

FSS WITH A WAVEGUIDE FILTER UNIT CELL

Jie WANG, Hui DENG, Jin-ming DENG

School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Xueyuan Road 37#
Haidian District, Beijing, China

When a Frequency Selective Surface (FSS) is irradiated by electromagnetic waves with different incident angle, drift of resonant frequency usually occurs as the incident angle changes. To solve this problem, a 3-D FSS design is presented, using metal post loaded waveguide filter as a unit cell. In this article, the poor angle stability of resonant frequency of a waveguide FSS is analyzed, and the mechanism of secondary radiation from metal post is used to improve the pass-band frequency stability of a waveguide filter as FSS irradiated by Transverse-Electric(TE) waves. This designing method is verified by numerical simulations. Moreover, the Wood's anomaly destructive to the frequency stability design of FSS is also discussed.

Keywords: Frequency Selective Surface(FSS), waveguide Filter, wood's anomaly

波导滤波器型 FSS

王婕 邓晖 董金明

100191 北京市海淀区学院路 37 号 北京航空航天大学电子信息工程学院

频率选择表面（FSS）在沿不同角度入射的电磁波照射下，谐振频率往往随着入射角度的变化而发生漂移。为改善此问题，提出一种三维/立体型的 FSS 设计，以金属销钉加载的波导带通滤波器为阵列单元。本文以波导型频率选择表面为例分析角度稳定性差的原因，利用金属销钉二次辐射的机理来改善 TE 波入射时通频带的角度稳定性。利用数值仿真，验证了此设计方法的正确性，同时，本文讨论了对 FSS 的频率稳定性起破坏作用的 Wood 异常现象。

关键词：频率选择表面（FSS），波导滤波器，Wood 异常

1. 问题的描述

频率选择表面（简称 FSS）是由谐振单元沿 X 和 Y 方向按周期排列所形成的阵列。由于它具有频率选择特性，可广泛应用于通信系统和雷达系统。根据不同的结构，FSS 可分为两种形式：薄壁型 FSS 和厚壁型 FSS。

薄壁型 FSS 是以导电贴片或导电基板上的缝隙为谐振单元，形式多样，参数调整比较灵活。但由于它的厚度较薄，机械强度受到很大限制，通常要附着于介质基片上 [1,2]。厚壁型 FSS 的厚度相对于工作波长较长，结构强度有很大的提高，而且可借助波导理论分析其频率选择特性。

在天线罩的应用中，入射到 FSS 结构上的电磁波的入射角度变化范围很大。一般来说，厚壁波导型 FSS 的谐振频率对入射角度变化比较敏感。TE 波入射时，随着入射角度的增大，通带的带宽变窄，中心频率向低频移动。这些因素都制约了厚壁波导型 FSS 的应用。

为了使入射角度大范围变化时 FSS 的通带中心频率保持稳定，本文将波导滤波器的概念引入 FSS 的

单元设计中，形成一种三维/立体型的 FSS，并称之为波导滤波器型 FSS，图 1 为这种新型 FSS 的示意图。这种 FSS 经过结构参数的调整，改善了谐振频率对入射角度的敏感性。

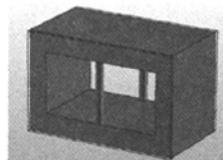


图 1. 波导滤波器型 FSS 结构示意图.
Figure 1. FSS with a Waveguide filter unit cell.

2. 波导滤波器型 FSS 的设计原理

2.1 新型 FSS 稳定通带频率的机理

如图 2 所示，以矩形波导为阵列单元的厚壁波导型 FSS，在 x 和 y 方向按周期排列形成阵列。平面波沿 -z 方向投射到周期阵列时，入射角 Theta (θ) 和 Phi (ϕ) 同球坐标系定义。当入射波的电场分量垂直于入射方向与 z 轴组成的入射平面时，为 TE 入射波；平行于入射平面时则为 TM 入射波。本文讨论入射波

为 TE 极化平面波，入射方向在水平角 Phi 为 0 度，俯仰角 Theta 在 0~45 度范围内变化时，FSS 通带频率的频率稳定性。

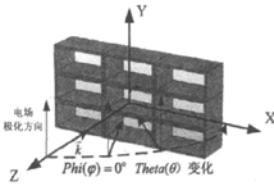


图 2. 厚壁波导型 FSS 的典型结构及 TE 波入射角度变化示意图。
Figure 2. Structure of waveguide FSS and incident angle of TE waves.

对于图 2 所示的厚壁波导型 FSS，当 TE 波以不同角度入射时，磁场的有效分量会发生改变，FSS 结构中波导单元和阵列周期相对于入射波的尺寸也会发生改变，这就导致了 FSS 频带特性随入射角度的变化。图 3 给出此种结构 FSS 在 TE 波大范围角度下的传输特性曲线。可见，随着入射角度的改变，谐振频率发生了明显地漂移。

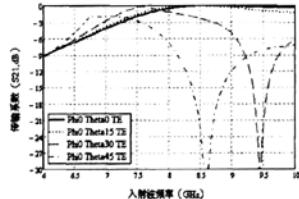


图 3. TE 波沿不同角度入射时的传输系数曲线。
Figure 3. S21 curves of a waveguide FSS irritated

为改善厚壁波导型 FSS 谐振频率随入射角度变化的敏感性，将波导口两端加载圆柱金属销钉的波导滤波器作为新型 FSS 的周期单元。改善入射角度变化时谐振频率稳定性的机理可以借助二次辐射的概念来理解，参见图 4。当电磁波照射到波导单元时，首先会在金属销钉上激励起感应电流，感应电流二次辐射的场，又成为激励波导内传输模式的源场。由于销钉的轴对称性，当电磁波从各个方向入射时，其上所激励起的感应电流相同，二次辐射对波导内腔传输模式的激励效果趋于一致。因此，加入销钉后，波导滤波器单元的尺寸相对于不同角度入射波基本保持不变，从而使得波导滤波器型 FSS 的谐振频率在电磁波沿不同角度入射时保持稳定。

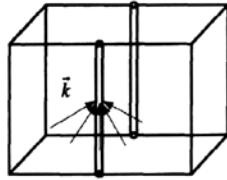


图 4. 金属销钉受激示意图。
Figure 4. Irritated metal post.

2.2 波导滤波器型 FSS 的设计

对波导滤波器型 FSS 的单元，可基于波导结构的传输线理论模型进行分析[3]。在波导宽边处用直径为 d 的圆柱形销钉加载，等效于在该处并联一个集总电感，其电感值与 d 相关。加载后，单元呈现出带通滤波的效果。

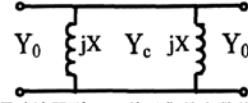


图 5. 波导滤波器型 FSS 单元集总参数传输线模型。
Figure 5. Transmission line model of a waveguide filter FSS unit cell.

空气—波导—空气的波导滤波器型 FSS 单元结构的传输线等效模型如图 5。其中 Y_0 、 Y_c 分别为自由空间和波导的特征导纳， X 为销钉的等效导纳。由传输线理论可知，对于确定截面尺寸的波导和金属销钉，可以通过调节波导腔长，实现在某一频率处波导口面与自由空间之间的匹配，从而实现带通滤波，如公式(1)。

$$\beta L = \arctan\left(\frac{2}{1 - \left(\frac{Y_0}{Y_c}\right)^2 - \left(\frac{X}{Y_c}\right)^2}\right) + \pi \quad (1)$$

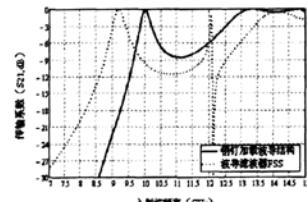


图 6. 相同参数的波导滤波器与波导滤波器型 FSS 的传输系数曲线。
Figure 6. S21 curves of waveguide filter and waveguide filter FSS with the same structure parameters.

将此结构周期排列起来，构成波导滤波器型 FSS，其也具有带通特性。但由于空间电磁波能量进入 FSS 单元的耦合过程与单个波导滤波器的电磁波激励情况不同，谐振频率有所偏移，如图 6 所示。

3. 数值仿真

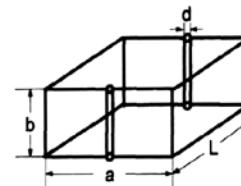


图 7. 波导滤波器参数示意图。
Figure 7. Structure parameters of a waveguide filter FSS unit cell.

设计一个谐振频率在 10GHz 的波导滤波器型 FSS，利用三维电磁场仿真软件 CST 进行仿真，观察不同角度入射时谐振频率稳定性的改善情况。

选取 FSS 的周期阵列参数为 $T_x=22\text{mm}$ (x 方向周期, 下同), $T_y=12\text{mm}$ (y 方向周期, 下同), $a=20\text{mm}$, $b=10\text{mm}$, $L=17.5\text{mm}$, 金属销钉直径 $d=0.4\text{mm}$, (各参数定义如图 7 所示), 波导内填充空气介质, 图 8 为 TE 波沿不同角度入射时 FSS 结构的传输特性曲线。

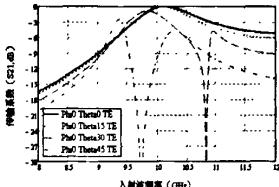


图 8. TE 波入射方向不同时的 FSS 传输系数曲线。
Figure 8. S21 curves of a waveguide FSS irritated by TE waves with different incident angle.

从图 8 中可看到, 通带中心频率没有获得预期的稳定。随着入射角度的增大, 传输特性曲线被一个严重的下陷(Wood 异常)破坏。在带通型 FSS 中, Wood 异常指传输系数为零的现象, 它与栅瓣的出现有关, 会削弱传输方向的能量。在此结构的频率响应特性中, Wood 异常发生的频率落入了通带频带内, 破坏了传输性能。

在 FSS 的设计中, 应当尽量避免或推迟栅瓣的出现和 Wood 异常发生的频率。一般来讲 [4,5], 影响频率的因素, 主要有阵列周期的尺寸和电磁波入射角度等。随着阵列周期的减小, Wood 异常现象出现的频率呈升高趋势; $\Phi(\phi)$ 为零时, 出现频率会随着 $\Theta(\theta)$ 的增加而降低。因此在大范围角度入射的要求下, 减小阵列周期可以提高 Wood 异常现象出现的频率。

然而, 受到波导结构固有截止频率的限制, 波导滤波器型 FSS 的谐振频率须高于相应波导结构的截止频率。在矩形波导中, 截止频率 F_c 由式 $F_c=c/2a$ 所确定, 其中 c 为光速, a 为宽边长。当减小阵列周期的尺寸以提高 Wood 异常现象发生的频率时, 波导滤波器单元的截面尺寸也会减小, 这会相应提高波导的截止频率, 从而限制波导滤波器型 FSS 的可用带宽。因此在设计波导滤波器型 FSS 时, 应尽可能使单元结构更加紧凑。

图 9 为波导滤波器型 FSS 阵列尺寸缩小为 $T_x=17\text{mm}$, $T_y=9\text{mm}$, $a=16\text{mm}$, $b=8\text{mm}$, $d=0.4\text{mm}$, $L=39\text{mm}$ 时的传输特性曲线。如图可见, 减小阵列周

期后, Wood 异常现象出现的频率提高了, 避开了 FSS 的工作频率 10GHz。

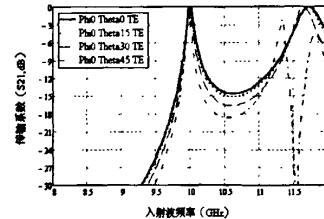


图 9. 紧凑设计的波导滤波器型 FSS 结构在电磁波沿不同角度入射时的传输系数曲线。
Figure 9. S21 curves of a compactly designed waveguide filter FSS irritated by TE waves with different incident angle.

如图 9 所示, 在避开 Wood 异常的破坏后, 新的 FSS 结构在电磁波沿不同方向入射时的频率稳定性得到有效改善。金属销钉改善 FSS 结构频率稳定性的作用得以体现。

4. 结论

以金属销钉加载的波导带通滤波器 FSS 设计, 得到了数值仿真的验证。证实金属销钉可以削弱不同方向入射波入射至 FSS 结构时产生的差别, 减小谐振频率随入射角度的变化。但由于受 Wood 异常现象的制约, 这种改善受到了限制。在此波导滤波器型 FSS 的设计中, 应使结构设计更加紧凑, 以避开 Wood 异常对其传输特性的影响。

参考文献

1. R. Mittra, C. H. Chan, T. Cwik, Techniques for analyzing frequency selective surface-A review, *Proc. IEEE* 76, 1593-1614, 1988.
2. B. A. Munk, *Frequency Selective Surface: Theory and Design*, Wiley, NY, 2000.
3. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd edition, Wiley, NY, 2004.
4. R. J. Luebbers and B. A. Munk, Some effects of dielectric loading on periodic slot arrays, *J. IEEE Trans. AP* 26(4), 536-542, 1978.
5. T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, Wiley, NY, 1995.
6. T. S. Yun, H. Nam, K. B. Kim, Waveguide bandpass filter using Substrate Integrated Waveguide (SIW) for satellite communication, *Proc. IEEE* 1, 2005.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

● HFSS 视频培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● CST 视频培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● 天线设计专业培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>