

基于电容加载的圆环缝隙频率选择表面研究

施凌飞,宗志园,许戎戎,吴 文

(南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室,江苏南京 210094)

摘 要: 介绍了一种新型小型化频率选择表面(FSS),在圆环缝隙周期单元表面加载电容以缩小 FSS 尺寸,并引入法拉第笼结构以消除单元间的干扰.对这种加载 FSS 进行了数值仿真和分析,提出了一种适用于 1~4GHz 频段的电容加载 FSS 谐振频率经验计算式,并在此基础上设计研制了谐振频率为 2.45GHz 的加载 FSS,其物理尺寸仅为传统 FSS 的百分之三十四,仿真和实测结果表明该 FSS 具有谐振频率稳定、对入射波入射角不敏感、对 TE、TM 极化一致性好等优点.

关键词: 频率选择表面;加载;法拉第笼结构;时域有限差分法

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1362-04

Research on Loaded Frequency Selective Surface with Ring Slot Elements

SHI Ling-fei, ZONG Zhi-yuan, XU Rong-rong, WU Wen

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: A miniaturized frequency selective surface (FSS) is presented. In this kind of FSS, each periodic cell consists of a ring slot loaded with ceramic chip capacitors for reducing the cell size, and Faraday Cage structure is introduced to eliminate the disturbance between unit cells. The loaded FSS has been analyzed and empirical formulas for calculating resonance frequency in the range of 1~4GHz is presented. The miniaturized FSS with high transmission at 2.45GHz has been designed by the empirical formulas. The dimension of the proposed FSS is miniaturized to 34 percent in comparison with the traditional FSS. The simulation and experimental result indicate that the loaded FSS has good polarized characteristic and very good stability to oblique incidence.

Key words: frequency selective surface (FSS); loaded; Faraday cage; finite difference time domain (FDTD)

1 引言

频率选择表面(FSS)可看成是开放空间的电磁滤波器结构,具有带通或带阻特性,通常被用于雷达罩、副反射器,在远红外波段还常被用于波束分光仪、激光输出耦合器等^[1,2].近年来多频技术在民用通信和军事领域的应用和通信设备的多功能集成度的提高使得系统部件的小型化越来越重要,而在低频段无线通信中,传统 FSS 由于其物理尺寸较大而不能满足小型化的要求,本文研究的 FSS 通过电容加载使得其在低频段物理尺寸大为缩小,而且谐振频率稳定,对入射角的变化不敏感.

FSS 在微波低频波段应用时,由于各通信频段非常接近,且带宽很窄,就需要将谐振频率设计得非常准确,而消除 FSS 单元间的耦合有助于准确设计谐振频率,因此本文将法拉第笼(Faraday-cage)结构引入到 FSS 结构中以消除这种相互影响.法拉第笼是以电磁学的基础

人、英国物理学家迈克尔·法拉第的姓氏命名的,其结构特点是以金属结构围成一个封闭的空间,这样就可以有效地隔绝笼体内外的电场和电磁波干扰^[3~5].

由于结构复杂、参数众多,FSS 的理论分析和设计比较困难.近年来已发展的一些数值方法,如时域有限差分(FDTD)、有限元(FEM)以及矩量法(MOM)等均存在计算量大、效率低等问题.因此本文研究了电容加载圆环缝隙 FSS 结构,提出了应用于 1~4GHz 频段范围的谐振频率经验计算公式,可以快速计算 FSS 的谐振频率,有效提高设计效率.同时,根据该公式可以预估这种加载 FSS 的性能,为 FSS 的优化设计和性能极限分析提供了可靠依据.

2 电容加载圆环缝隙 FSS 的结构

基于法拉第笼结构的圆环缝隙频率选择表面(Ring loop slot FSS based on Faraday Cage structure,简称 FC-RLS-

FSS)电容加载的单元结构如图 1 所示,图中黑色部分为金属,白色部分为介质.在单元结构的正面(见图 1(a)),中心是在金属表面腐蚀出来的圆环缝隙,在圆环缝隙上对角加载了四个贴片电容,圆环缝隙周围是一系列金属通孔,等效于平面电路中应用的法拉第笼结构,起到隔离单元间耦合的作用;在单元结构的背面(见图 1(b)),仅金属通孔周围的深色部分为金属,其作用是确保通孔在介质材料上下表面均有金属相连,否则通孔内壁的金属薄层容易脱落,影响隔离性能.研究表明,要达到比较好的隔离效果以有效抑制介质中的表面波和栅瓣,构成法拉第笼结构的金属化通孔参数要满足 $k/d \geq 0.5$ 和 $k/\lambda_0 \leq 0.1$ (λ_0 为中心频率对应的谐振波长)^[6]. FC-RLS-FSS 的几何结构参数由表 1 给出,其中 h 和 ϵ_r 分别表示介质板的厚度和介电常数.

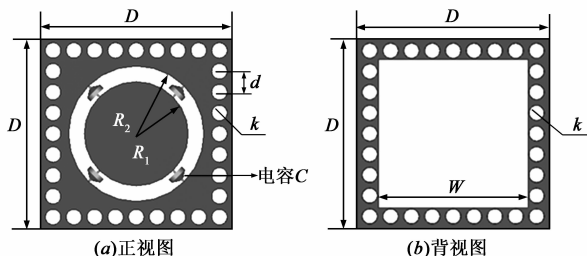


图1 基于法拉第笼的加载圆环缝隙FSS结构示意图

表1 基于法拉第笼的加载圆环缝隙 FSS 几何结构参数

周期单元间距 D	18.5mm	金属通孔直径 k	1.5mm
内圆半径 R_1	5mm	金属通孔间距 d	2mm
外圆半径 R_2	6.5mm	背面方形孔径边长 W	14mm
介质板厚度 h	1mm	介质板介电常数 ϵ_r	2.65
加载电容 C	1.0pF		

需要说明的是,这里的法拉第笼结构只保留了介质基片单侧的金属层,与金属化通孔组成一个半开放的空间,没有形成波导腔结构,因此和基片集成波导(SIW)结构有区别.

3 数值仿真与分析

迄今为止用于分析周期性结构的方法有很多,目前常用的全波方法主要有矩量法、有限元法、时域有限差分法^[7,8].其中时域有限差分法(FDTD)具有通用性强、一次计算可以获得宽频频响、容易对复杂模型建模等优点,因此本文基于 FDTD 方法来分析电容加载圆环缝隙 FSS 的性能,在大量数值仿真的基础上给出了这种 FSS 谐振频率的经验计算式,可以有效提高设计效率.

3.1 RLS-FSS 谐振频率计算式的修正

众所周知,介质加载可以减小 FSS 对入射波入射角度的敏感性,并使谐振频率产生偏移.对于圆环缝隙 FSS,当缝隙周长接近一个波长时产生共振^[1],设谐振频率为 f_0 ,则单边加载介质后新的谐振频率为:

$$f_1 = f_0 / \sqrt{(1 + \epsilon_r)/2} \quad (1)$$

式中 ϵ_r 为介质介电常数.然而 f_1 只是一个近似估计值,它和数值仿真结果有误差,该误差值有时高达 20% 以上,鉴于此,本文将公式(1)修正为:

$$f_1' = K \cdot f_0 / \sqrt{(1 + \epsilon_r)/2} \quad (2)$$

其中 K 为一个反应谐振频率偏移的经验系数,和 FSS 单元的物理结构有关,对于圆环缝隙单元在 X 波段和 Ku 波段可以设为 1.2.

表 2 给出了式(1)、式(2)和 FDTD 数值仿真结果的对比,其中 R_1 、 R_2 、 D 和 f 均是 FDTD 数值仿真结果,考虑到修正式的任意适用性, f 是在 X 波段和 Ku 波段中随机选取的,从表中可看出,修正式(2)的计算结果和数值仿真结果更接近,其最大偏差不超过 5%.计算中介质层参数同表 1.

表2 经验公式与 FDTD 仿真结果对比

R_1 (mm)	R_2 (mm)	D (mm)	f (GHz)	f_1 (GHz)	f_1' (GHz)	$ f_1 - f $ f	$ f_1' - f $ f
5.25	6.75	18	7.25	5.9	7.07	18.6%	2.5%
5	6	18	8.03	6.43	7.68	19.9%	4.3%
4.5	5.5	17	8.8	7.07	8.48	19.7%	3.6%
4	5	16	9.65	7.85	9.43	18.7%	2.3%
3.5	4.5	14	10.83	8.84	10.6	18.4%	2.1%
3.3	4.2	13	11.44	9.42	11.31	17.7%	1.1%
3.1	3.9	12	12.38	10.1	12.12	18.4%	2.1%
2.95	3.55	12	13.03	10.87	13.05	16.6%	0.15%
2.7	3.3	11	14.12	11.78	14.14	16.6%	0.14%
2.25	2.75	8	16.73	14.14	16.96	15.5%	1.4%

3.2 电容加载 RLS-FSS 谐振频率的经验计算式

加载电容使得圆环缝隙 FSS 谐振频率点进一步向短波段迁移,导致这种 FSS 的设计更为复杂,因此本文通过大量数值仿真,提出了一种适用于 1 ~ 4GHz 频段的电容加载 RLS-FSS 谐振频率经验计算式.

设加载电容后 RLS-FSS 谐振频率降为 f_l ,则设:

$$f_l = g(C) \cdot f_1' \quad (3)$$

式中 $g(C)$ 是反应电容加载对谐振频率影响的函数式, C 为加载的电容值.

为了得到 $g(C)$ 的具体表达式,采用 FDTD 针对不同的 f_1' 仿真了加载不同电容后的 f_l 值,得到 $g(C)$ 随电容 C 变化的关系曲线.仿真中 f_1' 取值范围为 8 ~ 16GHz,加载电容变化范围 0.5 ~ 4pF,得到的 f_l 值均在 1 ~ 4GHz 范围内,仿真结果见图 2.由图中曲线可知,当 f_1' 在 8 ~ 16GHz 范围内变化时, $g(C)$ 关于加载电容 C 的变化规律几乎一致,因此通过曲线拟合的方法得到了 $g(C)$ 的近似表达式如下:

$$g(C) = \begin{cases} -0.157 \times \ln C + 0.29 & , 0.5\text{pF} < C < 2\text{pF} \\ 0.3 \times e^{-0.15C} & , 2\text{pF} \leq C \leq 4\text{pF} \end{cases} \quad (4)$$

虽然图 2 显示 $g(C)$ 随 f_1' 不同而略有改变,但最大偏移量约为 0.038(对应 $c = 0.5\text{pF}$, f_1' 从 8GHz 变化到 16GHz),由此得到加载电容后 f_1 的相对偏差最大不超过 8%,所以 f_1' 的影响可忽略。

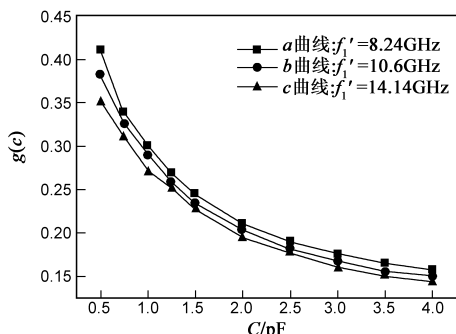


图2 $g(C)$ 随加载电容 C 的变化曲线

结合式(2)~(4)可以对电容加载的 RLS-FSS 谐振频率进行快速计算,使这种 FSS 的设计变得简单快捷。

需要说明的是,当 RLS-FSS 的环缝隙半径减少至 2mm 时,其谐振频率将达到 20GHz 以上,虽然通过加载电容 C 仍然可以将谐振频率点调整至 2.45GHz,但其 -3dB 带宽却明显减小,只有几十兆甚至几兆赫兹,从而使得 FSS 性能变差.所以对于半径小于 2mm 的 RLS-FSS,其电容加载的研究意义已经不大.故而本文 f_1' 仿真上限定为 16GHz。

4 电容加载 RLS-FSS 研制与测试

在上述经验公式的基础上设计了谐振频率为 2.45GHz 的电容加载 RLS-FSS 单元,其结构和参数分别见图 1 和表 1.值得一提的是,传统圆环缝隙 FSS 要满足 2.45GHz 的谐振频率,其圆环缝隙半径将达到 17mm 左右.而通过加载表面电容,圆环缝隙半径减少至原来的 34%,其物理尺寸大为缩小.仿真表明,这种加载电容的 FSS 尺寸最小可缩至 15% 左右。

图 3 给出了所设计的加载 FC-RLS-FSS 对应宽频带的 S 参数仿真结果.从图 3 中可以看出,该 FSS 在 0 到 10GHz 范围内除了 2.45GHz 外,没有其它任何谐振频率点。

图 4 给出了该 FC-RLS-FSS 对 TE 和 TM 波在不同入射角情况下的 S 参数仿真结果.分析图中曲线可知:对于 TE 极化入射波,当入射角由 0° 增加至 45° 时,谐振频率变化很小,最大偏移仅为 0.41%;-3dB 带宽有所变化,从 171MHz 降低至 120MHz,带宽变化率为 29.3%;对于 TM 极化入射波,当入射角由 0° 增加至 45° ,谐振频率在 2.45GHz 也几乎没有变化,-3dB 带宽从 170MHz 增加至 234MHz.由此可见,电容加载 FSS 的谐振频率很稳定,而且由于结构上的对称性,这种 FSS 对 TE 和 TM 极化波的性能一致性也很好。

图 5 给出了电容加载 FC-RLS-FSS 试件实物照片,试件单元数为 12×12 ,尺寸为 $195\text{mm} \times 195\text{mm}$,试件表面镀金,介质基板材料为 F4B。

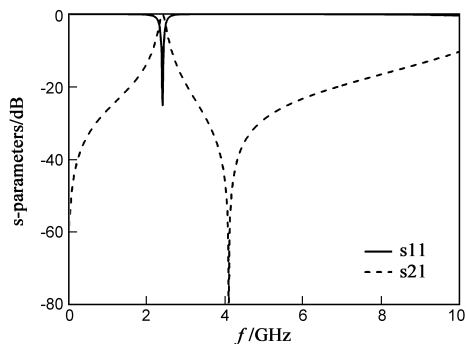
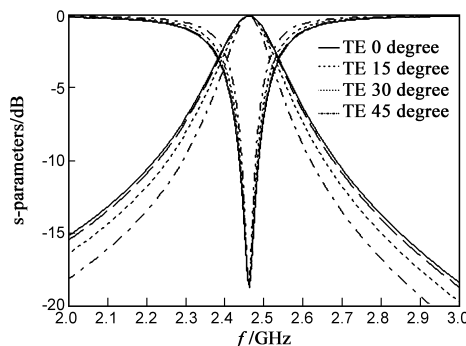
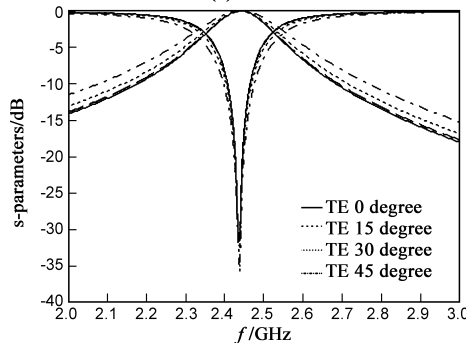


图3 电容加载RLS-FSS在0~10GHz的频响曲线



(a) TE波入射



(b) TM波入射

图4 不同入射角情况下电容加载RLS-FSS的传输和反射系数曲线

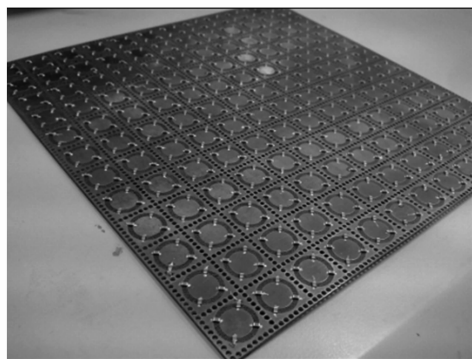


图5 圆环缝隙加载频率选择表面的实物照片

实测和仿真的传输和反射系数曲线如图 6 所示,受测试条件限制,对于该试件在 0 到 10GHz 范围内的宽频带 S 参数未予测试,图中给出了谐振频率附近的窄带测试结果.可以看出,两者比较吻合,尤其是谐振频率点的一致,表明了本文提出的加载 FSS 谐振频率近似计算公式的有效性.另外,测试显示加载 FSS 有 0.9dB 的插入损耗,这可能是 FSS 结构中的电介质和传导损耗引起的.

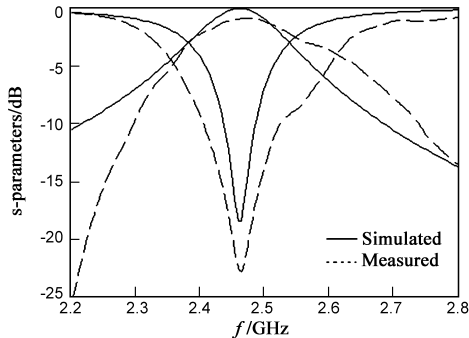


图6 仿真和实测的传输和反射系数曲线

5 结束语

本文介绍了一种基于法拉第笼结构的小型化带通加载 FSS,并针对这种结构提出了应用于 1 ~ 4GHz 的谐振频率近似计算公式.这种电容加载 FSS 结构显示了单一的谐振频率响应(2.45GHz)和 TE、TM 波斜入射时稳定的频率响应.和传统 FSS 相比,这种加载 FSS 的尺寸大为减少,FSS 单元间的串扰也利用法拉第笼结构得到了有效消除.而通过改变加载电容,这种 FSS 尺寸可以进一步缩小至传统 FSS 的 15%.

参考文献:

- [1] B A Munk. Frequency selective surface: Theory and design [M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] 武哲,武振波. 双层 FSS 结构电性能研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 517 – 520.
Wu Zhe, Wu Zhenbo. Research on electrical performance of dual-layer FSS configuration[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 517 – 520. (in Chinese)
- [3] J H Wu, J Scholvin, J A del Alamo, K A Jenkins. A Faraday

cage isolation structure for substrate crosstalk suppression[J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2001, 11(10): 410 – 412.

- [4] J H Wu, J Scholvin, J A del Alamo. An insulator-lined silicon substrate-via technology with high aspect ratio [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(9): 2181 – 2183.
- [5] G M Adema, L T Hwang, G A Rinne, I Turlik. Passivation schemes for copper/polymer thin-film interconnections used in multi-chip modules [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(1): 53 – 59.
- [6] Yu Lin Zhang, Wei Hong, Ke Wu, Ji Xin Chen, Hong Jun Tang. Novel substrate integrated waveguide cavity filter with defected ground structure [J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4): 1280 – 1287.
- [7] Yin-Chun A Kao, Atkins, R G. A finite difference-time domain approach for frequency selective surfaces at oblique incidence [A]. Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1996. 1432 – 1435.
- [8] Harms P, Mittra R, Wai Ko. Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(9): 1317 – 1324.

作者简介:



施凌飞 男, 1986 年生于江苏常州. 2004 年到 2008 年在江苏南京理工大学攻读电子信息工程专业. 现为硕士研究生, 主要从事计算电磁学和微波技术方面的有关研究.

E-mail: shilingfeihappy@163.com



宗志园 女, 1973 年生于安徽马鞍山, 2000 年获南京理工大学博士学位, 现为该校副研究员, 主要研究方向为微波、毫米波多频探测技术, 毫米波/红外复合探测技术.

E-mail: zongzhiyuan@sina.com

