

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线*

郑月军 高军[†] 曹祥玉 郑秋容 李思佳 李文强 杨群

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2014年5月11日收到; 2014年6月17日收到修改稿)

设计并制备了一种兼具高增益和低雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的微带天线, 通过给原始微带天线加载双屏频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 覆层, 使其具有宽带的 3 dB 增益带宽和宽带、宽角度的低 RCS 特性. 该 FSS 单元的上层是四个开口处都焊有电阻的金属环结构, 下层是中间和四边都开缝的金属贴片结构. 上层加载的电阻主要用于吸收雷达入射波, 减缩天线 RCS; 下层的贴片和天线地板构成 Fabry-Perot 谐振腔, 提高天线增益. 在 5.75—11.37 GHz 频带内, $S_{22} < -10$ dB, $S_{12} < -10$ dB; 在 11.21—11.54 GHz 频带内, S_{11} 反射系数相位曲线斜率为正, 幅度模值均在 0.86 以上. 实验结果表明: 与原始天线相比, 在谐振频点 11.73 GHz 处, 天线增益提高 3.4 dB, E, H 面的半功率波束宽度分别减小 16° 和 50° ; 天线的 3 dB 增益带宽为 10.00—12.40 GHz, 完全覆盖阻抗带宽. 在 4.10—11.30 GHz 频带内, 天线法向 RCS 均有 3 dB 以上的减缩, 最大减缩 23.08 dB; 4.95 GHz 处的单站 RCS 在 -20° — 20° 的角域、双站 RCS 在 -37° — 37° 的角域均有 3 dB 以上的减缩. 实验结果证实了该 FSS 覆层可用于同时改善天线的辐射和散射性能.

关键词: 频率选择表面, 低雷达散射截面, 高增益, 宽带

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.63.224102

1 引言

微带天线具有低剖面、质量轻、易共形的优点, 广泛应用于各种飞行平台, 然而微带天线损耗大、增益低、易被雷达探测, 因此, 提高微带天线增益和减缩其雷达散射截面 (RCS) 成为研究的热点. 为解决微带天线的这些问题, 诸多学者进行了有效的研究. 采用组成天线阵^[1]、多层结构^[2]、部分介质缺失^[3]、人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC)^[4,5]、频率选择表面 (frequency selective surface, FSS)^[6,7] 来提高微带天线增益; 采用改变天线外形^[8]、吸波材料 (radar absorbing material, RAM)^[9,10]、人工磁导体^[11,12]、频率选择表面^[13–17] 来减缩微带天线的 RCS. 从已有的研究来看, 频

率选择表面是实现同时提高微带天线增益和减缩 RCS 的很好选择.

频率选择表面是对电磁波具有带通或带阻特性的空间滤波器, 是一种一维或二维周期阵列结构, 其频响特性受频率、入射角、极化方式等因素的影响^[18,19]. FSS 覆层是 FSS 应用于天线的主要形式之一, 保护天线的同时改善天线的性能, 比如提高天线的增益^[6,7]、减缩天线 RCS^[16,17]、扩宽天线频带^[20]、控制天线波束^[21]、旋转极化方式^[22] 等. 文献^[6] 通过加载双 FSS 覆层实现对双频天线的辐射性能改善, 但是双覆层结构增加了天线剖面高度; 文献^[7] 通过加载分形树结构的具有部分反射特性的 FSS 覆层, 同时改善天线辐射和散射性能, 但其辐射和散射性能只在 8—11 GHz 范围有较明显改善; 文献^[15] 将电谐振器结构与电阻膜复合,

* 国家自然科学基金 (批准号:61271100) 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.

[†] 通讯作者. E-mail: erikzhengyang@126.com

设计了一种超薄、宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体; 文献 [16] 通过利用带阻型耶路撒冷十字 FSS 的反射损耗, 设计了一种吸波体. 但是将吸波电阻和 FSS 复合, 以覆层的形式应用于天线, 同时改善其辐射和散射性能的报道却鲜有见到. 因此, 本文进行了这方面的研究.

本文将 FSS 部分反射特性和电阻的吸波特性结合, 综合考虑辐射性能和散射性能改善, 设计了一种新结构、高性能的 FSS 覆层, 将其置于原始微带天线辐射方向前方, 如图 1 (b) 所示; 构成一种新型微带天线, 分析了其辐射增强和 RCS 减缩机理; 仿真和实验验证表明: 该天线兼具宽带的 3 dB 增益带宽和宽带、宽角度的低 RCS 特性.

2 FSS 覆层设计与分析

FSS 单元结构如图 1 (a) 所示, 其上下两层结构具有非对称性. 上层是由四边中间处都开有缺口的金属环和缺口处焊接的四个 130Ω 电阻组成的吸波层, 环的外边长 $L_1 = 8 \text{ mm}$, 环宽 $w_2 = 1 \text{ mm}$, 缺口长 $w_1 = 1 \text{ mm}$; 中间层是 FR4 介质层, 介电常数 $\epsilon_r = 4.4$, 电损耗正切 $\tan \delta = 0.002$, 高度 $t = 3.5 \text{ mm}$; 下层是由开有缝隙的金属贴片形成的反射层, 中心十字缝隙和边缘缝隙长度相同, $L_2 = 6.8 \text{ mm}$, 十字缝隙宽 $w_3 = 0.14 \text{ mm}$, 四边缝隙宽 $w_4 = 0.1 \text{ mm}$. 这样的结构设计 (对称结构), 可使 FSS 覆层对于任意极化和不同角度的电磁波都具有较好的稳定性.

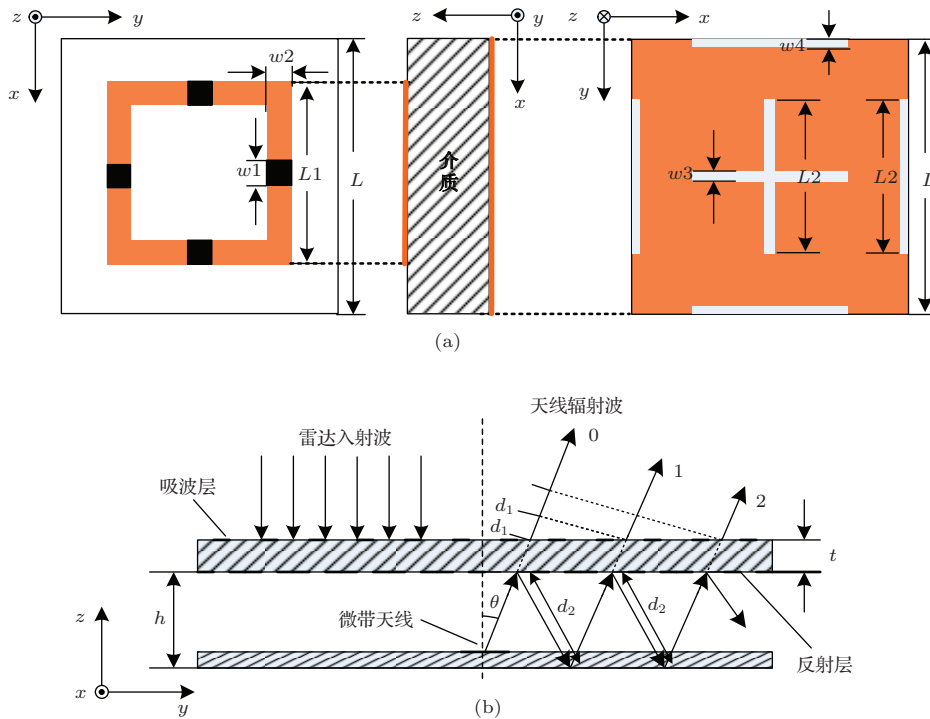


图 1 FSS 和新天线的结构图 (a) FSS 结构图; (b) 新天线结构图

将吸波层和反射层结合是设计该 FSS 覆层的关键. 对于反射层设计, 根据射线理论 [23] 和 Fabry-Perot 谐振腔模型 [6], FSS 覆层的反射层和微带天线地板构成谐振腔, 天线辐射的电磁波在腔内多次反射, 传播距离变长, 其中直接透射和多次反射后透射的电磁波的总相位差包含路径上的相位延迟和接地板的反射系数相位以及反射层的反射系数相位. 根据图 1 (b) 中的几何关系:

$$d_1 = 2h \tan \theta \sin \theta = 2h \left(\frac{1}{\cos \theta} - \cos \theta \right), \quad (1)$$

$$d_2 = \frac{h}{\cos \theta}, \quad (2)$$

其中 d_1 为射线 1 和射线 0 透射后的路径差, d_2 为射线 1 被反射层反射后到天线地板的路径, h 为反射层距天线地板高度, θ 角如图 1 (b) 所示. 射线 1 与射线 0 总相位差为

$$\begin{aligned} \Delta \phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} d_1 - \frac{2\pi}{\lambda} 2d_2 + \phi_r + \phi_d \\ &= \phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda} h \cos \theta; \end{aligned} \quad (3)$$

射线2与射线0的总相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda}2d_1 - \frac{2\pi}{\lambda}4d_2 + 2\phi_r + 2\phi_d \\ &= 2\left(\phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}h \cos\theta\right); \end{aligned} \quad (4)$$

射线 n 与射线0的总相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_n &= n\Phi \\ &= n\left(\phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}h \cos\theta\right); \end{aligned} \quad (5)$$

其中 λ 为天线辐射波的波长, ϕ_r 是覆层的反射相位, ϕ_d 是天线地板的反射相位. 最终透过FSS覆层向外辐射电磁波的功率为

$$P(\theta) = \frac{1 - R^2}{1 + R^2 - 2R \cos\Phi} F^2(\theta). \quad (6)$$

当 $\Phi = \phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}h \cos\theta = 2N\pi$, $N = 0, 1, 2, \dots$ 时, 即微带天线辐射的电磁波同相叠加, 辐射增强. 其最大前向功率($\theta = 0$)为

$$P_{\text{forward}}(0) = \frac{1 + R}{1 - R} F^2(0); \quad (7)$$

天线的前向增益为

$$G_{\text{forward}}(0) = \frac{P_{\text{forward}}(0)}{F^2(0)} = \frac{1 + R}{1 - R}; \quad (8)$$

天线的半功率波瓣宽度为

$$HPBW = \frac{\lambda(1 - R)}{2\pi h \sqrt{R}}; \quad (9)$$

其中 $F(\theta)$ 为 θ 方向的场强方向函数, R 为反射幅度模值. 根据(8)和(9)式, 天线前向增益与 R 成正比, 半功率波瓣宽度与 R 成反比, R 越大, 天线增益越高, 定向性越强, 因此要求反射层具有较强反射特性.

利用HFSS软件仿真建模. 当天线辐射电磁波时(方向从 $-z$ 到 z), FSS覆层反射层的频响曲线如图2所示. 缝隙和金属环产生的谐振频率为11.41 GHz, 在11.21—11.54 GHz范围内, 反射相位斜率为正, 相位从 167° 增加到 172° , 幅度模值都在0.86以上, 内插的传输系数(S_{21})曲线在天线工作频带内急剧增大, 因此反射层具有较强反射特性. 从图中也可知, 缝隙之间的谐振在12.75 GHz处. 对于 x 极化和 y 极化的入射波, 仿真得到的频响曲线如图3(a), (b)所示. 从图中可以看出, 无论是 x 极化和 y 极化, 缝隙和金属环产生的谐振频率都在11.41 GHz附近, 反射系数相位曲线斜率在谐振频率附近都为正, 反射系数模值都在0.80以上, 因

此该FSS覆层反射层对于天线辐射波具有极化稳定特性.

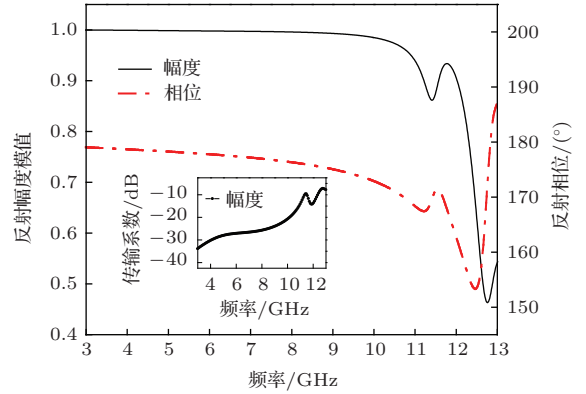


图2 反射层 S_{11} 曲线(内插 S_{21} 曲线)

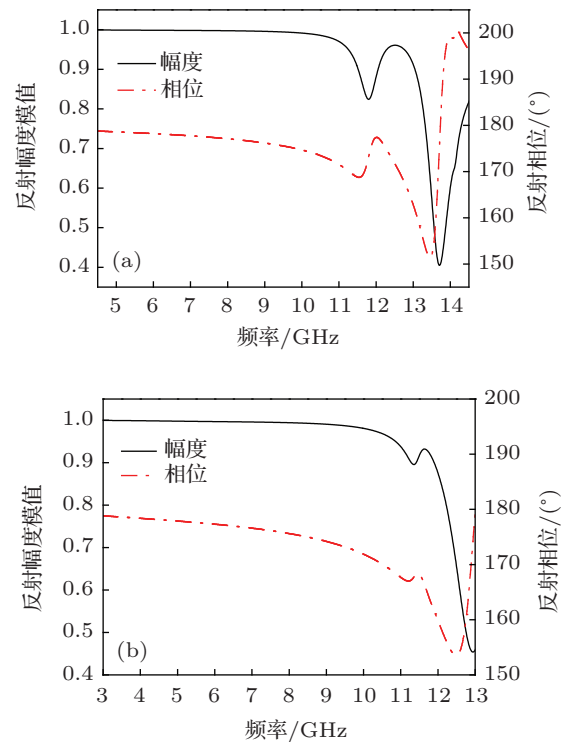


图3 不同极化辐射波下的反射层 S_{11} 曲线 (a) x 极化; (b) y 极化

对于吸波层设计, 加载电阻将入射的雷达波吸收, 吸波率公式为

$$A = 1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2, \quad (10)$$

其中 A 为吸波率. 由(10)式可得, 吸波层的反射系数 S_{22} 和传输系数 S_{12} 越小, 吸波率越大, RCS的减缩越明显. 图4(a)给出了雷达波入射时FSS加载电阻和未加电阻前后的表面电场分布对比. 可以看出, 未加电阻时, 上下表面都激励起很强的电场, 雷达波的反射和传输都较大; 加电阻后, 上下表面激励的电场强度减弱, 入射雷达波的反射和传输得到

很好抑制, 电阻对雷达波吸收效果明显, 吸波层具有减缩 RCS 的作用. 天线辐射时 FSS 的空间电场分布如图 4(b) 所示, 上下表面产生了很强的谐振, 天线辐射的电磁波可透过 FSS 覆层向外辐射. 吸波层对天线辐射的影响甚微, 天线在其工作频带内正常辐射.

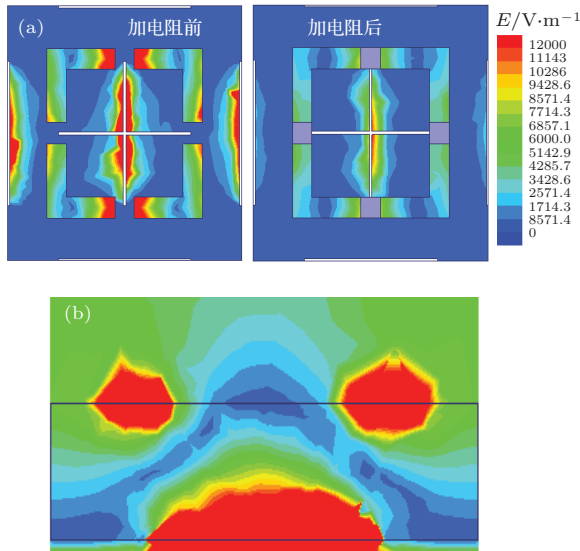


图4 (网刊彩色) FSS 的电场分布 (a) 加载电阻前后的表面电场分布对比; (b) 空间电场分布

当雷达波入射时(方向从 z 到 $-z$), FSS 覆层吸波层仿真的频响曲线和吸波率曲线如图 5 所示, 在 5.75—11.37 GHz 的频带范围内, 反射系数 $S_{22} < -10$ dB, 透射系数 $S_{12} < -10$ dB, 反射波和透射波都很小; 从内插图中可以看出, 在上述频段内吸波率都在 80% 以上, 入射的电磁波在 5.62 GHz 的宽频带范围内将被有效吸收, 但在天线的工作频带内, S_{22} 和 S_{12} 曲线急剧上升, 吸波率迅速减小, 因此吸波层在天线带内吸波效果差, 保证天线正常辐射. 对于不同角度下 x 极化和 y 极化雷达入射波, FSS 覆层吸波层仿真的频响曲线如图 6 所示. 从图中可以看出, 无论是 x 极化还是 y 极化, 当入射角度从 0° 增大到 45° , 反射波和透射波(内插图)依然都很小. 因此吸波层对于两种极化的雷达入射波都具有宽带宽角度的强吸波特性.

3 加载 FSS 覆层后的微带天线性能分析

当天线的谐振频率和 FSS 覆层的结构固定后, 覆层的加载高度 h 成为影响天线辐射性能和散射性能的最主要因素, 其必须满足式 $\Phi = 2N\pi$ 的谐

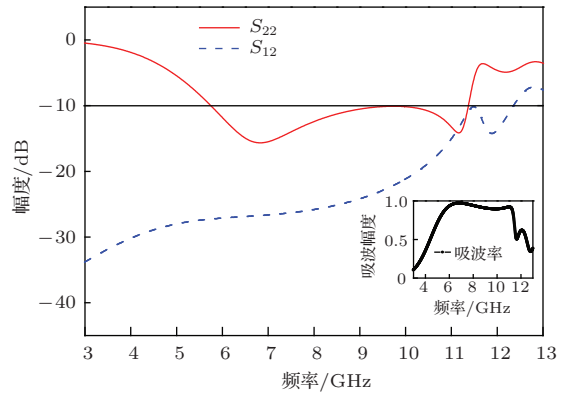


图5 吸波层 S_{22} 和 S_{12} 曲线(内插吸收层的吸波率曲线)

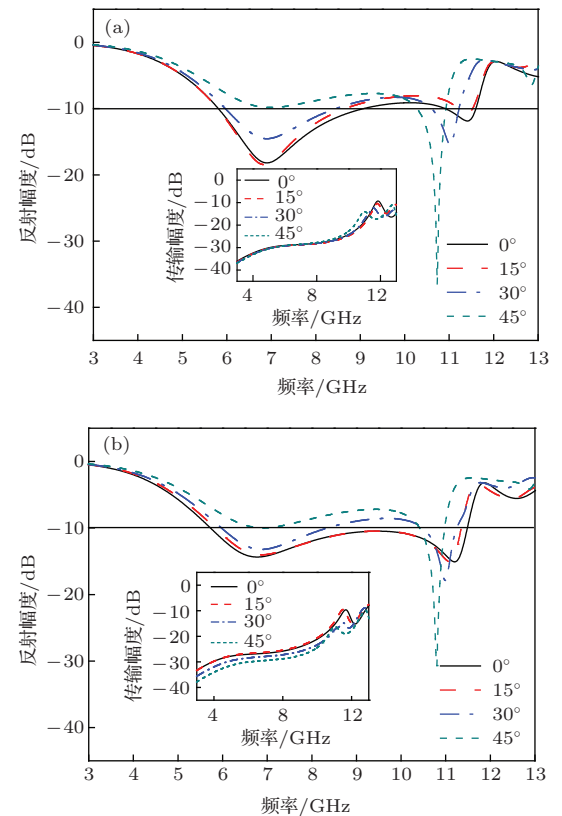


图6 (网刊彩色) 不同角度下不同极化时吸波层 S_{22} 曲线(内插 S_{12} 曲线) (a) x 极化; (b) y 极化

振条件, 将 $\Phi = \phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda} h \cos \theta = 2N\pi$ 进行变形:

$$f = \frac{c}{4\pi h} (\phi_r + \phi_d - 2N\pi) \quad (N = 0, 1, 2, \dots), \quad (11)$$

其中 f 为天线的谐振频率. 从 (11) 式可知, 由于反射层的反射相位曲线斜率为正, ϕ_r 与 f 成正比, h 在较宽的频带几乎不变, 即天线增益在较宽频带都有提高. 通过 (11) 式计算出 h 的初值, 为维持微带天线的低剖面特性, 一般取 $N = 0$. 地板的反射相位 $\phi_d = 180^\circ$, 根据仿真结果, 在频率 $f = 11.41$ GHz 处, $\phi_r = 170^\circ$, 计算得 h 初值为 12.8 mm, 在此基础

上进行优化.

3.1 天线性能的优化和验证

图 7(a) 和 (b) 分别给出了 FSS 覆层不同加载高度的天线反射系数 S_{11} 和增益的曲线. 从图中可以看出, 覆层的加载, 对天线的谐振频率和增益都有影响: 谐振频率稍向高频偏移, 增益明显提高. 当加载高度为 14 mm 和 15 mm 时, 天线带宽和增益改善的较好, 但前者的阻抗带宽和 3 dB 增益带宽分别为 10.44—12.60 GHz 和 10.00—12.24 GHz, 比后者宽.

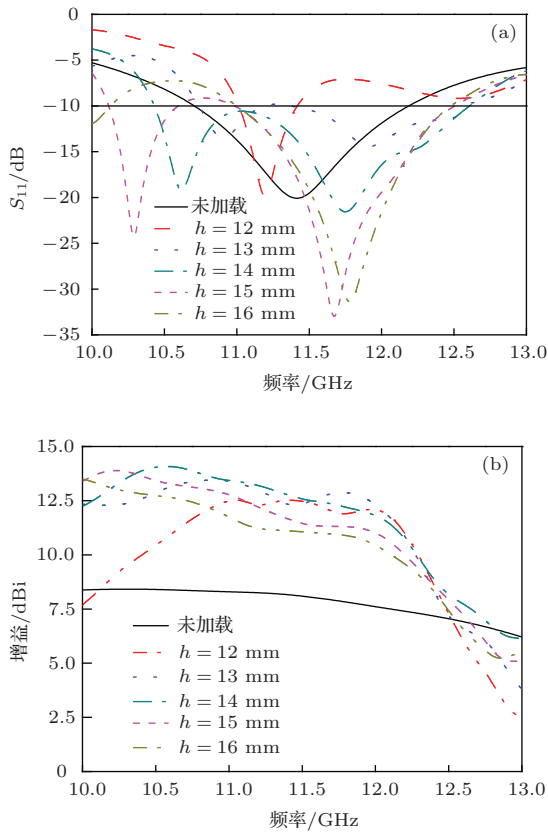


图 7 (网刊彩色) FSS 覆层不同加载高度的辐射性能随频率的变化 (a) 反射系数; (b) 增益

为了分析天线的散射性能, 分别用水平极化和垂直极化的平面波照射加载 FSS 覆层前后的天线. 图 8(a) 和 (b) 给出了 FSS 覆层加载高度分别为 14 mm 和 15 mm 时的天线 RCS 减缩曲线. 从图中可以看出, 在两种极化的垂直入射波照射下, 3—13 GHz 的频带范围, 当加载高度为 14 mm 时, 天线法线方向 RCS 的 3 dB 减缩带宽分别为 3.00—11.06 GHz 和 3.00—11.19 GHz, 当加载高度为 15 mm 时, 天线法线方向 RCS 的 3 dB 减缩带宽

分别为 3.00—10.64 GHz 和 3.00—10.81 GHz, 在两种极化下, 天线法向 RCS 在较宽范围内均有减缩, 天线具有宽带的低 RCS 特性. 从图中也可看出, 加载高度为 14 mm 的天线 RCS 的 3 dB 减缩带宽比加载高度为 15 mm 的天线宽, 但在 8—10 GHz 内的部分频点, 前者的 RCS 减缩效果没有后者好. 综合考虑天线的辐射和散射性能, 最终选择加载高度为 14 mm.

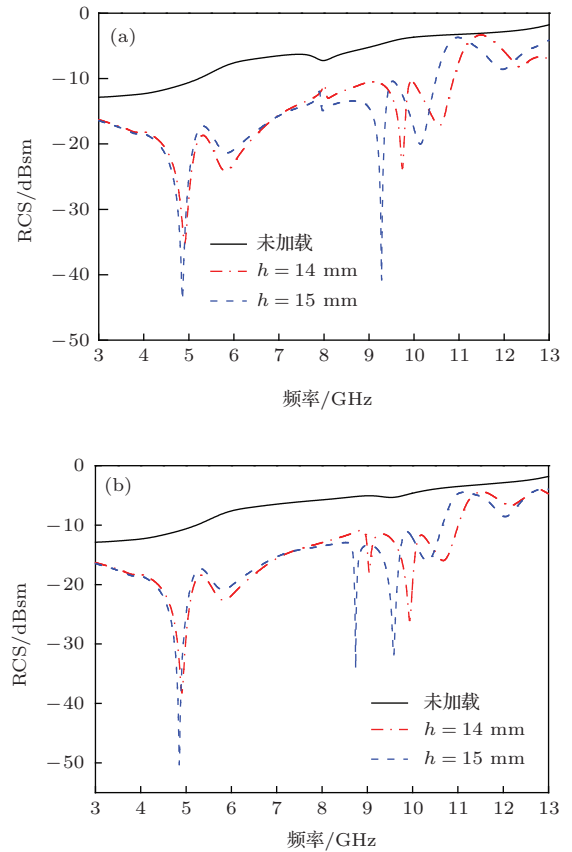


图 8 (网刊彩色) FSS 覆层不同加载高度的天线 RCS 随频率的变化 (a) 水平极化; (b) 垂直极化

在覆层加载高度为 14 mm 下, 当两种极化的平面波从不同角度入射时, 天线在 4.95 GHz (图 8 中 RCS 减缩最大点) 的 RCS 对比曲线如图 9 所示. 从图 9(a) 可以看出, 加载覆层后的天线较原始天线的单站 RCS 减缩最大, 分别达到 22.16 dB 和 22.53 dB, 在 -20° — 20° 的角域减缩均超过 3 dB, 在 -15° — 15° 的角域减缩超过 10 dB. 图 9(b) 是在 4.95 GHz 不同极化的平面波垂直入射时, 天线在各个角度的 RCS. 可以看出, 在 -37° — 37° 的角域, 均有 3 dB 以上的减缩, 在 -20° — 20° 的角域, RCS 减缩超过 10 dB. 天线单站和双站 RCS 随角度变化的

结果表明: 加载FSS覆层天线在较宽角域保持了低RCS特性, 法向的RCS峰值也得到显著降低, 天线具有宽角度的低RCS特性.

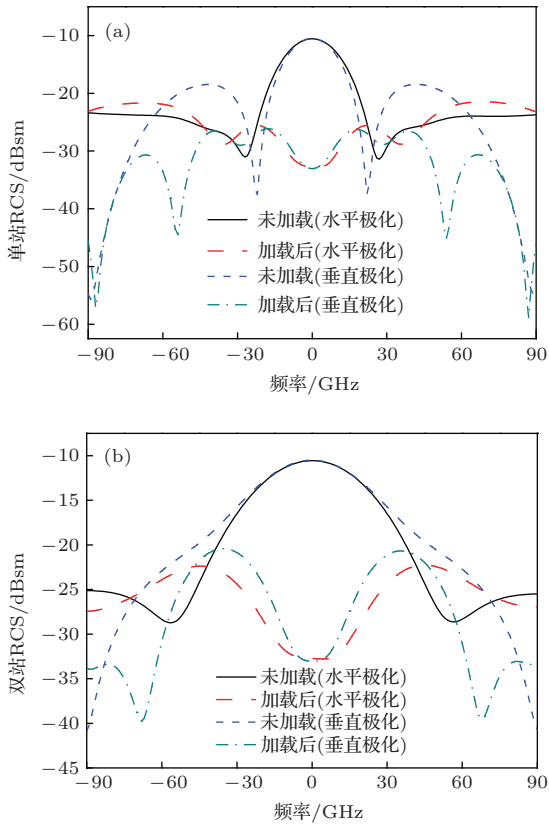


图9 (网刊彩色) 天线 RCS 随角度的变化 (a) 单站; (b) 双站

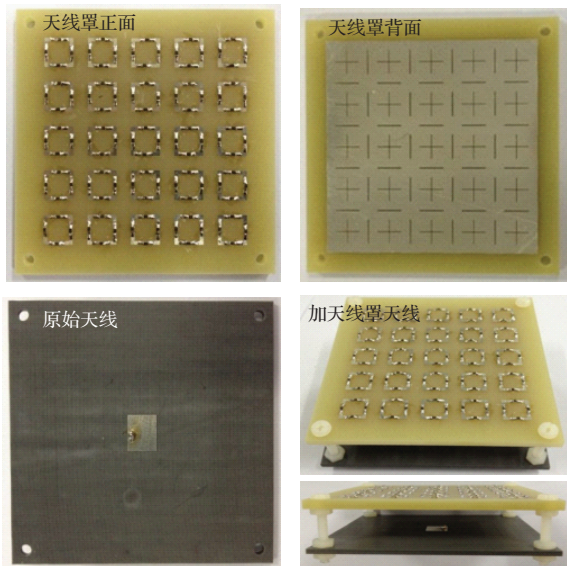


图10 天线实物图

3.2 天线性能的实验验证

为进一步验证加载FSS覆层后天线的性能, 加工了天线实物, 如图10所示. 用N5230C矢量网

络分析仪和远场测量方法, 分别测试天线的 S_{11} 、增益和E, H面方向图, 其结果如图11—图13所示. 从图11中可以看出, 加载覆层后, 天线谐振频率从11.50 GHz向高频偏移到11.73 GHz, 带宽从10.71—12.20 GHz扩宽到10.74—12.33 GHz, 增加0.1 GHz. 两天线的增益对比曲线如图12所示, 在10.00—12.40 GHz的频带范围, 加载覆层后天线的增益提高均在3 dB以上, 其3 dB增益带宽完全覆盖天线的阻抗带宽, 天线增益最大提高了7.8 dB. 图13给出了谐振频点11.73 GHz的E, H面方向图, 可以看出, 天线增益分别提高3.5 dB和3.4 dB, 波束宽度分别减少了16°和50°, 天线的定向性增强.

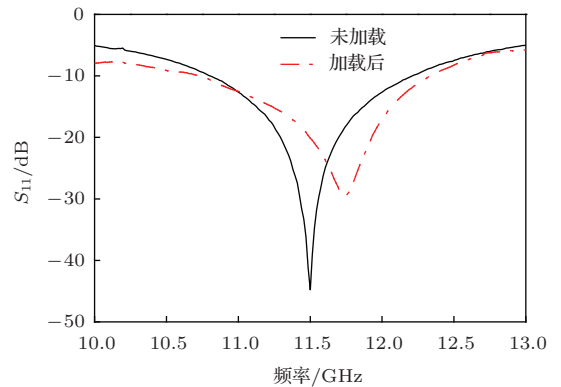


图11 实测天线 S_{11} 随频率的变化

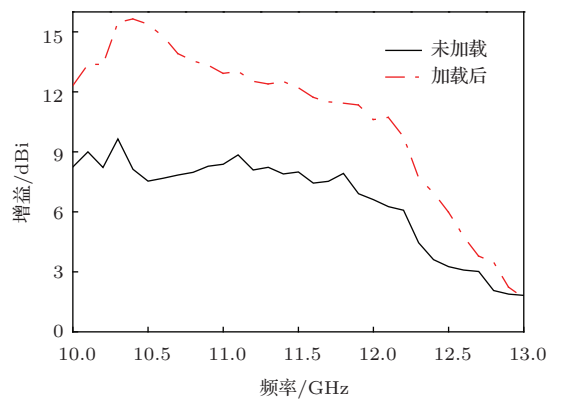


图12 实测天线增益随频率的变化

对于天线的散射性能, 通过宽带喇叭天线测量了加载FSS覆层后天线对垂直入射波的反射损耗. 考虑到天线整体尺寸较小, 故将天线置于距喇叭天线0.6 m ($> 10\lambda_{11.73 \text{ GHz}}$)处, 如图14所示. 图15给出了3—13 GHz频带范围的反射损耗曲线. 从图中可以看出, 在4.10—11.30 GHz

频带范围内, 天线的反射损耗均有 3 dB 以上的减缩, 4.65—7.00 GHz, 9.30—10.00 GHz 和 10.25—11.15 GHz 三个频段减缩超过 10 dB; 在 4.95 GHz 处, 最大减缩达到 23.08 dB. 天线工作频带内, 天线的 RCS 急剧增大, 但也有 3 dB 以上的减缩. 测试结果与仿真结果基本一致, 验证了天线具有宽带低 RCS 特性.

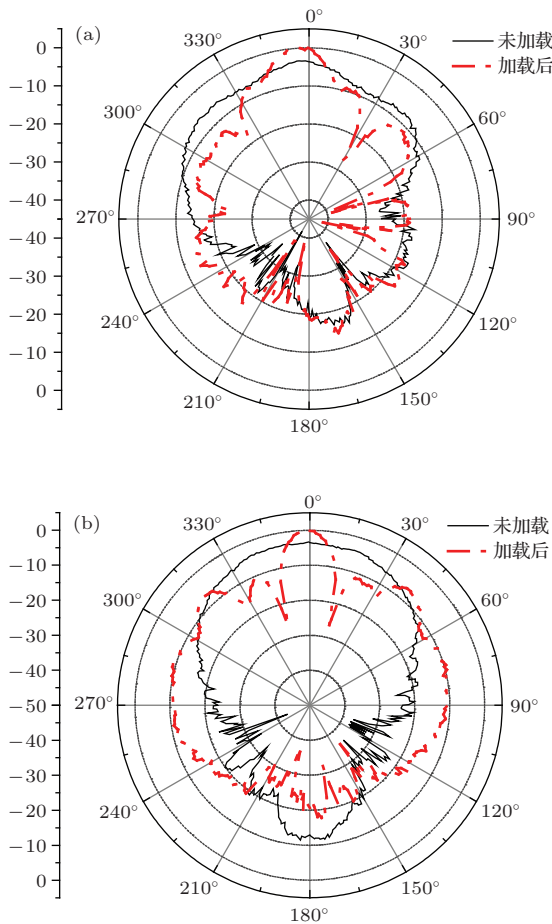


图 13 实测天线方向图 (a) E 面; (b) H 面

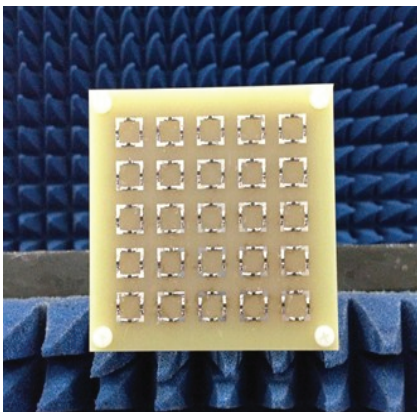


图 14 天线测试示意图

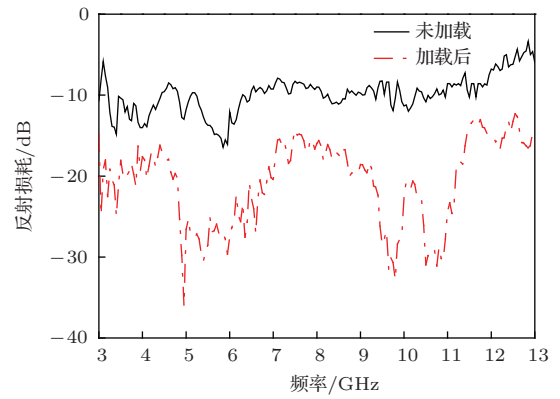


图 15 实测天线反射损耗曲线

4 结 论

本文设计了一种 FSS 覆层的新结构, 并将该覆层加载于微带天线. 通过合理设计覆层, 使其上表面具有吸波特性和下表面具有强反射特性. 上表面吸收入射电磁波, 改善天线的散射性能, 下表面和原始天线地板构成 Fabry-Perot 谐振腔, 改善天线的辐射特性, 并通过仿真与实测进行了验证. 结果表明: 加载覆层后的天线, 在 10.00—12.40 GHz 均有 3 dB 以上的增益提高, 天线方向性增强得; 同时天线的 RCS 在 4.10—11.30 GHz 也得到了减缩, 最大减缩达到了 23.08 dB. 本文的研究对于同时改善微带天线的增益、提高定向性与 RCS 减缩有一定的借鉴作用.

参考文献

- [1] Guntupalli A B, Wu K 2014 *IEEE Anten. Wire. Propag.* **13** 384
- [2] Yeap S B, Chen Z M 2010 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **58** 2811
- [3] Latif S I, Shafai L, Shafai C 2010 *IET Microw. Anten. Propag.* **5** 402
- [4] Prakash P, Abegaonkar M P, Basu A, Koul S K 2013 *IEEE Anten. Wire. Propag.* **12** 1315
- [5] Cook B S, Shamim A 2013 *IEEE Anten. Wire. Propag.* **12** 76
- [6] Ge Y H, Esselle K P, Bird T S 2012 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **60** 743
- [7] Yuan Z D, Gao J, Cao X Y, Yang H H, Yang Q, Li W Q, Shang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014102 (in Chinese) [袁子东, 高军, 曹祥玉, 杨欢欢, 杨群, 李文强, 商楷 2014 物理学报 **63** 014102]
- [8] 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]

- [9] Li S J, Gao J, Cao X Y, Li W Q, Zhang Z, Zhang D 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 213703
- [10] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [11] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, Maagt P 2007 *IEEE Trans. Anten. Propagat.* **55** 3630
- [12] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Li W Q 2014 *IEEE Mic. Opt. Tech. Lett.* **56** 158
- [13] 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
- [14] Genovesi S, Costa F, Monorchio A 2014 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **62** 163
- [15] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044103 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 王鲜 2013 物理学报 **62** 044103]
- [16] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **60** 2740
- [17] Pan W B, Huang C, Chen P, Ma X L, Hu C G, Luo X G 2014 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **62** 945
- [18] Jia H Y, Gao J S, Feng X G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1227
- [19] Lu G W, Zhang J, Yang J Y, Zhang T X, Kou Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 198401 (in Chinese) [卢戈舞, 张剑, 杨洁颖, 张天翔, 寇元 2013 物理学报 **62** 198401]
- [20] Pirhadi A, Bahrami H, Nasri J 2012 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **60** 2101
- [21] Wang M, Huang C, Chen P, Wang Y Q, Zhao Z Y, Luo X G 2014 *IEEE Anten. Wire. Propag.* **13** 213
- [22] Zuo Y, Shen Z X, Feng Y J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034101
- [23] Feresidis A P, Vardaxoglou J C 2001 *IEE Proc.-Microw. Anten. Propag.* **148** 345

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna*

Zheng Yue-Jun Gao Jun[†] Cao Xiang-Yu Zheng Qiu-Rong Li Si-Jia
Li Wen-Qiang Yang Qun

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

(Received 11 May 2014; revised manuscript received 17 June 2014)

Abstract

A novel high-gain and low radar cross section (RCS) microstrip antenna is designed and fabricated. The proposed antenna obtained broad-band 3 dB gain bandwidth and wide-band, wide-angle low RCS properties after applying the frequency selective surface (FSS) as a superstrate of original microstrip antenna. The FSS cell is composed of two metallic layers separated by a dielectric substrate. A metallic square loop with four resistors mounted on each side of the loop is etched on the top layer and a metallic plane with a central cross slot and four fringe slots is etched on the bottom layer. The four resistors of top layer are mainly used to absorb radar incoming wave and reduce antenna RCS. The patch of bottom layer can construct a Fabry-Perot resonance cavity with ground plane and improve the antenna gain. The reflection coefficient S_{22} and transmission coefficient S_{12} of top layer are all below -10 dB at 5.75–11.37 GHz. The reflection phase gradient of bottom layer is positive and the reflection magnitude value is above 0.86 from 11.21 GHz to 11.54 GHz. Measurement results show that the antenna gain is enhanced by about 3.4 dB at 11.73 GHz, and the half-power beam width of E-plane and H-plane is reduced 16° and 50° respectively. The 3 dB gain bandwidth is about 2.4 GHz which from 10.0 GHz to 12.4 GHz and well cover the impedance bandwidth. The proposed antenna achieved an RCS reduction of more than 3 dB in the normal direction at 4.10–11.30 GHz, the largest reduction reached 23.08 dB in comparison with the original antenna. The monostatic and bistatic RCS reduction are over 3 dB from -20° to 20° and -37° to 37° respectively at 4.95 GHz. The results proved the FSS superstrate can be applied to improve the radiation and scattering performance simultaneously.

Keywords: frequency selective surface, low radar cross section, high-gain, wide-band

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.63.224102

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

[†] Corresponding author. E-mail: erikzhengyang@126.com