

基于混合耦合的低剖面高选择性频率选择表面

马 骏, 陈欣然, 向凯燃*, 陈付昌, 严俊杰

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510641)

摘要: 本文提出一种基于低剖面叠层贴片结构的高选择性频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)设计方法. 针对频率选择表面综合设计中因结构复杂而导致谐振模式与耦合机制难以准确调控, 进而限制传输零点灵活配置的问题, 本文提出基于混合电磁耦合理论的等效电路模型, 并将其应用于频率选择表面的综合设计中. 首先, 本文设计并分析了一种弱耦合双层贴片频率选择表面, 以阐明其工作机理. 研究表明, 两层贴片间的混合电磁(Electric and Magnetic, EM)耦合可引入一个可控的传输零点(Transmission Zero, TZ). 在贴片上刻蚀单条或双条缝隙可有效调节耦合强度, 从而灵活调控传输零点的位置. 建立并验证了等效电路模型, 以准确描述该耦合机理. 基于此原理, 进一步设计了两种在通带一侧具有传输零点的三阶频率选择表面和一种在通带两侧具有传输零点的四阶高选择性频率选择表面, 显著提升了频率选择性. 制作并测试了工作在 4.72 GHz 的实物样品, 实测结果与仿真结果高度一致. 所提出的频率选择表面具有优异的频率选择性, 良好的人射角稳定性和低剖面, 适用于空间滤波和电磁屏蔽应用.

关键词: 频率选择表面; 混合电磁耦合; 传输零点; 叠层贴片; 等效电路; 高选择性

基金项目: 国家自然科学基金(No.62501240); 广东省自然科学基金(No.2024A1515011615)

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)12-4485-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20251023

Low-Profile and High-Selectivity Frequency Selective Surfaces Based on Mixed Electric and Magnetic Coupling

MA Jun, CHEN Xin-ran, XIANG Kai-ran*, CHEN Fu-chang, YAN Jun-jie

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: This paper proposes a high-selectivity frequency selective surface (FSS) based on a low-profile stacked patch structure. To address the challenges in the synthesis design of FSS: where complex structures make it difficult to accurately control resonant modes and coupling mechanisms, thereby limiting the flexible control of transmission zeros, equivalent circuit models based on mixed electric and magnetic coupling theory are proposed and applied to the design of FSSs. First, a weakly coupled dual patch FSS is designed and analyzed to clarify its operating mechanism. It is demonstrated that mixed electric and magnetic (EM) coupling between the two patch layers can introduce a controllable transmission zero (TZ). By etching one or two narrow slots on the patches, the EM coupling strength can be effectively adjusted, allowing precise control over the TZ position. An equivalent circuit model is developed and validated to accurately predict the coupling behavior. Based on the working mechanism, two third-order FSSs with single TZ and a fourth-order FSS with TZs on both sides of the passband are further designed, significantly enhancing frequency selectivity. A prototype operating at 4.72 GHz is fabricated and measured, and the measured results are in good agreement with the simulated results. The proposed FSS exhibits excellent out-of-band suppression, stable angular stability and low profile, making it a suitable candidate for advanced spatial filtering and electromagnetic shielding applications.

Key words: frequency selective surface; mixed electric and magnetic coupling; transmission zero; stacked patch; equivalent circuit; high selectivity

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62501240); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2024A1515011615)

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种能够根据频率、入射角及极化方式实现选择性透射或反射电磁波的周期性电磁结构,在雷达天线罩^[1]、电磁干扰屏蔽^[2]、吸波材料^[3]以及空间滤波领域^[4]中具有广泛应用.传统二维频率选择表面通常具有较窄的工作带宽,因而在工程应用中受到一定限制^[5-7].为实现宽带特性,研究者普遍采用多层级联的方式^[8-10],此类结构虽然可以显著改善滤波性能,提高频率选择性,但往往以增加结构复杂度和剖面高度为代价.因此,如何在保持高性能的同时实现低剖面,成为频率选择表面设计中的关键挑战.文献^[11]中采用亚波长周期单元,结合感性金属网格与容性贴片,实现了紧凑型设计.

近年来,三维频率选择表面结构受到广泛关注^[12-14].通过在空间中垂直布置介质基板,可在传播路径上提供更多自由度,显著改善滤波特性.然而,其不可避免地带来较高的剖面,不利于集成化应用.此外,滤波天线-滤波天线架构被广泛应用于频率选择表面设计^[15-17].通过在收发天线单元中集成滤波响应,频率选择表面的设计可转变为具有辐射零点的滤波天线设计.该方法具有设计流程简便的特点、零点配置灵活的特点.

相较于经典的巴特沃斯和切比雪夫响应,椭圆形或准椭圆形响应具有更陡峭的过渡带和更强的带外抑制能力.然而,传统二维频率选择表面因缺乏交叉耦合机制,难以自然实现此类响应^[18].具有椭圆形响应的频率选择表面已成为当前研究热点^[19-22].现有方案主要通过交叉耦合谐振器或双模谐振结构实现.例如,文献^[19]利用基板集成波导腔体中的交叉耦合机制实现了高选择性;文献^[20]提出一种由双方环与网格方环组成的双模谐振器型频率选择表面,在两个阻带之间形成中间通带,从而获得准椭圆响应.

关于频率选择表面的通用综合设计方法至关重要,如基于等效电路模型综合法^[23-25]和耦合矩阵综合法^[26].虽然这些工作中可以通过综合参数设计具有不同带宽或不同回波损耗的频率选择表面,但在面对复杂周期结构时,其谐振模式与耦合机制难以准确预判,尤其缺乏对传输零点(Transmission Zero, TZ)的高效调控能力.针对这一挑战,本文提出基于混合电磁(Electric and Magnetic, EM)耦合理论的电路模型,并应用于频率选择表面综合设计中.首先以弱耦合双层频率选择表面为例,结合其等效电路模型,系统阐述传输零点的产生机理;并通过在贴片上刻蚀单条或双条缝隙,灵活调控耦合强度,从而实现对传输零点位置的精确控制.通过层间可控的混合电磁耦合,设计并加工

了一款高选择性四阶带通频率选择表面,在通带两侧各引入一个传输零点,实现约 20 dB 的带外抑制.与已有文献报道的频率选择表面设计相比,本文提出的结构具有低剖面、结构简洁、角度稳定性好及高频率选择性的优势.

2 双贴片频率选择表面耦合特性分析

2.1 工作机理

为便于分析贴片谐振器的本征谐振频率及其层间耦合特性,本文采用弱耦合法^[27]对叠层贴片表面结构进行研究.图 1 所示为弱耦合双贴片频率选择表面的单元结构示意图.介质基板均采用 Rogers RO4350B 材料,其介电常数为 3.66,损耗角正切为 0.004.中间介质基板的两侧分别加载一层金属贴片,两层外侧介质基板具有相同厚度,均覆有金属地板层,并在地板层上刻蚀缝隙以实现弱耦合激励.该频率选择表面由周期性单元在 xy 平面内无限延拓构成,入射电磁波沿 x 方向极化,入射面位于 xz 平面.

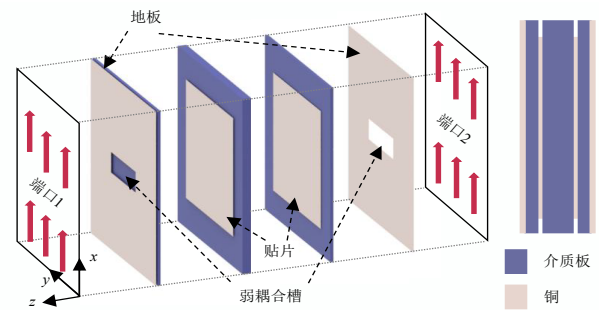


图1 弱耦合双贴片频率选择表面结构

为深入揭示耦合机理,选取单元中心截面观察电场与磁场分布.如图 2 所示,两贴片之间的空间中心区域磁场较强,而电场主要集中于贴片边缘.这一分布特征说明层间同时存在电耦合与磁耦合,整体表现为混合电磁耦合.基于此,建立了如图 3 所示的混合电磁耦合等效电路模型^[27].

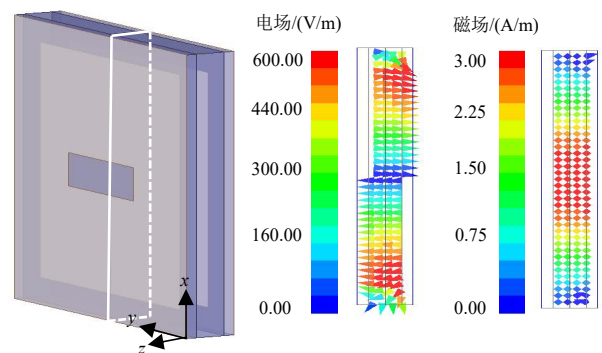


图2 截面上电场与磁场分布

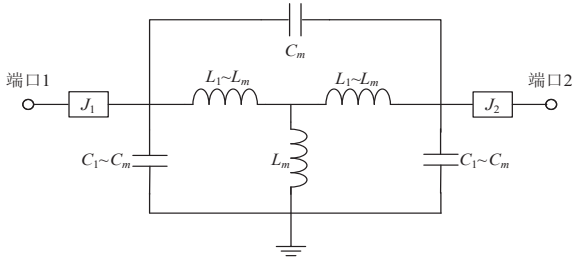


图3 双贴片频率选择表面等效电路

根据滤波器设计理论,谐振器的损耗对谐振频率的影响较小,因此在电路模型中忽略贴片的内在损耗电阻以简化分析.弱耦合部分由 J 变换器表示,由于贴片谐振器上下表面电场与磁场方向相反, J_1 与 J_2 的符号相反.其中,电耦合由互电容 C_m 表征,磁耦合由互电感 L_m 表征.该等效电路可视为一个 π 型网络与T型网络的并联组合,其导纳参数可由此推导得到:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{L_2}{j\omega(L_1L_2-L_m^2)} + j\omega C_1 & \frac{-L_m}{j\omega(L_1L_2-L_m^2)} - j\omega C_m \\ \frac{-L_m}{j\omega(L_1L_2-L_m^2)} - j\omega C_m & \frac{L_1}{j\omega(L_1L_2-L_m^2)} - j\omega C_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

传输零点由混合电磁耦合结构引入,当导纳参数 $Y_{21} = 0$ 时,在频率 ω_z 处形成传输零点,其计算表达式为

$$\omega_z^2 = \frac{L_m}{C_m(L_1L_2-L_m^2)} \quad (2)$$

对于对称结构,等效电路中具有相同的电感值($L_1 = L_2 = L$)和电容值($C_1 = C_2 = C$).在等效电路的对称平面中插入电屏障或磁屏障将产生两个谐振频率^[27],对应频率为

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L_m)(C+C_m)}} \quad (3)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_m)(C-C_m)}} \quad (4)$$

图4中给出了在弱耦合条件下二阶频率选择表面的全波仿真与电路仿真透射系数,其中电路参数为

$$\begin{aligned} L_1 = L_2 = 34.36 \text{ pH}, L_m = 8.64 \text{ pH}, J_1 = 2 \text{ mS} \\ C_1 = C_2 = 34.36 \text{ pF}, C_m = 8.65 \text{ pF}, J_2 = -2 \text{ mS} \end{aligned} \quad (5)$$

两个谐振峰对应的本征谐振频率分别为 f_e 与 f_m ^[27],分别对应电主导模式与磁主导模式,其谐振频率分别为4.90 GHz和4.61 GHz,传输零点频率 f_z 位于5.46 GHz.等效电路仿真与全波仿真结果高度一致,从而验证了所建立的等效电路模型的有效性.进一步分析表明,当贴片间的磁耦合占主导时(即 $f_e > f_m$),传输零点位于通带的高频侧;反之,当电耦合占主导时(即 $f_e < f_m$),传输零点则位于通带的低频侧.因此,通过调控耦合强

度,可灵活配置传输零点位置.基于此,设计了两种具有不同零点分布的二阶频率选择表面以对比其滤波特性.

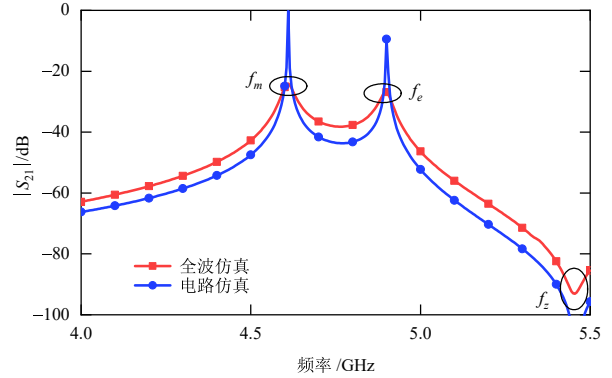


图4 全波仿真与电路仿真结果对比

2.2 频率选择表面1

图5展示了频率选择表面1的结构,其中在贴片1上刻蚀了一条缝隙,尺寸参数如下(单位:mm):

$$\begin{aligned} W_1 = 13.0, W_2 = 13.0, L_1 = 14.2, L_2 = 13.8, h_1 = 1.524, \\ W_{s1} = 5.1, L_{s1} = 0.5, p_y = 16.0, p_x = 17.0, h_2 = 0.508 \end{aligned} \quad (6)$$

由图6(a)所示,缝隙长度 W_{s1} 对磁耦合强度具有显著影响,随着 W_{s1} 的增加,传输零点向低频方向移动,而两个本征谐振频率几乎保持不变,说明磁耦合减弱.等效电路仿真结果如图6(b)所示,当互电感 L_m 减小时,传输零点同样向低频移动,验证了物理结构与电路模型的一致性.类似地,增大缝隙宽度 L_1 亦会削弱磁耦合,导致零点频率降低.此外,中介质层厚度对耦合强度亦有显著影响.如图6(c)所示,随着介质层厚度的增加,传输零点向高频方向移动,两谐振峰间距逐渐减小,表明 L_m 增大、磁耦合增强.

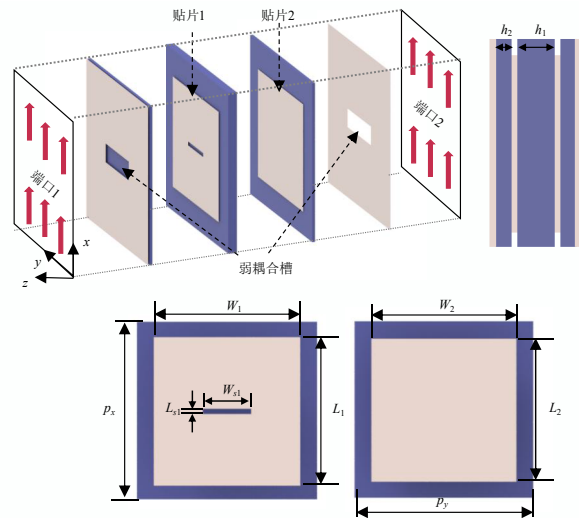


图5 频率选择表面1结构

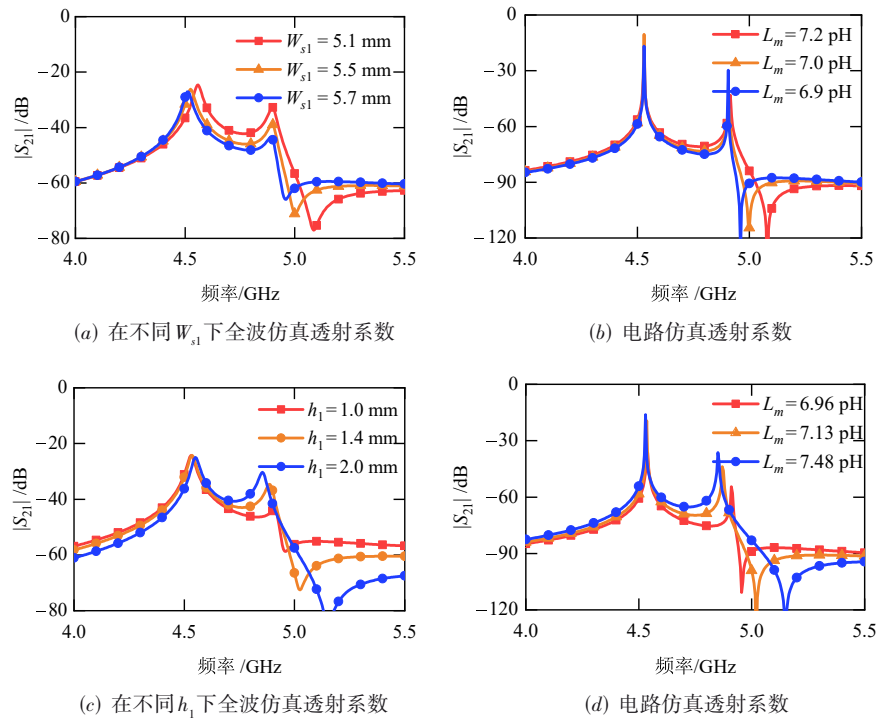


图6 频率选择表面1等效电路仿真结果与全波仿真结果对比

2.3 频率选择表面2

为实现通带左侧的传输零点,进一步提出频率选择表面2,如图7所示,尺寸参数如下(单位:mm):

$$\begin{aligned} W_3 &= 12.0, W_4 = 8.5, L_3 = 10.5, L_4 = 13.0, \\ W_{s2} &= 10.5, L_{s2} = 0.5, t_1 = 2.0 \end{aligned} \quad (7)$$

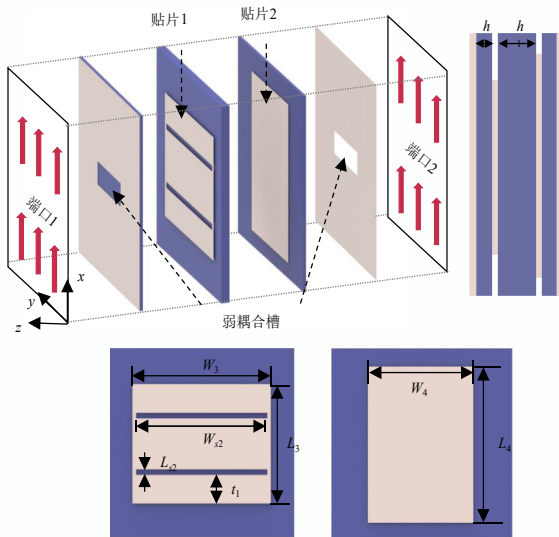


图7 频率选择表面2结构

通过在贴片1上刻蚀一对对称缝隙,以更显著地削弱磁耦合.如图8(a)所示,传输零点位于通带低频侧.随着缝隙与贴片边缘间距 t_1 减小,缝隙靠近贴片边缘,

磁耦合增强,传输零点向高频方向移动.同时, f_c 发生偏移,反映出 t_1 对贴片本征谐振特性的影响.对应的等效电路调整结果如图8(b)所示,随着互电感 L_m 的增大,传输零点亦向高频方向移动,介质层厚度的影响如图8(c)、图8(d)所示,其变化规律与频率选择表面1中观察到的结果一致,进一步验证了耦合机制的普适性.

3 高选择性频率选择表面

基于上述双贴片频率选择表面的混合电磁耦合特性,可通过级联多个贴片结构设计高阶频率选择表面.首先设计了一种三阶频率选择表面,其等效电路如图9所示,包含一个二阶混合耦合结构与一个贴片谐振器.考虑到实际设计中贴片谐振器存在有限品质因数,在等效电路中引入电阻 R 以表征谐振器损耗.

设计了两种具有不同传输零点分布的三阶频率选择表面以验证设计方法.第一种由频率选择表面1与单贴片谐振器组成,如图10(a)所示,二者通过地板层上的耦合缝隙实现能量耦合,其耦合强度可通过缝隙尺寸调节.尺寸参数如下(单位:mm):

$$\begin{aligned} W_1 &= 15.1, W_2 = 13.2, W_5 = 15.0, W_{s1} = 0.5, W_c = 4.4, \\ L_1 &= 13.7, L_2 = 14.7, L_5 = 15.1, L_{s1} = 5.7, L_c = 1.0, \\ p_y &= 16.0, p_x = 16.7, h_1 = 0.55, h_2 = h_3 = 0.508 \end{aligned} \quad (8)$$

全波仿真与等效电路仿真得到的S参数结果如图10(b)所示,其中等效电路中参数如下:

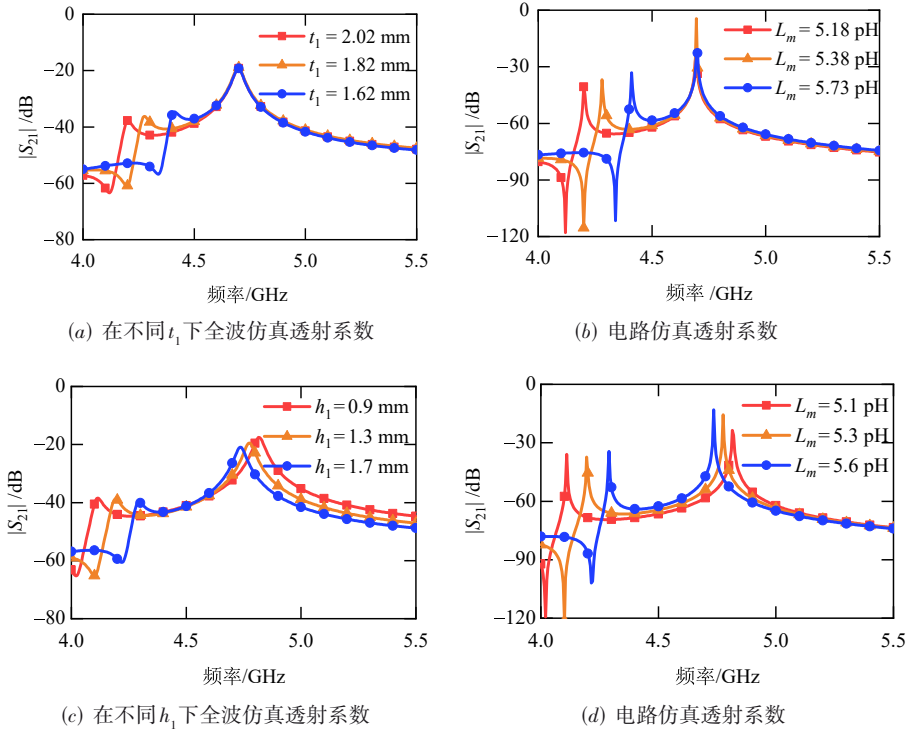


图8 频率选择表面2等效电路仿真结果与全波仿真结果对比

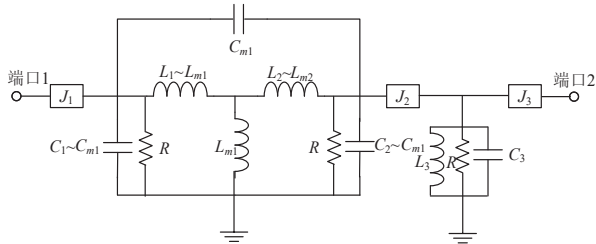


图9 三阶频率选择表面等效电路

$$L_1 = 34.9 \text{ pH}, L_2 = 41.0 \text{ pH}, L_3 = 27.3 \text{ pH}, L_{m1} = 24.9 \text{ pH}, \\ C_1 = 50.8 \text{ pF}, C_2 = 43.9 \text{ pF}, C_3 = 39.6 \text{ pF}, C_{m1} = 29.5 \text{ pF}, \\ J_1 = -29.0 \text{ mS}, J_2 = 67.5 \text{ mS}, J_3 = -42.9 \text{ mS}, R = 178 \Omega \quad (9)$$

由于该结构中仅含有一个混合耦合单元,因此仅产生一个位于通带右侧的传输零点,频率为 5.12 GHz. 通带范围为 4.68~5.06 GHz,相对带宽约为 8%,中心频率处插入损耗小于 1.1 dB. 全波仿真与等效电路仿真结果吻合良好,高度一致,验证了模型的准确性.

第二种三阶频率选择表面由频率选择表面2与单贴片谐振器组成,如图 11(a)所示. 尺寸参数如下(单位:mm):

$$W_3 = 13.4, W_4 = 8.7, W_5 = 11.0, W_{s2} = 11.0, W_c = 3.9, \\ L_3 = 10.4, L_4 = 13.8, L_5 = 15.0, L_{s2} = 0.48, L_c = 1.0, \quad (10) \\ p_y = 16.2, p_x = 16.2, h_1 = 1.6, h_2 = h_3 = 0.508, t_1 = 3.4$$

全波仿真与等效电路仿真得到的 S 参数结果如图 11(b)所示,其中等效电路中参数如下:

$$L_1 = 36.6 \text{ pH}, L_2 = 46.8 \text{ pH}, L_3 = 31.2 \text{ pH}, L_{m1} = 24.5 \text{ pH}, \\ C_1 = 48.8 \text{ pF}, C_2 = 37.2 \text{ pF}, C_3 = 34.2 \text{ pF}, C_{m1} = 27.1 \text{ pF}, \\ J_1 = -42.8 \text{ mS}, J_2 = 60.8 \text{ mS}, J_3 = -28.5 \text{ mS}, R = 161.8 \Omega \quad (11)$$

传输零点位于通带左侧,频率为 4.53 GHz. 通带范围为 4.64~5.08 GHz,分数带宽约为 9%,中心频率处插入损耗低至 1.4 dB.

由于每个混合耦合单元可引入一个传输零点,将两个此类单元级联即可在通带两侧同时生成零点,从而实现高选择性滤波. 一种四阶高选择性频率选择表面等效电路如图 12 所示,其中包含两个混合耦合单元. 该结构由频率选择表面1与频率选择表面2组合而成,能够在通带两侧同时实现传输零点,其物理结构如图 13(a)所示. 尺寸参数如下(单位:mm):

$$W_1 = 15.1, W_2 = 13.2, W_3 = 12.0, W_4 = 7.5, W_c = 5.0, \\ L_1 = 14.1, L_2 = 13.7, L_3 = 10.5, L_4 = 13.8, L_c = 1.0, \\ W_{s1} = 4.5, W_{s2} = 11.5, L_{s1} = 0.5, L_{s2} = 0.5, t_1 = 2.5, \\ p_x = 16.7, p_y = 16.0, h_1 = 1.525, h_2 = 0.508 \quad (12)$$

图 13(b)给出了该四阶频率选择表面的全波仿真结果与等效电路仿真结果的对比,其中等效电路中参数如下:

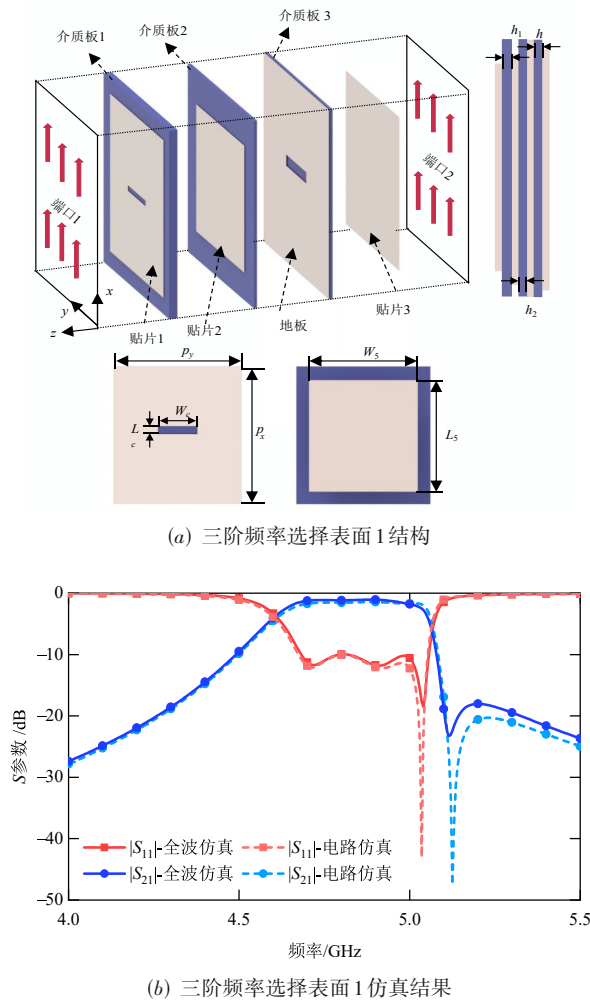


图 10 三阶频率选择表面 1 结构与仿真结果

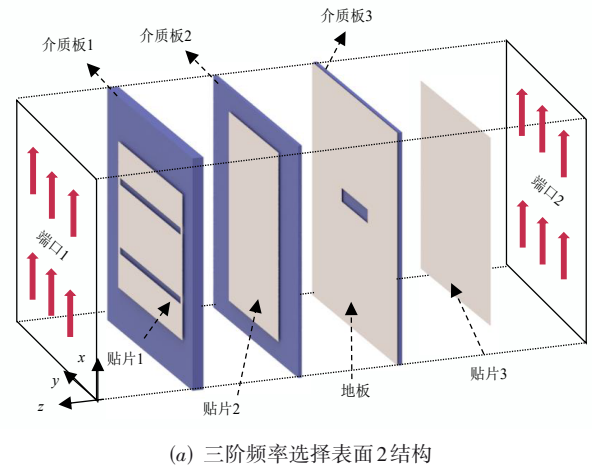
$L_1 = 30.0 \text{ pH}, L_2 = 39.4 \text{ pH}, L_3 = 37.1 \text{ pH}, L_4 = 52.7 \text{ pH},$
 $C_1 = 60.3 \text{ pF}, C_2 = 47.2 \text{ pF}, C_3 = 53.1 \text{ pF}, C_4 = 35.7 \text{ pF},$
 $L_{m1} = 22.8 \text{ pH}, L_{m2} = 27.1 \text{ pH}, C_{m1} = 32.6 \text{ pF}, C_{m2} = 30.0 \text{ pF},$
 $J_1 = -47.1 \text{ mS}, J_2 = 78.7 \text{ mS}, J_3 = -36.1 \text{ mS}, R = 121.8 \Omega$

(13)

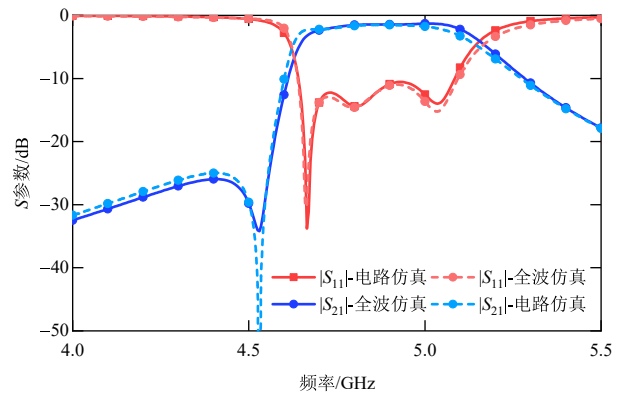
通带范围为 4.40~5.03 GHz, 通带内最小插入损耗为 0.9 dB. 两个传输零点的引入显著提升了频率选择表面的频率选择性, 带外抑制超过 20 dB. 仿真曲线与电路模型结果高度一致.

4 测试结果

为验证设计的有效性, 制作并测试了一款工作在 4.72 GHz 的四阶频率选择表面原型. 该频率选择表面单元的尺寸为 (17 mm × 15 mm × 4.1 mm), 对应于中心频率自由空间波长 $0.267\lambda_0 \times 0.252\lambda_0 \times 0.064\lambda_0$. 该阵列包含 13 × 14 个单元, 总体尺寸为 240 mm × 240 mm × 4.066 mm, 由四层 Roger RO4350B 介质基板通过尼龙螺



(a) 三阶频率选择表面 2 结构



(b) 三阶频率选择表面 2 仿真结果

图 11 三阶频率选择表面 2 结构与仿真结果

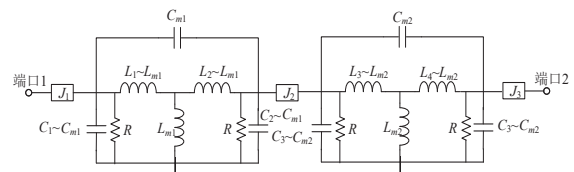
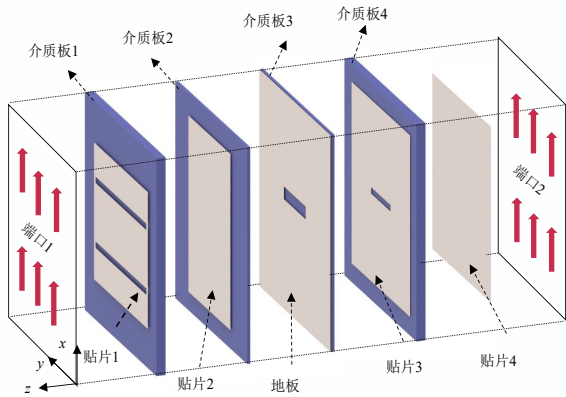


图 12 四阶频率选择表面等效电路

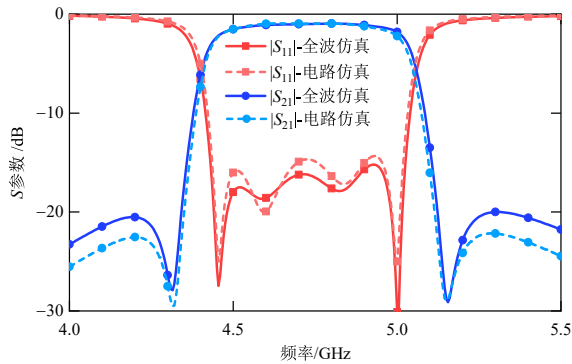
钉固定组装, 实物图如图 14 所示. 测试在微波暗室中进行, 测试系统由矢量网络分析仪与喇叭天线构成. 样品置于吸波材料包围的测试窗内, 以抑制环境反射. 反射系数测试时双天线同侧放置, 传输系数测试时分置两侧, 测试环境如图 14 所示.

仿真与测试结果如图 15 所示, 在垂直入射条件下, 实测的 -10 dB 带宽范围为 4.43~5.04 GHz, 相对带宽为 12.9%. 通带内插入损耗小于 2 dB, 最小插入损耗为 0.89 dB. 低频与高频传输零点分别位于 4.27 GHz 与 5.15 GHz, 带外抑制超过 11 dB, 实现了良好的滤波性能. 实测抑制水平略低于仿真结果, 主要源于测试环境噪声及边界效应.

此外, 还测量了不同入射角下的传输系数. 随着入



(a) 四阶频率选择表面结构



(b) 四阶频率选择表面仿真结果

图 13 四阶频率选择表面结构与仿真结果

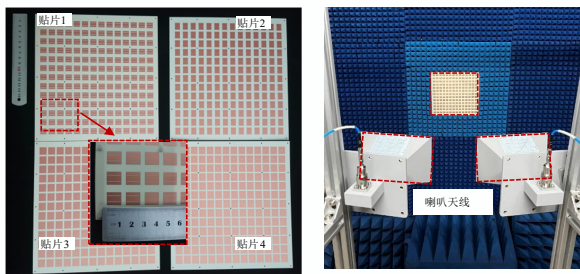
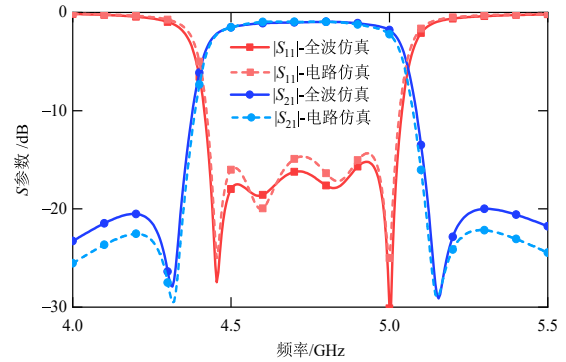
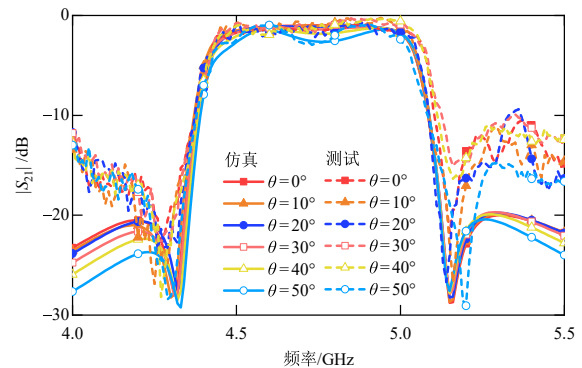


图 14 频率选择表面实物图与测试环境图

射角增大,单元间相位差增加,导致谐振频率产生偏移,从而影响频率选择表面的稳定性^[28].减少相位差的有效方法是减小频率选择表面尺寸,得益于文中所提出的结构具有较小的周期尺寸,因此能够实现良好的



(a) 在垂直入射角度下



(b) 在不同入射角度下

图 15 频率选择表面仿真结果与实物测试结果对比

角度稳定性.在入射角增加至 50° 时,传输零点仍稳定分布于通带两侧,通带内插入损耗为 2.8 dB .性能偏差主要归因于加工公差、手动装配误差、有限阵列尺寸及测量不确定性.

为进一步说明性能优势,表1对比了本文所提出频率选择表面与其他文献报道结构在垂直入射下的关键性能指标.其中滚降系数用来衡量频率选择性,该指标描述了透射系数衰减变化率与频率变化的关系.具体而言,它表示传输系数 20 dB 衰减值与 3 dB 衰减值之差的绝对值,除以这两个衰减各自对应的频率之差.这一系数反映了传输系数下降的陡峭程度,系数越大代表频率选择性越强.本工作在显著降低剖面高度的同时,实现了高频率选择性与良好的角度稳定性,性能优势明显.

表 1 与其他频率选择表面性能对比

参考文献	中心频率/GHz	零点/极点数量	剖面/ λ_0	相对带宽/%	角稳定性/ $^\circ$	滚降系数(低频/高频)
文献[4]	29.3	0/1	0.166	5	30	1.96/-0.66
文献[10]	10.36	-/3	0.155	30.5	45	18.1/14.66
文献[15]	9.71	2/2	0.102	9.25	20	26.6/-42.9
文献[21]	10.13	3/3	0.17	4.7	40	170/213.3
文献[22]	21.5	2/3	0.21	21	60	~19.2/11.26
本文	4.73	2/4	0.064	12.9	50	189/189

5 结论

本文提出了一种基于叠层多贴片结构的低剖面、高选择性频率选择表面. 通过建立基于混合电磁耦合机制的等效电路模型, 深入阐释了其工作机理. 在贴片上引入缝隙可有效调节层间耦合强度, 从而实现对传输零点位置的精确调控. 基于该原理, 设计并加工了一款四阶带通频率选择表面, 在通带两侧引入对称分布的传输零点, 显著提升了频率选择性. 该结构采用平面化设计, 组装简便, 剖面高度仅为 $0.064\lambda_0$, 表现出良好的角度稳定性, 适用于对紧凑性和滤波性能要求较高的空间滤波和电磁屏蔽应用.

参考文献

- [1] 施凌飞, 宗志园, 许戎戎, 等. 基于电容加载的圆环缝隙频率选择表面研究[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1362-1365. SHI L F, ZONG Z Y, XU R R, et al. Research on loaded frequency selective surface with ring slot elements[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1362-1365. (in Chinese)
- [2] XU S J, LI Y, AHMED M, et al. A novel miniaturized ultra-wideband frequency selective surface with rapid band edge[J]. IEEE Access, 2021, 9: 161854-161861.
- [3] ZHOU J, BIE S W, WAN D, et al. Realization of thin and broadband magnetic radar absorption materials with the help of resistor FSS[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 24-27.
- [4] CHOU H H, KE G J, LIN C C, et al. Reconfigurable design of mmWave liquid-crystal frequency selective surface at ka-band[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(5): 1734-1741.
- [5] LANGLEY R J, PARKER E A. Equivalent circuit model for arrays of square loops[J]. Electronics Letters, 1982, 18(7): 294-296.
- [6] ZHAO P C, ZONG Z Y, WU W, et al. A convoluted structure for miniaturized frequency selective surface and its equivalent circuit for optimization design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(7): 2963-2970.
- [7] ZHAO P C, ZONG Z Y, WU W, et al. An FSS structure with geometrically separable meander-line inductors and parallel-plate capacitors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4693-4705.
- [8] MA Y H, ZHANG X M, WU S, et al. A hybrid 2-D-3-D miniaturized multiorder wide bandpass FSS[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(2): 307-311.
- [9] JIN C, LV Q H, WANG J L, et al. Capped dielectric inserted perforated metallic plate bandpass frequency selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 7129-7136.
- [10] LALBAKHSI A, AFZAL M U, ESSELLE K P, et al. All-metal wideband frequency-selective surface bandpass filter for TE and TM polarizations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(4): 2790-2800.
- [11] LI M, BEHDAD N. A third-order bandpass frequency selective surface with a tunable transmission null[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(4): 2109-2113.
- [12] ZHANG W P, XIE J M, LI B, et al. Synthesis of second-order bandpass frequency selective structure using planar slotline inverters[C]//2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Piscataway: IEEE, 2019: 1-3.
- [13] PELLETTI C, BIANCONI G, MITTRA R, et al. Frequency selective surface with wideband quasi-elliptic bandpass response[J]. Electronics Letters, 2013, 49(17): 1052-1053.
- [14] ZHU J P, TANG W C, WANG C, et al. Dual-polarized bandpass frequency-selective surface with quasi-elliptic response based on square coaxial waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(3): 1331-1339.
- [15] LI Y, WONG S W, WANG S Y, et al. Frequency selective surface with quasi-elliptic bandpass response using radiation null of patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(1): 13-17.
- [16] LIN H W, LI Y, WONG S W, et al. High-selectivity FA-FA-based frequency selective surfaces using magneto-electronic dipole antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 10669-10677.
- [17] LIN H W, WONG S W, TAM K W, et al. Filtenna-filter-filtenna-based FSS with simultaneous wide passband and wide out-of-band rejection using multiple-mode resonators[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 5046-5056.
- [18] LUO G Q, HONG W, LAI Q H, et al. Design and experimental verification of compact frequency-selective surface with quasi-elliptic bandpass response[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(12): 2481-2487.
- [19] LUO G Q, WEI H, HAO Z C, et al. Theory and experiment of novel frequency selective surface based on substrate integrated waveguide technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(12): 4035-4043.

- [20] LI B, SHEN Z X. Synthesis of quasi-elliptic bandpass frequency-selective surface using cascaded loop arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3053-3059.
- [21] CHEN G W, WONG S W, LI Y, et al. High roll-off frequency selective surface with quasi-elliptic bandpass response[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5740-5749.
- [22] ZHANG T L, XIA Z P, ZHU J M, et al. Design of a dual-polarized FSS with wide angular stability and high selectivity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(10): 3208-3211.
- [23] XU G Y, ELEFThERIADES G V, HUM S V. Generalized synthesis technique for high-order low-profile dual-band frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(11): 6033-6042.
- [24] ZHANG W P, LI B, ZHU L, et al. Stacked slotline structure-based unit cell and its application for synthesis of 3-D bandpass frequency-selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(12): 7958-7968.
- [25] LI H X, LI B, ZHU L. A generalized synthesis technique for high-order and wideband 3-D frequency-selective structures with Chebyshev functions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(7): 3936-3944.
- [26] WEI T, LI B, LI H X, et al. Synthesis of 3-D polarization-rotating surface based on orthogonally inserted parallel-coupled slotlines[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(12): 11957-11967.
- [27] HONG J S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [28] LI D, LI T W, LI E P, et al. A 2.5-D angularly stable frequency selective surface using via-based structure for 5G EMI shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(3): 768-775.

作者简介



马 骏 男,2000年6月出生于黑龙江省双鸭山市.现为华南理工大学电子与信息学院博士研究生.主要研究方向为滤波天线综合与设计、无反射天线、频率选择表面、毫米波天线.
E-mail: eejma@mail.scut.edu.cn



陈付昌 男,1982年12月出生于江西省抚州市.现为华南理工大学电子与信息学院教授.主要研究方向为用于微波和毫米波应用的滤波器和相关射频模块的综合理论与设计.中国电子学会会员编号:E190012992M.
E-mail: chenfuchang@scut.edu.cn



陈欣然 女,2000年12月出生于福建省龙岩市.现为华南理工大学电子与信息学院硕士研究生.主要研究方向为频率选择表面.
E-mail: 202221012307@mail.scut.edu.cn



严俊杰 男,1998年10月出生于广西壮族自治区百色市.现为华南理工大学电子与信息学院博士研究生.主要研究方向为滤波器综合与设计.
E-mail: eejunjieyan@mail.scut.edu.cn



向凯燃 男,1995年2月出生于广东省清远市.现为华南理工大学电子与信息学院副教授.主要研究方向为综合理论、微波滤波器、滤波天线和阵列、全双工天线、频率选择性表面以及毫米波应用.中国电子学会会员编号:E190025984M.
E-mail: eekrxiang@scut.edu.cn