

## 一种加载电阻膜吸波材料的新型频率选择表面\*

周航<sup>1)</sup> 屈绍波<sup>1)†</sup> 彭卫东<sup>2)</sup> 王甲富<sup>1)</sup> 马华<sup>1)</sup> 张东伟<sup>1)</sup> 张介秋<sup>1)</sup> 柏鹏<sup>2)</sup> 徐卓<sup>3)</sup>

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 西安 710051)

3) (西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2011年6月17日收到; 2011年9月2日收到修改稿)

通常频率选择表面雷达罩借助其几何外形, 将带外信号反射到远离来波的方向, 从而实现隐身. 然而随着多基雷达反隐身技术的发展, 这种反射信号仍然可以被侦测到. 针对这一难题, 提出一种加载电阻膜吸波材料的新型频率选择表面. 该频率选择表面在低频工作带通内, 不仅对大入射角和不同极化电磁波具有稳定的带通特性, 而且在高频带外对电磁波表现出吸收特性, 可以将探测信号吸收掉, 从而大大降低被反隐身多基雷达探测的风险. 另外, 由于吸波材料的作用, 使得频率选择表面的栅瓣也得到了很好的压制, 降低了栅瓣对频率选择表面工作频带的干扰.

关键词: 雷达罩, 吸波, 频率选择表面

PACS: 42.25.Bs, 52.35.Hr, 74.25.nm

## 1 引言

频率选择表面(FSS)是一种空间滤波器, 它是由周期性排列的金属贴片单元或缝隙单元构成的一种二维周期结构, 对电磁波表现出带通或带阻特性. 因其特定的频率选择特性而广泛地应用于微波、红外等频段的雷达天线罩和反射面<sup>[1]</sup>. FSS雷达罩的工作机理是: 工作频段内的电磁波几乎能够无损地穿过雷达罩, 保证天线的正常工作, 而对带外信号起到抑制和反射的作用. 当带外电磁波照射时, 借助于雷达罩的几何外形, 带外电磁波被反射到远离来波的方向, 阻止了其进入雷达罩从而在天线上感应电流而向外产生较强的散射, 进而实现雷达的隐身. 同时可以防止敌人高功率武器信号的进入而烧毁天线, 起到抗干扰的作用. 鉴于FSS雷达罩的重要应用价值, 使得FSS迅速成为一个研究热点. Munk<sup>[1]</sup>以及Luebbers和Munk<sup>[2]</sup>研究了介质加载对FSS性能的影响, 并总结了不同单元及不同布阵方法对FSS性能的影响. 文献[3,4]提出了互补型FSS. Baena等<sup>[5]</sup>提出了各向同性的FSS.

Sarabandi教授带领的课题组提出了小型化FSS的设计<sup>[6,7]</sup>. 国内有关FSS的研究起步较晚, 但重要的工程应用价值使其迅速成为一个研究热点并且发展很快. 西北工业大学侯新宇领导的课题组对FSS在雷达罩上的应用进行了较深入的研究<sup>[8,9]</sup>; 东南大学洪伟教授带领的课题组提出了基于基片集成波导技术的FSS<sup>[10-12]</sup>; 北京航空航天大学课题组设计了夹层FSS雷达罩<sup>[13]</sup>, 并研究了空隙对FSS传输性能的影响<sup>[14]</sup>; 长春理工大学利用遗传算法设计出具有良好带通性能的双屏FSS<sup>[15]</sup>; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所及中国科学院合作单位提出了适用于雷达罩的FSS设计<sup>[16-18]</sup>.

然而, 随着隐身技术的发展, 反隐身技术应运而生. 虽然FSS雷达罩能够将带外的信号反射到远离来波的方向, 实现雷达隐身. 但是随着多基雷达反隐身技术的发展, 这种反射的信号仍然可以被探测到, 从而大大降低了飞行器的隐身性能. 基于上述考虑, 我们提出一种加载电阻膜吸波材料的新型FSS. 这种FSS在工作带通内, 不仅具有对大入射角和不同极化电磁波具有稳定的带通特性, 而且

\* 国家自然科学基金(批准号: 60871027, 60901029, 61071058)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2009CB623306)、陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金(批准号: 201114Y11)和中国博士后科学基金(批准号: 20100481327)资助的课题.

† E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

在高频带外对电磁波表现出吸收的特性, 可以将探测信号吸收掉, 从而大大降低被反隐身多基雷达探测的风险. 另外, 由于吸波材料的作用, 使得 FSS 的栅瓣也得到了很好的压制, 降低了栅瓣对 FSS 工作频带的干扰, 具有重要的应用前景.

## 2 FSS 单元设计

在一块聚四氟乙烯板材的正反面刻蚀不同的金属周期结构来设计一个工作在  $L$  波段的 FSS 结构单元. 图 1 为设计的 FSS 单元结构示意图. 浅色部分代表金属, 在其正面 (a) 刻蚀金属贴片, 背面 (b) 刻蚀交叉金属线. 单元周期  $P = 10.0$  mm, 缝隙  $g = 0.05$  mm, 金属线宽  $s = 0.2$  mm, 基板相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ , 损耗角正切  $\tan \delta = 0.001$ , 厚度  $h = 1.0$  mm. 将上述 FSS 结构单元进行二维周期性的拓展, 构成一个平行  $LC$  谐振电路, 其中正面金属贴片通过缝隙感应出等效电容, 而背面金属线形成等效电感. 该 FSS 周期结构的等效电路如图 2 所示.

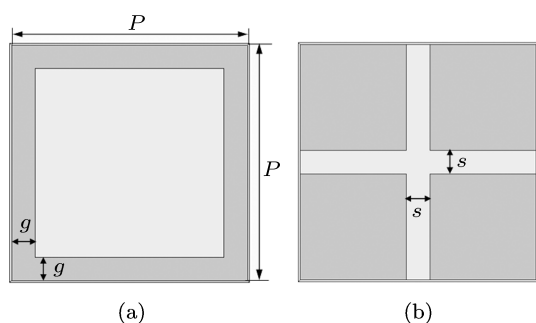


图 1 FSS 单元结构示意图 (a) 正面; (b) 背面

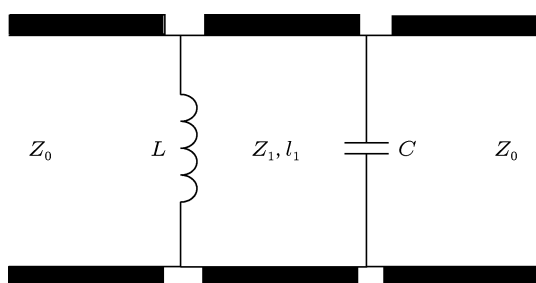


图 2 等效电路模型

该等效电路为一等效电容  $C$  和等效电感  $L$  组成的平行电路, 中间用一长度为  $l_1$ , 特征阻抗为  $Z_1$  的短传输线连接, 该短传输线代表介质基板, 其阻抗为  $Z_1 = Z_0/(\epsilon_r)^{1/2}$ . 介质基板两边为自由空间,

它可以用特征阻抗  $Z_0 = 377 \Omega$  的传输线来表示. 而等效电容  $C$  可近似表示为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2P}{\pi} \ln \left( \frac{1}{\sin \frac{\pi g}{P}} \right). \quad (1)$$

该电容值由周期尺寸  $P$  和金属贴片间缝隙决定,  $\epsilon_r$  为介质基板的等效介电常数, 增加周期尺寸和减小缝隙, 电容值  $C$  将增大. 而长金属线等效电感  $L$  可由下式表示

$$L = \mu_0 \frac{P}{2\pi} \ln \left( \frac{1}{\sin \frac{\pi s}{2D}} \right). \quad (2)$$

该等效电感值由周期尺寸  $P$  和金属线宽  $s$  决定, 增加周期尺寸, 减小金属线宽, 电感值  $L$  将增大. 由平行电路谐振频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  可知, 谐振频率  $f_0$  与周期尺寸  $P$  成正比, 与缝隙  $g$  和金属线宽  $s$  成反比. 根据这一规律, 为了得到单元周期尺寸远小于工作波长的 FSS, 以降低 FSS 对大入射角和不同极化电磁波的敏感性, 我们可以通过减小缝隙  $g$  和金属线宽  $s$  来实现. 将上述模型利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的 unit cell 边界和频域求解器, 对 FSS 进行仿真计算, 得出的  $S$  参数如图 3 所示.

由图 3 可知, 该 FSS 结构在 2.43 GHz 处发生谐振, 产生传输通带, 周期尺寸  $P$  约为  $\lambda_0/12$ , 对于不同入射角和不同极化的电磁波该 FSS 保持了良好的带通稳定性, 在通带外 6.0 GHz 以上, 该 FSS 处于反射状态, 并且在 12.0 GHz 附近产生栅瓣. 假如这种类型的 FSS 单元用于雷达罩设计, 虽然 FSS 雷达罩能够将带外的信号反射到远离来波的方向, 实现雷达隐身. 但是随着多基雷达反隐身技术的发展, 这种反射信号仍然可以被探测到, 从而大大降低了飞行器的隐身性能. 基于这一点考虑, 我们提出一种加载电阻膜吸波材料的新型 FSS, 首先我们来设计一种基于电阻膜的吸波材料.

## 3 电阻膜的吸波材料

基于电阻膜的吸波材料主要是将碳膜喷涂在多孔泡沫介质材料 ( $\epsilon_r \approx 1$ ) 上, 这种吸波材料具有吸收频带宽、极化不敏感和宽入射角的优点<sup>[19,20]</sup>. 为了保持 FSS 在低频保持通带特性, 而在高频带外, 对电磁波具有吸收特性, 我们将设计一种在低频全通、在高频具有良好吸波性能的吸波体.

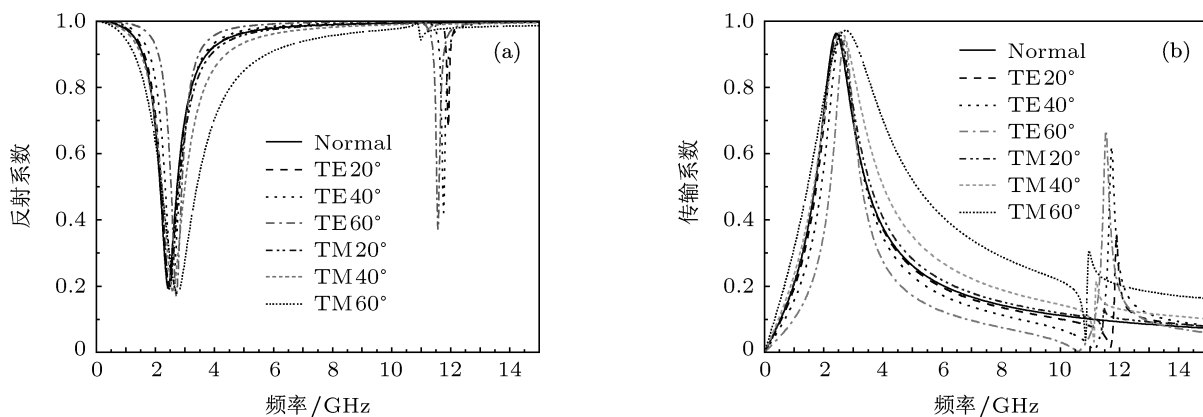


图3 FSS在不同入射角和不同极化电磁波入射下的S参数 (a)反射系数;(b)传输系数

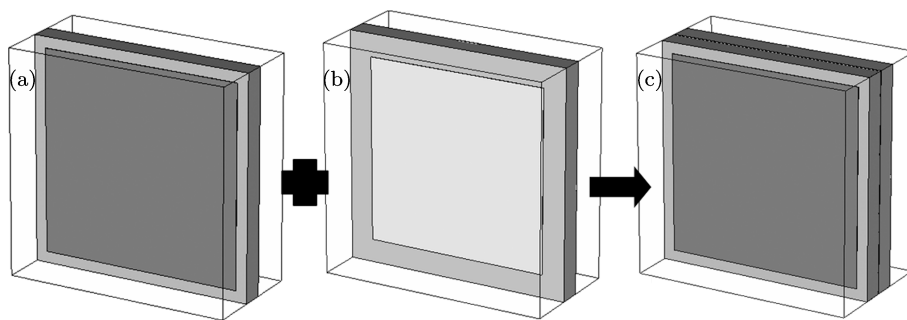


图4 加载电阻膜吸波材料FSS的构成示意图 (a)电阻膜吸波体;(b)FSS;(c)加载电阻膜吸波材料的FSS

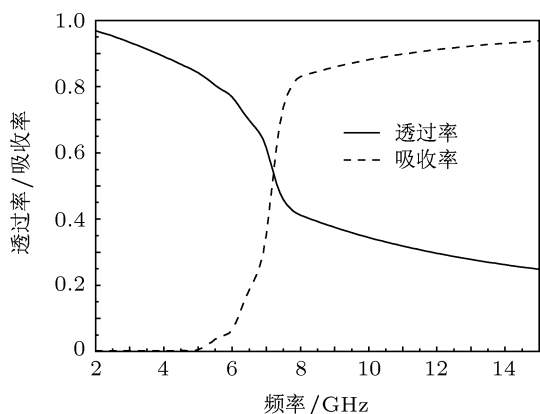


图5 电阻膜吸波体的透过率和吸收率

本文设计的电阻膜吸波体如图4(a)所示,它在一块与FSS具有同样周期 $P$ 的多孔泡沫介质材料上喷涂边长 $a = 9\text{ mm}$ ,厚度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的方形碳膜.碳膜的阻抗值在 $2.0\text{--}5.0\text{ GHz}$ 设为 $0.5\text{ }\Omega$ , $5.0\text{--}6.0\text{ GHz}$ 设为 $10\text{ }\Omega$ , $6.0\text{--}8.0\text{ GHz}$ 设为 $50\text{ }\Omega$ , $8.0\text{ GHz}$ 以上设为 $377\text{ }\Omega$ .采取上述梯度变化的阻抗值,主要是考虑到在阻抗值较低时,碳膜在低频具有良好的通带特性,而在高频阻抗值接近 $377\text{ }\Omega$ 时具有最好的吸收性能<sup>[19]</sup>,这主要因为它和空气

阻抗值匹配.

图5为电阻膜吸波体的透过率和吸波率,在 $2.0\text{--}4.0\text{ GHz}$ 透过率大于 $90\%$ ,而在 $7.68\text{ GHz}$ 以上,吸收率大于 $80\%$ .图6为电阻膜吸波体在不同入射角和不同极化电磁波下的透过率和吸波率.由图6可知,在电阻膜在低频( $2.0\text{--}4.0\text{ GHz}$ )保持了良好的透过率,而在高频( $8.0\text{--}15\text{ GHz}$ )具有良好的吸波性能,对于设计吸波与透波结合的FSS,是一种理想的吸波材料.

#### 4 加载电阻膜吸波体的FSS

将上述设计的电阻膜吸波体加载到第一节设计的FSS上,如图4所示.图7为加载电阻膜吸波材料后FSS在不同入射角和不同极化电磁波入射下的S参数.由图7可以看出,将电阻膜吸波体加载到FSS后,电阻膜在低频处对电磁波具有良好的透过性能,几乎不吸收电磁波,从而使得FSS带通性能几乎不受影响;而在 $7.6\text{ GHz}$ 以上,由于电阻膜对电磁波的吸收特性,使得FSS的反射系数与图3相比大大降低,另外在 $12.0\text{ GHz}$ 附近出现的栅瓣

的传输系数也被压制. 当然, 由于本文所设计的吸波材料只能实现高频阻带的吸收, 低频阻带仍然要被反射到其他空间. 所以具有这种特性的 FSS 若用来制作混合雷达罩, 在低频带通内, 吸波材料不

影响 FSS 的带通性, 而在高频带外, 可以将探测信号吸收掉, 从而大大降低被反隐身雷达探测的风险. 另外, 吸波材料对 FSS 的栅瓣也起到了很好的压制作用, 降低了栅瓣对 FSS 工作频带的干扰.

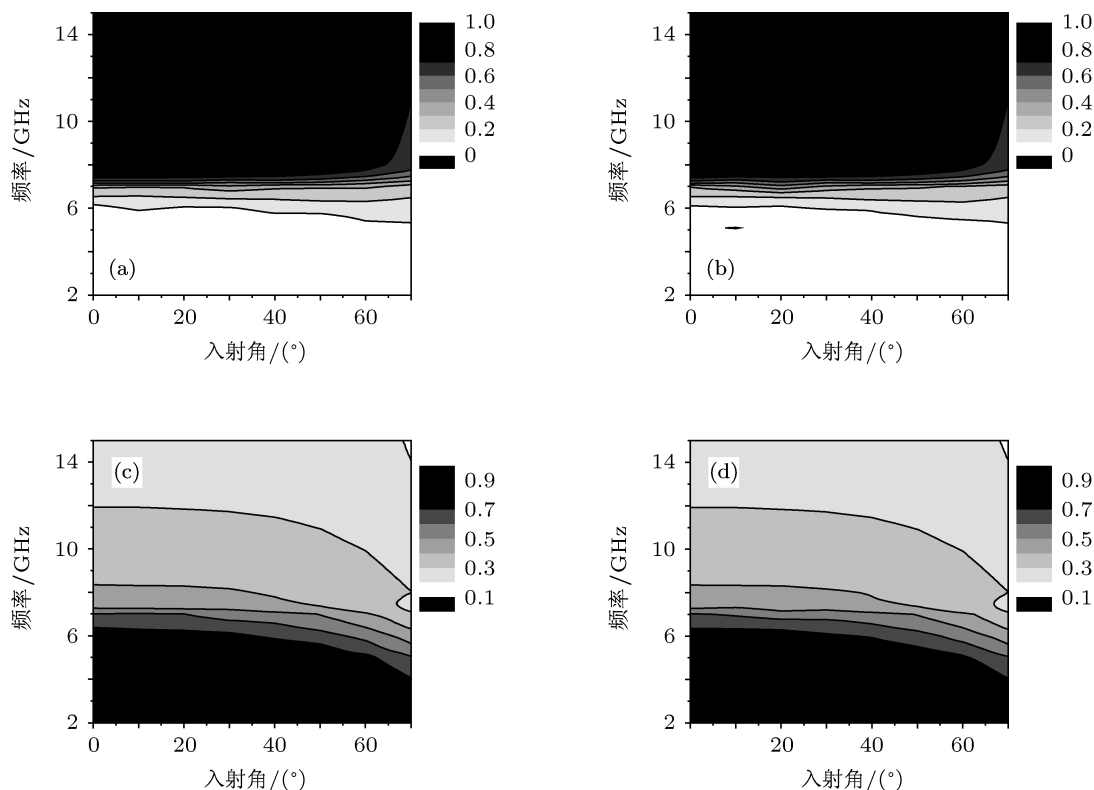


图 6 仿真得到的电阻膜吸波体在不同极化电磁波下的吸收率和透过率 (a) 不同入射角下电阻膜吸波体对横电 (TE) 波的吸收率; (b) 不同入射角下电阻膜吸波体对横磁 (TM) 波的吸收率; (c) 不同入射角下电阻膜吸波体对 TE 波的透过率; (d) 不同入射角下电阻膜吸波体对 TM 波的透过率

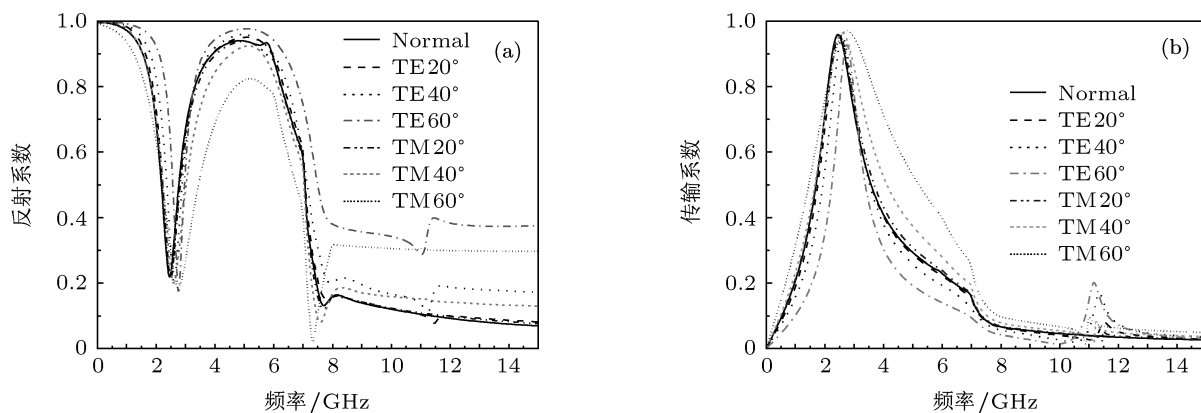


图 7 加载电阻膜吸波材料后 FSS 在不同入射角和不同极化电磁波入射下的 S 参数 (a) 反射系数; (b) 传输系数

## 5 结论

本文提出一种加载电阻膜吸波材料的新

型 FSS. 首先, 基于平行 LC 谐振原理, 设计了工作在 2.43 GHz 的 FSS 结构单元. 然后, 设计了在低频具有良好带通特性、在高频具有良好吸波特性

的电阻膜吸波材料. 最后, 将电阻膜吸波材料加载到工作在低频的 FSS 结构上, 形成一种新型的 FSS. 这种加载电阻膜吸波材料的新型 FSS 在工作频带内仍具有良好的带通性能, 而在高频带外可以将探测信号吸收掉, 从而大大降低被反隐身雷达探测的

风险. 另外, 由于吸波材料的作用, 使得 FSS 的栅瓣也得到了很好的压制, 降低了栅瓣对 FSS 工作频带的干扰, 起到一举两得的作用, 具有重要的应用前景.

- 
- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley)
- [2] Luebbers R J, Munk B A 1978 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **26** 536
- [3] Wakabayashi H, Kominami M, Kusaka H, Nakashima H 1994 *IEE Pro.-Micro. Antennas Propag.* **141** 477
- [4] Lockyers D S, Vardaxoglou J C, Simpkin R A 2000 *IEE Pro.-Micro. Antennas Propag.* **147** 501
- [5] Baena J D, Jelinek L, Marqués R, Mock J J, Gollub J, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191105
- [6] Sarabandi K, Behdad N 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 1239
- [7] Bayatpur F, Sarabandi K 2008 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **56** 774
- [8] Hou X Y 1998 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwest Polytechnical University) (in Chinese) [侯新宇 1998 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [9] Chen H Y, Hou X Y, Deng L J 2009 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **8** 1231
- [10] Luo G Q 2006 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [罗国清 2006 博士学位论文 (南京: 东南大学)]
- [11] Luo G Q, Hong W, Hao Z C, Liu B, Li W D 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 4035
- [12] Luo G Q, Hong W, Lai Q H, Wu K, Sun L L 2007 *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.* **55** 2481
- [13] Meng Z J, Lü M Y, Wu Z, Zhu M 2010 *Opt. Prec. Eng.* **18** 1175 (in Chinese) [蒙志君, 吕明云, 武哲, 祝明 2010 光学精密工程 **18** 1175]
- [14] Meng Z J, Wang L F, Lü M Y, Wu Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 127301
- [15] Wang J B, Lu J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057304 (in Chinese) [汪剑波, 卢俊 2011 物理学报 **60** 057304]
- [16] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋, 高劲松, 赵晶丽, 孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
- [17] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [18] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [19] Wu R X, Wang X Y, Qian J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 745 (in Chinese) [伍瑞新, 王相元, 钱鉴 2004 物理学报 **53** 745]
- [20] Gu C, Qu S B, Pei Z B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌 2011 物理学报 **60** 087802]

# A novel frequency selective surface loaded with resistance films absorbers\*

Zhou Hang<sup>1)</sup> Qu Shao-Bo<sup>1)†</sup> Peng Wei-Dong<sup>2)</sup> Wang Jia-Fu<sup>1)</sup> Ma Hua<sup>1)</sup>  
Zhang Dong-Wei<sup>1)</sup> Zhang Jie-Qiu<sup>1)</sup> Bai Peng<sup>2)</sup> Xu Zhuo<sup>3)</sup>

1) ( College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China )

2) ( Research Center of Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure,  
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China )

3) ( Key Laboratory of Electronic Materials Research of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China )

( Received 17 June 2011; revised manuscript received 2 September 2011 )

## Abstract

Commonly, by virtue of the frequency selective surface (FSS) radome's shape, out-band signals are reflected to other directions to achieve a stealth radome. However, with the development of the anti-stealth of poly-state radar technology, such reflected signals can be still detected. In view of this problem, a novel frequency selective surface loaded with resistance film absorbers is proposed. Such an FSS not only has a stable performance for various incident angles and for different polarizations, but also possesses absorptive property to electromagnetic waves in out-band. By virtue of this advantage, the out-band signals can be absorbed and the risk of anti-stealth detection can be greatly reduced. In addition, because of the function of the absorber, grating lobes of the FSS are also restrained, which reduces the interference of operating band.

**Keywords:** radome, frequency selective surface, absorber

**PACS:** 42.25.Bs, 52.35.Hr, 74.25.nm

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871027, 60901029, 61071058), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB623306), the Research Fund of Shaanxi Key Laboratory of Electronic Information System Integration (Grant No. 201114Y11), and the China Postdoctoral Science Foundation, China (Grant No. 20100481327).

† E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn