

# 混杂组元低频吸波阵列层板复合材料的吸波性能

宫元勋<sup>1,2</sup> 周忠祥<sup>2</sup> 赵宏杰<sup>1</sup> 嵇培军<sup>1</sup> 赵亮<sup>1</sup>

(1 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

(2 哈尔滨工业大学,哈尔滨 150000)

**文 摘** 采用电磁仿真运算的方法设计了方形和十字形混杂组元低频吸波阵列,采用模压工艺制备了基于混杂组元低频吸波阵列的吸波层板复合材料。研究了各单组元阵列本征吸波特性和随单元结构变化的规律和混杂组元低频阵列本征吸收带的叠加效应。吸波性能测试结果表明,不同形状阵列单元的混杂可以有效拓宽阵列的本征吸收带宽,方形和十字形混杂组元阵列为双峰吸收阵列,吸收峰频率分别为 3.1 与 4.5 GHz。混杂组元低频阵列的引入可以有效改善层板低频吸波性能,5 mm 厚吸波阵列层板的反射率在 2~6 GHz 范围内 $<-4.7$  dB,6~16 GHz 范围内 $<-7$  dB,阵列吸波层板的宽频吸波性能显著优于传统的阻抗渐变型吸波层板,阵列吸波层板力学性能与树脂基复合材料层板相当。

**关键词** 低频吸波阵列,吸波电磁膜,吸波层板复合材料,吸波性能

中图分类号:TB34

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.013

## Microwave Absorbing Composites Based on Low-Frequency Electromagnetic Wave Absorbing Array With Multiple-Component

GONG Yuanxun<sup>1,2</sup> ZHOU Zhongxiang<sup>1</sup> ZHAO Hongjie<sup>1</sup> JI Peijun<sup>1</sup> ZHAO Liang<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

(2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150000)

**Abstract** In this paper, an low-frequency microwave absorbing (LFMA) array with patch & cross multiple-component is designed by electromagnetic simulation, and the microwave absorbing composites (MAC) based on LFMA array is prepared by moulded pressing. The influence of component structure on changing of the intrinsic microwave absorbing properties is studied. The microwave absorbing performance measurement reveals that the intrinsic absorbing bandwidth can be broaden by utilizing multi-component array. Dual absorbing peak is found on multi-component array with patch & loop cell, the frequency of which is located at 3.1 GHz and 4.5 GHz, respectively. The low-frequency absorbing performance of MAC can be obviously improved by introduction of LFMA array. The reflection coefficient of MAC in 5 mm thickness is lower than  $-4.7$  dB in the frequency range of 2 to 6 GHz as well as lower than  $-7$  dB in the frequency range of 6 to 16 GHz, which is remarkably improved compared with the traditional impedance gradation MAC.

**Key words** Low-frequency microwave absorbing array, Microwave absorbing films, Microwave absorbing composites, Microwave absorbing performance

### 0 引言

由于吸波层板复合材料具有轻质、强隐身、承载等突出优势,吸波层板复合材料在隐身武器装备上展现了巨大的应用潜力,并成为近年来隐身材料技术领域的研究热点,部分研究成果已在高性能武器装备上获得了工程应用。近年来,研究者们重点研究了阻抗

渐变型吸波层板的复合材料基体、电磁波吸收剂及阻抗渐变结构形式对吸波性能和力学性能的影响机制<sup>[1-4]</sup>,并通过阻抗渐变结构的调控在 6~18 GHz 高频频带获得了较好的吸波效果,但在 1~6 GHz 低频范围内阻抗渐变型吸波层板复合材料几乎不具备电磁波吸收能力。

收稿日期:2015-04-20

作者简介:宫元勋,1983 年出生,工程师,工学博士,主要研究方向为结构吸波材料。E-mail:gyxgyy@126.com

根据 LAGAKOV 定律,阻抗渐变型吸波材料的理论吸波频率下限是由材料厚度决定的,吸波材料的厚度越薄,则其低频吸波性能越差。飞航武器装备的舱体、翼面、进气道等多为薄壁结构件,材料厚度较薄,因此传统的阻抗渐变型吸波层板复合材料无法通过增加厚度来改善低频吸波性能。由导体贴片或孔径单元周期排列组成的吸波阵列结构,可利用阵列单元尺寸以及周期结构的控制对其电磁响应频段进行调控<sup>[5-8]</sup>,进而通过电磁波在吸波阵列内传输、反射特性的控制实现低频吸波功能,从而突破材料厚度对低频吸波性能的限制<sup>[9-15]</sup>。低频吸波阵列的引入可以大幅度提高现有阻抗渐变吸波层板材料的低频吸波性能,使吸波层板材料获得优异的宽频吸波性能。

本文采用电磁仿真运算的方法设计了方形和十字形混杂组元低频吸波阵列,研究了各单组元阵列本征吸波特性随单元结构变化的规律以及混杂组元低频阵列的本征吸收带的叠加效应,制备了基于混杂组元低频吸波阵列的吸波层板复合材料(阵列吸波层板),讨论了混杂组元阵列的低频吸波性能增强效应,研究了阵列吸波层板的吸波与力学性能。

## 1 试验

### 1.1 材料

图 1 为阵列吸波层板的结构示意图。其中吸波电磁膜阻抗渐变层由吸波电磁膜/环氧树脂与玻璃布/环氧树脂交替组成,自制的 GC 系列吸波电磁膜,其吸收剂含量沿电磁波入射方向梯度增加,EW180 平纹玻璃布,3068 中温环氧树脂;低频吸波阵列层与电磁反射层材料为 G0814 碳布/3068 复合材料。

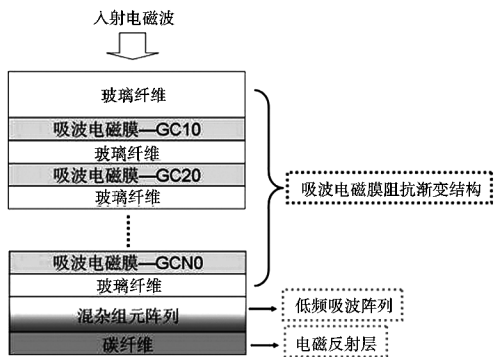


图 1 阵列吸波层板结构示意图

Fig. 1 Structure illustration of MAC based on LFMA array

### 1.2 低频吸波阵列设计

采用电磁仿真软件 CST 对低频吸波阵列的本征吸波特性进行仿真运算,并根据仿真运算结果对阵列结构尺寸进行优化。

### 1.3 阵列吸波层板制备

首先分别进行玻璃纤维预浸料、碳纤维预浸料以及低频吸波阵列预浸料准备,其中低频吸波阵列预浸料采用宇航材料工艺

料由自动化裁布机在碳纤维预浸料表面加工所需的阵列单元图案而成;然后将预浸料裁剪为 300 mm×300 mm;将裁剪好的预浸料按吸波结构铺层;最后进行装模,并在 130℃ 下固化 120 min 成型,获得阵列吸波层板。

### 1.4 性能测试

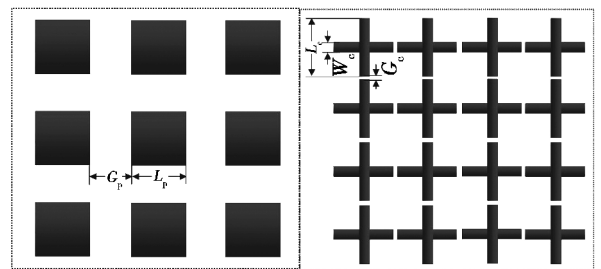
采用弓形法对阵列吸波层板的反射率进行测试。采用万能力学性能试验机对阵列吸波层板的拉伸、压缩、弯曲以及层间剪切等力学性能进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混杂组元低频阵列的本征吸波特性

#### 2.1.1 单组元吸波阵列设计

图 2 为方形与十字形单组元阵列的结构示意图,如图所示方形阵列的本征吸波特性主要由方形单元尺寸( $L_p$ )、单元间距( $G_p$ )决定,而十字形阵列的本征吸波特性则由十字线长( $L_c$ )、十字线宽( $W_c$ )以及单元间距( $G_c$ )决定。



(a) 方形阵列

(b) 十字形阵列

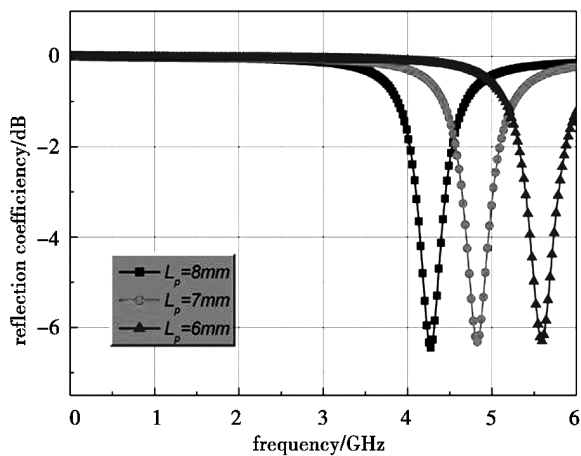
图 2 单组元阵列结构示意图

Fig. 2 Structure illustration of LFMA array component

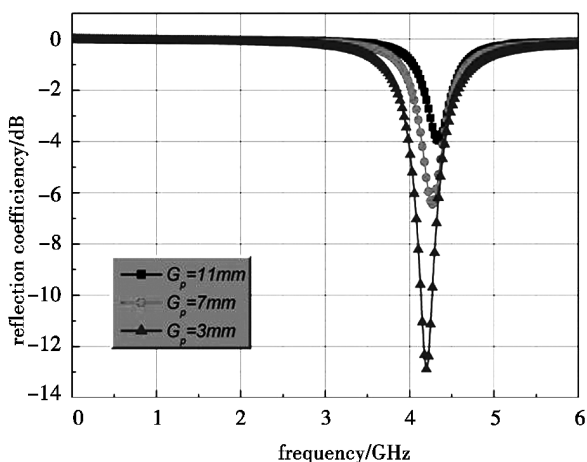
图 3 和图 4 分别为不同单元结构下方形及十字形阵列的本征吸波特性电磁仿真计算结果。方形阵列的吸收峰随单元长度的增加向低频方向移动,单元长度为 6 mm 时,方形阵列吸收峰位于 5.6 GHz 左右;单元长度为 7 mm 时,方形阵列吸收峰位于 4.8 GHz 左右;随着单元长度增加至 8 mm,其吸收峰频率也降低至 4.3 GHz 附近[图 3(a)]。方形阵列的有效吸收带宽随单元间距的减小而展宽,同时吸收峰向低频方向移动,而且吸收峰强度相应增强[图 3(b)]。当单元间距为 11 mm 时,方形阵列-2 dB 有效吸收带宽约为 0.3 GHz,吸收峰频率为 4.3 GHz,吸收峰强度为-3.9 dB;单元间距为 7 mm 时,方形阵列-2 dB 有效吸收带宽为 0.5 GHz,吸收峰频率为 4.2 GHz,吸收峰强度为-6.5 dB;单元间距减小至 3 mm,方形阵列-2 dB 有效吸收带宽也增至 0.8 GHz,吸收峰频率为 4.1 GHz,吸收峰强度为-13 dB。十字阵列的吸收峰随单元长度的增加向低频方向移动,同时吸收峰强度减弱。当单元长度为 11 mm 时,十字阵列吸收峰频率为 4.1 GHz,吸收峰强度为-12 dB;单元长度为 13

mm 时, 十字阵列吸收峰频率为 3.5 GHz, 吸收峰强度为 -7 dB; 随着单元长度增加至 15 mm, 十字阵列的吸收峰频率也降低至 3 GHz, 吸收峰强度减弱为 -4.6 dB [图 4(a)]。十字阵列的有效吸收带宽随单元线宽的增加而展宽, 同时吸收峰强度也逐渐增强。当单元线宽为 2 mm 时, 十字阵列 -2 dB 有效吸收带宽约为 0.2 GHz, 吸收峰强度为 -3.4 dB; 单元线宽为 2.5 mm 时, 十字阵列 -2 dB 有效吸收带宽为 0.3 GHz, 吸收峰强度为 -4.6 dB; 随着单元线宽增加至 3 mm, 十

字阵列 -2 dB 有效吸收带宽也增加至 0.4 GHz, 吸收峰强度为 -5.6 dB [图 4(b)]。十字阵列的吸收峰随单元间距的减小向低频方向移动, 同时吸收峰强度也减弱。当单元间距为 3 mm 时, 十字阵列吸收峰频率为 3.2 GHz。吸收峰强度为 -4.9 dB; 单元间距为 2 mm 时, 十字阵列吸收峰频率为 2.3 GHz, 吸收峰强度为 -4.6 dB; 单元间距为 1 mm 时, 十字阵列吸收峰频率为 2.7 GHz, 吸收峰强度为 -4.1 dB [图 4(c)]。



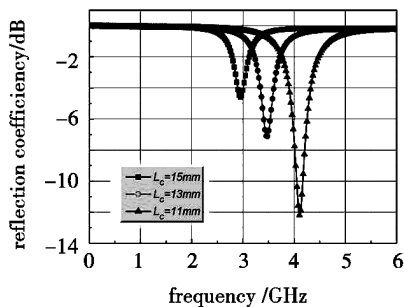
(a) 不同单元尺寸



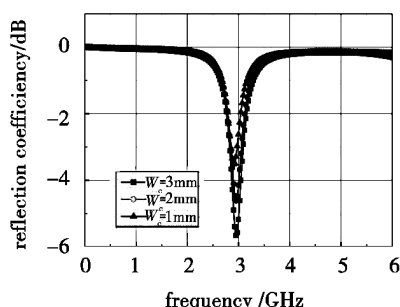
(b) 不同单元间距

图 3 不同单元结构下方形阵列的本征吸波特性的电磁仿真运算结果

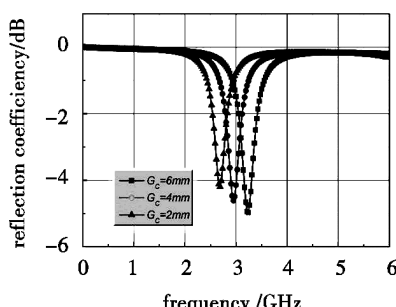
Fig. 3 EM simulation results of intrinsic microwave absorbing performance of patch arrays with different component structure



(a) 不同线长



(b) 不同线宽



(c) 不同单元间距

图 4 不同单元结构下十字形阵列的本征吸波特性的电磁仿真运算结果

Fig. 4 EM simulation results of intrinsic microwave absorbing performance of cross arrays with different component structure

### 2.1.2 混杂组元吸波阵列设计

图 5 为混杂组元低频吸波阵列的结构示意图, 混杂组元由方形单元与十字形单元周期排列而成。图 6 为方形和十字形混杂组元阵列以及各单组元阵列的本征吸波特性的电磁仿真运算结果。如图 5 所示, 方形与十字形单组元阵列呈单峰吸收特征, 其中方形阵列的吸收峰频率为 4.3 GHz, 十字阵列的吸收峰频率为 2.9 GHz。由方形单元与十字形单元组成的混杂组元吸波阵列为双峰吸收, 分别在 4.3 与 2.9 GHz 附近出现吸收峰, 吸收峰频率位置以及峰形与各单组元阵列对应性较好, 表明不同形状组元的混杂排列具有良好的吸波频带叠加特性, 通过不同形状组元的混杂

叠加可以有效地展宽低频阵列的有效吸收频带。

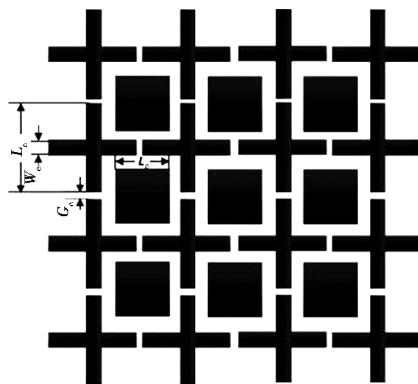


图 5 混杂组元低频吸波阵列结构示意图

Fig. 5 Structure illustration of LFMA arrays with multi-components  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 4 期

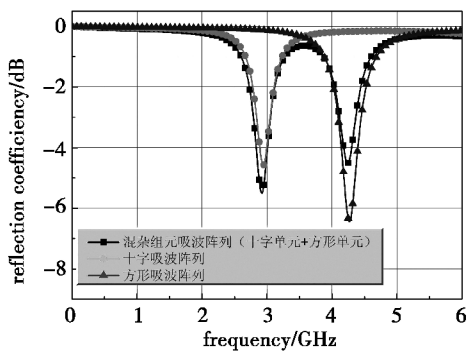


图6 混杂组元阵列与单组元阵列的本征吸波特性电磁仿真运算结果

Fig.6 EM simulation results of intrinsic microwave absorbing performance of LFMA arrays with mono-component and multi-component

根据电磁仿真优化结果制备的混杂组元吸波阵列试板反射率的实际测试与电磁仿真运算结果如图7所示,混杂组元吸波阵列试板的反射率实测曲线为典型的双峰吸收,吸收峰频率分别为3.1与4.5 GHz,吸收峰频率以及强度均与电磁仿真运算结果接近,表明电磁仿真设计可靠性强,能够准确反映低频阵列的吸波特性。

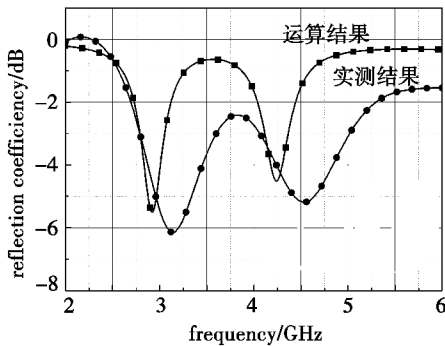


图7 混杂组元阵列试板反射率的电磁仿真运算与实际测试结果对比

Fig.7 EM simulation and measurement results of microwave absorbing performance of MAC based on LFMA arrays with multi-component

## 2.2 阵列吸波层板的吸波及力学性能

### 2.2.1 吸波性能

根据吸波结构优化结果制备了阵列吸波层板,层板厚度为5 mm。图8为阵列吸波层板以及不含低频阵列的吸波层板的反射率测试结果。如图所示,吸波阵列层板反射率在2~6 GHz范围内小于-4.7 dB,在6~16 GHz范围内小于-7 dB,宽频吸波性能优异。不含低频阵列的阻抗渐变型吸波层板在2~3 GHz范围内的反射率要高于-3 dB,而混杂组元低频吸波阵列的引入使吸波层板反射率在2~3 GHz范围内下降了2~5 dB,低频吸波性能改善效果非常显著。在低频吸波性能提高的同时,阵列吸波层板的高频吸波性能则相较于阻抗渐变型吸波层板略有退化,这是由于宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第4期

低频吸波阵列的引入对原吸波电磁膜阻抗渐变结构造成一定程度的破坏所导致的,因此需在后续工作中对低频阵列与吸波电磁膜阻抗渐变结构进行协同优化,以进一步提高阵列吸波层板的宽频吸波性能。

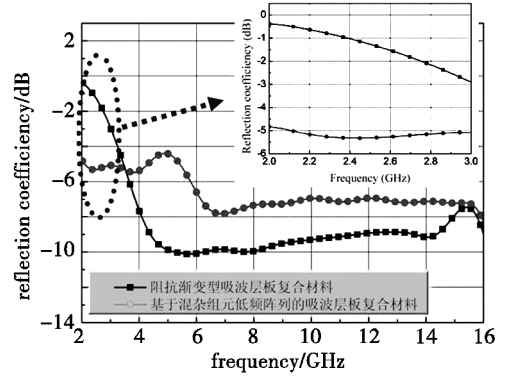


图8 阵列吸波层板与不含低频阵列的吸波层板的反射率测试结果

Fig.8 Measurement results of microwave absorbing performance of MAC with and without LFMA array

### 2.2.2 力学性能

表1为阵列吸波层板以及不含吸波结构的树脂基复合材料层板的力学性能测试结果。如表所示,相比于不含吸波结构的复合材料层板拉伸强度、模量、压缩强度以及层间剪切强度小幅下降,而压缩模量、弯曲强度以及弯曲模量则略有上升。总体来说,低频吸波阵列的引入对力学性能影响较小,阵列吸波层板的力学性能与普通树脂基复合材料层板相当。

表1 阵列吸波层板与复合材料层板的力学性能

Tab.1 Strength performance of MAC based on LFMA array

and composites without microwave absorbing materials

层板	拉伸强 /度	拉伸模 MPa量/GPa	压缩强 度/MPa	压缩模 量/GPa	弯曲强 度/MPa	弯曲模 量/GPa	层间强 度/MPa
复合材料	445	23	438	22.4	585	19.5	50
阵列吸波	425	22.8	394	25.6	605	21.2	45
性能变化/%	-4.5	-0.9	-10	14	3.4	8.7	-4

## 3 结论

本文设计制备了基于混杂组元低频阵列的吸波层板复合材料,对其吸波性能和力学性能进行了研究,得到以下结论。

(1)电磁仿真运算结果表明单组元阵列吸波特性受单元结构影响较为明显,方形阵列的吸收峰频率随单元长度增加向低频方向移动,有效吸收带宽随单元减小而增加,吸收峰频率降低,吸收峰强度增强;十字阵列的吸收峰随单元长度的增加以及单元间距的减小向低频方向移动,吸收峰强度随十字单元长度和单元间距的减小、单元线宽的增加而增强。

(2)吸波阵列的本征吸收频带具有良好的叠加效应,不同形状阵列单元的混杂可以有效拓宽阵列的本征吸收带宽,方形和十字形混杂组元阵列为双峰吸收阵列,吸收峰频率分别为3.1与4.5 GHz。

(3)混杂组元低频阵列的引入可以有效改善吸波层板的低频吸波性能,5 mm 阵列吸波层板的反射率在2~6 GHz 范围内小于-4.7 dB,6~16 GHz 范围内小于-7 dB。

(4)低频吸波阵列的引入对层板力学性能影响较小,阵列吸波层板的力学性能与树脂基复合材料层板相当。

### 参考文献

[1] Liang Q, Sun J, Zhao Q, et al. Microwave absorbing properties of linear low density polyethylene/ethylene-octene copolymer composites filled with short carbon fiber[J]. Mater. Sci., Eng., B, 2009, 162:162-166

[2] Chin W S, Lee D G. Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range[J]. Composite Structure, 2007, 77: 457-465

[3] Oh J H, Oh K S, Kim C C, et al. Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges [J]. Composites, Part B, 2004, 35:49-56

[4] Lee S E, Kang J H, Kim C C. Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites[J]. Composite Structures, 2006, 76: 397-405

[5] Tennant A, Chambers B. Adaptive radar absorbing structure with PIN diode controlled active frequency selective surface [J]. Smart. Mater. Struct., 2004, 13:122-125

[6] Tennant A, Chambers B. A single-layer tunable microwave absorber using an active fss[J]. IEEE Microwave and Wir-

less Components Letters, 2004, 14:46-47

[7] 程海峰, 刘海韬, 楚增勇, 等. 一类周期结构雷达吸波材料的设计与吸波性能研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26: 80-83

[8] 周永江, 程海峰, 刘世利, 等. 十字形电阻贴片频率选择表面吸收体吸波性能研究[J]. 材料工程, 2006(增刊1):106-109

[9] Zhao N, Zou T, Shi C, et al. Microwave absorbing properties of activated carbon-fiber felt screens (vertical-arranged carbon fibers)/epoxy resin composites [J]. Mater. Sci. Eng. B, 2006, 127:207-211

[10] Jose K A, Sha Y, Vaaradan V K. FSS embedded microwave absorber with carbon fiber composite[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002

[11] Sha Y, Jose K A, Neo C P, et al. Experimental investigation of microwave absorber with FSS embedded in carbon fiber composite[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 32:245-249

[12] Ye C F, Li E P. Finite difference time domain simulation for multi-layer microwave absorber with frequency selective surface[J]. IEEE, 2002, 2PC08:417-419

[13] Chakravarty S, Mitra R, Williams N R. Application of a microgenetic algorithm(MGA) to the design of broad-band microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50: 284-296

[14] Wu T K, Lee S W. Multiband frequency selective surface multiring patch elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42:1484-1490

[15] Wu T K. Four-band frequency selective surface with double-square-loop patch elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42:1659-1663

(编辑 吴坚)