

覆盖 X 和 Ku 波段的低雷达散射截面人工磁导体反射屏

郑月军 高军 曹祥玉 李思佳 杨欢欢 李文强 赵一 刘红喜

A low radar cross-section artificial magnetic conductor reflection screen covering X and Ku band

Zheng Yue-Jun Gao Jun Cao Xiang-Yu Li Si-Jia Yang Huan-Huan Li Wen-Qiang Zhao Yi Liu Hong-Xi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 024219 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024219

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024219>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带多孔硅表面缺陷腔的半无限光子晶体 Tamm 态及其折射率传感机理

Tamm state of semi-infinite photonic crystal based on surface defect cavity with porous silicon and its refractive index sensing mechanism

物理学报.2014, 63(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244207>

有耗色散光子晶体带隙结构的本征值分析新方法

A novel eigenvalue method for calculating the band structure of lossy and dispersive photonic crystals

物理学报.2014, 63(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184210>

光子晶体中基于有效折射率接近零的光束准直出射

Collimating emission from photonic crystals based on the quasi-zero-effective-index

物理学报.2014, 63(17): 174204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174204>

增益对一维周期结构慢光传输特性影响

Influence of gain on propagation properties of slow light in one-dimensional periodic structures

物理学报.2014, 63(17): 174202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174202>

基于空气孔的光子晶体亚波长成像的特性研究

Research of the characteristics of photonic crystals based on air holes sub-wavelength imaging

物理学报.2014, 63(15): 154212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154212>

# 覆盖 X 和 Ku 波段的低雷达散射截面人工磁导体反射屏\*

郑月军 高军<sup>†</sup> 曹祥玉 李思佳 杨欢欢 李文强 赵一 刘红喜

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2014年6月29日收到; 2014年7月20日收到修改稿)

设计并制备了一种基于人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 的覆盖 X 和 Ku 波段的宽带低雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 反射屏. 将双频带耶路撒冷十字形 AMC 结构和宽带双金属方形 AMC 结构复合, 通过参数优化, 使耶路撒冷十字形结构的反射相位反转频点与方形结构的反射相位零值频点重合或者非常接近, 进一步扩宽有效相位差区域, 从而拓展 RCS 减缩带宽. 给出了反射能量峰值方位的一般理论计算公式, 当入射角度、棋盘单元尺寸和观察频率确定后, 可通过公式计算出反射峰的方位. HFSS 软件仿真结果与理论计算结果符合较好, 验证了理论公式的正确性. 同时与等尺寸金属平板相比, 在 7.4—17.0 GHz 频带内, 除 9.8 GHz 附近的少数频点外, 天线后向 RCS 均有 -10 dB 以上的减缩, 基本覆盖 X 波段和 Ku 波段, 相对带宽为 78.7%, 在 11.6 GHz 时, 减缩量最大, 达到 40.3 dB. 加工了反射屏实物并进行测试, 测试结果与仿真结果基本一致, 证实了反射屏具有宽带的低 RCS 特性.

**关键词:** 人工磁导体, 宽带, 低雷达散射截面, 反射屏

**PACS:** 42.70.Qs, 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.64.024219

## 1 引言

雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 是表征目标平台对入射电磁波反射能力的度量, 是衡量各种平台隐身性能好坏的重要参数, 故减缩雷达散射截面以提高平台的隐身性能成为研究的热点 [1-7]. 雷达散射截面减缩的方法很多 [8-17], 采用人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 是主要的方法之一 [18-23]. AMC 是在一定频率范围内能满足理想磁导体边界条件的周期性结构, 具有同相反射特性 [24]. 文献 [18] 首次利用 AMC 的同相反射特性和理想电导体 (perfect electric conductor, PEC) 的反向反射特性所产生的  $180^\circ$  的相位差, 将两种结构以棋盘形式周期布阵, 根据相位相消原理, 将垂直入射到该反射屏的电磁波反射到其他方向, 有效减缩后向 RCS. 这种反射屏

设计简单, 便于加工, 且剖面低, 易于和目标平台共形. 然而由于 AMC 的同相反射带宽有限, 制约着 RCS 的减缩带宽. 为了拓展 RCS 减缩带宽, 目前主要采用以下两种方法: 一是扩宽 AMC 的同相反射带宽, 文献 [25] 采用多个分段六边形的结构, 测试结果表明, AMC 的反射相位带宽达到 26%; 文献 [26] 采用 Koch 分形, 使 AMC 的反射相位带宽提高到了 44.6%; 其二是将 PEC 用 AMC 代替, 通过合理设计, 使两种 AMC 的相位在较宽范围内保持  $180^\circ \pm 30^\circ$  的有效相位差. 方法二可将窄带 AMC、宽带 AMC 甚至是多频带 AMC 相互复合, 扩展 RCS 的减缩带宽, 因此引起了研究者的极大兴趣 [19-23]. 文献 [19] 将两种不同大小的方形贴片周期结构复合减缩后向 RCS, 测试结果表明, 除 6.1 GHz 附近少数频点外, RCS 减缩 -10 dB 以上的带宽为 5.1—7.5 GHz, 相对带宽达到 32%; 文献

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61271100, 61471389) 和陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (批准号: 2012JM8003) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [gjgj9694@163.com](mailto:gjgj9694@163.com)

[20] 基于互补开口谐振环在不同极化波照射下的奇异电磁特性, 设计了仅由单一结构组成的反射屏, 在 7.4—10.5 GHz 的频带范围, 其 RCS 减缩 -10 dB 以上, 相对带宽到达了 34.6%; 文献 [21] 将三个不同尺寸的金属方片复合, 其 RCS 减缩 -10 dB 以上的频段覆盖整个 X 波段 (7.7—13.1 GHz), 进一步提高了 RCS 的减缩带宽; 文献 [23] 将两种不同大小的耶路撒冷十字形结构组合在一起构成反射屏, 其 RCS 减缩 -10 dB 的带宽为 14.4—21.8 GHz (41%), 且在 ±30° 角域仍有 20% 的带宽.

为进一步拓展 RCS 的减缩带宽, 本文将结构简单、单元尺寸相同的双频带耶路撒冷十字结构和宽带双方形贴片结构复合, 按棋盘的形式进行布阵组成反射屏. 单元结构在较宽的频带范围, 相位差保持在 150°—210° 之间, 反射屏 RCS 减缩 -10 dB 以上的带宽为 7.4—17.0 GHz, 基本覆盖 X 波段和 Ku 波段.

## 2 原理与设计分析

### 2.1 棋盘布阵原理

AMC1 和 AMC2 棋盘布阵如图 1 所示, 每个 AMC 块均有多个 AMC 单元, 通常采用阵列天线的分析方法对棋盘布阵的原理进行研究 [24]. 假设在垂直入射波照射下, AMC1 与 AMC2 都是全反射结构, 则 AMC1 和 AMC2 产生相同幅度的电场, 则这两种结构的总反射电场为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{AMC1}} \cdot A_{F\text{AMC1}} + \mathbf{E}_{\text{AMC2}} \cdot A_{F\text{AMC2}}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{E}_{\text{AMC1}} = E_1 e^{j\varphi_1} \mathbf{E}_{\text{element1}}$ ,  $\mathbf{E}_{\text{AMC2}} = E_2 e^{j\varphi_2} \mathbf{E}_{\text{element2}}$ ,  $E_1 \mathbf{E}_{\text{element1}}$  与  $E_2 \mathbf{E}_{\text{element2}}$  一致. 垂直入射的电磁波与  $z$  轴和  $x$  轴的夹角分别 0° 和 90°, 有  $A_{F\text{AMC1}} = A_{F\text{AMC2}} = 2$ , 总反射场化简为

$$\mathbf{E} = 2E_1 (e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}) \mathbf{E}_{\text{element1}}. \quad (2)$$

假设要在法线方向, 反射的电磁波能量比单元同相情况下小 -10 dB 以上, 则

$$|\mathbf{E}|^2 / |\mathbf{E}_0|^2 \leq -10 \text{ dB}, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{E}_0$  表示各单元等幅同相情况下的理想反射场. 进一步推导可得

$$\left| e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2} \right| = \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \leq 0.6325, \quad (4)$$

由此可得 AMC1 与 AMC2 的相位差范围为

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ. \quad (5)$$

因此只要 AMC1 与 AMC2 的相位差满足在 143°—217° 之间, 一般取 150°—210°, 即可实现在电磁波垂直入射情况下后向 RCS 减缩 -10 dB 以上.

AMC1 块和 AMC2 块按棋盘结构进行布阵组成反射屏, 利用 AMC1 和 AMC2 的相位差进行相位相消, 入射电磁波能量将被反射到其他方向, 从而达到减缩法向 RCS 的目的. 当入射波垂直照射时, 其能量主要被反射到四个象限的对角线方向, 然而对于更一般的入射情况, 反射能量峰值方位可通过下面的理论公式进行计算 [23]:

$$\tan \phi = \frac{\sin \theta_i \sin \phi_i \pm (2n + 1) \frac{\lambda}{2L_c}}{\sin \theta_i \cos \phi_i \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2W_c}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \frac{\sin \theta_i \sin \phi_i \pm (2n + 1) \frac{\lambda}{2L_c}}{\sin \phi} \\ &= \frac{\sin \theta_i \cos \phi_i \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2W_c}}{\cos \phi}. \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\theta_i$  和  $\phi_i$  是入射波与  $z$  轴和  $x$  轴的夹角,  $\theta$  和  $\phi$  是反射波与  $z$  轴和  $x$  轴的夹角,  $\lambda$  是计算频点所对应的波长,  $L_c$  和  $W_c$  分别是棋盘结构单元 (AMC 块) 的长和宽,  $m$  和  $n$  为非负整数,  $m + n + 1$  表示反射能量峰出现的阶数. 当  $L_c = W_c$  时,  $m = n$ , 对于一阶反射能量峰,  $m = n = 0$ . 从 (6), (7) 式可以看出, 入射波角度和棋盘结构尺寸固定后, 频率成为影响反射能量偏离法线方向的主要因素, 频率越高,  $\theta$  越小, 反射能量越向法向集中. 同时公式表明, 当入射波角度和频率固定后, 反射能量峰值方位只与棋盘结构单元的尺寸有关 ( $L_c$  与  $W_c$ ), 与其具体结构无关, 即与 AMC 单元结构无关, 因此该理论公式更具一般性.

### 2.2 单元结构设计与分析

本文 AMC 单元设计受方法二启发, 将双频的 AMC1 和宽带的 AMC2 复合, 通过参数优化, 使 AMC1 的反射相位反转频点与 AMC2 的反射相位零值频点重合或者有较小的差值, 进一步拓展 AMC1 与 AMC2 的有效反射相位差带宽. AMC1

和 AMC2 的单元结构及优化后的参数如图 2 所示, 自上而下, 分为三层, 第一层是复合结构, AMC1 由耶路撒冷十字构成, 十字臂长  $L1 = 5.6$  mm, 宽  $w1 = 0.8$  mm, 十字帽长  $L2 = 2.4$  mm, 宽  $w2 = 0.7$  mm; AMC2 由棋盘排列的方形贴片构成, 贴片边长分别为  $L3 = 2.2$  mm,  $L4 = 3.0$  mm; 第二层是介质层, 相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.65$ , 损耗正切为  $\tan \delta = 0.002$ , 厚度  $h = 3$  mm; 第三层为金属接地板, 单元周期  $P = 9.0$  mm. 利用 HFSS 软件中的主从边界和 Floquet 端口进行仿真建模.

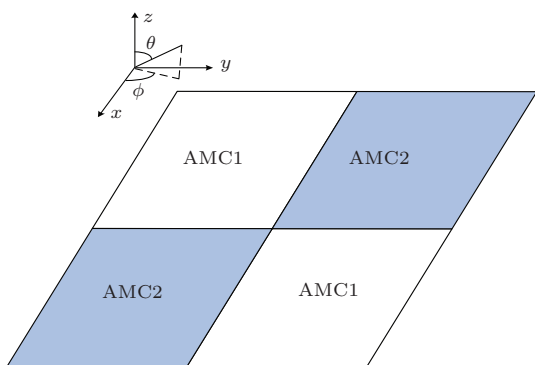


图1 棋盘布阵示意图

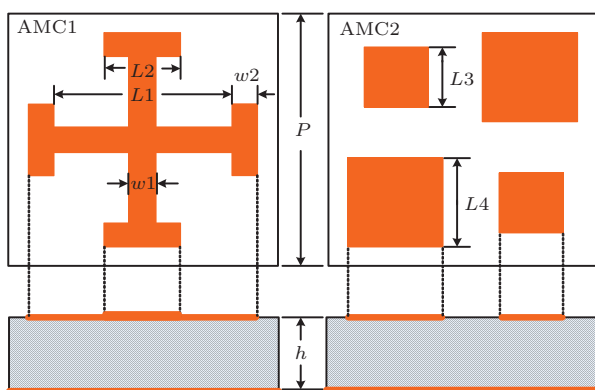


图2 AMC单元结构图

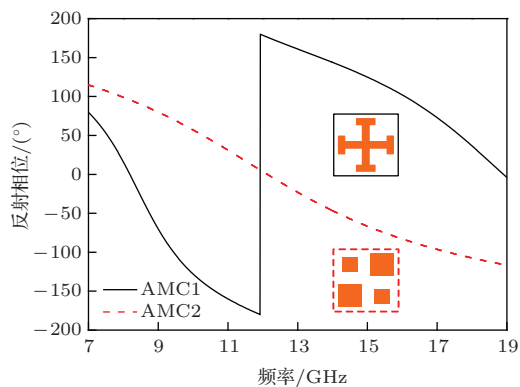


图3 AMC单元的反射相位曲线

AMC1 与 AMC2 单元在垂直入射波照射下的反射相位曲线如图 3 所示, 从图中看出, AMC1 出现了两个反射相位零点, 分别为 8.2 GHz 和 18.9 GHz, 并在 11.9 GHz 处反射相位出现反转, AMC2 的反射相位零点为 12.1 GHz, AMC1 的反射相位反转频点和 AMC2 的反射相位零值频点只相差 0.2 GHz, 满足设计要求. 图 4 给出了 AMC1 与 AMC2 单元的反射相位差曲线, 图中的阴影部分为有效相位差区域 ( $180^\circ \pm 30^\circ$  的角度范围). 从图中可以看出, 垂直入射下, 在 9.0—17.8 GHz 的频带范围, AMC1 和 AMC2 反射相位差处于有效相位差区域内, 有效反射带宽得到拓展.

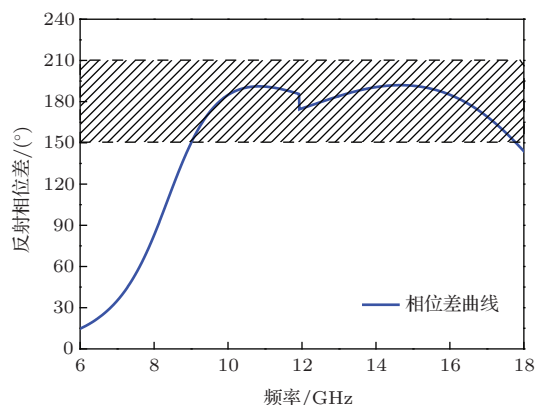


图4 AMC单元的反射相位差曲线

### 3 棋盘结构反射屏性能分析

为验证反射屏的散射性能, 建立了  $4 \times 4$  的棋盘单元阵, 每一个棋盘单元由 4 个 AMC1 单元或者 AMC2 单元组成. 图 5 给出了入射波垂直照射下  $4 \times 4$  棋盘单元阵的后向 RCS 减缩曲线, 除 9.8 GHz 附近少数频点外 (最小减缩为 9.3 dB), 在 7.4—17.0 GHz 的频段范围, RCS 均有  $-10$  dB 以上的减缩, 约为 9.6 GHz, 相对带宽达到 78.7%, 覆盖整个 X 波段和 Ku 波段的大部分频点, 大大拓展了 RCS 减缩带宽, 并在 11.6 GHz 处, 最大减缩量达到 40.3 dB. 从图中还可看出, 在 8.1, 11.6, 12.6 和 16.5 GHz 附近产生了四个减缩峰值, 后三个峰值频点与反射相位差  $180^\circ$  对应的频点基本一致, 其中略微的频差主要是组成棋盘单元阵的 AMC 单元个数较少, 棋盘单元的反射性能受到影响所致, RCS 减缩的总体趋势与相位差变化相符. 可 8.1 GHz 并不在有效反射相位差区域内, 其仍产生了减缩峰值. 分析认为 8.1 GHz 处于 AMC1 反射相位零点附近,



此时 AMC2 相当于金属平板, 类似于 AMC 和 PEC (perfect electric conductor) 棋盘结构, 故仍产生了减缩峰值, 且此作用会影响附近频点的 RCS 减缩. 受此影响, 原本在 9.8 GHz 附近出现的减缩峰值没有出现. 17.0—17.8 GHz 以上的高频部分, 虽在有效相位差区域, 但 RCS 减缩未达到 -10 dB, 分析认为, 这可能是高频时电尺寸增大, 以及周期边界下的高次模使 RCS 增大.

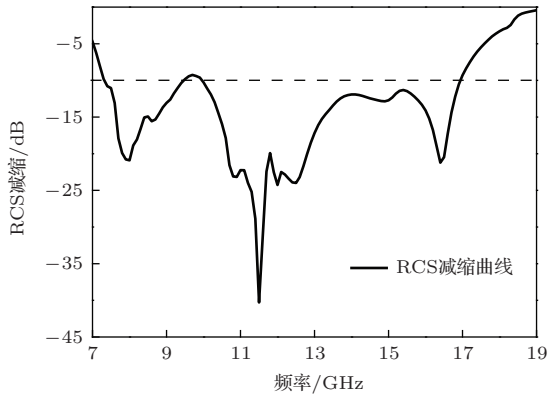


图5 RCS 减缩曲线

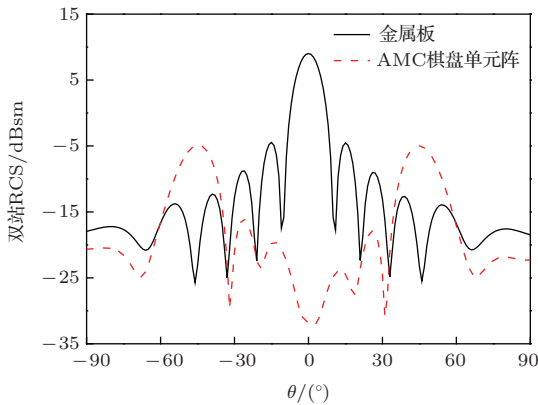


图6 11.6 GHz 处  $\phi = 0^\circ$  平面的双站 RCS

根据 RCS 减缩曲线, 研究了 11.6 GHz (RCS 减缩最大点) 的双站 RCS 特性. 在垂直入射波照射下, 棋盘单元阵与金属板在  $\phi = 0^\circ$  平面的双站 RCS 对比曲线如图 6 所示. 从图中可以看出, 在  $-31^\circ$ — $32^\circ$  的角域范围, RCS 均有减缩, 在  $\theta = 0^\circ$  时, 金属板的后向 RCS 为 9.0 dBsm, 棋盘单元阵的后向 RCS 为 -31.3 dBsm, RCS 减缩了 -40.3 dB, 在  $\theta = \pm 45^\circ$  时出现了两个反射能量峰值, 其大小为 -4.9 dBsm, 与金属板最大反射峰值相比, RCS 仍有 13.9 dB 的减缩. 后向反射能量减小, 其他方向反射能量增大, 结果证实反射屏的 RCS 减缩效

果. 但由于不是吸波, 总体反射能量没有减小.

根据 (6) 式, 入射波垂直照射时,  $\theta_i$  和  $\phi_i$  都为 0, 计算得  $\phi = 45^\circ$ , 入射电磁波的能量主要被散射到四个象限对角线方向上. 选择 8.1, 12.6 和 16.5 GHz 三个代表性的频点 (RCS 减缩峰值点), 根据 (7) 式, 计算其在  $\phi = 45^\circ$  平面的  $\theta$  值, 当入射波频率分别为 8.1, 12.6 和 16.5 GHz 时,

$$\theta_{8.1\text{GHz}} = \pm 46^\circ,$$

$$\theta_{11.6\text{GHz}} = \pm 27^\circ,$$

$$\theta_{16.5\text{GHz}} = \pm 21^\circ.$$

图 7 给出了利用 HFSS 软件仿真  $\phi = 45^\circ$  平面双站 RCS 所得的结果, 从图 7(a) 的三维图可以直观地看出, 反射能量峰值出现在四个象限的对角线方向, 且随着入射波频率的逐渐增大, 能量峰值逐渐向棋盘单元阵的法线方向集中, 三维图结果验证了计算结果  $\phi = 45^\circ$  和  $\theta$  值随频率变化趋势的正确性. 8.1 GHz 时的棋盘单元阵和金属板的双站 RCS 对比曲线如图 7(b) 所示, 从图中可以看出, 在  $\theta = \pm 43^\circ$  出现了两个 -4.3 dBsm 的反射峰值, 相比金属板反射峰值, RCS 减小 10.4 dB, 在  $\theta = 0^\circ$  时, RCS 减缩最大达到 20.4 dB. 图 7(c) 给出了 12.6 GHz 的双站 RCS 对比曲线, 在  $\theta = \pm 26^\circ$  时分别出现了大小为 1.8 dBsm 的反射峰值, 与金属板峰值相比, RCS 减缩了 8.0 dB, 在  $\theta = 0^\circ$  时减缩量达到最大, 最大减缩量为 24.1 dB. 16.5 GHz 的双站 RCS 情况如图 7(d) 所示, 在  $\theta = \pm 20^\circ$  的角域出现了两个反射峰值, 大小为 4.5 dBsm, 该频点金属板的反射峰值为 12.7 dBsm, RCS 减缩了 8.2 dB, 在  $\theta$  的零点处, 出现了一个小反射峰值, 大小为 -8.6 dBsm, 与金属板峰值相比, RCS 降低了 21.3 dB. 从以上三个频点的双站 RCS 情况可以看出, 在  $\phi = 45^\circ$  平面, 金属板用棋盘单元阵代替后, 后向强反射能量被打散, 反射后最大能量值相比金属板反射峰值均有 8.0 dB 以上的减小, 减缩量最大值点都出现在  $\theta = 0^\circ$  处, 最大减缩量均在 20 dB 以上. 仿真所得的  $\theta$  值与 (7) 式计算的值基本符合, 证实了理论公式计算结果正确可靠, 故设计时可根据理论公式调整反射能量峰值出现的角域.

反射屏最终由  $2 \times 2$  的棋盘单元阵组成, 并进行了实物加工. 图 8 给出了加工的反射屏实物, 其整体尺寸为 288 mm  $\times$  288 mm  $\times$  3 mm. 为了验证反射屏的 RCS 减缩特性, 用 Agilent N5230C 矢

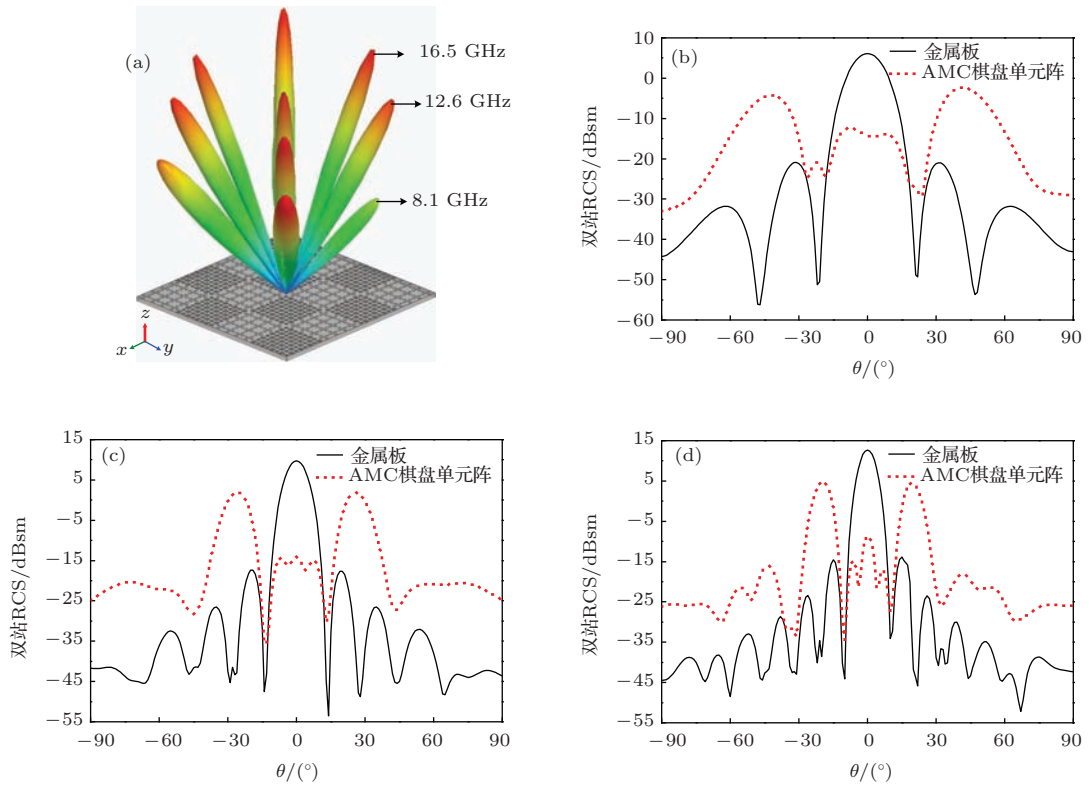


图7 (网刊彩色)  $\phi = 45^\circ$  平面的双站 RCS (a) 三个频点的双站 RCS 三维图; (b) 8.1 GHz; (c) 12.6 GHz; (d) 16.5 GHz

量网络分析仪和两个宽带喇叭天线等测量器件, 对加工的实物进行了测试, 其测试示意图如图8所示. 测试方法参考了文献[27], 由于实验条件的限制, 仅测试了7—12 GHz频段的反射屏反射损耗曲线, 如图9所示. 从图中可以看出, 在7.4—12.0 GHz的频段范围内, RCS 减缩均在10 dB以上, 在8.0 GHz和11.7 GHz附近出现了两个减缩峰值. 在11.8 GHz处, 反射损耗最小, 为-40.7 dB. 其中的微小差异是由于加工以及测试时反射屏摆放位置引起的, 经过多次测试比较, 测试结果与仿真结果基本一致, 验证了反射屏对垂直入射电磁波具有宽带低RCS特性.

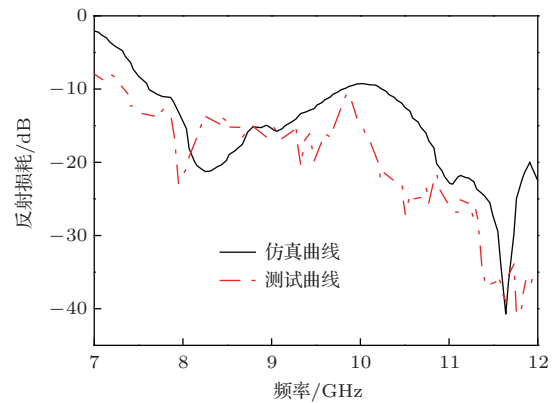


图9 实测与仿真对比

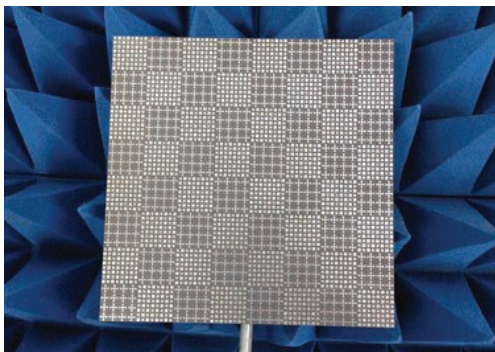


图8 (网刊彩色) 反射屏实物及测试示意图

## 4 结 论

本文设计了一种基本覆盖整个X波段和Ku波段的宽带低雷达散射截面反射屏. 将双频带的耶路撒冷十字形结构和宽带的双金属方片结构复合, 通过合理设计, 使双频带反射相位反转频点和宽带相位零值频点重合或者接近, 进一步扩宽有效相位差区域, 进而拓展 RCS 减缩带宽, 并给出了反射能量峰值方位的理论计算公式, 仿真计算结果与理论计算结果符合较好. 加工了实物并进行实验测试, 测

试结果与仿真结果基本一致. 本文的研究对于宽带低RCS反射屏设计具有一定的借鉴作用.

## 参考文献

- [1] Jia Y T, Liu Y, Hao Y W, Gong S X 2014 *Electron. Lett.* **50** 345
- [2] Pan W B, Huang C, Chen P, Ma X L, Hu C G, Luo X G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **62** 945
- [3] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2014 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **62** 163
- [4] Zheng Y J, Gao J, Cao X Y, Yuan Z D, Yang H H 2014 *J. Microwave* **5** 54 (in Chinese) [郑月军, 高军, 曹祥玉, 袁子东, 杨欢欢 2014 微波学报 **5** 54]
- [5] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [6] Li W Q, Gao J, Cao X Y, Yang Q, Zhao Y, Zhang Z, Zhang C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 124101 (in Chinese) [李文强, 高军, 曹祥玉, 杨群, 赵一, 张昭, 张呈辉 2014 物理学报 **63** 124101]
- [7] Zheng Y J, Gao J, Cao X Y, Yuan Z D, Li W Q 2014 *J. Air Force Engin. Univ. (Nat. Sci. Edit.)* **5** 57 (in Chinese) [郑月军, 高军, 曹祥玉, 袁子东, 李文强 2014 空军工程大学学报 (自然科学版) **5** 57]
- [8] Euler M, Fusco V F 2010 *IEEE Microw. Opt. Technol. Lett.* **52** 577
- [9] Jiang W, Gong S X, Hong T, Wang X 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 2162 (in Chinese) [姜文, 龚书喜, 洪涛, 王兴 2010 电子学报 **38** 2162]
- [10] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **60** 2327
- [11] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **60** 2740
- [12] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 055201
- [13] Li M, Xiao S Q, Bai Y Y, Wang B Z 2012 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **11** 748
- [14] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **61** 1479
- [15] Lin B Q, Zhao S H, Wei W, Da X Y, Zheng Q R, Zhang H Y, Zhu M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024201
- [16] Li S J, Cao X Y, Liu T, Yang H H 2014 *Radio Engineering* **23** 222
- [17] Li S J, Gao J, Cao X Y, Zhang Z 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 213703
- [18] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, Maagt P 2007 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **55** 3630
- [19] Fu Y Q, Li Y Q, Yuan N C 2011 *IEEE Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 712
- [20] 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]
- [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, Li W Q 2013 *Electron. Lett.* **49** 1312
- [23] Galarregui J C I, Pereda A T, Falcón J L M, Gonzalo I E R, Maagt P 2013 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **61** 6136
- [24] Zhang Y 2011 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [张泳 2011 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [25] Cos M E, Álvarez Y, Las-Heras F 2011 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **10** 615
- [26] Liu S Y, Wu Q, Hua J, Chen M L 2012 *Proceedings of the 5th GSMM* Harbin, China, May 27–30, 2012 p70
- [27] Fan Z H, Chen M, Wang S N, Chen R S, Du B, Liang Z M 2009 *Chinese Journal of Radio Science* **24** 724 (in Chinese) [樊振宏, 陈明, 汪书娜, 陈如山, 杜彪, 梁赞明 2009 电波科学学报 **24** 724]

# A low radar cross-section artificial magnetic conductor reflection screen covering X and Ku band\*

Zheng Yue-Jun Gao Jun<sup>†</sup> Cao Xiang-Yu Li Si-Jia Yang Huan-Huan Li Wen-Qiang  
Zhao Yi Liu Hong-Xi

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

( Received 29 June 2014; revised manuscript received 20 July 2014 )

## Abstract

Based on the properties of the artificial magnetic conductor (AMC), a broadband low radar cross-section (RCS) reflection screen covering X and Ku band is designed and fabricated. The reflection screen is formed by combining two AMC cells, i.e., AMC1 with a dual band Jerusalem cross structure, and AMC2 with a wideband metal square patch structure. By optimizing the structures of these AMC cells, it is achieved that the frequency corresponding to the inversion point of the AMC1 reflection phase curve is equal or close to the frequency corresponding to the null point of the AMC2 reflection phase curve. Therefore, the valid reflection phase difference band is broadened and the RCS is reduced in a wider band. In addition, presented in this paper is a theoretical formula to calculate the reflection energy peak direction. When the incident angle, chessboard unit dimension and observed frequency are fixed, the reflection energy peak direction can be calculated by the formula. The calculation results from the theoretical formula are consistent with the HFSS simulation results, so the theoretical formula is valid. The simulation results indicate that, compared with the same-dimension metal RCS, the backscattering RCS is reduced by more than 10 dB in a frequency range of 7.4–17.0 GHz, except minority frequencies close to 9.8 GHz. The 10 dB-reducing RCS bandwidth covers the entire X band and most of Ku band, and the relative bandwidth is 78.7%. The largest reduction reaches 40.3 dB at 11.6 GHz. The simulations and the measurements are in good agreement. The results validate the broadband low RCS property of the reflection screen.

**Keywords:** artificial magnetic conductor, broadband, low radar cross section, reflection screen

**PACS:** 42.70.Qs, 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.64.024219

---

\* Project support by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61271100, 61471389) and the Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2012JM8003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [gjg9694@163.com](mailto:gjg9694@163.com)