

S波段准椭圆响应带通频率选择表面设计研究

焦煜洋, 陈志红, 姜铁华

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 在多个领域中具有重要应用价值。通过两层双行为谐振器的双方环 FSS 级联, 实现具有准椭圆响应的 FSS, 不同于传统的巴特沃斯与切比雪夫型。仿真结果表明, FSS 在 S 波段、通带至阻带单侧过渡带宽为 350 MHz。设计结构与同通带二阶巴特沃斯滤波器相比, 过渡带减小了 30%, 与三阶巴特沃斯滤波器过渡性能一致。全波仿真结果表明, 设计结构工作在 S 频段, 实现了准椭圆响应, 并具有良好极化稳定性与角度稳定性。

关键词: 频率选择表面; 准椭圆响应; 双方环单元

中图分类号: V4

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 03-0037-07

Study on Surface Design Method of Quasi-Elliptic Response Band-Pass Frequency Selection in S-Band

JIAO Yuyang, CHEN Zhihong, JIANG Tiehua

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Frequency Selective Surface (FSS) has important application value in many fields. The response curves of traditional band-pass frequency selective surfaces are mostly of Butterworth and Chebyshev type. The structure realizes a band-pass frequency selective surface with quasi-elliptic response by cascading two layers of double squareloops FSS. In the S-band of the FSS, the single-side transition band width between passband and stopband is only 350 MHz. Compared with this structure, the transition band is reduced by 30%, which is consistent with the performance of the third-order Butterworth filter transition band. Full-wave simulation results implement quasi-elliptical response, and show that the structure has good polarization stability and angular stability.

Key words: Frequency selective surface; Quasi-elliptic; Double square loops

0 引言

频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 是一种具有空间滤波特性的周期结构。它的结构单元包含孔径类单元与金属贴片类单元, 对应于不同的滤波特性^[1], 具有频率选择特性, 可以作为空间滤波器^[2]。

频率选择表面的工程应用包括: 应用于飞行器 (如隐身飞机等) 的雷达天线罩, 能够有效减

小自身的雷达散射截面积 (RCS)^[3-5], 增强自身隐身突防性能; 用于多频天线系统, 将不同频率的电磁波导入不同通路, 有效提高天线利用率^[6-8]; 用于电磁屏蔽领域, FSS 可作为吸波体构造, 形成宽带高吸收率吸波体, 减小电磁干扰, 实现电磁兼容^[9-11]。

频率选择表面的传输特性指标影响结构在工程应用中的实际效果。理想的带通型频率选择表面, 应该在通带内具有较低的插入损耗, 波纹较

收稿日期: 2023-09-03; 修订日期: 2024-04-27

作者简介: 焦煜洋 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波防护与带通频率选择表面

小,在通带外具有陡降特性,带外抑制度高,以及较好的极化稳定性与角度稳定性^[12-13]。在频率选择表面的设计中,结构的传输特性受单元形状类型与级联方式影响很大^[14]。

目前已有众多学者开展了带通频率选择表面的设计研究,包括基于谐振单元的设计方法^[15]、基于非谐振单元的设计方法^[16]以及加载集总元件的设计方法^[17]等。采用非谐振单元的设计方法可以基于传统滤波器理论的合成方法开展设计,但是由于频率选择表面集总参数等效计算公式与设计中的近似性,难以实现对等效集总参数要求十分精确的椭圆响应^[18]。准椭圆响应可以通过交叉耦合谐振器或双行为谐振器(Dual-Behavior Resonators, DBRs)实现^[19],而谐振单元的频率选择表面设计方法可以设计实现具有两个独立阻带和一个中间通带的DBR。在文献[20]中,通过级联3个DBR频率选择表面,实现了具有6个传输零点的空间滤波器。

本文提出了一种基于DBR的带通频率选择表面设计,该频率选择表面采用双方环单元的周期序列级联。结构工作在S频段,具有4个传输零点,形成了一个平坦的传输通带与两个具有陡降特性的阻带区,实现了准椭圆响应。

1 验证分析

1.1 等效电路分析

文献[18]提出的双方环型FSS结构如图1所示。单元由两个对称中心重合、大小不同的方环单元组合而成,一侧加载介质。采用等效电路法对双方环型单元的频率选择性能进行分析,首先确定双方环单元的结构,如图2所示。

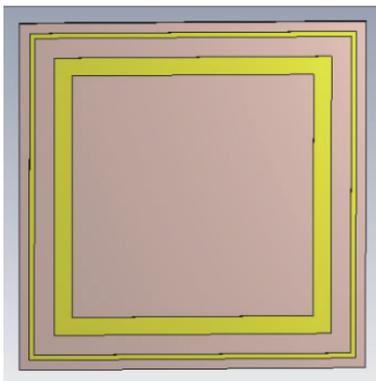


图1 双方环单元结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of two ring units

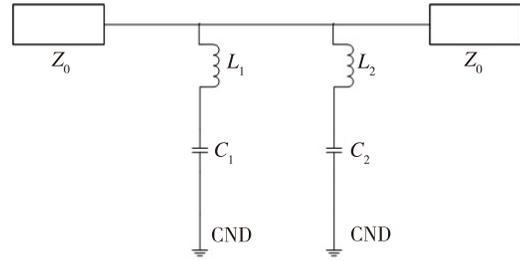


图2 双方环单元等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of double square loops unit

等效电路图中的两个 Z_0 阻抗为自由空间波阻抗, L_1 为外侧方环的等效电感, C_1 为多单元间外侧方环的等效电容, L_2 为内侧方环的等效电感, C_2 为同一个单元外侧方环与内侧方环间的等效电容。

对双方环单元的等效电路进行分析,该单元的等效电路为两个串联谐振电路并联。根据其物理结构可以得到,两个串联支路谐振频率不同^[21]。

两个串联谐振支路对应两个谐振频率 f_{z1} 和 f_{z2} ,不妨假设 f_{z1} 小于 f_{z2} 。当串联支路谐振时,等效电路出现传输零点,所以两个谐振频率对应两个传输零点, f_{z1} 和 f_{z2} 附近为传输阻带^[22]。当电路工作频率介于二者之间,也就是大于 f_{z1} 小于 f_{z2} 时,串联支路1阻抗为感性,支路2阻抗表现为容性。

当频率介于两个传输零点之间时,单元等效电路可视为并联谐振电路,当并联谐振电路发生谐振时,在其谐振频点 f_{o1} 处为传输极点,附近频段为传输通带。传输极点与传输零点可由公式(1)~(3)计算得出

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2)$$

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 (L_1 + L_2)}} \quad (3)$$

通过上述分析可以确定,双方环单元的等效电路应当具备两个传输零点与一个传输极点,传输系数表现出两个传输阻带与一个通带,通带介于两个阻带之间。

1.2 仿真分析

对双方环单元型FSS进行仿真,仿真中选择的观察指标为S参数中的 S_{12} 参数(端口1匹配时,端口2到端口1的传输系数)。FSS为互易结

构, 故 S_{12} 参数可完整表征出其传输系数 (可近似视为无耗网络)。

传输系数曲线如图 3 所示。图中单元的传输系数曲线包含两个传输零点, 传输零点附近各存在一个传输阻带; 包含一个传输极点, 附近存在传输通带。双方环单元 FSS 与等效电路模型分析的结果一致, 这种双方环频率选择表面相当于一个带通滤波器, 通带外具有双边陡降特性, 具备两个传输零点与一个传输极点的特点, 符合 DBR 频率选择表面的特征, 理论上说明可通过不同双方环单元的级联, 实现准椭圆响应的带通频率选择表面。

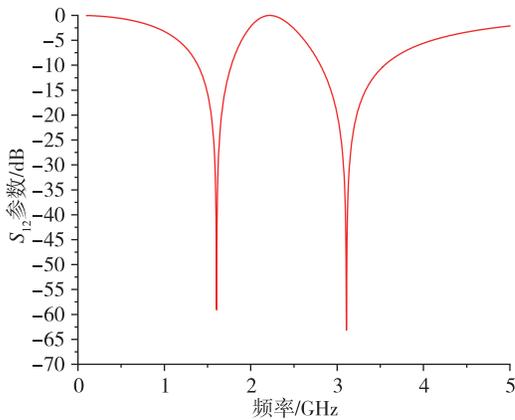


图 3 FSS 单元传输系数图

Fig. 3 FSS unit transmission coefficient diagram

FSS 单元具备 DBR 特征, 可用于准椭圆响应的实现。但是从图 3 中可得, 单层 FSS 单元的阻带带宽很窄, 难以满足在制定的频率范围内实现带通滤波的设计要求。通过多层该类型单元级联的方法^[18,23]可以拓宽阻带, 满足要求, 并且增强通带平坦性。但是该类型单元级联时, 阻抗匹配单元间距需要保持为 $1/4$ 波长, 级联层数越多, 该 FSS 剖面厚度越大。综上, 设计结构级联层数选择为两层单元级联, 对阻带进行拓宽。

2 结果分析

设计了两层双方环单元级联的 S 波段的准椭圆响应带通频率选择表面。两级 DBR 频率选择表面单元级联, 形成了具有准椭圆响应的带通频率选择表面结构。两个级联结构的频率响应的通带重合, 增强了平坦性; 阻带交错排列, 实现整体阻带拓宽。两层 FSS 级联结构如图 4 所示, 两层结构上下级联, 中间存在间隔。

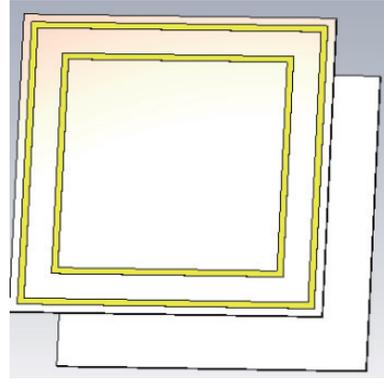


图 4 两层双方环 FSS 级联结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of double-layer double square loops FSS cascade structure

FSS 等效电路参数可通过静电磁学分析, 等效电感与介质材料相对介电常数无关, 只受金属栅格结构影响。根据预设的频率响应以及静电磁学公式进行仿真。对计算结果在 $\pm 10\%$ 范围内进行优化。设计中选取的介质为 Rogers RT5880, 相对介电常数为 2.2, 损耗角正切为 0.0009。

仿真结果如图 5 所示。该 FSS 的通带中心频率为 2.35 GHz, -1 dB 通带为 2.2~2.55 GHz (此频率范围内插入损耗小于 1 dB), 相对带宽 14.9%; -3 dB 通带为 2.1~2.6 GHz, 带宽为 0.5 GHz, 相对带宽 21.2%。对阻带进行分析, 可以看到仿真结果曲线中单侧阻带具有两个波谷, 波谷即为原双方环单元 FSS 的传输零点, 通过设计使两个传输零点在阻带内交错排列, 成功使阻带宽度得到拓展, -20 dB 阻带为 1.15~1.85 GHz, 2.9~3.65 GHz。分析可得单侧 -20 dB 过渡带带宽为 350 MHz。

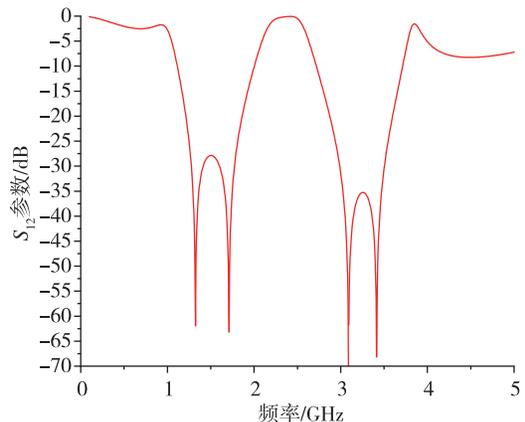


图 5 TE 波垂直入射时 FSS 传输系数图

Fig. 5 FSS transmission coefficient diagram when TE wave vertically incident

将设计结果与巴特沃斯滤波器对比。输入指标与 FSS 一致, 频率范围 1.5 GHz 到 3.5 GHz; 谐振频率 2.35 GHz, 相对带宽 20%, 阻带抑制制度优于 20 dB, 分别与二阶巴特沃斯滤波器与三阶巴特沃斯滤波器对比。

根据上述条件与巴特沃斯滤波器原型(二阶与三阶), 可以计算得出相应的二阶巴特沃斯滤波器与三阶巴特沃斯滤波器的电路参数。对计算得到的电路根据 LC 滤波器理论可计算得到 -20 dB 过渡带, 分别为 500 MHz 与 330 MHz。

通过电路仿真软件对两个巴特沃斯滤波器 S 参数分析, 仿真结果中两个巴特沃斯滤波器的单侧过渡带为 500 MHz 与 330 MHz, 与 LC 理论计算结果一致。

对比所用二阶巴特沃斯滤波器与三阶巴特沃斯滤波器参数, 分别见表 1、表 2。滤波器的输入阻抗为 377 Ω 。下标相同的元件属于同一谐振支路, 二阶滤波器原型为“L-C”, 三阶滤波器原型为“L-C-L”。具体电路可参考 LC 滤波器理论, 过渡带计算与仿真结果均可由上述参数得出。

表 1 二阶巴特沃斯滤波器参数表

Tab. 1 Second order Butterworth filter parameters table

电路元件	元件参数
L_a	169.7 nH
C_a	27.34 fF
L_b	3.885 nH
C_b	1.194 pF

表 2 三阶巴特沃斯滤波器参数表

Tab. 2 Third order Butterworth filter parameters table

电路元件	元件参数
L_a	120.0 nH
C_a	38.66 fF
L_b	2.747 nH
C_b	1.689 pF
L_c	120.0 nH
C_c	38.66 fF

通过结果与巴特沃斯滤波器性能对比, 证明了本带通 FSS 过渡带性能超越二阶巴特沃斯滤波器, 与三阶巴特沃斯滤波器一致, 因此认为本设计具有双边陡降特性, 能够有效说明本设计通过

将两个具有 DBR 特性的频率选择表面级联实现了具有准椭圆响应的频率选择表面。

在实际应用中, 可以通过调整双方环单元参数与介质参数, 对结构的谐振频率与带宽进行调整, 以满足对应的设计需求。

3 FSS 的极化稳定性与角度稳定性

频率选择表面在雷达天线罩、电磁兼容电磁屏蔽等领域的工程应用中, 入射波的极化方式并不确定, 并且大入射角的情况也需要得到考虑, 因此工程应用中的 FSS 需要具有较好的极化稳定性与角度稳定性。通过对本 FSS 结构在 TE 波与 TM 波不同入射角斜入射的情况下的传输特性曲线进行分析, 对 FSS 的极化稳定性与角度稳定性开展分析。

TE 极化下, 不同入射角斜入射情况下的传输系数曲线如图 6 所示。结果表明, 随着入射角度增大通带整体向高频偏移, 通带两侧的阻带向中间移动, 低频阻带传输零点向高频偏移, 高频阻带传输零点向低频偏移。其中通带的平均偏移量为 0.9%, 最大偏移量为 2.6%, 通带宽度 0.45, 0.41, 0.35 GHz, 带宽随入射角度增大逐渐减小。

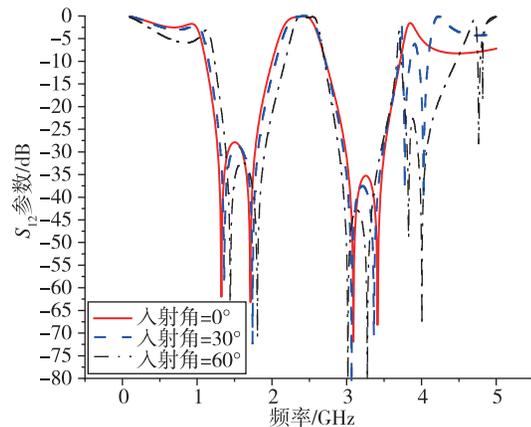


图 6 TE 波不同角度入射时 FSS 传输系数图

Fig. 6 FSS transmission coefficient diagram for TE wave incident at different angles

TM 极化下, 不同入射角情况下的传输系数曲线如图 7 所示。通过分析可知, 入射波为 TM 极化时, 传输特性曲线随入射角增大时的变化趋势与 TE 极化情况下基本一致。当 TM 波入射角在 0°、30°、60° 时, 通带谐振频率为 2.41, 2.44, 2.55 GHz, 通带宽度 0.46, 0.48, 0.64 GHz, 带宽随入射角度增大逐渐增大。

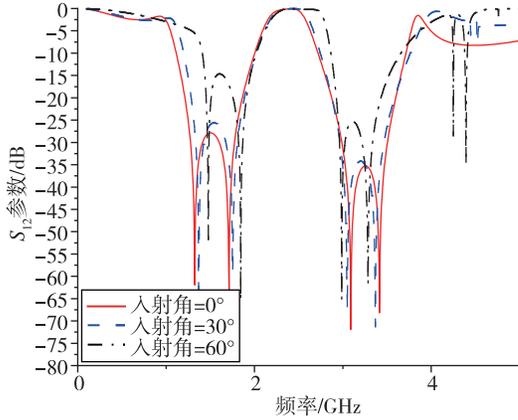


图 7 TM 波不同角度入射时 FSS 传输系数图

Fig. 7 FSS transmission coefficient diagrams at different angles of TM wave incidence

频率选择表面传输特性曲线在 2.2~2.55 GHz 范围内存在传输系数大于 -1 dB 的通带（带内损耗优于 1 dB）；通带左侧，在 1.15~1.85 GHz 范围内存在传输系数小于 -20 dB 的阻带（带外抑制度超过 20 dB），阻带内有两个传输零点，过渡带宽度为 0.35 GHz；通带右侧在 2.9~3.65 GHz 存在传输系数小于 -20 dB 阻带，阻带内有两个传输零点，过渡带为 0.35 GHz。

对于 TE 极化波，入射角增大时，通带中心频点向高频移动，60° 时偏移量约 5%，通带带宽减小约 18%（3 dB 通带），阻带宽度有所增加，宽度增加约 7%；对于 TM 波，入射角增大时，通带中心频点向高频移动，60° 时偏移量约 6%，通带带宽增大约 19%（3 dB 通带），阻带宽度有所减小，宽度缩小约 6%。通过以上特征数据对比，认为 TE 极化波与 TM 极化波条件下，该 FSS 都能在 60° 入射角时保持稳定，因此认为在 TE、TM 模式下角度稳定性均能达到 60°。

同时以上特征数据也可用于极化稳定性对比，由上述数据可认定该 FSS 在 TE 模式和 TM 模式下工作状态无明显差异，这得益于设计中采用的单元具备旋转对称性，以及加载了介质基底。TE 模式与 TM 模式传输特性曲线随入射角变化趋势不同，是因为它们的波阻抗随入射角变化趋势不同。

将分析结果与设计指标对照，设计结构的阻带抑制度可达 20 dB，频率范围满足要求，单侧过渡带优于 500 MHz，谐振频率以及相对带宽符合指标，TE、TM 模式角度稳定性均可达 60°。因此认为设计结构达到了设计时提出的指标，满足准椭圆响应与大角度稳定性兼备的设计要求。

4 参数变化对双方环 FSS 性能的影响分析

设计结构为两层双方环 FSS 级联。两层 FSS 单元的结构类型完全一致，参数变化时，双方环 FSS 传输系数对比见图 8~图 13。

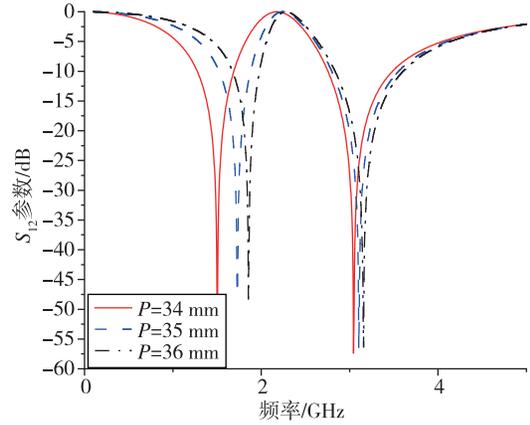
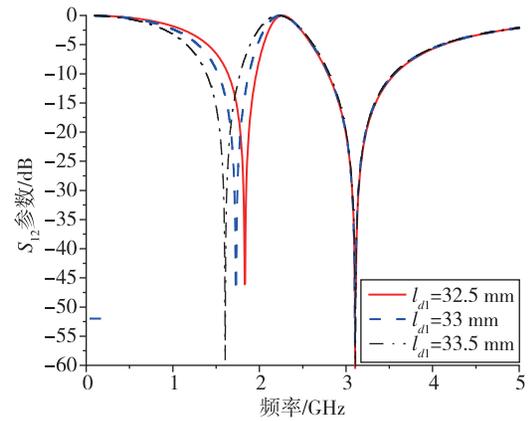
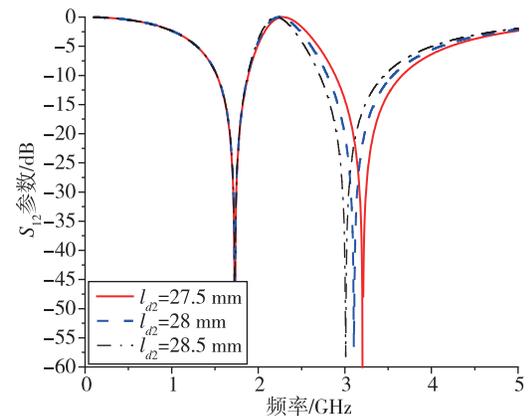
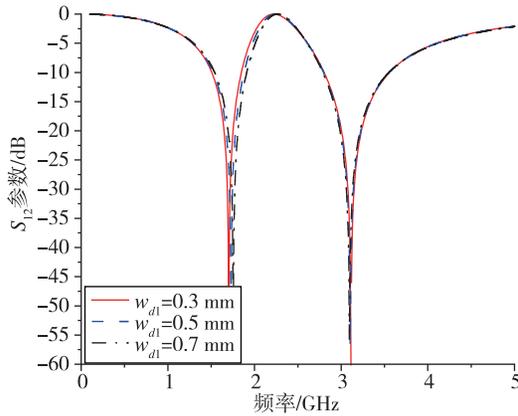
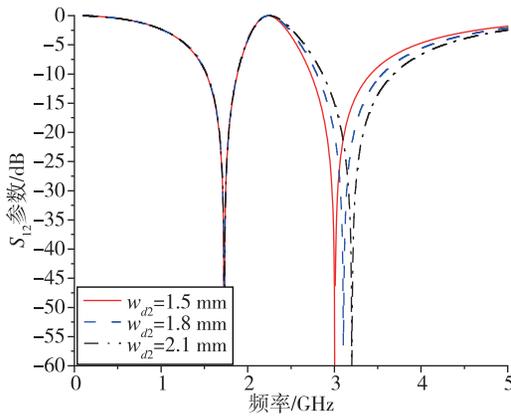
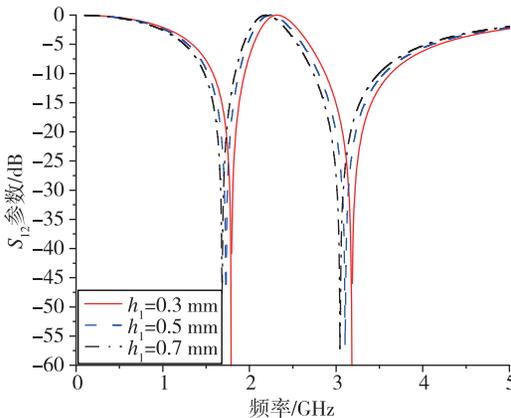


图 8 P 取值变化时双方环 FSS 传输系数图

Fig. 8 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when P value changes

图 9 l_{d1} 变化时双方环 FSS 传输系数图Fig. 9 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when l_{d1} value changes图 10 l_{d2} 取值变化时双方环 FSS 传输系数图Fig. 10 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when l_{d2} value changes

图 11 w_{d1} 取值变化时双方环 FSS 传输系数图Fig. 11 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when w_{d1} value changes图 12 w_{d2} 取值变化时双方环 FSS 传输系数图Fig. 12 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when w_{d2} value changes图 13 h_1 取值变化时双方环 FSS 传输系数图Fig. 13 Transmission coefficient diagrams of FSS unit when h_1 value changes

P 为单元间距, l_{d1} 为外侧方环边长, l_{d2} 为内侧方环边长, w_{d1} 为外侧方环宽度, w_{d2} 为内侧方

环宽度, h_1 为介质厚度。

根据结果, 单元间距与介质厚度对传输极点与传输零点均有影响, 其他条件不变时间距增大或介质厚度减小使特征点对应频率升高, 且 3 个特征点变化的百分比相同, 平坦性与相对带宽基本不变; 单个方环的边长与宽度影响对应的阻带, 方环边长增大传输零点降低, 宽度增大阻带带宽增加 (外侧方环对应低频阻带、内侧方环对应高频阻带); 通带平坦性受传输零点影响, 其他条件不变时, 两个传输零点距离减小会令通带平坦性降低。

可通过以上参数对结果影响趋势, 调整设计参数, 开展不同指标的本类型带通 FSS 设计工作。

5 结束语

本文提出了一种双方环 FSS 级联形成的带通频率选择表面, 该结构实现了准椭圆响应, 具备双边陡降特性。对双方环 FSS 的集总参数等效电路图与仿真结果进行分析, 双方环 FSS 符合 DBR 频率选择表面特征, 结合 DBR 器件合成准椭圆响应的理论, 为利用双方环 FSS 级联实现准椭圆响应提供理论支撑。

对设计结构进行了仿真分析, 验证了设计 FSS 的传输性能, 证明结构具有良好的角度稳定性与极化稳定性, 并给出了参数改变对双方环 FSS 的影响趋势, 为在工程应用中使用同类型不同指标的该结构提供设计指导。相关传输系数图也能说明单层 FSS 不能满足设计要求, 以及通过级联拓宽阻带的必要性。

参考文献

- [1] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: Wiley-Interscience, 2000.
- [2] Behdad N. A second-order band-pass frequency selective surface using nonresonant subwavelength periodic structures[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(6): 1639-1643.
- [3] 王义富, 陈毅乔, 毛玮. 一种低频段小型化带通频率选择表面天线罩设计[J]. 电讯技术, 2022, 62(10): 1526-1531.
- [4] 唐亮, 潘宇轩. 频率选择表面天线罩研究现状综述[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(3): 132-135, 144.
- [5] 王向峰, 高炳攀, 任志英, 等. 一体化曲面共形频率选择表面雷达罩[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1362.
- [6] 吴伟伟, 朱翠肖. S/X 波段频率选择副反射面的设计与测试[J]. 河北省科学院学报, 2018, 35(1): 41-45.

- [7] 李运志, 孙浩, 赵继明. 基于频率选择表面的 X/Ka 双频双极化共口径天线设计[C]//中国电子学会. 2018年全国微波毫米波会议论文集(下册). 成都, 2018: 581-584.
- [8] Momeni Hasan Abadi S M A, Ghaemi K, Behdad N. Ultra-wideband, true-time-delay reflectarray antennas using ground-plane-backed, miniaturized-element frequency selective surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 534-542.
- [9] 沈宁, 闫丽萍, 谷智渊, 等. 频率选择表面结构的电子系统 K/Ka 波段电磁屏蔽分析[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(5): 71-77.
- [10] 张靖晗, 闫丽萍, 黄钰, 等. 电磁屏蔽用低频比小型化双频带频率选择表面[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(5): 61-66.
- [11] Kiani G I, Ford K L, Olsson L G, et al. Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 581-584.
- [12] 王丽黎, 张悦, 杨海龙, 等. 应用于超宽带天线的新型小型化阻带 FSS 设计[J]. *磁性材料及器件*, 2019, 50(2): 50-52, 56.
- [13] 郑光明, 张延冬, 龙怡菲. 三阶超宽阻带小型化单元频率选择表面研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(10): 80-86.
- [14] 王晖, 屈绍波. 小型化频率选择表面研究现状及其应用进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 881-893.
- [15] Liu N, Sheng X J, Zhang C B, et al. A design method for synthesizing wideband band-stop FSS via its equivalent circuit model[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2721-2725.
- [16] 党涛, 田殷, 王铭, 等. 非谐振多层级联频率选择表面研究[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(4): 463-469.
- [17] 杨国辉, 杨鑫, 吴群, 等. 一种 X 波段小型化可调谐 FSS 设计[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(4): 442-446.
- [18] 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.
- [19] Quendo C, Rius E, Person C. Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(3): 734-743.
- [20] Ohira M, Deguchi H, Tsuji M, et al. Novel waveguide filters with multiple attenuation poles using dual-behavior resonance of frequency-selective surfaces[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(11): 3320-3326.
- [21] 田冠锁, 马召, 段婧婧, 等. 基于电子对抗环境的导引头制导干扰集成技术研究[J]. *宇航总体技术*, 2019, 3(3): 1-6.
- [22] 刘宁, 盛贤君. 基于曲折型单元的双频段频率选择表面[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(1): 58-62.
- [23] 黄任之. X 波段频率选择表面天线罩研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

引用格式: 焦煜洋, 陈志红, 姜铁华. S 波段准椭圆响应带通频率选择表面设计研究[J]. *宇航总体技术*, 2024, 8(3): 37-43.

Citation: Jiao Y Y, Chen Z H, Jiang T H. Study on surface design method of quasi-elliptic response band-pass frequency selection in S-band[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2024, 8(3): 37-43.