

# 利用等效电路模型快速分析加载集总元件的 微型化频率选择表面\*

王秀芝<sup>1)2)</sup> 高劲松<sup>1)</sup> 徐念喜<sup>1)†</sup>

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5月28日收到; 2013年7月19日收到修改稿)

为了提高频率选择表面 (FSS) 设计优化速度, 利用等效电路方法对基于集总元件加载的微型化 FSS 结构进行了分析. 根据 FSS 物理结构建立了相应的等效电路模型, 通过 ADS 软件对全波分析曲线进行拟合提取了等效电路模型参数, 通过延长曲线范围增加极值点个数提高拟合参数精度. 利用所提取的等效电路参数计算了不同  $LC$  参数下 FSS 的传输特性, 与全波分析精确结果相对比, 电路模型计算的透过率略高, 中心频点及  $-3$  dB 带宽与全波分析结果的相对误差均小于 10%. 证明了利用等效电路模型分析复杂 FSS 结构的可行性, 为 FSS 设计和快速优化提供了参考.

**关键词:** 频率选择表面, 等效电路, 集总元件

**PACS:** 73.61.-r, 73.90.+f

**DOI:** 10.7498/aps.62.207301

## 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孔径单元组成的二维周期性结构. 它能够使电磁波在谐振频率处发生全反射 (贴片型 FSS) 或全透过 (孔径型 FSS), 是一种对电磁波入射角度、极化方式以及频率均有选择作用的空间滤波器<sup>[1,2]</sup>. FSS 被广泛地应用于雷达、天线等领域.

随着 FSS 的发展和相关研究的不断深入, 涌现出多种 FSS 分析处理方法. 这些方法主要分为三维全波数值分析法<sup>[3,4]</sup> 和等效电路分析法<sup>[5,6]</sup>. 三维全波数值分析法包括周期矩量法、有限元法、有限积分法、有限差分法等, 是目前最通用的 FSS 处理方法. 利用全波分析法可以计算单屏、多屏、有限及曲面等各种 FSS 结构<sup>[1,7,8]</sup>, 获得精确的  $S$  参数、电场及电流分布等信息. 然而, 在全波分析法计算过程中需要大量的计算机内存和计算时间, 尤

其在初始阶段调节参数时, 这一问题更加突出. 等效电路法通过分析 FSS 结构, 建立相应的  $LC$  等效电路模型, 利用电路模型快速获得 FSS 频响特性. 尽管其精度低于全波分析法计算结果, 但在设计阶段利用等效电路法进行粗调, 能够大大提高设计速度, 缩短设计周期. 另外, 等效电路法还能够直观地反映周期结构的物理机制, 加深对 FSS 性能的理解.

等效电路参数的获得是等效电路分析的关键. 从 20 世纪初开始, 很多学者致力于建立精确公式计算结构的  $LC$  值来准确获得 FSS 频响特性. 文献 [9, 10] 中通过引入半经验关系能较准确地计算网栅结构等简单图形的第一谐振, 在 20 世纪 80 年代, 文献 [11—13] 给出了计算较复杂结构 (如环形、双环形、十字形、耶路撒冷形) 的分析公式. 然而, 这些公式应用范围较窄, 并且随着 FSS 结构复杂程度的增加, 这些公式越来越冗长繁杂, 已经背离了简单便捷的初衷. 获得等效电路参数的另一种方法是对全波分析曲线进行拟合<sup>[14]</sup>. 这一方法尤其在处理复杂 FSS 结构和多屏 FSS 结构时更具优势, 快捷

\* 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期工程项目 (批准号: 093Y32J090) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xnxlzh999@126.com

直观, 精确度更高.

本文利用等效电路方法分析了基于集总元件加载的 FSS 结构. 该 FSS 由于所引入的集总 LC 值远大于谐振型或耦合型 FSS 阵列本身产生的 LC 值, 有效缩减了工作在低频 ( $f_0 < 1$  GHz) 波段的 FSS 结构周期单元尺寸, 是一种性能优良的微型化结构. 本文通过分析 FSS 物理结构建立相应的等效电路模型, 通过对全波分析曲线进行拟合提取等效电路模型参数, 利用所提取的等效电路数据进行参数分析, 并利用全波分析结果验证其准确性和有效性.

## 2 等效电路模型的建立

周期阵列结构如图 1 所示. 当入射电磁波的电场分量平行于集总元件时, 集总元件处于工作状态, 电流将会沿着金属贴片流动形成 LC 谐振回路, 谐振回路的滤波特性将主要取决于集总器件 L 和 C 的大小, 这种滤波结构实现了“小尺寸”调制“大波长”的目的, 属于一种微型频率选择表面 (MEFSS).

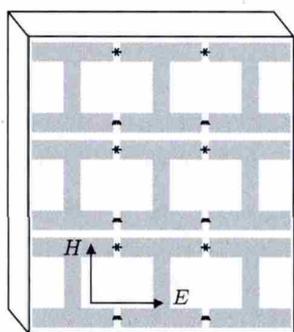


图 1 基于集总 LC 加载的 MEFSS 结构示意图

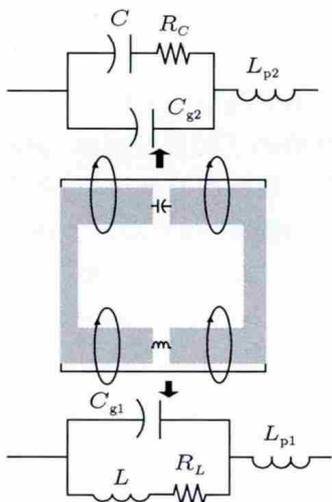


图 2 周期单元作用机理

当集总 LC 元件处于工作状态时, 在每个周期单元上, 集总元件加载处的单元缝隙可等效为电容  $C_{g1}, C_{g2}$ , 分别与  $L, C$  并联, “工”形金属贴片本身可以等效为电感  $L_{p1}, L_{p2}$ , 分别与  $L, C$  串联. 集总 LC 的电阻分别用  $R_L, R_C$  表示. 周期单元所对应的等效电路作用机理如图 2 所示. 图 3 为 FSS 结构所对应的等效电路模型. 其中,  $Z_0$  和  $Z_1$  分别为自由空间和介质基底等效传输线特征阻抗,  $Z_0 = 377 \Omega$ ,  $Z_1 = Z_0/\sqrt{\epsilon_r}$ ,  $\epsilon_r = 4.3$  为基底相对介电常数. 耦合系数  $k$  表示周期单元间缝隙两侧金属贴片的耦合作用.

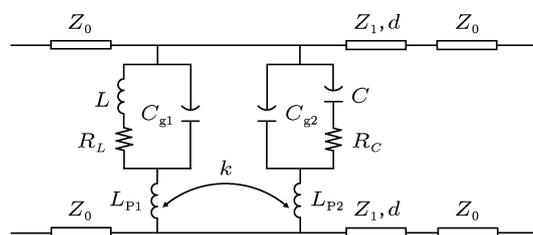


图 3 FSS 等效电路模型

## 3 等效电路参数的获得

提取有效的等效电路参数, 利用电路模型快速分析 FSS 频率响应特性, 是 FSS 设计和特性分析的关键.

根据传输线理论<sup>[15]</sup>, 金属贴片单元的电感、电容近似公式为

$$C = -\epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \frac{2D}{\pi} \log \left( \sin \frac{\pi s}{2D} \right), \quad (1)$$

$$L = -\mu_0 \frac{D}{2\pi} \log \left( \sin \frac{\pi w}{2D} \right), \quad (2)$$

其中  $D, w, s$  分别为结构电容及电感的长度、宽度及间隔,  $\epsilon_{\text{eff}}$  为介质层有效介电常数.

上述近似公式更适用于二维网栅结构, 通过大量仿真实验证实, 在本文 FSS 阵列中, 用 (1) 和 (2) 式计算出来的电容、电感值与实际情况偏差较大. 因此, 本文对 FSS 全波分析法计算曲线进行拟合, 提取等效电路参数值.

### 3.1 全波分析法计算结果

首先采用基于 FI 的 CST 软件对其进行全波分析. 利用周期边界条件从无限大的周期结构提取出一个如图 4 所示的单元模型. 单元尺寸如下:  $D_x = D_y = 11$  mm,  $h_1 = h_2 = 10$  mm,  $W = 2$  mm; 基底介电常数和厚度分别为  $\epsilon_r = 4.3$ ,

$d = 1.6 \text{ mm}$ ; 集总电容电感值及元件本身的电阻值分别为  $L = 7.5 \text{ nH}$ ,  $R_L = 1.5 \text{ } \Omega$ ,  $C = 1.5 \text{ pF}$ ,  $R_C = 1.5 \text{ } \Omega$ . 通过计算得到结构的透过率曲线如图 5 所示, 该结构在  $0\text{--}2 \text{ GHz}$  呈现带通传输特性. 其中, 通带中心频点  $f_0 = 0.95 \text{ GHz}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $228 \text{ MHz}$ , 单元尺寸  $D(D = D_X = D_Y)$  与中心波长  $\lambda_0$  的关系为  $D = \lambda_0/28$ .

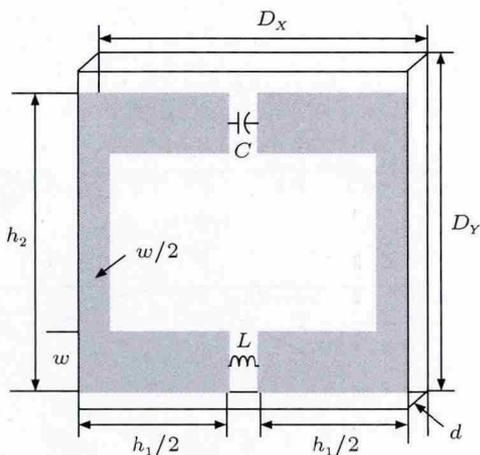


图 4 FSS 周期单元结构图

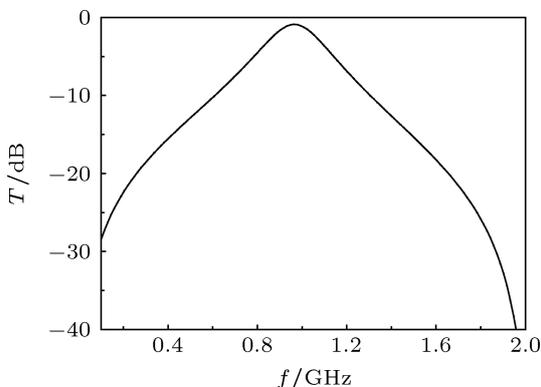


图 5 FSS 透过率曲线图

### 3.2 等效电路参数的提取

为了提高拟合数据的精度, 将全波曲线范围延伸至  $12 \text{ GHz}$  (FSS 实际工作范围由集总元件参数和

实际需求决定), 共包含两个通带和四个极值点. 全波计算曲线和利用 ADS 软件拟合的曲线如图 6 所示, 所提取的等效电路参数如表 1 所示.

表 1 等效电路参数值

| 参数名称 | $C_{g1}/\text{pF}$ | $C_{g2}/\text{pF}$ | $L_{p1}/\text{nH}$ | $L_{p2}/\text{nH}$ | $K$   |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 参数值  | 0.106              | 0.106              | 4.2                | 4.2                | -0.35 |

等效电路模型忽略了金属和介质损耗, 因此与全波分析法相比会存在一定偏差.

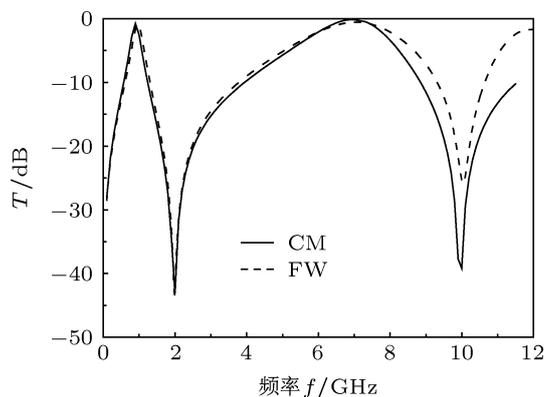


图 6  $L = 7.5 \text{ nH}$ ,  $C = 1.5 \text{ pF}$  时全波分析法透过率曲线与等效电路模型拟合曲线

## 4 利用电路模型快速分析 FSS 传输特性

利用表 1 中等效电路参数快速分析不同  $LC$  参数下该微型化结构的传输特性, 并通过与全波分析结果对比, 分析电路模型的相对误差, 证明等效电路参数的有效性和电路模型分析的可靠性.

保持其他参数不变, 分别取集总电感  $L = 2.5, 7.5$  和  $15.0 \text{ nH}$ . 图 7(a) 是等效电路模型 (CM) 快速计算结果, 图 7(b) 给出了利用全波分析法 (FW) 计算的精确结果, 数据对比如表 2 所示. 电路模型计算的中心频点、透过率和  $-3 \text{ dB}$  带宽相对误差分别小于  $9.48\%$ ,  $14.8\%$  和  $4.39\%$ . 由于等效电路法没有充分考虑金属和介质损耗, 其透过率略高.

表 2 不同集总电感  $L$  下 FSS 传输特性分析

| 集总电感 $L/\text{nH}$ | 中心频点  |       |      | 透过率   |       |      | $-3 \text{ dB}$ 带宽 |       |      |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|--------------------|-------|------|
|                    | a/GHz | b/GHz | c/%  | a/dB  | b/dB  | c/%  | a/MHz              | b/MHz | c/%  |
| 2.5                | 1.05  | 1.16  | 9.48 | -1.45 | -1.68 | 13.7 | 138                | 137   | 0.73 |
| 7.5                | 0.90  | 0.95  | 5.26 | -0.77 | -0.87 | 11.5 | 218                | 228   | 4.39 |
| 15.0               | 0.75  | 0.78  | 3.85 | -0.46 | -0.54 | 14.8 | 288                | 296   | 2.70 |

注: a: 电路模型计算结果; b: 全波分析计算结果; c: 相对误差

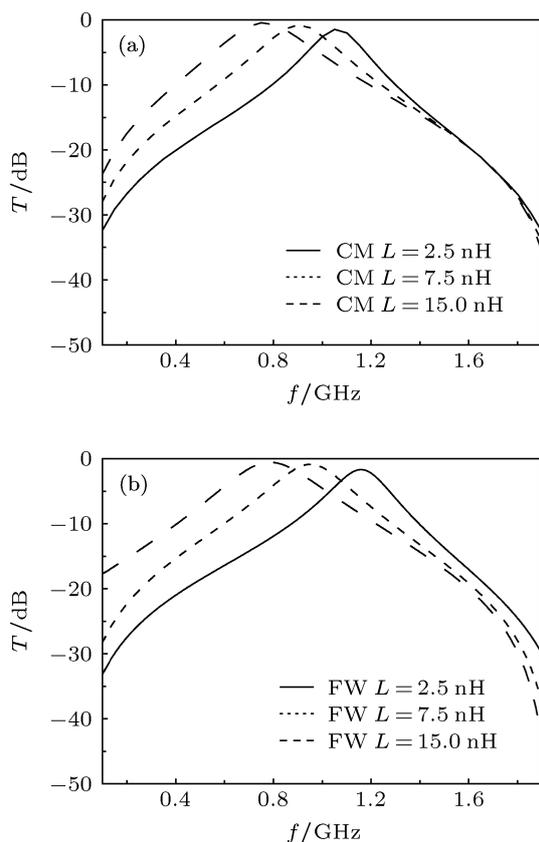


图7 集总电感  $L = 2.5, 7.5$  和  $15.0$  nH 时透过率曲线 (a) CM 计算结果; (b) FW 计算结果

保持其他参数不变, 分别取集总电容  $C = 0.5, 1.5$  和  $3.0$  pF, 图 8(a) 和 (b) 分别是 CM 快速计算的结果和利用 FW 计算的精确结果, 数据对比如表 3

所示. 等效电路计算的中心频点、透过率和  $-3$  dB 带宽相对误差分别小于  $7.05\%$ ,  $26.3\%$  (相应的绝对误差仅为  $0.1$  dB) 和  $4.91\%$ .

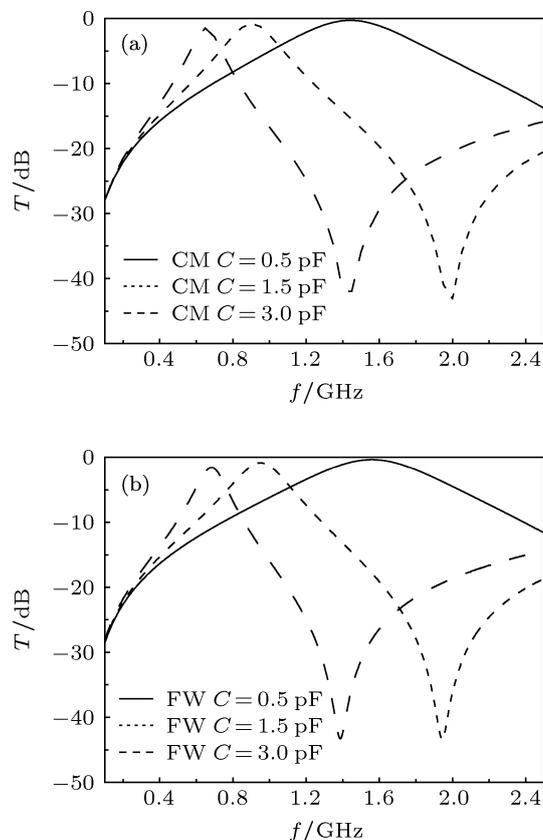


图8 集总电容  $C = 0.5, 1.5$  和  $3.0$  pF 时透过率曲线 (a) CM 计算结果; (b) FW 计算结果

表3 不同集总电容  $C$  下 FSS 传输特性分析

| 集总电容 $C$ /pF | 中心频点  |       |      | 透过率   |       |       | $-3$ dB 带宽 |       |      |
|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------------|-------|------|
|              | a/GHz | b/GHz | c/%  | a/dB  | b/dB  | c/%   | a/MHz      | b/MHz | c/%  |
| 0.5          | 1.45  | 1.56  | 7.05 | -0.28 | -0.38 | 26.30 | 620        | 652   | 4.91 |
| 1.5          | 0.90  | 0.95  | 5.26 | -0.77 | -0.87 | 11.50 | 218        | 228   | 4.39 |
| 3.0          | 0.65  | 0.68  | 4.41 | -1.48 | -1.59 | 6.92  | 98         | 100   | 2.00 |

注: a: 电路模型计算结果; b: 全波分析计算结果; c: 相对误差

综上所述, 等效电路快速计算结果与全波分析法精确计算结果基本一致, 不仅证明了表 1 等效电路参数的有效性, 同时也说明了等效电路参数提取方法的可行性.

## 5 结论

本文利用等效电路方法对基于集总元件加载的微型化 FSS 结构进行了分析. 根据 FSS 物理结构建立了相应的等效电路模型, 通过 ADS 软件对全波分析曲线进行拟合提取了等效电路模型参数,

利用所提取的等效电路参数快速计算了不同集总元件  $LC$  参数下结构的传输特性, 并与全波分析结果相对比, 电路模型计算的透过率略高, 中心频点及  $-3$  dB 带宽与全波分析结果的相对误差均小于  $10\%$ . 证明了等效电路参数的有效性、提取方法的合理性和利用等效电路方法分析复杂 FSS 结构的可行性. 利用等效电路法能够快速地获得 FSS 的频率响应特性, 因此, 在设计过程中, 可以先通过等效电路法进行粗调, 再利用全波分析法进行优化, 缩短设计时间. 为 FSS 设计和快速优化提供了参考.

- [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] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (1st Ed.) (New York: Wiley)
- [4] Wu T K 1995 *Frequency-Selective Surface and Grid Array* (New York: Wiley)
- [5] Dubrovka R, Vazquez J, Parini C, Moore D 2006 *IEE Proc. Microwaves Antenn. Propag.* **153** 213
- [6] Costa F, Monorchio A, Manara G 2012 *IEEE Antenn. Propag. Mag.* **54** 35
- [7] 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]
- [8] Meng Z J, Wang L F, Lü M Y, Wu Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017301 (in Chinese) [蒙志君, 王立峰, 吕明云, 武哲 2011 物理学报 **60** 017301]
- [9] Ulrich R 1967 *Infrar. Phys.* **7** 37
- [10] Lee S W, Zarillo G, Law C L 1982 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **AP-30** 904
- [11] Langley R J, Drinkwater A J 1982 *IEE Proc. H: Microwave Optics and Antennas* **129** 1
- [12] Langley R J, Parker E A 1982 *Electron. Lett.* **18** 294
- [13] Savia S B, Parker E A 2003 *IEE Proc. H: Microwaves Antenn. Propag.* **150** 37
- [14] Bayatpur F, Sarabandi K 2010 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **58** 1214
- [15] Marcuvitz N 1986 *Waveguide Handbook* (1986 Ed.) (Lexington: Boston Technical Publishers)

# Quick analysis of miniaturized-element frequency selective surface that loaded with lumped elements by using an equivalent circuit model\*

Wang Xiu-Zhi<sup>1)2)</sup> Gao Jin-Song<sup>1)</sup> Xu Nian-Xi<sup>1)†</sup>

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 28 May 2013; revised manuscript received 19 July 2013)

## Abstract

In order to quicken the pace of the frequency selective surface (FSS) design and optimization, an equivalent circuit method is used to analyze the miniaturized-element FSS structure loaded with lumped elements. According to the physical structure of the FSS, an equivalent circuit model is established. These parameters values of the equivalent circuit model are obtained by a curve-fitting process using ADS to obtain the best fitting between the circuit response and the full-wave analysis response. The fitting accuracy is improved by increasing the curve frequency and the extrema. By using the circuit model, the frequency responses of the FSS at different  $LC$  values of lumped components are obtained. The transmissions at center frequencies calculated by the circuit model are slight higher than the exact results from the full-wave analysis, and the relative errors between the center frequencies and the  $-3$  dB bandwidths are smaller than 10%. This paper proves that it is feasible to analyze the complex FSS structure by the equivalent circuit model based on curve-fitting process. It will give some references to the quick design and optimization of the FSS.

**Keywords:** frequency selective surfaces, equivalent circuit method, lumped elements

**PACS:** 73.61.-r, 73.90.+f

**DOI:** 10.7498/aps.62.207301

\* Project supported by the Third Innovation of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 093Y32J090).

† Corresponding author. E-mail: xnxlzh999@126.com