

利用集总 LC 元件实现频率选择表面极化分离的特性*

王秀芝¹⁾²⁾ 高劲松¹⁾ 徐念喜^{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 100039)

(2013年3月8日收到; 2013年3月25日收到修改稿)

基于电磁局域谐振的路谐振理论, 将集总 LC 器件加载到工字形周期阵列中, 设计了一种新型频率选择表面极化分离结构. 利用等效电路法分析了不同极化时该结构的作用机制, 并采用全波分析法研究了极化方式、入射角度和集总参数对其传输特性的影响. 结果表明: 所设计的结构在 6.37 GHz 附近具有良好的极化分离特性; 在 0° — 40° 扫描范围内, 横电 (TE) 和横磁 (TM) 极化下结构传输特性均保持稳定; 通过调控集总元件 LC 值, 该结构在保持 TE 极化方向传输特性不变的同时, 可以实现对 TM 传输特性的独立调节, 使设计更加灵活. 该结构为极化分离器以及极化波产生器的设计提供了借鉴.

关键词: 频率选择表面, 极化分离器, 集总电容, 集总电感

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.147307

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是指由介质表面上周期性排布的金属贴片单元或在金属屏上周期性排布的孔径单元组成的二维周期结构. 它能够使电磁波在谐振频率处发生全反射或全透过, 是一种对电磁波极化方式和工作频率均有选择作用的空间滤波器, 被广泛地应用于雷达天线隐身设计和天线多频复用设计中^[1-3].

目前, 有关 FSS 的研究主要集中于其滤波特性^[4,5], 而对 FSS 极化分离特性的研究较少. 极化分离特性的充分利用可以为 FSS 削弱恶劣电磁环境影响、对抗有源干扰、抑制环境杂波、提高其探测能力等^[6], 具有较大的应用潜力. 常见的 FSS 极化分离结构主要有两种形式, 第一种^[7,8]是使 FSS 与入射平面波呈 45° 夹角, 在入射波长大于或等于截止波长的情况下, 由于谐振作用, 孔径型 FSS 和

贴片型 FSS 将分别构成 TE/TM 极化带通/带阻滤波器和 TM/TE 极化带通/带阻滤波器. 第二种^[9,10]是利用电磁局域波谐振理论, 在 Lorentz 谐振区域, 平面周期结构等效介电常数为负时将出现传输禁带, 否则禁带消失, 从而形成基于电磁局域谐振波谐振的 FSS 极化分离结构.

本文根据电磁局域谐振的路谐振理论, 将集总 LC 器件加载到工字形周期阵列中, 设计了一种新型 FSS 极化分离结构. 该结构具有良好的极化分离特性, 由于集总器件的引入, 其角度稳定性非常高, 并且对 TE 和 TM 极化分别可调, 使设计更加灵活. 为描述其工作机理, 本文采用等效电路模型^[11]进行分析, 同时将运用全波分析法^[12]进行数值计算和讨论.

2 物理模型建立与等效电路分析

通过集总 LC 器件加载获得如图 1 所示的极化

* 长春光机所创新三期工程项目 (批准号: 093Y32J090) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xnxlzhy999@126.com

分离 FSS 阵列结构, 其中, 工字部分为金属贴片, 可视为金属线, 使集总元件形成等效谐振回路, 该回路由电介质层 FR-4 材料支撑. 通过控制集总元件参数和工字形贴片尺寸, 可使 TE 和 TM 极化具有不同的滤波特性.

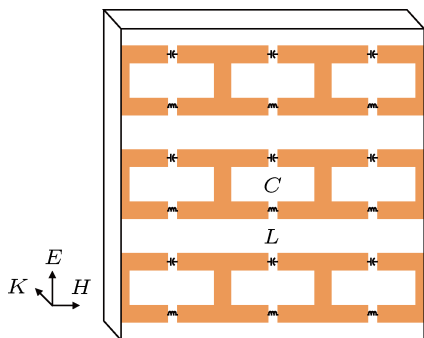


图1 基于 LC 加载的极化分离结构示意图

当入射平面波电场为 TE 极化时, 阵列中所加载的集总 LC 元件处于非工作状态, 其作用机制如图 2(a) 所示. 在 TE 极化方向, 相邻单元间存在间隙, 产生电容 C_g , 竖直贴片本身可等效为电感 L_p , 二者串联, 其 FSS 等效电路如图 2(b) 所示. 图中, $Z_0 = 377 \Omega$ 为自由空间特征阻抗, Z_1 为介质层等效传输线特征阻抗, 介质层厚度 d 即等效传输线长度, 满足 $Z_1 = Z_0/(\epsilon_r)^{1/2}$, $\epsilon_r = 4.3$ 为介质层相对介电常数. 因其等效电路为串联 LC 电路, 根据滤波器理论^[13], 该阵列结构此时应具有带阻传输特性.

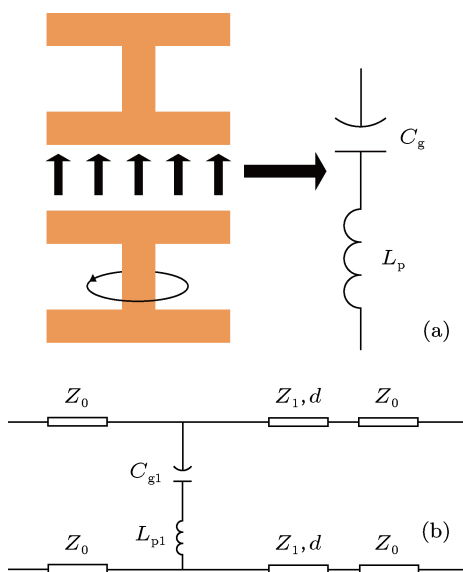


图2 (a) TE 极化时阵列单元作用机制; (b) TE 极化时 FSS 等效电路图

当入射平面波电场为 TM 极化时, 所加载集总

电容、电感由单元贴片相连, 构成并联 LC 回路, 其作用机制如图 3(a) 所示. LC 加载处的单元缝隙可分别等效为电容 C_{g1}, C_{g2} , 各自与 L, C 并联, 贴片本身可等效为电感 L_{p1}, L_{p2} , 相邻单元缝隙两侧等效电感相互耦合, 设耦合系数为 k . 图 3(b) 为 TM 极化下的 FSS 等效电路图, 其中, $Z_0 = 377 \Omega, Z_1 = Z_0/(\epsilon_r)^{1/2}, \epsilon_r = 4.3$. 因其等效电路为并联 LC 电路, 根据滤波器理论^[13], 该阵列结构此时应具有带通传输特性.

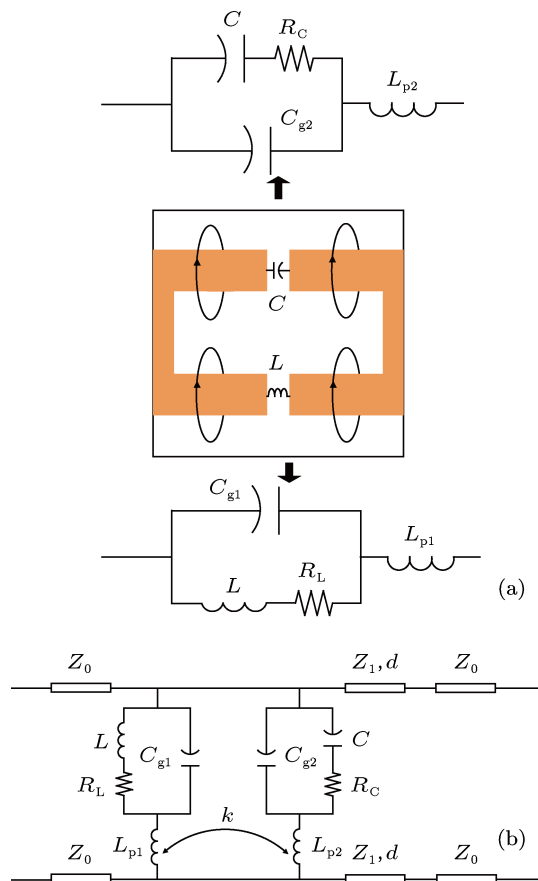


图3 (a) TM 极化时阵列单元作用机制; (b) TM 极化时 FSS 等效电路图

3 数值分析与讨论

在等效电路分析的基础上, 采用 CST 电磁仿真软件对图 1 所示阵列结构的传输特性进行计算和分析.

由于该阵列属于二维周期结构, 可采用图 4 所示单元模型进行计算. 该结构单元尺寸为 $D_x = D_y = 12 \text{ mm}, h_1 = 11 \text{ mm}, h_2 = 8 \text{ mm}, w = 2 \text{ mm}$; 介质层介电常数和厚度分别为 $\epsilon_r = 4.3, d = 1.6 \text{ mm}$; 阵列中所加载集总电容、电感值及元件本身的电阻值分别为 $C = 1.5 \text{ pF}, R_C = 1.5 \Omega, L = 7.5 \text{ nH}$,

$R_L = 1.5 \Omega$.

3.1 不同极化下 FSS 的传输特性

正入射时, 该 FSS 结构的 TE 和 TM 极化传输特性曲线如图 5 所示. TE 极化时该结构具有带阻传输特性, 阻带中心频点 f_{01} 为 6.37 GHz, 透过率低至 -30.8 dB, 在 5.65—6.95 GHz 频段内透过率均小于 -10 dB. TM 极化时阵列具有带通传输特性, 通带中心频点 f_{02} 为 6.37 GHz, 与 TE 极化时阻带中心频点相同, 透过率高达 -0.53 dB, 在 5.15—7.50 GHz 频段内透过率优于 -3 dB; 该结构在 6.37 GHz 附近实现了良好的极化分离特性.

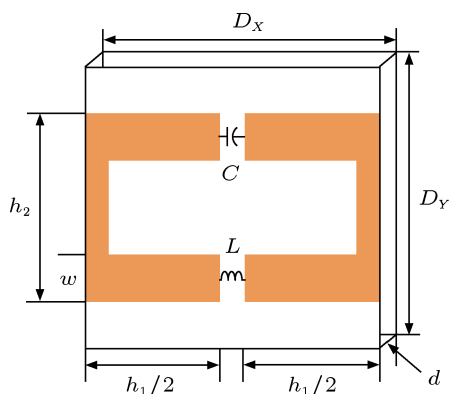


图 4 数值计算单元模型

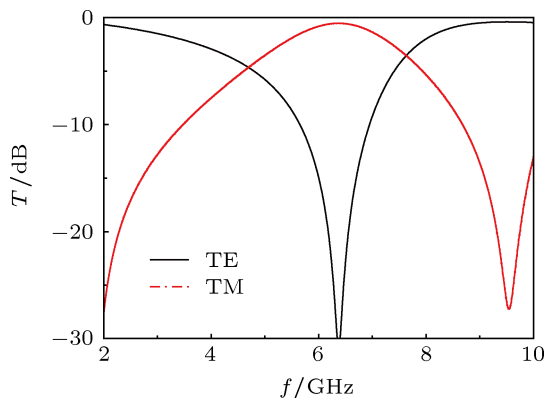


图 5 正入射时 FSS 透过率曲线

3.2 入射角度对传输特性的影响

为验证该结构对极化波入射角度的敏感性, 下文将对不同入射角下的 TE 和 TM 波传输特性分别

进行计算分析.

首先, 保持 TE 方向不变, 不断改变入射角度 θ , 在 0° — 40° 扫描范围内, 透过率曲线如图 6 所示. 随着入射角度的增加, 阻带曲线略向高频漂移, -10 dB 带宽略有增加, 带阻状态良好. 其阻带峰值随扫描角度的增加而略有回升, 这是由于 TE 极化时, 集总元件处于非工作状态, 周期结构的辐射能力取决于表面感应电流. 随着入射角度的增加, 工字形贴片 FSS 表面感应电流降低, 辐射能力有所下降, 导致阻带峰值回升.

其次, 保持 TM 方向不变, 不断改变入射角度 θ , 在 0° — 40° 扫描范围内, 透过率曲线如图 7 所示. 随着入射角度的增加, 通带 -3 dB 带宽增加, 中心频点基本不变, 透过率峰值略有降低. 该结构通带中心频点基本不变主要是因为引入了集总 LC 器件, 由 LC 器件构成的谐振回路较纯贴片结构角度稳定性好.

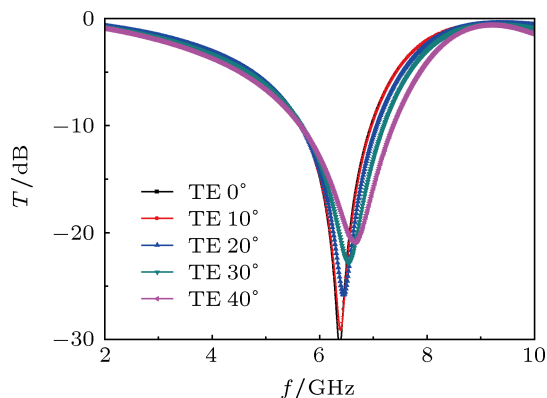


图 6 不同入射角度 TE 极化时透过率曲线

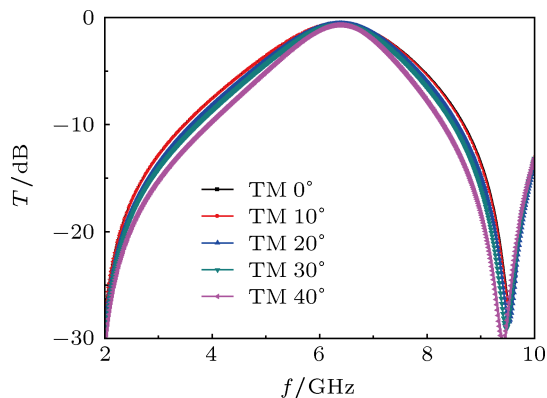


图 7 不同入射角度 TM 极化时透过率曲线

上述结果表明: 该结构对入射角度不敏感, 在 $0^\circ\text{--}40^\circ$ 范围内均具有稳定的极化分离特性.

3.3 集总元件参数对传输特性的影响

当入射平面波电场为 TE 极化时, 阵列中集总器件处于非工作状态, 正如图 8 所示, 有无 LC 加载均不影响这种极化状态下的透过率曲线, 其透过率仅与单元本身有关.

当入射平面波电场为 TM 极化时, 集总元件处于工作状态, 集总电感和集总电容的变化均会影响其传输特性.

首先, 改变集总电感值, 保持其他参数不变, 分别取 $L = 4, 8$ 和 16 nH, 其 TM 极化透过率曲线如图 9 所示. 当集总电感 L 由 4 nH 增加到 16 nH 时, TM 极化波传输曲线的中心频点由 7.4 GHz 降低到 5.6 GHz.

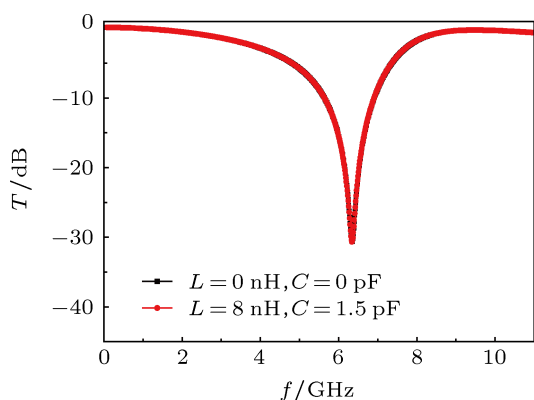


图 8 集总 LC 不同取值时 TE 极化透过率曲线

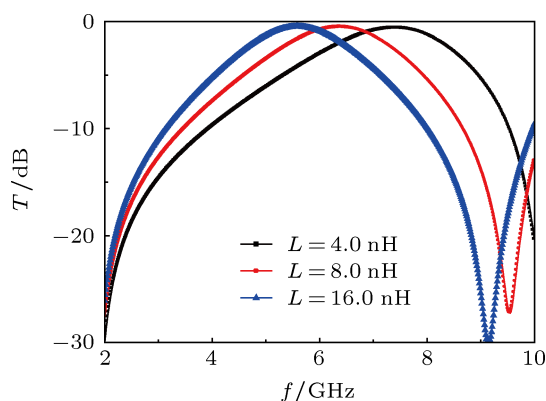


图 9 集总电感 L 分别为 $4, 8$ 和 16 nH 时 TM 极化透过率曲线

其次, 改变集总电容值, 保持其他参数不变, 分别取 $C = 0.75, 1.5$ 和 3.0 pF, 其 TM 极化透过率曲线如图 10 所示. 当集总电容 C 由 0.75 pF 增加到 3 pF 时, TM 极化波传输曲线的中心频点基本保持在 6.37 GHz 附近, -3 dB 带宽增加.

由上述结果可知, 通过调控集总元件 LC 值, 该结构在保持 TE 极化方向传输特性不变的同时, 可以实现对 TM 传输特性的独立调节, 使设计更加灵活. 另外, TM 极化传输特性对集总电感参数更加敏感, 因此, 在制作图 1 所示的 FSS 结构时, 集总电感的精度控制尤为重要.

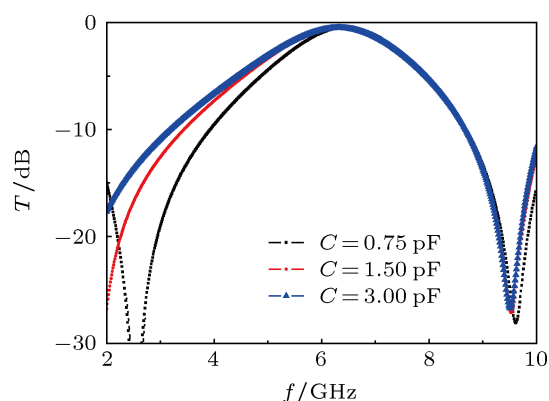


图 10 集总电容 C 分别为 $0.75, 1.5$ 和 3.0 pF 时 TM 极化透过率曲线

4 总结

本文基于电磁局域谐振的路谐振理论, 将集总 LC 器件加载到工字形周期阵列中, 设计了一种新型极化分离结构. 根据物理结构模型分析了入射平面波电场为 TE 和 TM 极化时阵结构的等效电路和作用机制, 并利用全波分析法计算讨论了各参数对阵列传输特性的影响. 该新型结构在 6.37 GHz 附近具有良好的极化分离特性; 在 $0^\circ\text{--}40^\circ$ 扫描范围内, TE 和 TM 极化传输特性均保持稳定; 通过调控集总元件 LC 值, 该结构在保持 TE 极化方向传输特性不变的同时, 可以实现对 TM 极化方向传输特性的独立调节, 使设计更加灵活. 在制作过程中, 集总电感的精度控制尤为重要. 这种结构在提高雷达及天线系统抗干扰能力和探测能力方面具有较高的研究价值和应用前景.

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (1st Ed.) (New York: Wiley)
- [2] Wu T K 1995 *Frequency-Selective Surface and Grid Array* (New York: Wiley)
- [3] Vardaxoglou J C 1997 *Frequency-Selective Surfaces: Analysis and Design* (Taunton, UK: Research Studies Press)
- [4] 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]
- [5] 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]
- [6] Wang K 2009 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [王珂 2009 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [7] Bormemann J 1993 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **41** 1588
- [8] Reed J A 1997 *Ph. D. Dissertation* (Dallas: The University of Texas at Dallas)
- [9] Schurig D, Mock J J, Smith R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [10] Wu X, Pei Z B, Qu S B, Xu Z, Bai P, Wang J F, Wang X H, Zhou H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114201 (in Chinese) [吴翔, 裴志斌, 屈绍波, 徐卓, 柏鹏, 王甲富, 王新华, 周航 2011 物理学报 **60** 114201]
- [11] Amore M D, Santis V D, Feliziani M 2012 *IEEE Trans. Magn.* **48** 703
- [12] Mittra R, Chan C H, Cwik T 1988 *Proc. IEEE* **76** 1593
- [13] Williams A B, Taylor F J 1995 *The Electronic Filter Design Handbook* (3rd Ed.) (New York: McGraw-Hill)

Characteristics of polarization separation of frequency selective surface by lumped inductors and capacitors*

Wang Xiu-Zhi¹⁾²⁾ Gao Jin-Song¹⁾ Xu Nian-Xi^{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 the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 8 March 2013; revised manuscript received 25 March 2013)

Abstract

Based on the circuit resonance theory of the electromagnetic local resonance, a novel frequency selective surface structure with the property of polarization separation is designed by loading the lumped inductors and capacitors to the periodic array with "I" elements. The operation principle of the structure at all polarizations is analyzed by using the equivalent circuit method. And the influences of the polarization, incident angle and parameters of the lumped device on the transmission characteristics of the FSS are simulated and discussed by using the full-wave numerical analysis method. The results indicate that the designed structure has a good property of polarization separation at about 6.37 GHz, the transmission characteristics are stable with the scan angle increasing from 0° to 40° at TE and TM polarization, and by controlling the lumped inductors and capacitors, the transmission characteristics for TM polarization can be regulated independently while the transmission characteristics for TE polarization remain constant. The proposed structure is conducive to the designs of the polarization separator and the polarized wave generator.

Keywords: frequency selective surface, polarization separator, lumped capacitor, lumped inductor

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.147307

* Project supported by the Third Innovation of CIOMP (Grant No. 093Y32J090).

† Corresponding author. E-mail: xnxlzhy999@126.com