

# 双阻带小型化频率选择表面的设计

吴翔<sup>1</sup>, 裴志斌<sup>1</sup>, 屈绍波<sup>1</sup>, 柏鹏<sup>2</sup>, 马华<sup>1</sup>, 王新华<sup>1</sup>, 周航<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学综合电子信息系统研究中心, 陕西 西安 710051)

**摘要** 设计了一种通过加载电容和增加电长度的方法实现小型化的双阻带频率选择表面。这种频率选择表面单元具有双周期结构, 从而实现了双阻带特性。在十字单元结构之间加载集中电容, 可以大大降低单元结构的串联谐振频率, 实现 S 及 C 波段的带阻特性; 金属短线的扭曲结构则通过增加电长度提高等效电感, 得到 Ku 波段的带阻特性。仿真结果表明: 对不同角度入射波该结构保持了十分稳定的传输特性, 同时由于良好的对称性, 该结构对平面波的 2 种模式——TE 及 TM 模式传输特性基本相同, 验证了通过加载电容和增加电长度实现小型化的方法, 对 FSS 的设计具有很好的参考价值。

**关键词** 频率选择表面; 小型化; 双阻带

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.018

**中图分类号** O441 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0086-04

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)指按照一定方式周期排布的二维阵列结构, 通常可归纳为 2 类: 具有特殊几何形状的金属贴片结构以及蚀刻在金属薄层表面与贴片几何形状相同的缝隙结构。这 2 种互补结构对单元谐振频率附近电磁波具有良好的选择性, 金属贴片结构呈全反射特性而缝隙结构呈全透特性。FSS 在微波、毫米波、红外直至光波各个频段都得到了广泛应用, 特别在微波频段, FSS 作为电磁空间滤波器件在军事、通讯、电磁安全等方面都得到了深入研究<sup>[1-4]</sup>。

FSS 的仿真设计中假设单元周期无限排列, 从而得到其传输特性, 所以实际应用中有效尺寸的表面必须包含足够多的 FSS 单元才能得到与仿真结果一致的传输特性。常规 FSS 单元尺寸为半个波长左右, 受实际到空间限制, 无法在有限平面区域内构建足够多的单元个数, 所以 FSS 的小型化对于实际应用就显得尤为重要。文献[5]提出了通过增加电长度实现小型化的方法, 文献[6-7]提出在介质基板表面刻蚀长金属线及金属贴片实现 LC 并联谐振的方法实现小型化 FSS, 文献[8-10]提出了加载集总元件实现 FSS 小型化的方法。除了 FSS 结构单元的小型化研究外, 有效提高天线利用率和实现工作频段灵活控制的多通带 FSS<sup>[9,11]</sup>也受到高度重视。本文设计了一种小型化双阻带 FSS, 其传输禁带覆盖了 S 及 C 波段(2-4 GHz)和 Ku 波段(12.5-18 GHz)。

## 1 双阻带频率选择表面的设计

图 1 显示了双阻带 FSS 结构, 该结构在  $x$  及  $y$  方向结构完全相同, 且具有 2 种周期。实线方框内的周期单元实现了低频滤波特性, 虚线方框内的周期单元实现了高频滤波特性, 这 2 种结构实际上均为十字贴片结构 FSS 的变形。图 1(b)为 FSS 结构单元。结构单元建立在厚度为 0.4 mm 的 FR4(相对介电常数 4.9, 损耗

\* 收稿日期: 2010-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871027; 60901029; 61071058); 国家“973”计划资助项目(2009CB623306); 陕西省电子信息系统系统集成重点实验室基金资助项目(200905A)

作者简介: 吴翔(1983-), 男, 福建莆田人, 硕士生, 主要从事超材料及频率选择表面研究。

E-mail: wuxiang19830201@sohu.com

角正切 0.025)上,见图 1(b)中的浅色部分;金属覆层厚度 0.017 mm 的覆铜,见图 1(b)中的深色部分;图中的圆锥体为 1.2 pF 的集中电容;图 1(b)中金属线宽  $w = 0.2$  mm;  $g = 0.2$  mm;  $l = 2$  mm;  $m = 0.5$  mm;  $a = 5$  mm。

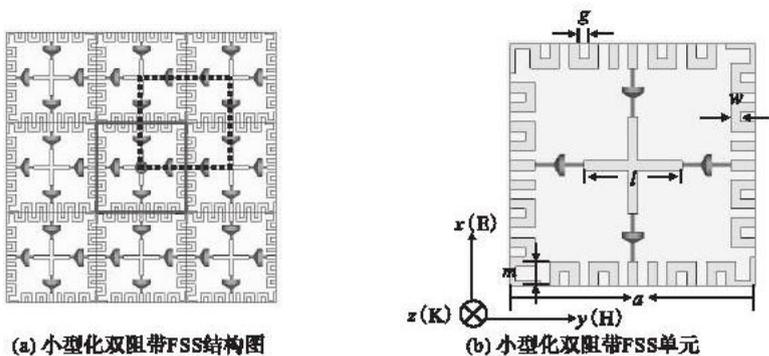


图 1 小型化双阻带 FSS 结构与 FSS 单元图

Fig. 1 The geomery and the unit cell of miniaturized stopband FSS

TEM 平面波可分解为 2 种线极化波——水平极化波及垂直极化波的叠加,水平极化(TM 模式)波的磁场分量沿  $x$  方向,垂直极化(TE 模式)的电场分量沿  $x$  方向。入射平面波以一定角度入射时,根据 Floquet 定理可将 FSS 周期的场用相对于  $z$  轴的 TM 和 TE 模式来表示,仿真中通常分别计算 TE 及 TM 模式下 FSS 的传输特性。由于所设计的单元结构关于  $x$  轴和  $y$  轴完全对称,垂直入射时 TE 及 TM 模式的传输特性相同。

## 2 仿真与分析

使用 CST microwave studio 电磁软件对图 1 所示的二维周期结构进行仿真,结构单元的边界设为 unit cell,入射波为垂直入射的 TE 波( $E = e \cdot x$ )时计算得到的  $S$  曲线见图 2。从图 2 可以看出,在 1.17 - 7.9 GHz 以及 13.52 - 24.47 GHz 内出现 2 个 -3 dB 传输禁带。

由于 FSS 通常构建在具有一定曲率的天线罩表面,为此,设计中要求 FSS 对不同角度入射波其传输中心频率保持不变。仿真计算了双阻带 FSS 对不同入射角下两种模式的选通特性。图 3 为在 TE 模式入射波从  $0^\circ - 50^\circ$  变化时的  $S$  曲线,可以看出随着入射角的增加,传输禁带的中心频率保持不变, -3 dB 禁带带宽略有增加。

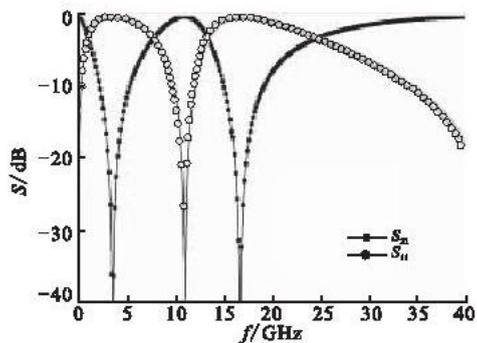


图 2 垂直入射 TE 波仿真计算得到的  $S$  曲线  
Fig. 2 Reflection and transmission coefficient of the miniaturized dual stopband FSS for normal incident with TE polarization

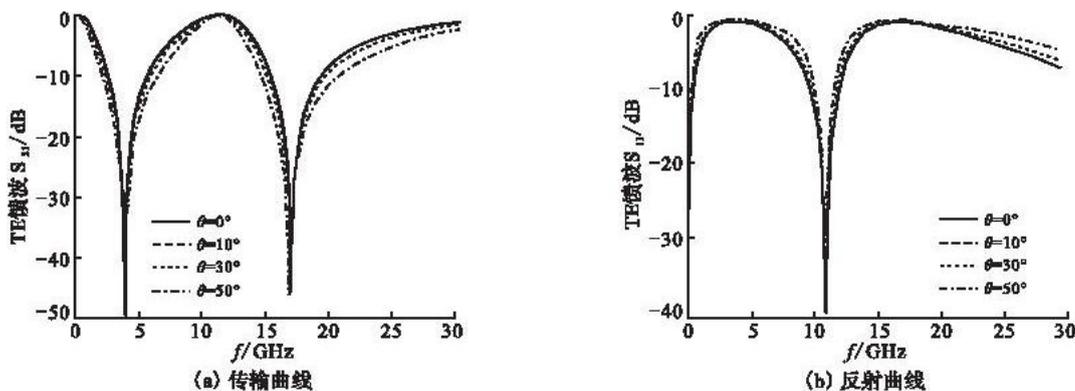


图 3 不同角度入射 TE 波仿真计算得到的  $S$  曲线

Fig. 3 Transmission coefficient and refraction coefficient of the miniaturized dual stopband FSS for different angle incident waves with TE polarization

图 4 为在 TM 波入射角从  $0^\circ - 50^\circ$  范围内变化时计算得到的  $S$  曲线。从图中可以看出,随着入射角的增加,禁带中心频率仍未发生变化,与图 3 相反,传输禁带的 -3 dB 带宽略有减小。

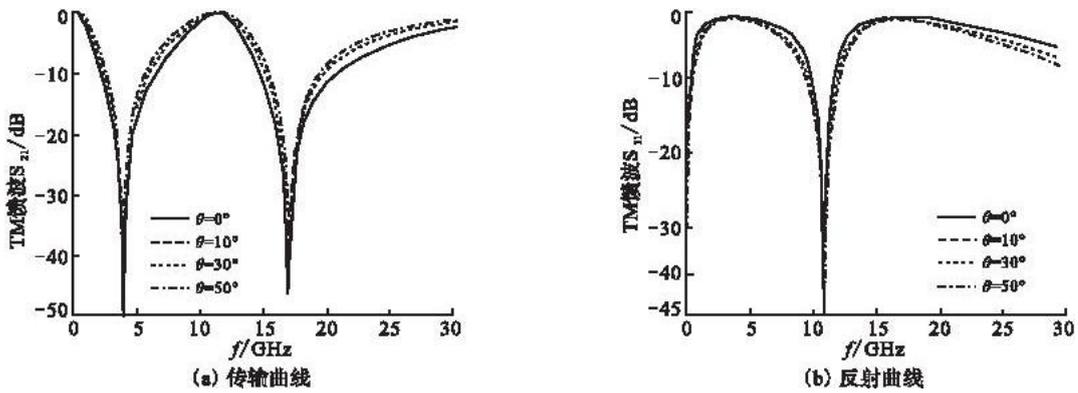


图4 不同角度入射 TM 波仿真计算得到的 S 曲线

Fig.4 Transmission coefficient and reflection coefficient of the miniaturized dual stopband FSS for different angle incident waves with TM polarization

图5显示了加载不同集中电容情况下电磁波垂直入射得到的S曲线,从图5可以看出,双通带频率选择表面在Ku波段的传输和反射特性并没有受到集中电容变化的影响,说明了Ku波段的传输特性主要由图1中的虚线框中的结构所决定。S波段的传输和反射系数则随着集中电容的变化而变化,当集中电容增大时,工作频段将向低频移动,根据等效电路理论,十字结构周期排列可等效为一个由集中电容和细金属线(产生等效电感)构成的串联谐振电路<sup>[4]</sup>,而串联谐振回路的等效阻抗在谐振点为0,FSS相当于电反射面,使得入射波发生全反射,当频率远离谐振点时,等效阻抗 $z = z_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ ,传输率增强。其中, $z_0$ 为真空阻抗, $\epsilon_r$ 为基板的相对介电常数。

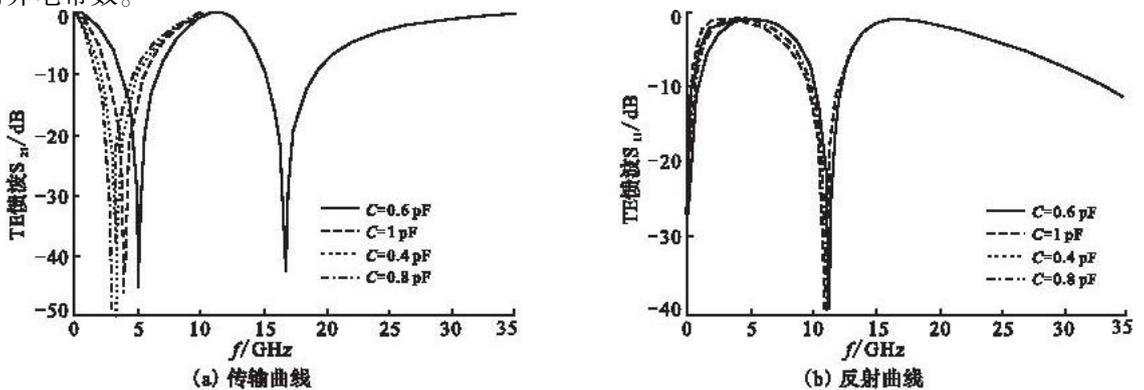


图5 加载不同集中电容情况下 TE 波垂直入射得到的 S 曲线

Fig.5 Transmission coefficient and reflection coefficient of the miniaturized dual stopband FSS for normal incident waves with TE polarization when loading different capacitors

仿真结果表明,加载了集中电容的FSS,单元尺寸与波长之比减小到了1/20,而通过增加电长度的方法,单元尺寸与波长比减小到了1/4,这2种方法均有利于得到对入射角方向以及极化方向不敏感的小型化FSS,通过调节电容的大小还可实现对工作频带的调节。由于单元结构均为十字FSS结构的变形,从而较好地解决了多频带FSS栅瓣出现过早的问题<sup>[12]</sup>。基于以上2种方法设计的FSS结构可用于卡赛格伦天线系统中副天线反射面(见图6),S、C以及Ku波段信号回波经双阻带FSS反射后进入天线,而S、C、Ku波段以外信号则完全透射,无法进入天线。使用双阻带FSS,提高了天线的利用率,实现工作频段的灵活控制。

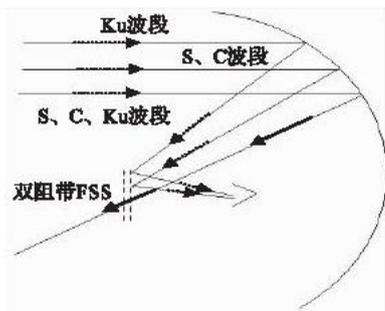


图6 卡赛格伦天线系统示意图

Fig.6 The structure of the Cassegrain antenna system

### 3 结束语

本文构建了一个在S、C和Ku波段实现全反射的具有双周期特性的FSS。实现了结构单元的小型化。

这种 FSS 在低频段相对工作带宽较宽,对入射角及入射波极化方向不敏感,且可同时在 S、C 和 Ku 波段实现高反射率,在雷达抗干扰、天线罩隐形、天线副反射等方面具有一定的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Yeo J, Lee Y, Mittra R. Wideband slot antenna for wireless communications[J]. Proc micro antennas propag, 2004, 151(4): 351 - 353.
- [2] Sievenpiper D, Hsu H P, Riley R M. Low - profile cavity - backed crossed - slot antenna with a single - probe feed designed for 2.34 GHz satellite radio applications[J]. IEEE trans antennas propag, 2004, 52(5): 873 - 879.
- [3] 方维海,徐善驾.由左手媒质构成的新的频率选择表面[J].红外与毫米波学报,2007,26(2):121 - 124.  
FANG Weihai, XU Shanjia. New frequency selective surface composed of left - handed materials[J]. Journal of infrared millim waves, 2007, 26(2): 121 - 124. (in Chinese)
- [4] 贾宏燕,高劲松,冯晓国.新型单元的频率选择表面[J].光学精密工程,2008,16(11):2076 - 2080.  
JIA Hongyan, GAO Jinsong, FENG Xiaoguo. Novel element frequency selective surface[J]. Optics and precision engineering, 2008, 16(11): 2076 - 2080. (in Chinese)
- [5] Chui Cheng Nan, Chang Keng Ping. A novel miniaturized - element frequency selective surface having a stable resonance[J]. IEEE antennas wireless propag lett, 2009, 8: 1175 - 1177.
- [6] Sarabandi K, Behdad N. A frequency selective surface with miniaturized elements[J]. IEEE trans antennas propag, 2007, 55: 1239 - 1245.
- [7] Behdad Nader, Al Joumayly Mudar, Salehi Mohsen. A low - profile third - order bandpass frequency selective surface[J]. IEEE trans antennas propag, 2009, 57(2): 460 - 466.
- [8] Mosallaei H, Sarabandi K. Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate[J]. IEEE trans antennas propag, 2004, 52(9): 2403 - 2414.
- [9] Salehi M, Behdad N. A second - order dual X/Ka - band frequency selective surface[J]. IEEE micro wireless compon lett, 2008, 18(12): 785 - 787.
- [10] Christos M. Varactor - tunable frequency selective surface with resistive - lumped - element biasing grids[J]. IEEE micro wireless compon lett, 2005, 15(9): 570 - 572.
- [11] WU T K. Four - band frequency selective surface with double - square - loop patch elements[J]. IEEE trans antennas propag, 1994, 42: 1659 - 1663.
- [12] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: Wiley - interscience press, 2000.

(编辑:田新华)

## The Design of Dual Stop - band Miniaturized Frequency Selective Surface

WU Xiang<sup>1</sup>, PEI Zhi - bin<sup>1</sup>, QU Shao - bo<sup>1</sup>, BAI Peng<sup>2</sup>, MA Hua<sup>1</sup>, WANG Xin - hua<sup>1</sup>, ZHOU Hang<sup>1</sup>

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Synthetic Electronic Information System Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The general method of improving the transmission characteristic stability of a frequency selective surface is to miniaturize its unit cell. By loading capacitor and increasing the electric length, this paper designs a dual stop - band miniaturized frequency selective surface. With two periodic structures the proposed frequency selective surface demonstrates the dual stop - band quality, the lumped capacitor between the cross structures can greatly reduce the series resonance frequency and realizes lower stop - band characteristics in S and C band, the meandering lines will increase the series inductance to achieve higher stop - band in the Ku band. The simulation results demonstrate that this structure keeps the excellent transmission stability with respect to different incidence angles. Meanwhile, because the designed frequency selective surface is nice in symmetry, its transmission characteristic is identical for the TE and TM modes of plane wave. This paper verifies the feasibility of the miniaturized method by loading lumped capacitor and increasing the electric length, which is of great reference value for designing frequency selective surface.

**Key words:** frequency selective surface; miniaturized; dual stop - band