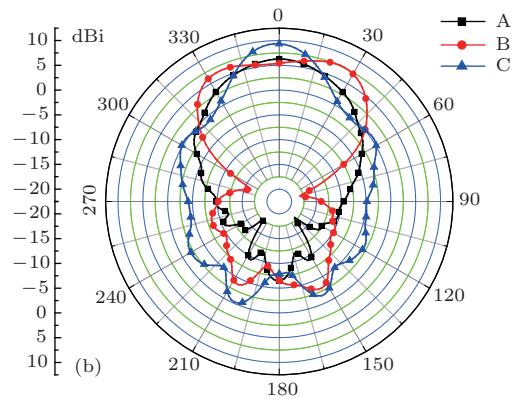
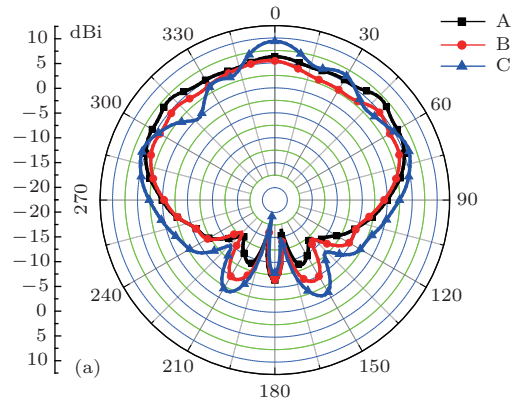


图8 天线方向图 (a) E面; (b) H面

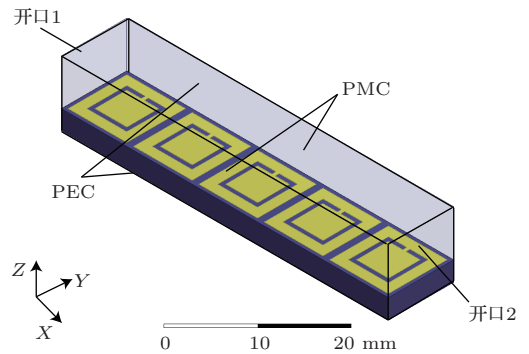


图9 直接传输方法仿真模型

尺寸为  $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ , 使 TEM 波在波导中沿  $X$  方向传播. 将 5 个 CSRR-AMC 周期单元放在波导的一个 PEC 面上, 对于图 9 中所示的开口方向垂直于电磁波传播方向的摆向称为垂直摆向, 将 AMC 贴片沿中心旋转  $90^\circ$  后开口方向平行于电磁波传播方向称为平行摆向.

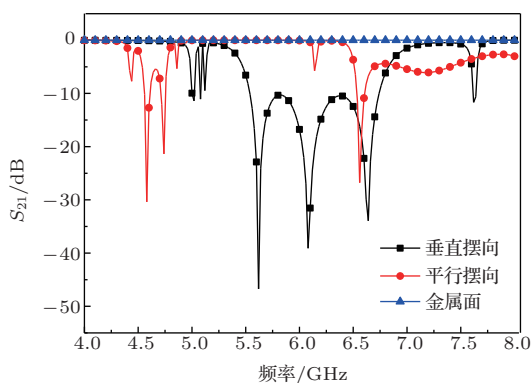


图 10 传输曲线对比

分别观察上述两种摆向的二端口波导的传输系数幅度并与纯金属面比较, 得到如图 10 所示结果. 从图中可以看出, 垂直摆向在  $5.5\text{--}6.75 \text{ GHz}$

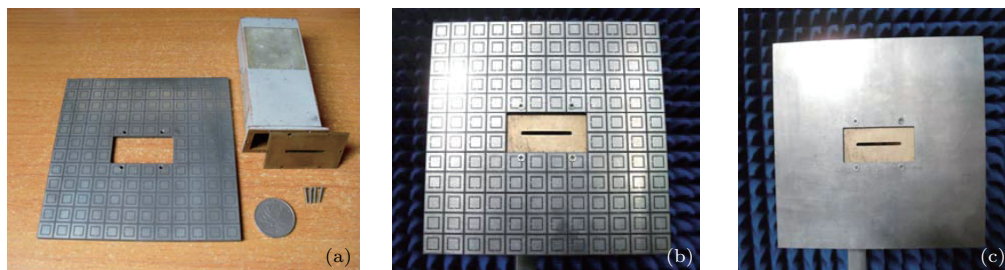


图 11 加工实物样品 (a) 反射屏和波导缝隙; (b) 加载天线; (c) 原始天线

利用型号为 Agilent N5230C 的矢量网络分析仪测试得到图 12 所示的天线的反射系数曲线. 测试结果表明加载反射屏后天线工作带宽增加约  $100 \text{ MHz}$ . 与仿真结果相比, 原始天线与加载天线中心工作频点均向高频略微偏移, 但仍然重合, 这是由于加工误差造成的. 图 13 为实测得到的天线辐射方向图, 可以看出加载天线主辐射方向波束变窄, 方向性得到改善, 与原始天线相比前向增益提高了  $3.2 \text{ dB}$ , 与仿真结果较为符合.

为了测量天线的散射性能, 在微波暗室中搭建如图 14 所示的实验测试系统. 选用  $1\text{--}18 \text{ GHz}$  宽带喇叭天线分别作为收发天线测量天线口径面的反射率. 两喇叭接在型号为 Agilent N5230C 的矢量网络分析仪的两个接口上, 摆放时距离地面约  $1$

范围内表现出明显的电磁带隙, 覆盖了天线的工作频段, 而平行摆向和金属面在天线工作的频段内均没有带隙产生. 由波导缝隙天线口径场可知, 在辐射缝隙的上下两侧表面波较强, 加载方式 C 在上下两侧的 AMC 块正好对应于以上分析中垂直摆向的情形, 在辐射缝隙上下两侧形成了高阻表面, 因此能够有效抑制表面波, 提高天线增益. 而加载方式 B 对应于平行摆向的情形, 由于没有在缝隙周围形成高阻表面因此没有增益提升效果.

### 3 实物测试

综合考虑辐射和散射性能, 本文选用加载方式 C 进行加工和实测. 波导缝隙天线参数为缝隙长  $26 \text{ mm}$ , 宽  $2 \text{ mm}$ , 馈电波导选用 C 波段的标准波导 (国标型号: WJB-58), 宽边为  $40.4 \text{ mm}$ , 窄边为  $20.2 \text{ mm}$ . 采用印刷电路板方法制备低 RCS 反射屏, 介质板选用介电常数为 2.65 的聚四氟乙烯玻璃布板 (F4B-2), 实物整体尺寸为  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ . 将反射屏通过螺钉固定在波导缝隙周围, 得到测试天线样品, 实物如图 11 所示.

$\text{m}$ , 距离待测天线  $0.6 \text{ m} (> 10\lambda_{0.57 \text{ GHz}})$  以满足远场条件, 喇叭口指向待测天线中心. 用吸波材料遮蔽转台等金属物, 减少环境对测试结果的影响. 理论上发射和接收天线应处于同一位置, 而实际测量是将两者并排摆放并有较小的夹角, 这在单站 RCS 测量中是允许的. 测试过程中待测天线的摆放位置对反射率结果影响较大, 必须保证天线正对标准喇叭才能得到正确结果. 由于已知天线对正时反射率幅度最高, 因此在本实验中通过调节天线方向使反射率幅值最大来判定天线已经对正, 并且通过多次观测求平均减小测量误差. 分别对加载天线和原始天线进行测试, 得到如图 15 所示的反射率曲线. 从图中可以看出, 实测的 RCS 减缩  $10 \text{ dB}$  频带为  $5.52\text{--}6.63 \text{ GHz}$ , 相对带宽达到  $20\%$ , 覆盖了天

线的工作频段,并且在4.74—7.32 GHz范围内均有3 dB以上的减缩效果,有效降低了天线的带内和带外RCS.从实验结果中还能看出,虽然实测的天线工作频带以及10 dB减缩频带较仿真结果均有频率偏移,但是由于设计的是宽带材料,因此仍然可以保证减缩频带完整覆盖整个天线的工作带宽,避免了加工精度对减缩性能的影响.

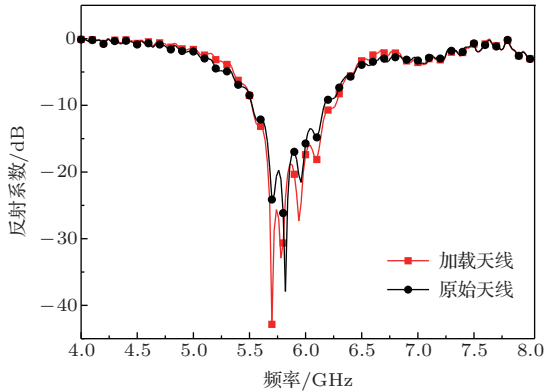


图12 实测反射系数

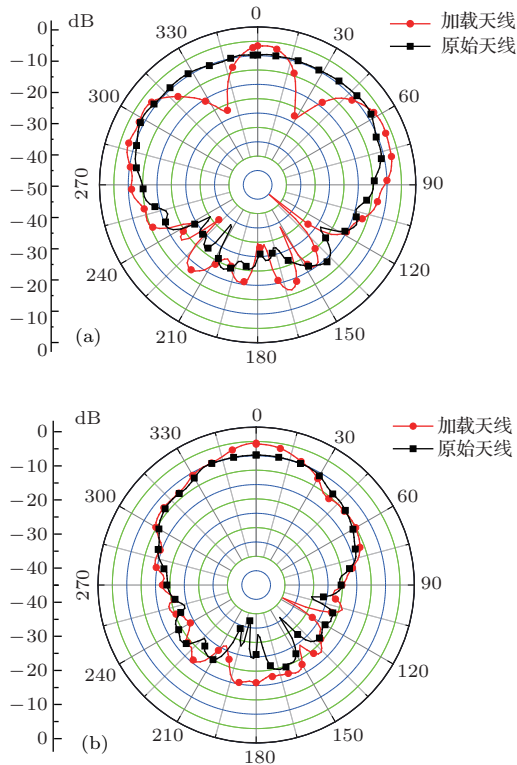


图13 归一化实测方向图对比 (a) E面; (b) H面

最后,将文献[12]和文献[13]以及本文设计天线的性能加以比较,得到表2所示结果.从表中可以看出,本文提出的天线设计在辐射和散射两个方

面较之前的设计都有较为优异的性能,特别是RCS减缩频带得到大幅展宽,再次验证了设计方法的有效性.

表2 不同AMC复合表面波导缝隙天线设计性能比较

	工作带宽 展宽/MHz	增益提 高/dB	RCS减缩带宽 (10dB以上)/%
文献[12]	—	1.7	8.5
文献[13]	60	5.1	5.8
本文	100	3.2	20

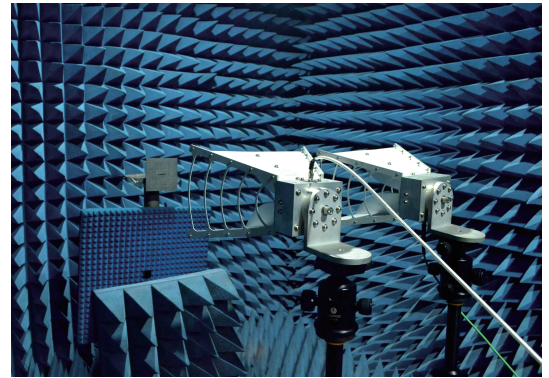


图14 实验测试环境

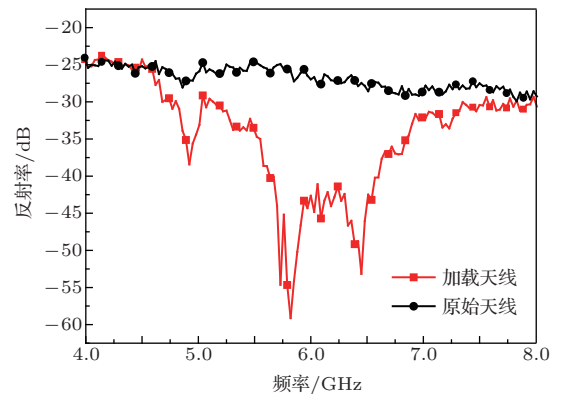


图15 实测反射率曲线

## 4 结 论

随着隐身技术的发展,如何在保证天线辐射性能的同时提升天线的散射性能成为天线领域研究的热点.本文提出的加载宽带低RCS反射屏的波导缝隙天线在提高天线增益、展宽工作频带的同时,在宽频域范围降低鼻锥方向的散射能量,天线带内和带外RCS均得到有效减缩.由于复合表面属于空域的RCS减缩设计,鼻锥方向RCS降低的同时伴随着其他角度上RCS抬升,因此该设计适用于

对特定空域有 RCS 减缩要求的场合. 接下来的研究是进一步考察天线的扫角 RCS 特性, 通过优化布阵结构控制反射波方向, 使反射能量峰值始终保持在威胁空域以外. 就目前应用来说, 鼻锥方向的 RCS 减缩是关注的重点, 因此本文提出的设计方法是行之有效的.

## 参考文献

- [1] Gong S X, Liu Y 2010 *Prediction and Reduction of Antenna Radar Cross Section* (Xi'an: Xidian University Press) p1 (in Chinese) [龚书喜, 刘英 2010 天线雷达截面预估与减缩 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 1 页]
- [2] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q, Yuan N C 2008 *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters* **7** 473
- [3] Wei H, Rong H J, Jun P G, Guo M Y 2007 *Microwave and Optical Technology Letters* **49** 1418
- [4] Ling J, Gong S X, Lu B, Yuan H W, Wang W T, Liu S 2009 *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* **23** 607
- [5] Lu B, Gong S X, Ling J, Wang W T 2010 *Journal of Electronic and Information Technology* **32** 199 (in Chinese) [路宝, 龚书喜, 凌劲, 王文涛 2010 电子与信息学报 **32** 199]
- [6] Costa F, Genovesi S, Monorchio A 2012 *Progress In Electromagnetics Research* **126** 317
- [7] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Transactions on Antennas and Propag.* **60** 2327
- [8] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Yao X, Li W Q 2012 *Journal of Electronic and Information Technology* **34** 2790 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 姚旭, 李文强 2012 电子与信息学报 **34** 2790]
- [9] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Transactions on Antennas and Propag.* **61** 1479
- [10] 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]
- [11] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, de Maagt P 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3630
- [12] Tan Y, Yuan N, Yang Y, Fu Y 2011 *Electronics letters* **47** 10
- [13] Yao X, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Zhao Y 2012 *Chinese Journal of Radio Science* **27** 1206 (in Chinese) [姚旭, 曹祥玉, 高军, 杨欢欢, 赵一 2012 电波科学学报 **27** 1206]
- [14] Gong Q, Zhang S, Gong S X, Jiao Y C, Lu B 2012 *Journal of Xidian University* **39** 134 (in Chinese) [龚琦, 张帅, 龚书喜, 焦永昌, 路宝 2012 西安电子科技大学学报 **39** 134]
- [15] De Cos, Elena M, Álvarez, Yuri, Las-Heras, Fernando 2011 *Microwave and Optical Technology Letters* **53** 1372
- [16] Liang L, Liang C H, Chen L, Su Z J 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 793 (in Chinese) [梁乐, 梁昌洪, 陈亮, 苏子剑 2008 强激光与粒子束 **20** 793]

# Design of high-gain broadband low-RCS waveguide slot antenna\*

Zhao Yi<sup>†</sup> Cao Xiang-Yu Zhang Di Yao Xu Li Si-Jia Yang Huan-Huan  
Li Wen-Qiang

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

(Received 27 August 2013; revised manuscript received 23 September 2013)

## Abstract

A novel design for high gain and low radar cross section (RCS) waveguide slot antenna is proposed. Low RCS screen composed of orthogonal array of complementary split ring resonator etched square patch artificial magnetic conductor (CSRR-AMC) is exploited on the antenna for radiation improvement and broadband RCS reduction. Measured results demonstrate that the operating bandwidth is increased by 100 MHz and the gain is enhanced by 3.2 dB with the proposed structure. Meanwhile, 10 dB RCS reduction is achieved over the range of 5.52–6.63 GHz, implying 20% relative bandwidth.

**Keywords:** waveguide slot antenna, gain-enhancement, radar cross section reduction, broadband

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf

**DOI:** [10.7498/aps.63.034101](https://doi.org/10.7498/aps.63.034101)

---

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [519763316@qq.com](mailto:519763316@qq.com)