

基于互补屏的主动频率选择表面设计研究*

焦健¹⁾²⁾ 徐念喜¹⁾ 冯晓国¹⁾ 梁凤超¹⁾ 赵晶丽¹⁾ 高劲松^{1)†}

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年4月2日收到; 2013年5月9日收到修改稿)

将谐振型频率选择表面负载阻抗分离可形成基于耦合机制的互补频率选择表面 (CFSS). 控制容性表面单元的旋转角 α , 可调节 CFSS 谐振频点. 以“Y”形单元为例, 利用耦合积分方程法计算了 CFSS 的频响特性, 并通过自由空间法测试 250 mm×250 mm 样件. 计算与测试结果表明: 随着 α 角变化, CFSS 能够实现主动变频功能, 为主动 FSS 设计提供借鉴.

关键词: 频率选择表面, 主动频率选择表面, 互补屏, 耦合积分方程

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.167306

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是由周期性排布的金属贴片单元或金属屏上周期性排列的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构. 当与电磁波相互作用时, FSS 具有明显的滤波特性, 在谐振频点处, 入射电磁波会发生全透射或全反射, 即实现带通滤波特性 (孔径型 FSS) 或带阻滤波特性 (贴片型 FSS)^[1-3], 因此, FSS 已经在微波、红外直至可见光波段得到广泛应用及深入研究^[4,5]. 当 FSS 的谐振频率发生改变, -3 dB 带宽以及通带开关得以控制, 此时 FSS 称为主动频率选择表面^[6] 或有源栅格阵列 (active grid arrays). 主动 FSS 不仅能够解决雷达罩的带外隐身问题, 而且能够灵活地适应外部电磁环境的变化, 满足全频段、全方位、全天候、高性能的隐身技术发展趋势. 主动 FSS 已成为国内外研究热点.

运用各种加载馈源技术设计主动频率选择表面可实现对 FSS 电磁滤波特性的主动控制 (包括带通滤波或带阻滤波中心频点变频的调制、-3 dB 带宽的控制、通带开关的控制等). 目前, 馈源加载技术主要分为两种: 一种是机械调制^[7], 另一种则

是常见的电调制^[8].

为实现 FSS 谐振频点的变频功能, 本文将环状孔径 FSS 的负载阻抗进行分离, 此时, FSS 孔径阵列形成感性表面, 负载贴片形成容性表面, 双屏之间的强耦合机制同样能够产生带通滤波结构, 该类型的滤波结构称为互补频率选择表面 (complementary frequency selective surface, CFSS)^[9], 贴片型 FSS 的每个周期单元绕其中心旋转一定角度 α 后, 感性表面与容性表面之间的互感系数 K 发生变化, 此时, CFSS 中心频点变化, 实现变频功能.

本文设计了由“Y”形单元构成的 CFSS, 根据 Y 贴片阵列和 Y 孔阵列的带阻和带通滤波特性, 以及两互补屏的近距离耦合关系建立等效电路模型, 分析 CFSS 变频物理机理. 利用耦合积分方程法计算其频响特性, 包括耦合距离、耦合电介质等参数对 CFSS 传输规律的影响; 利用自由空间法测试 250 mm×250 mm 的 CFSS 样件. 计算与测试结果表明: 随着 α 角变化, CFSS 中心频点也发生变化, 实现主动变频功能, 为主动 FSS 设计提供借鉴.

2 模型建立与物理机理分析

谐振型 FSS 是一个典型的利用波结构实现路

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172012) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

谐振的范例. FSS 表面一部分构成等效电容, 以电场储能为主; 另一部分构成等效电感, 以磁场储能为主. 依据传输线理论能够建立相应的等效 $L-C$ 电路, 根据等效电路理论可知, 其谐振频率取决于周期结构尺寸与工作波长关系. 谐振型 FSS 利用波结构实现路谐振带给我们的启发是: 形成电磁转换滤波结构必须包含以存储电场能为主的区域和以存储磁场能为主的区域. 因此, 从环形孔径结构出发, 将负载分离, 得到由容性表面和感性表面构成的互补频率选择表面结构, 当容性表面的贴片单元绕其

中心旋转一定角度 α 后, 感性表面与容性表面之间的耦合作用发生变化, 此时通带中心频点发生变化, 从而实现 CFSS 的变频功能.

为了方便 CFSS 设计与制作, 将环形孔径 FSS 负载贴片分离后, 调整容性表面单元尺寸使其与感性表面单元尺寸一致, 即 $W_{out} = W_{in} = W$, $L_{out} = L_{in} = L$. 当容性表面周期单元旋转 α 角后, 由 CFSS 对应的等效电路可知, 容性表面与感性表面之间的互感系数 K_c 和层间电容 C_c 发生变化, 具有变频功能的 CFSS 设计流程如图 1 所示.

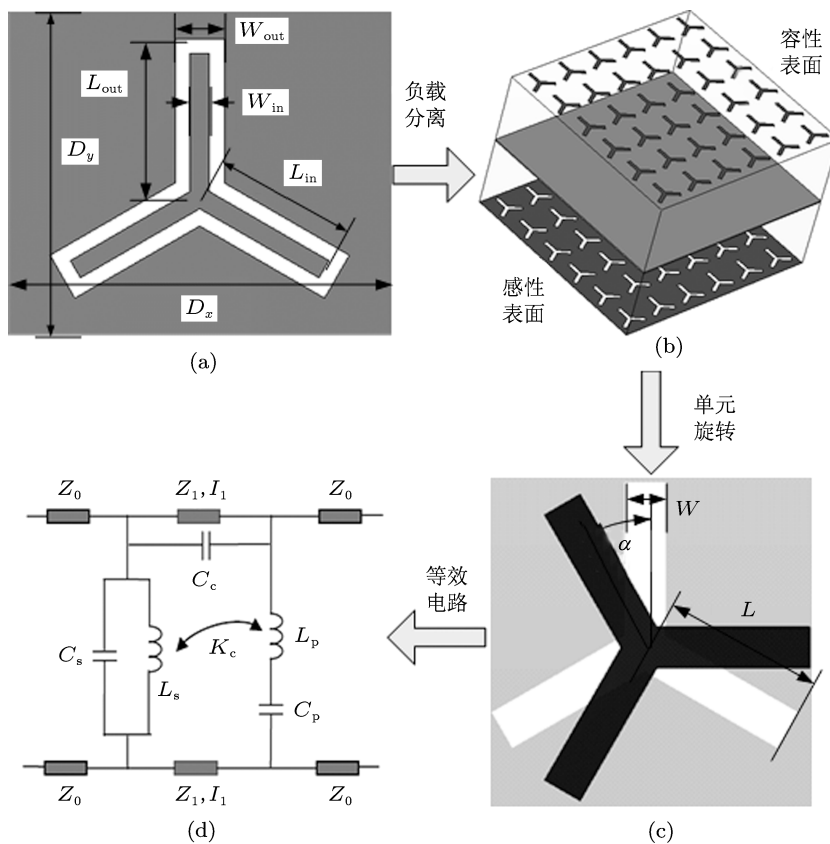


图 1 具有变频功能的 CFSS 设计流程

3 数值分析与计算

鉴于等效电路法的局限性, 为精确获得旋转角度与互感系数之间的关系, 本文采用耦合积分方程方法精确计算 CFSS 频率响应特性. 基于耦合机制的 CFSS 属于近距离耦合互补屏, 很多分析方法例如广义散射矩阵法以及多端口电路技术等在处理近距离阵列时因所需的矩阵过大而受计算条件限制^[10-12], 耦合积分方程方法从耦合本质出发, 基于高阶本征模式相互作用 (即凋落模耦合) 建立方

程组, 并采用矩量法求解方程组, 求解过程中可避免矩阵过大, 降低对计算条件的要求^[13,14]. 耦合积分方程法计算速度快而且在处理近距离耦合问题时收敛稳定性高. 首先, 假设该 CFSS 平面无穷大, 金属为无限薄理想导体, 入射平面波以任意角度入射^[15].

根据 Floquet 定理, 将自由空间和介质区域的横向电场和横向磁场用正交矢量 Floquet 模式展开, 用 p, q 表示 Floquet 模式因子, $m = 1, 2$ 表示 TE, TM 模式, 则正交 Floquet 模式为

$$\begin{aligned} \Psi_{pq}^m = & \frac{1}{D} \left(\frac{v_{pq}}{t_{pq}} e_x - \frac{u_{pq}}{t_{pq}} e_y \right) \\ & \times \exp[-j(u_{pq}x + v_{pq}y + \gamma_{pq}z)] \\ & \times \exp(\pm j\gamma_{pq}z), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $D = (D_x D_y)^{1/2}$, $v_{pq} = k \sin \theta \cos \phi + \frac{2\pi p}{D_x}$, $u_{pq} = k \sin \theta \sin \phi + \frac{2\pi q}{D_y}$, $t_{pq}^2 = v_{pq}^2 + u_{pq}^2$, $\gamma_{pq}^2 = k^2 - t_{pq}^2$, D_x , D_y 为 x, y 方向的周期, k 为入射电磁波的波数, θ 为电磁波的入射角, ϕ 为入射平面与 x 轴的夹角.

在各界面处 ($l = 1, 2$) 利用标准电磁场边界条件得到一系列矢量模式积分方程组, 通常各积分方程均以 Floquet 模式以及二元格林函数谱域展开 \tilde{G} 与表面电流谱域展开 \tilde{J}' 乘积的形式表示:

$$E_l^{\text{inc}} = \sum_{pq} \left\{ \sum_{r'=1}^M \tilde{G}_l^{r'} \tilde{J}'^{r'} \right\} \Psi \quad (l = 1, 2). \quad (2)$$

当横向电场振幅为 T_m^{inc} 的电磁波照射该频率选择表面时,

$$E_l^{\text{inc}} = 2 \sum_{m=1}^2 \left(\prod_{i=1}^{3l-1} \tau_i \right) \eta_{lm00}^1 T_m^{\text{inc}} \psi_{00} K_{m00}, \quad (3)$$

其中, η 和 τ 分别为介质导纳和模式反射系数, (2) 式是含有阵列间凋落模耦合因子的矩阵.

将介质考虑在内, 谱域格林函数为

$$\begin{aligned} \tilde{G}_l^{r'} = & \frac{1}{(k_{lx})^2 + (k_{ly})^2} \\ & \times \begin{bmatrix} \xi_l^{1,r'}(k_{lx})^2 + \xi_l^{2,r'}(k_{ly})^2 & -k_{lx}k_{ly}(\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}) \\ -k_{lx}k_{ly}(\xi_l^{2,r'} - \xi_l^{1,r'}) & \xi_l^{2,r'}(k_{lx})^2 + \xi_l^{1,r'}(k_{ly})^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ξ 是与介质基底及两层互补屏分开距离相关的参量. 利用矩量法, 将未知电流用全域基函数展开, (2) 式化简为矩阵形式, 求解得到透射电场:

$$E^+(r, z) = \left(E_2^{\text{inc}} - \sum_{r'=1}^2 \tilde{G}_2^{r'} \tilde{J}'^{r'} \right) \tau e^{+j\beta_{pq}z} \psi_{00}(r). \quad (5)$$

至此, 将 (5) 式和 (2) 式联立便可求得 CFSS 的透射系数 t .

4 频响特性讨论

CFSS 设计源于环形孔径 FSS, 由相同谐振单元尺寸的容性表面和感性表面组成, 通过控制容性表面周期单元旋转角 α , 寻找 CFSS 谐振频点的变化规律, 进而给出符合实际应用条件的主动 FSS 设计方法.

4.1 FSS 与 CFSS 频响特性对比

采用上述分析方法计算图 1 所示的物理模型时, 容性表面与感性表面周期单元均为矩形布阵且周期间隔相同, 选择臂长 $L = 2$ mm, 臂宽 $W = 0.5$ mm, X 方向和 Y 方向周期间隔为 5 和 4.7 mm; 容性表面与感性表面之间的耦合电介质厚度为 0.2 mm, 介电常数为 3, 损耗正切忽略不计. 选择环形孔径 FSS 周期单元尺寸: $D_x = 6$ mm, $D_y = 6$ mm, $W_{\text{out}} = 1$ mm, $L_{\text{out}} = 2.5$ mm, $W_{\text{in}} = 0.5$ mm, $L_{\text{in}} = 2.2$ mm.

垂直扫描时, 在 0—50 GHz 扫描范围内, 环形孔径 FSS(Y-LOOP)、互补屏 FSS(CFSS), CFSS 的容性表面(Y-PATCH)和感性表面(Y-SLOT)的频响特性如图 2 所示. 由图 2 可知, CFSS 相邻很近的两层 FSS 屏分别采用互补类型(贴片型与孔径型)且具有相同谐振频率(单独存在时)的单元形式, CFSS 与环形孔径 FSS 具有相同的频响特性(包括主谐振和高次谐振), 而且 CFSS 的谐振频带优于单屏环形孔径 FSS 的谐振频带. CFSS 滤波机理是基于容性表面与感性表面的耦合机制, 从而 CFSS 单元具有较小的尺寸和良好的入射角度稳定性 [9].

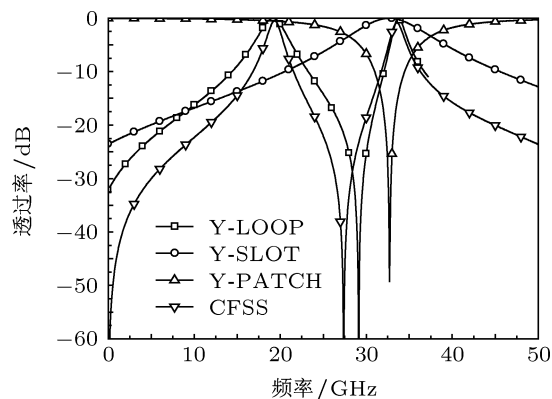


图 2 环形孔径 FSS 与 CFSS 频响特性对比

4.2 旋转容性表面单元实现对 CFSS 的变频

由 CFSS 的等效电路图 1(d) 可知, 容性表面单元旋转一定角度 α 时, 容性表面与感性表面之间的互感系数将发生变化: 当 Y 贴片旋转即 α 角度增加时, 两互补屏因金属重叠面积增加导致层间电容 C_c 增加, 层间电感互感 K_c 增强, 这两种耦合作用增强导致 CFSS 谐振能力增强, 此时 CFSS 通带峰值易产生在低频带. 介质厚度为 0.1 mm, 其他结构

参数与 4.1 节相同. TE 极化波垂直入射时, 旋转容性表面单元对 CFSS 频响特性的影响如图 3 所示. 当 α 从 0° 增加到 30° 时, 重叠金属面积增加量大导致层间电容及层间电感互耦大量增加, 因此 FSS 中心频点向低频方向大量漂移 (从 19.8 GHz 漂到 11.8 GHz), 当 α 从 30° 增加到 60° 时, 金属重叠面积增加量减小甚至不再增加, 导致层间电容以及层间互感增加量小甚至不再增加, FSS 中心频点仅向低频方向漂移 0.6 GHz (从 11.8 GHz 漂到 11.2 GHz).

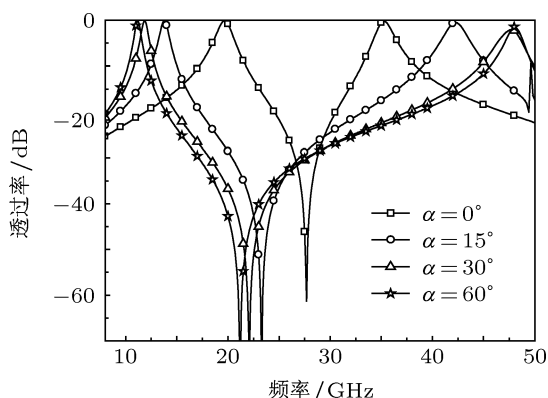


图 3 旋转容性表面单元 α 角对 CFSS 的频响特性影响

综上所述, 控制 Y 贴片旋转角度, 调节 CFSS 中心频点, 使得 FSS 具有变频功能, 尤其是 α 在 0° 到 30° 之间变化, CFSS 调谐效果显著.

4.3 耦合电介质对 CFSS 频响特性的影响

容性表面与感性表面之间强烈的耦合作用使 CFSS 具有良好的角度稳定性和工作频点远离栅瓣等优点^[9], 因此, 耦合电介质 (包括厚度与相对介电常数) 对 CFSS 频响特性的影响至关重要.

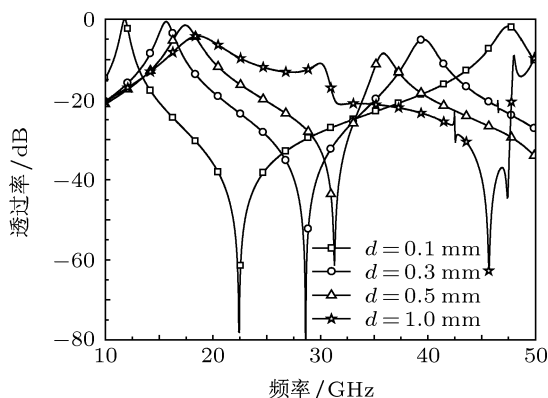


图 4 耦合电介质厚度对 CFSS 频响特性的影响

选择臂长 $L = 2 \text{ mm}$, 臂宽 $W = 0.5 \text{ mm}$, X 方向和 Y 方向周期为 5 和 4.7 mm; 旋转角度 $\alpha = 30^\circ$, 由于耦合材料一般选择低损耗 (损耗正切值小于 10^{-3} 量级) 的微波电介质, 损耗可忽略不计. 首先, 固定耦合电介质相对介电常数 ϵ_r 为 3, 其厚度分别为 0.1, 0.3, 0.5 和 1 mm 时, CFSS 频响特性曲线如图 4 所示. 然后, 固定耦合电介质厚度为 0.2 mm, 其相对介电常数分别为 2, 3 和 5 时, CFSS 频响特性曲线如图 5 所示.

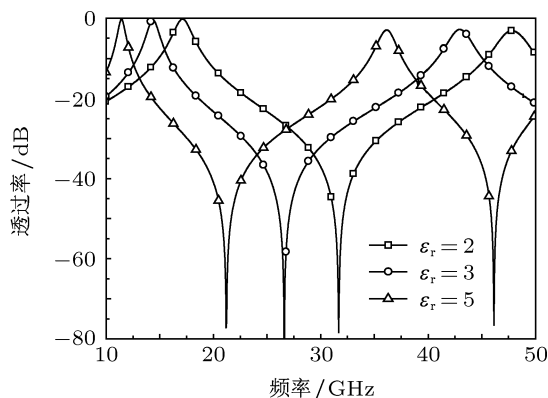


图 5 耦合电介质相对介电常数对 CFSS 频响特性的影响

由图 4 和图 5 可知, 当优化设计 CFSS 时, 耦合电介质的物理厚度对其频响特性的影响至关重要, 电介质厚度增加会严重影响互补屏间的耦合效果, 层间电容和电感耦合作用因两屏间距离增大而逐渐消失. 耦合电介质相对介电常数增加能增强两互补屏间的耦合作用, 使 CFSS 中心频点向低频漂移.

4.4 扫描角度和极化方式对 CFSS 频响特性的影响

选取容性表面、感性表面结构参数与 4.3 节一致, 耦合电介质厚度为 0.2 mm, 相对介电常数 ϵ_r 为 3. TE 极化和 TM 极化平面电磁波分别以不同角度照射该 CFSS 时, 其频响特性曲线如图 6 所示.

由图 6 可知, CFSS 主谐振具有极好的角度稳定性: 0° — 60° 扫描时, TE 极化波入射时中心频点基本稳定在 14.6 GHz, TM 极化波入射时中心频点稳定在 14.4 GHz, 进一步验证了 CFSS 谐振频带优于环形孔径 FSS. 而对于高次谐振, CFSS 与其他孔径型 FSS 一样, 随着扫描角度的增加, 高次谐振的稳定性变差.

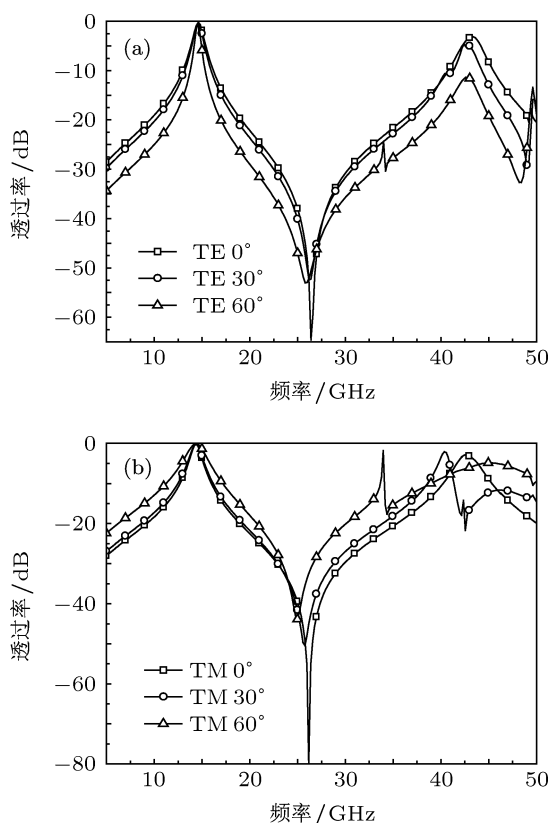


图6 (a) CFSS 在 TE 极化下不同入射角度的频率响应特性; (b) CFSS 在 TM 极化下不同入射角度的频率响应特性

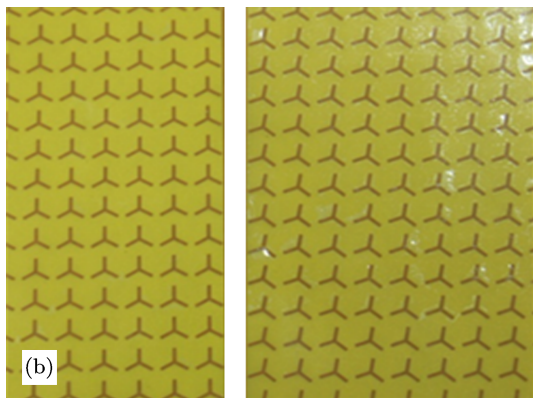
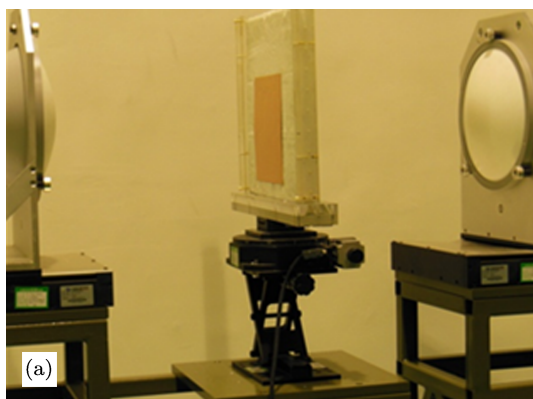


图7 CFSS 样件的测试系统与容性表面周期单元旋转前后对比 (a) 自由空间法测试系统; (b) 容性表面周期单元旋转前后对比图

5 实验验证

首先, 利用印刷电路板技术制备 CFSS 容性表面与感性表面样件, 容性表面单元旋转 10° 前后对比如图 7(b) 所示. 样件结构参数为: $L = 2.3 \text{ mm}$, $W = 0.5 \text{ mm}$, $D_x = D_y = 5 \text{ mm}$. 然后, 将容性表面与感性表面置于耦合电介质两侧, 同时保证两周期表面单元对准精度. 最后, 采用自由空间法在微波暗室中对该 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 试验件进行传输特性测量, 如图 7(a), 实验仪器包括矢量网络分析仪、喇叭天线和转台等, 测试频段为 $12\text{--}18 \text{ GHz}$, 电磁波为 TE 极化入射, 入射角度为 0° 和 50° . CFSS 样品测试结果如图 8 所示, 在考虑容性表面与感性表面单元对准精度前提下, 理论计算与实验测量的结果基本一致. 考虑介质损耗后, 大角度入射 (50°) 时, 中心频点处损耗增加, 但中心频点保持稳定. 实验结果不仅证明 CFSS 结构的可行性和 CFSS 设计方法的准确性, 为制备主动 FSS 提供实验参考.

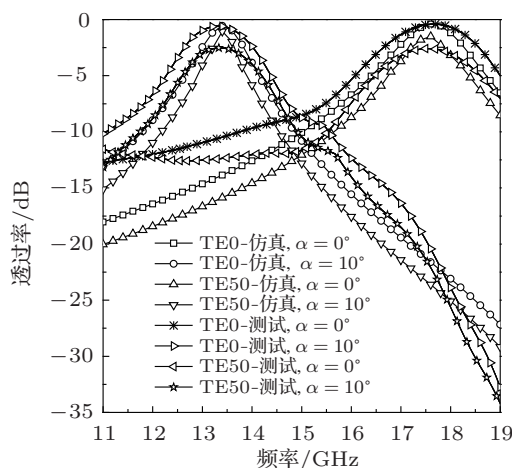


图8 容性表面单元旋转 10° 前后 CFSS 频响特性仿真与测试对比

6 结论

本文从“Y”环形结构出发, 将单元负载分离, 获得由容性表面和感性表面组成的一对互补屏, 并将其置于耦合电介质两侧, 互补屏之间强烈的耦合作用使 CFSS 谐振频带优于环形孔径 FSS, 根据互补屏近距离耦合关系建立等效电路模型, 分析 CFSS 变频物理机理; 利用耦合积分方程法计算其频响特性. 计算与测试结果表明: 容性表面旋转角 α 从 0° 变化到 10° 时, CFSS 谐振频点能够从 17.6 GHz 变频到 13.4 GHz , 为主动 FSS 理论分析和实验制备提供借鉴.

- [1] 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]
- [2] 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]
- [3] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易, 张树仁, 卢俊, 王剑波, 孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [4] Moallem M, Sarabandi K 2012 *Trans. Terahertz Sci. Technol.* **2** 333
- [5] Xu N X, Feng X G, Wang Y S, Chen X, Gao J S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114102 (in Chinese) [徐念喜, 冯晓国, 王岩松, 陈新, 高劲松 2011 物理学报 **60** 114102]
- [6] Chang T K, Langley R J, Parker E A 1996 *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.* **143** 62
- [7] Wang C 2007 *M.S. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [王操 2007 硕士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [8] Bayarpur F, Sarabandi K 2008 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **56** 774
- [9] Lockyer D S, Vardaxoglou J C, Simpkin R A 2000 *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.* **147** 501
- [10] Shuley N V 1984 *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propagat. H* **131** 129
- [11] Johansson F S 1985 *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propagat. H* **132** 319
- [12] Orta R, Tascone R, Zich R 1988 *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave Antennas Propagat. H* **135** 75
- [13] Feresidis A P, Apostolopoulos G, Serfas N, Vardaxogou J C 2004 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **52** 1154
- [14] Wakabayashi H, Kominami M, Kusaka H, Nakashima H 1994 *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.* **141** 477
- [15] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley)

Design and study of the active frequency selective surface based on the complementary screen*

Jiao Jian¹⁾²⁾ Xu Nian-Xi¹⁾ Feng Xiao-Guo¹⁾ Liang Feng-Chao¹⁾
Zhao Jing-Li¹⁾ Gao Jin-Song^{1)†}

1) (Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 2 April 2013; revised manuscript received 9 May 2013)

Abstract

Separating the load impedance of the resonant frequency selective surface (FSS) can form the complementary frequency selective surface (CFSS), whose filtering feature is based on the coupling mechanism. The resonance of CFSS can be tuned by controlling the rotation angle α of the element on the capacitive surface. Taking tripole element for example, the frequency response of the CFSS is calculated by using the coupled integral equation method. A 250 mm \times 250 mm prototype is tested via free space method. Calculation and test results show that the resonance of the CFSS can be tuned actively as the rotation angle α changes. This study provides reference to the active FSS design.

Keywords: frequency selective surface, active frequency selective surface, complementary screens, the coupled integral equation method

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.167306

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172012).

† Corresponding author. E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn