

亚毫米波段波导阵列结构频率选择性 滤波器的设计

崔广斌[†] 苗俊刚 张勇芳

(北京航空航天大学, 电子信息工程学院, 北京 100191)

(2012年3月11日收到; 2012年8月2日收到修改稿)

在毫米波和亚毫米波段探测技术中, 为了满足低的透射带插入损耗及反射带反射损耗的需要, 本文设计了一种基于波导阵列结构的频率选择性滤波器, 通过结构参数的优化设计, 克服了大角度入射下透射带插入损耗大的缺点, 并且还具有对入射角度变化不太敏感的优点, 满足了实际工程设计的需要. 另外这种滤波器还兼具有双极化信号的检测特性, 对 TE 波和 TM 波有基本一致的频率响应, 可以同时检测双极化信号. 文中首先根据指标要求给出滤波器结构参数的设计初值, 然后通过软件进行仿真优化设计, 最后给出一种低损耗的滤波器结构, 仿真结果表明设计的滤波器满足系统的性能要求, 接着详细分析了透射带插入损耗的主要来源. 最后给出了滤波器各个参数的误差灵敏度分析, 为实物加工提供了工艺参考.

关键词: 亚毫米波, 准光系统, 频率选择性表面

PACS: 41.20.-q, 42.15.Eq, 41.20.Jb

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surfaces, FSS) 由金属贴片或金属屏上的缝隙单元二维周期性排列形成, 可以由介质支撑和覆盖, 其本质特征就是能够对不同频率、入射角度及极化状态下的电磁波呈现滤波特性. 由于 FSS 滤波器的这种特性, 使其得到广泛的应用. 在过去几十年中, 随着对全球气候探测和外太空未知宇宙探索需求的增长, 毫米波和亚毫米波段的探测技术得到了长足的发展. 基于星载微波大气遥感的探测, 需要有高接收灵敏度的硬件设备来检测微弱的大气分子辐射, 由于这种设备常常需要工作在非常宽的频率带宽内, 传统的基于波导的导波结构会引入不可接受的损耗, 同时为了满足卫星平台对重量、空间和能量消耗的限制条件, 先进的毫米波和亚毫米波探测仪采用不同的频率和极化通道共用同一个天线口面, 这样就需要在天线系统和各通道的接收机之间添加

一个频率/极化复用器, 将天线口面捕获的地面/大气辐射信号分离成不同的频率和极化通道, 然后再送至相应的接收机进行处理. 在毫米波与亚毫米波段, 对 FSS 滤波器的透射带插入损耗和反射带反射损耗要求比较严格, 因为从天线接收的信号是非常微弱的信号, 接收机的信噪比 (S/N) 是非常关键的指标. 在准光学馈电网络中, 频率/极化复用器中的频率选择性表面 (FSS) 滤波器的设计是最大的技术挑战^[1,2], 因为其需要满足通带内低的插入损耗和邻近通道之间高的隔离度. 在微波波段有多种不同的谐振型^[3,4]和非谐振型 FSS 能提供频率的分离作用. 于 1998—2002 年间发射的 NOAA-15, 16, 17 型号卫星上的微波有效载荷 Advanced Microwave Sounding Units (AMSU-B) 应用了两个波导阵列型的 FSS 滤波器来分离中心频率在 89GHz、150 GHz 和 183 GHz 的三个信号通道^[5]. 由于波导阵列型滤波器不存在介质吸收损耗, 相对于有介质衬底的 FSS 滤波器, 其通带损耗可以做的比较小, 使其可以满足星载微波辐射计的需要. 但波导阵列

[†] E-mail: cgbsd1g@126.com

型滤波器具有对入射角敏感的缺点, 当入射角度大于 20° 时, 具有较高的透射带插入损耗 [6]. 为克服以上缺点, 根据实际工程设计的需要, 文中通过对结构参数的优化给出一种基于波导阵列结构的 FSS 滤波器的设计, 在入射角度为 30° 的情况下, 其仍具有较低的透射带插入损耗和反射带反射损耗, 并且具有较好的双极化滤波特性.

2 需求背景

国内风云四号同步轨道气象卫星上的毫米波/亚毫米波探测器, 其探测频率包括 54 GHz, 118 GHz, 183 GHz, 380 GHz 和 425 GHz 共 5 个频段, 其天线系统由一个抛物形反射主面和椭球形反射副面组成, 采用了一个实孔径机械扫描的配置结构, 如图 1(a) 所示. 观测信号由直径约 3 m 的主反射面天线接收, 经副反射面进入准光学馈电网络, 然后分别由 3 个准光滤波器 FSS1#, FSS2# 和 FSS3# 分离出五个频段, 由各频段的波纹喇叭天线接收并馈入相应的接收机进行处理. 在本探测器中, 准光滤波器采用相同的入射角度, 同时考虑到卫星平台空间的限制, 这里采用 30° 的入射角度,

因为入射角度大时, 可使整个准光学馈电网络的布局变得紧凑, 但同时准光滤波器的设计难度也加大了, 所以要在布局和设计难度两者之间进行折中. 其频率分离方案及光学版图布局如图 1(b) 和 (c) 所示, 各个频段的准光波束的透射和反射路径都被显示出来.

从天线接收到的微弱辐射信号通过极化栅网分离器后分成两路, 一路为水平极化信号 (TE), 另一路为垂直极化信号 (TM), 然后通过各级 FSS 滤波器将不同信道的信号分开, 最后分离出的各个信道信号分别进入不同的接收机进行相应的下变频处理. 文中给出了 FSS1# 准光滤波器的设计, 其电性能指标如表 1 所示.

表 1 FSS1# 准光滤波器的性能指标

属性	指标要求
透射带/GHz	420—428
透射带插入损耗/dB	小于 0.4
反射带/GHz	176—190
反射带插入损耗/dB	小于 0.4
入射角/ $^\circ$	30
极化方式	TM(垂直极化)

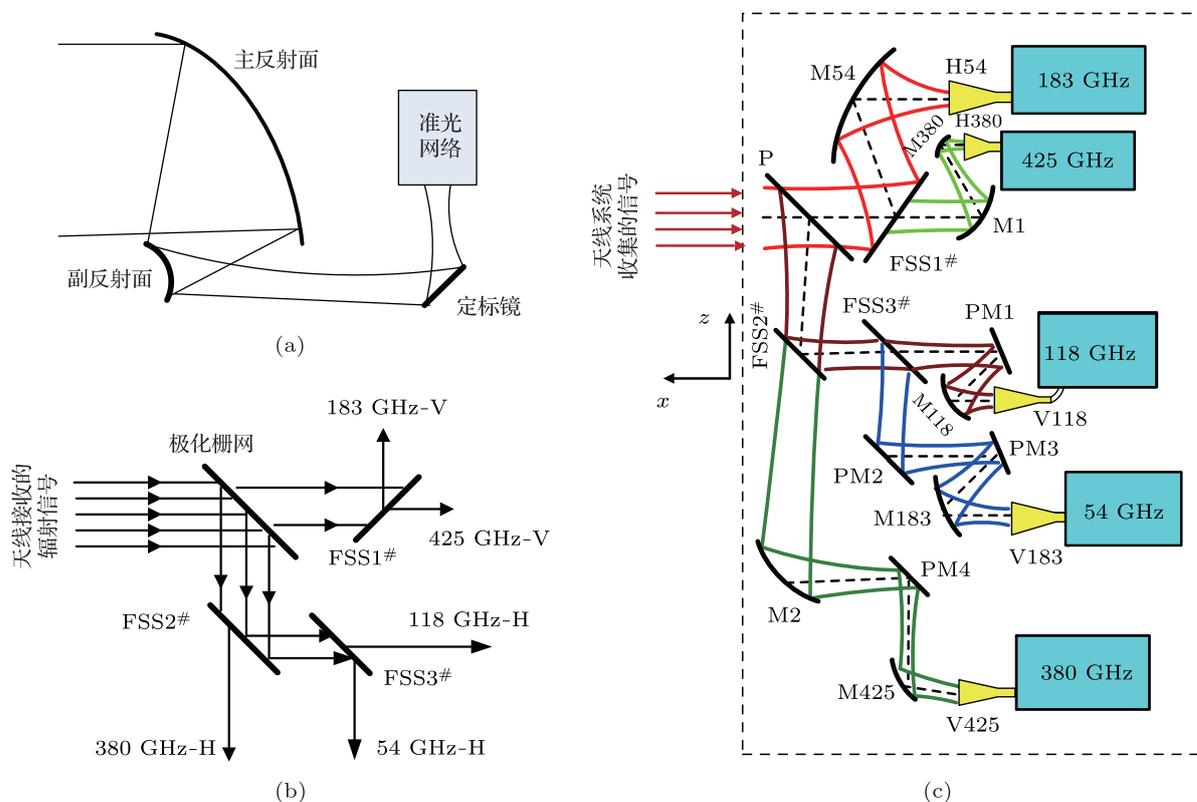


图 1 准光馈电网络 (a) 微波有效载荷的总体结构; (b) 准光系统前端频率/极化复用器的频率分离方案示意图; (c) 准光馈电网络的光学布局示意图

FSS1# 工作在 TM 极化方式下, 入射角为 30° , 其用来分离中心频率为 183 和 425 GHz 的两个通道信号, 其中透射 420—428 GHz, 透射带插入损耗小于 0.4 dB. 反射 176—190 GHz, 反射带插入损耗小于 0.4 dB.

3 滤波器的设计

考虑到星载辐射计接收到的是来自空间或地球辐射的非常微弱的信号, 系统给出的电性能指标中, 透射带的插入损耗是一个非常关键的指标, 它决定了整个辐射计接收系统的信噪比. 为了满足透射带插入损耗小于 0.4 dB 的系统要求, 本文采用基于波导阵列结构的 FSS 滤波器, 波导型 FSS 滤波器由周期排布的孔径组成, 孔径可以采用任意的形状, 主要根据系统指标要求和加工工艺来决定. 由波导理论可知, 波导中存在 TE 和 TM 两种模式的电磁波, 每种模式都会有它相应的截止频率. 在波导各个模式 (包括 TE 和 TM) 的截止频率中, 最低的截止频率为整个波导的截止频率. 在矩形波导中 TE_{10} 模式的截止频率最低, 电磁波频率低于 TE_{10} 的截止频率则截止, 高于 TE_{10} 的截止频率则通过. 其滤波原理是利用金属波导的导波原理, 当入射的电磁波频率远低于波导的截止频率时, 入射电磁波在波导口面处于截止状态, 电磁波无法耦合进入波导口面, 无法进入波导传播, 被波导型 FSS 反射回来, 形成带阻特性. 当入射电磁波频率高于波导的截止频率时, 入射电磁波在波导口面是传播状态, 电磁波容易耦合进入波导, 形成带通特性, 所以这种结构的滤波器具有高通滤波特性. 当平面波入射到 FSS 滤波器表面时, 一般情况下, 透射波的方向与入射波的方向一致, 这里称为主方向. 在某些情况下, 高阶模式会被激励, 造成一部分透射波不再按主方向传播, 这部分高阶模被称为栅瓣. 与传统的周期性结构一样如相控阵天线等, 在波导型 FSS 的应用中, 同样也存在栅瓣散射的情况. 栅瓣在不需要方向上的辐射, 会造成能量的浪费, 并且还会影响透射带的特性 [7]. 在 FSS 滤波器中, 为了尽可能避免栅瓣的出现, 单元孔径的形状应使得整个周期结构比较紧凑. 本文所用的设计结构如图 2 所示, 阵列单元采用矩形口径, 周期结构为三角形排列. 其中 T_x, T_y 分别是 x, y 方向的周期, a, b 为矩形口径

的边长, Ω 为三角形的夹角.

由于结构参数比较多, 直接采用电磁软件盲目仿真, 计算工作量非常大. 因此从物理本质上把握各个结构参数对滤波性能的影响非常重要, 将会大大减轻前期的计算工作量. 所以在进行仿真设计之前, 需要对所要设计的 FSS 单元的结构参数做一个初步估计.

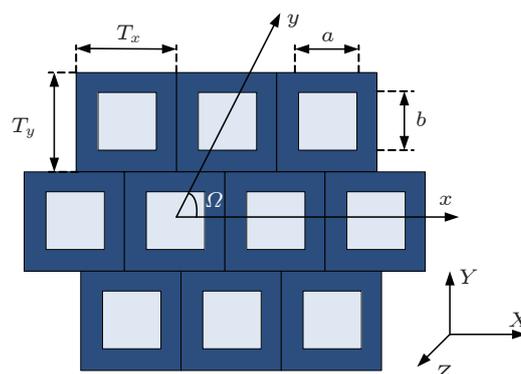


图 2 FSS1# 滤波器的结构示意图

3.1 周期大小的确定

栅瓣的产生取决于波束入射角度、工作频率及单元周期的排列结构, FSS 滤波器单元之间的周期也要遵循同样的规律来避免栅瓣的产生. 由 Floquet 理论可知, 波导型 FSS 中的单元阵列排布紧密, 会提高出现栅瓣散射的频率. 即为了避免栅瓣散射带来的能量损失, 波导口径需要紧密的排布起来, 使出现栅瓣散射的频率远离所需的频率范围. 因此, 为了保证栅瓣出现频率高于通带的最高频率, 这里采用三角形周期结构排列的 FSS, 夹角 Ω 选为 63.4° , 这种结构相对于其他周期排列结构能够更好的抑制栅瓣的出现 [8], 满足下式可抑制栅瓣的出现:

$$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1.12}{1 + \sin(\theta_0)}, \quad (1)$$

λ_0 是透射带中最高频率所对应的自由空间波长, θ_0 是入射角度. 由 (1) 式可知, 当周期小于 0.52 mm 时, 可以保证在透射带的最高频率处避免栅瓣的出现. 实际上, 由于入射的不是理想的平面波而是高斯波束, 一些较大入射角的频谱分量可能会激励起栅瓣, 为了防止栅瓣的产生, 实际所选的周期要小于上面根据公式计算的值.

3.2 单元结构参数设计

根据矩形波导传输理论, 波导型 FSS 的通带起始频率要高于波导的截止频率^[9], 相应的矩形孔径单元的边长 a 和 b 须满足

$$\frac{c}{2f_l} < a \leq T_x - W_{\min}, \quad (2)$$

$$\frac{c}{2f_l} < b \leq T_y - W_{\min}, \quad (3)$$

即矩形孔径的边长需要满足两个限制条件: 1) 要大于通带起始频率在矩形波导中传播所需的最小口径; 2) 要小于周期的长度. 其中, c 是光速, f_l 是透射带中的最低频率, W_{\min} 是矩形孔径的最小壁厚, 由加工工艺确定.

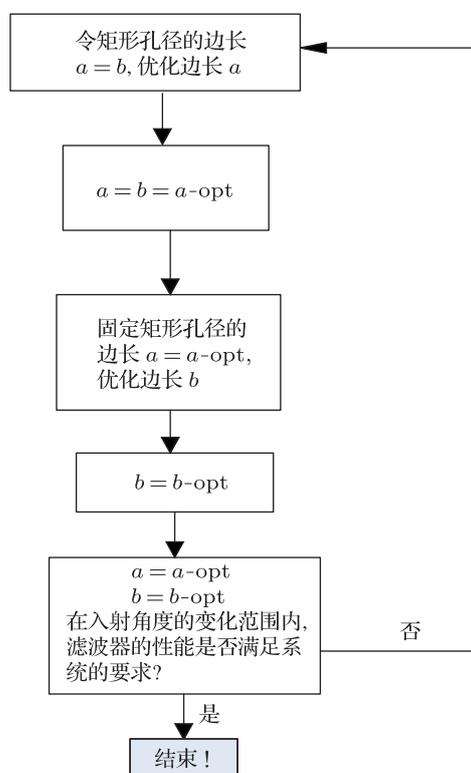


图3 优化流程框图

在设计中, 我们采用 30° 的入射角度, 但实际上入射到 FSS 滤波器表面的信号不是理想的平面波, 而是一束傍轴近似的高斯波束, 由傅立叶光学可知, 其包含各个方向的角谱分量^[10] (即不同传播方向的平面波). 在实际的设计中, 我们不仅要考虑给定的入射角度, 还需计及其他方向的平面波. 在仿真优化过程中, 采用不同的入射角度来优化设计滤波器, 使其能满足实际的性能要求. 考虑到实际的应用条件, 这里采用的入射角度变化范围为 $30 \pm 5^\circ$, 将以上计算得到的初值作为输入, 通过 CST 软件来

仿真并优化 FSS 滤波器的性能. 由上图 2 可知, 矩形孔径单元有多个自由参数: 金属板的厚度、单元的周期及孔径的边长, 通过调节这些参数可以达到所需的性能要求. 滤波器的厚度根据加工工艺的要求可以事先给定, 设定单元的周期相等即 $T_x = T_y$, 且周期大小可以由上节确定, 这样就只有两个自由参数: 孔径的边长 a, b , 其中边长 a, b 的取值范围由 (2) 式已给定. 优化迭代过程如框图 3 所示, 首先令孔径边长 $a = b$, 这样就只剩一个自由变量 a , 通过调节边长 a , 根据透射带的性能要求, 选出合适的值 $a\text{-opt}$. 接着固定 $a = a\text{-opt}$, 调节边长 b , 选出合适的值 $b\text{-opt}$. 最后在固定边长 $a = a\text{-opt}$, $b = b\text{-opt}$ 的情况下, 在给定的入射角度范围内, 仿真 FSS 滤波器的性能是否满足系统的要求, 若不满足, 再次重新迭代优化, 若满足系统的性能要求, 优化过程终止, 给出滤波器的结构参数. 最终得到一种满足系统性能要求的 FSS 滤波器, 其具有双层结构, 周期单元为矩形孔径并采用三角形周期排布结构, 夹角 Ω 为 63.4° , 其中, 每层金属板的厚度为 0.4 mm , 两层之间的空气间隙为 0.45 mm , 几何参数如图 4 所示. 图 5 给出了该 FSS 滤波器随入射角度变化的频谱响应曲线, 可以看出在要求的角度变化范围内, 优化设计的 FSS 滤波器满足系统的性能要求.

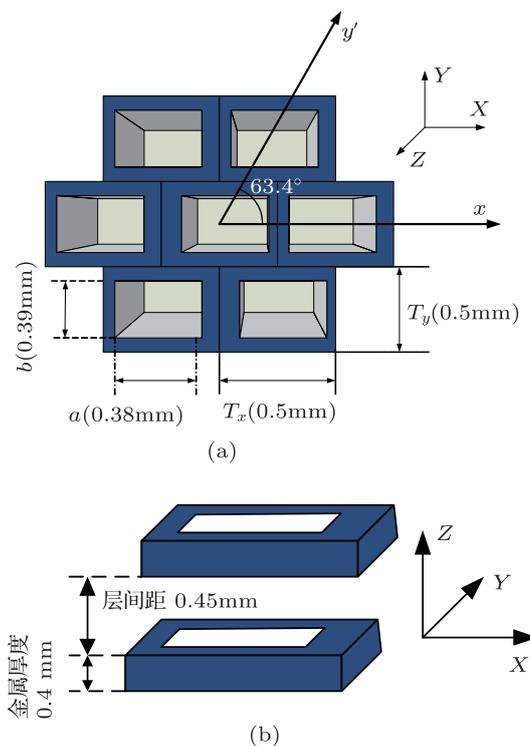


图4 FSS1# 滤波器的结构 (a) 正视图; (b) 侧视图

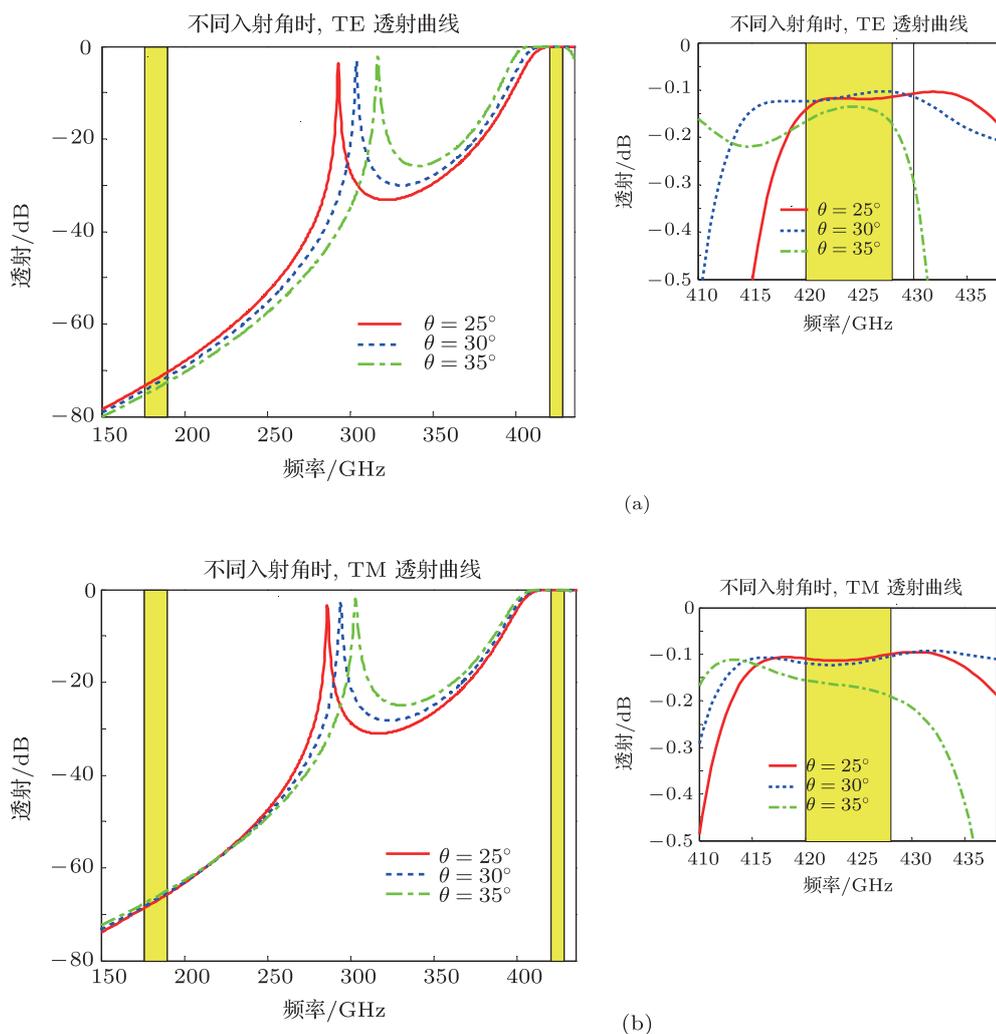


图5 在不同入射角度下, FSS 滤波器的透射特性曲线 (a) 不同入射角度时, TE 波的透射特性曲线, 小图为透射带的局部放大图; (b) 不同入射角度时, TM 波的透射特性曲线, 小图为透射带的局部放大图

4 仿真计算结果及讨论

FSS1# 滤波器的主极化透射及反射特性仿真曲线如下图 6 和图 7 所示. 从图中可以看出, 透射带中心频率 (425 GHz) 的插入损耗为 0.12 dB, 在透射带的最低频率 (420 GHz) 和最高频率 (428 GHz) 处插入损耗分别为 0.12 和 0.1 dB, 透射带中插入损耗在 0.12 和 0.1 dB 之间变动. 反射带中心频率 (183 GHz) 的反射损耗为 0.009 dB, 在反射带的最低频率 (176 GHz) 和最高频率 (190 GHz) 处插入损耗分别为 0.008 和 0.0085 dB, 反射带插入损耗在 0.01 dB 左右变动. 由以上结果可以看出, FSS 滤波器满足系统的性能指标, 另外从图 8 中还可以看出, FSS1# 滤波器对 TE 波和 TM 波的滤波特性基本一致, 具有探测双极化信号的能力.

由仿真结果可知, 文中的结构具有比较低的损耗. 在 FSS 滤波器中, 损耗主要有三个来源: 介质

的吸收损耗、界面的阻抗失配损耗和金属的欧姆损耗. 由于没有引入介质, 所以这种结构只有两种引入损耗的来源, 通过将金属铜换成理想导体, 就能看出两种损耗在透射带插入损耗中所占的比例. 当金属为理想导体时, 这时金属的欧姆损耗可以忽略, 此时透射带的插入损耗由界面的阻抗失配引起, 由图 9 可以看出界面的阻抗失配引起的损耗在 0.04 dB 左右, 而当金属材料为铜时, 在透射带中引入的插入损耗包括界面的失配损耗和金属的欧姆损耗, 其值在 0.15 dB 左右, 通过比较可知, 相对于金属的欧姆损耗, 界面失配损耗是非常低的. 所以经过结构参数的优化设计, 这种滤波器结构基本消除了由界面失配引起的插入损耗, 透射带的插入损耗主要由金属的欧姆热损耗引起. 这样可以通过将金属材料改换为导电率高的金属 (例如银), 可以进一步降低透射带的插入损耗.

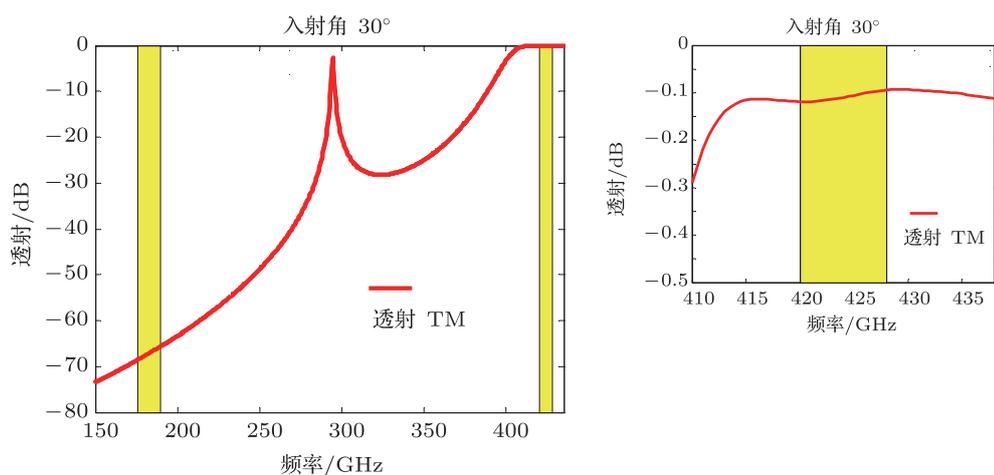


图6 在 TM 平面内,以 30° 入射时, FSS1# 滤波器的透射特性曲线,其中上面的小图显示透射带的局部放大图

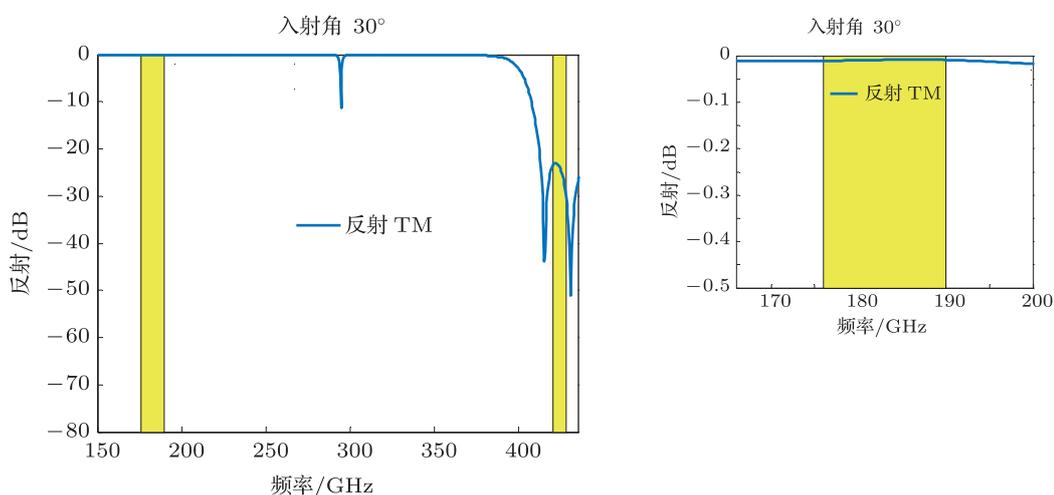


图7 在 TM 平面内,以 30° 入射时, FSS1# 滤波器的反射特性曲线,其中上面的小图显示反射带的局部放大图

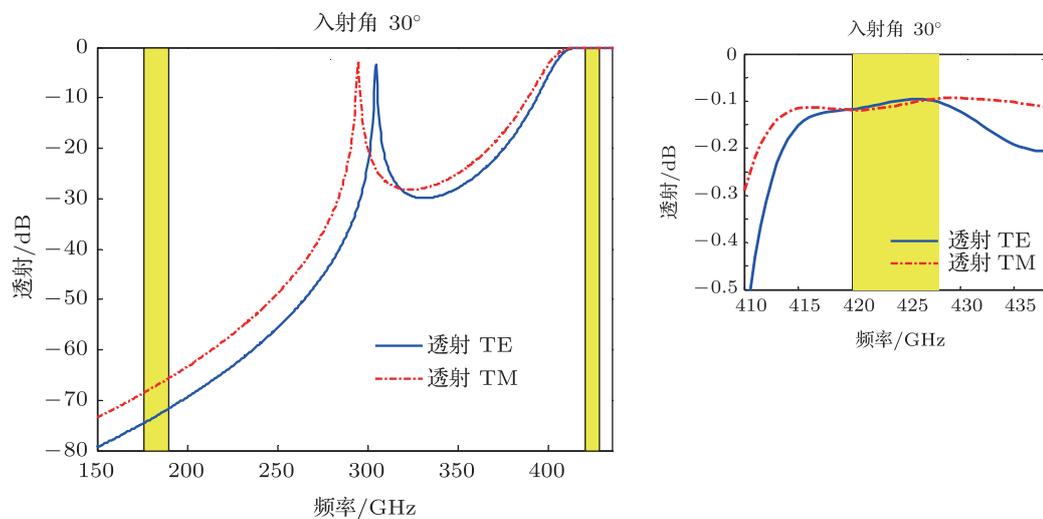


图8 在 TE 和 TM 平面内,以 30° 入射时, FSS1# 滤波器的双极化 (TE 和 TM) 透射特性曲线,其中上面的小图显示透射带的局部放大图

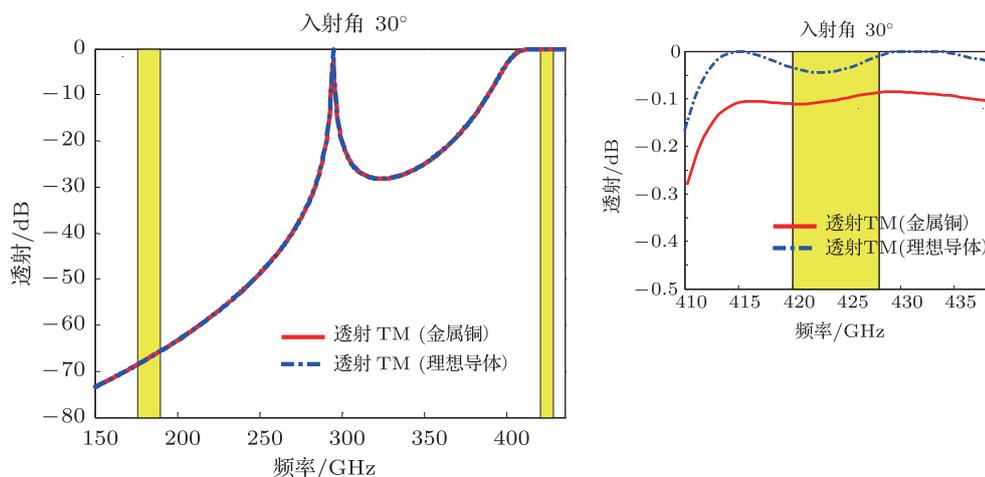


图9 当金属材料分别为铜和理想导体时, FSS 滤波器的透射特性曲线, 其中上面的小图显示透射带的局部放大图

最后对 FSS1# 滤波器进行误差敏感度的分析研究, 通过研究各个变量的变化对滤波器性能的影响, 为后面的加工工艺提出了要求, 这一步是加工实物时不可缺少的. 误差分析是基于一个参量变化, 其他参数不变的情况下进行的, 分别对周期单元孔径的边长、阵列的周期和金属的厚度进行了误差灵敏度的分析, 结果如表 2 所示.

表 2 各变量的误差灵敏度

参数	误差值/mm
边长 a 的误差	+/- 0.01
边长 b 的误差	+/- 0.01
周期的误差	+/- 0.02
金属厚度的误差	+/- 0.2

以上各变量的误差值是在满足系统性能指标要求的情况下得到的. 从表中可以看出, FSS1# 滤波器的性能对单元孔径边长的变化比较敏感, 相对来说, 对周期和金属板厚度的变化不太敏感, 另外, 在仿真设计中, 仿真模型采用的是理想的矩形孔径, 但实际上, 由于现有加工工艺的限制, 实际加工的器件中矩形孔径不可能做到数学上理想的直角, 因此最终加工出来的器件不可避免的会出现圆角, 会对 FSS 滤波器的滤波频率特性产生影响, 造成加工出来的滤波器的性能偏离理想的仿真值. 所以由圆角引起的性能偏离也需通过仔细的建模来考虑, 其圆角模型如图 10, 通过建模仿真可知, 当圆角的半径 r 在小于 0.06 mm 范围内时, 制作的滤波器的性

能仍满足系统的性能要求, 根据现有的加工工艺, 这些加工误差的限制要求是完全能达到的.

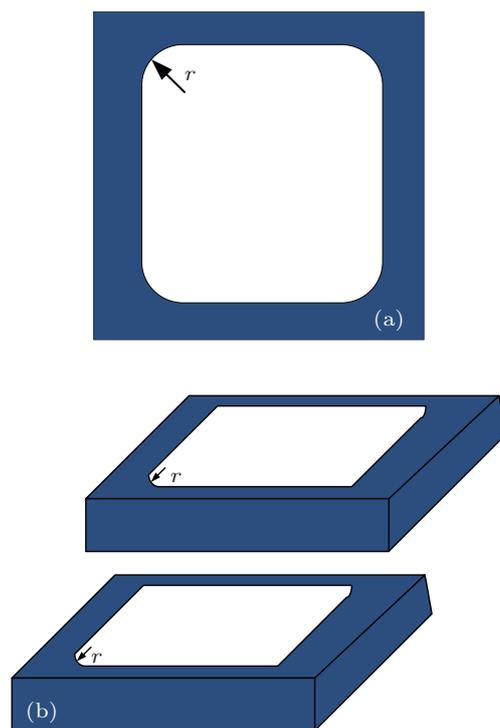


图 10 实际加工的圆角模型 (a) 正视图; (b) 侧视图

5 结论

本文采用波导阵列结构设计了应用于风云四号同步轨道气象卫星上的低损耗频率选择性双极化滤波器, 详细阐述了其滤波原理, 并给出了设计这类滤波器的参数选择公式及迭代设计过程, 为实

际工程中设计该类滤波器提供了一个设计参考. 仿真计算结果显示, 通过结构参数的优化设计, 在亚毫米波段下这种结构的 FSS 滤波器在较大的入射

角度下仍具有好的性能, 在透射带和反射带中的损耗都较低, 其满足系统的性能指标, 适合于空间探测器的应用.

- [1] Cahill R 1982 *Electron letter* **18** 1060
 [2] Parker E A 1983 *ICAP IEEE* **83** 459
 [3] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces Theory and Design* (New York: Wiley) p28
 [4] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王姗姗, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
 [5] Cahill R, Hall W J, Martin R J 1994 *Spacecraft Antennas* **8** 1
 [6] Cahill R, Gamble H S 2001 *24th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Surfaces* European Space Agency Holland, May, 2001 p103
 [7] Lo Y T, Lee S W 1988 *Antenna Handbook* (New York: VanNostrand Reinhold Co) p13
 [8] Huang J, Lee S W 1991 *IEEE Int. APS Symp.*, Ontario, Canada, June 24–28, 1991 p119
 [9] Chen C C 1971 *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* **19** 475
 [10] Chen J C 1991 *JPL TDA Progress Rep.* **42** 104

Design of waveguide array frequency selective surface filter in sub-millimeter wave band

Cui Guang-Bin[†] Miao Jun-Gang Zhang Yong-Fang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

(Received 11 March 2012; revised manuscript received 2 August 2012)

Abstract

In order to meet the low insertion loss of transmission band and the low reflection loss of reflection band in detection technology of millimeter and sub-millimeter wave, in this paper, we design a frequency selective surface (FSS) filter based on waveguide array structure in the sub-millimeter wave band. Through optimizing the structural parameters, the FSS filter overcomes the drawback that the insertion loss increases at large angle of incidence. Meanwhile the FSS filter is not sensitive to the change of angle of incidence, these make it satisfy the requirements of particular engineering. In addition, the frequency responses of the FSS filter to TE and TM are the same, so it can detect the dual-polarized radiation signals simultaneously. Firstly, we give initial values of structural parameter according to the indicator. Secondly, we simulate and optimized the structure by simulation software. Finally, a new FSS filter with a low insertion loss is given. Simulation results show that the FSS filter meets the system requirements and overcomes the shortcoming of large insertion loss at a large incident angle. Then, we analyze the main source of the insertion loss in transmission band. An error sensitivity analysis of structural parameters of FSS filter is also given, which provides a reference for fabrication.

Keywords: sub-millimeter wave, quasi-optical system, frequency selective surface

PACS: 41.20.-q, 42.15.Eq, 41.20.Jb

[†] E-mail: cgbsdgl@126.com