

应用于微小卫星平台的太赫兹分频技术研究

王婧^{1,2}, 张升伟^{1*}, 孟进¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 微波遥感重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要: 基于微小卫星组网编队技术, 气象预报工作在时间和空间分辨率方面得到大幅提升. 为了完成微小卫星大气微波探测仪射频部分的频率分离功能, 采用体积小、插损小的波导双工器来实现. 采用等效电路法和模式匹配法优化参数, 设计了一款 166/183 GHz 双工器. 考虑到实际加工情况, 仿真过程中具体分析膜片陡直度和膜片厚度对双工器性能的影响. 加工过程中, 通过对器件分割方式和加工缺陷的分析, 不断优化加工方案, 最终得到满意的加工样品. 经测试, 166/183 GHz 双工器的带内插损小于 1.5 dB, 回波损耗大于 15 dB, 带外抑制高于 27 dB 以上, 仿真结果与实测结果相吻合, 证明了双工器设计方法的可行性.

关键词: 微小卫星; 太赫兹分频技术; 波导双工器; 模式匹配法; 实验分析

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A

Research on terahertz frequency division technique applied to microsatellite platform

WANG Jing^{1,2}, ZHANG Sheng-Wei^{1*}, MENG Jin¹

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the microsatellite constellation, meteorological forecast has been greatly improved in terms of temporal and spatial resolution. To separate the frequency in RF front-end system of the microsatellite atmospheric microwave sounder, a waveguide diplexer with compact size and low insertion loss is adopted. A 166/183 GHz diplexer was designed by using equivalent circuit method and mode-matching technology. According to the actual situation of machining, the effects of iris steepness and iris thickness on the performance of the diplexer are analyzed in the simulation. Through the analysis of the split-block realization and the machining defects, the way of machining is continuously optimized to obtain a satisfactory machining sample. The maximum measured insertion loss is 1.5 dB, the minimum measured return loss is 15 dB, and the measured out-band rejection is higher than 27 dB. The simulation results are consistent with the measured results, which proves that the diplexer design method is feasible.

Key words: microsatellites, terahertz frequency separation technique, waveguide diplexer, mode-matching technology, experimental analysis

PACS: 87.50.U-, 84.40.Az

引言

对台风、暴雨等极端天气的监测, 要求达到 30 min 的时间分辨率和 20 km 左右的空间分辨率, 而

极轨气象卫星和同步轨道气象卫星由于客观原因的限制, 很难达到这个要求^[1-2]. 基于微小卫星组网编队技术, 大大提高了气象预报的时间和空间分辨率. 针对大气温度与湿度的探测, 搭载在微小卫星上的

收稿日期: 2018-05-18, 修回日期: 2018-12-20

Received date: 2018-05-18, revised date: 2018-12-20

基金项目: 青年人才托举工程(2015QNR001), “十三五”装备预研领域基金(6140136010116ZK24001)

Foundation items: Supported by the Young Elite Scientist Sponsorship Program by CAST (2015QNR001), and the 13th Five-Year Equipment Pre-research Field Fund (6140136010116ZK24001)

作者简介 (Biography): 王婧(1990-), 女, 山西太原人, 博士研究生. 主要研究领域为微波遥感、太赫兹波导器件. E-mail: wangjingcoral@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhangshengwei@mirslab.cn

大气微波探测仪选择的频点为 89 GHz、118 GHz、166 GHz 和 183 GHz,因此实现探测仪射频部分的分频技术具有重要的意义.

风云四号静止轨道气象卫星搭载的毫米波/亚毫米波探测仪,采用 3 个波导阵列结构的频率选择性滤波器来分离 54 GHz、118 GHz、183 GHz、380 GHz 和 425 GHz 五个频段,该频率分离方案如图 1 所示,滤波器的插入损耗仿真结果小于 0.4 dB^[3-4]. 由于随着入射角增大,准光馈电网络的空间占用减小,但是滤波器的设计难度加大,所以要在占用空间和设计难度两者之间进行折中. 而且准光器件结构复杂、安装精度要求高,不适合于微小卫星平台搭载.

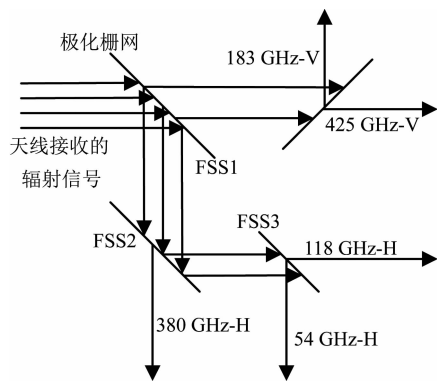


图 1 基于频率选择性滤波器和栅网的分频技术
Fig. 1 Frequency separation technique based on the frequency selective surface filters and wire grids

风云三号 (FY-3) 卫星是我国第二代极轨气象卫星, FY-3C 和 FY-3D 星中搭载的微波湿度计工作频点为 89 GHz、118.75 GHz、150 GHz 和 183.31 GHz. 该湿度计包含两套天线装置, 89 GHz 和 118.75 GHz 接收机共用一个抛物线反射面, 150 GHz 和 183.31 GHz 接收机共用一个抛物线反射面, 采用极化栅网再实现两个频率的分离^[5], 如图 2 所示. 该分频技术同样使用了准光学器件, 而且占用空间较大, 同样不适用于微小卫星平台.

针对大气微波探测仪, 首先利用波导极化分离器分离水平极化波和垂直极化波, 然后通过两个双工器进行各频段的频率分离, 如图 3 所示. 该分频技术采用多频段共馈源、共用天线反射面技术, 实现设备小型化, 并且分频器件结构简单, 集成度高, 更适用于微小卫星搭载. 因此 89/118 GHz 和 166/183 GHz 这两个双工器成为该分频技术的重要组成部分. 由于两个双工器的设计、加工和测试方法类似, 所以本文着重研究 166/183 GHz 频率高的这款双

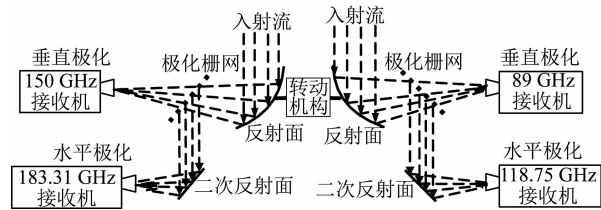


图 2 基于不同天线反射面和栅网的分频技术
Fig. 2 Frequency separation technique based on the different antenna reflectors and wire grids

工器.

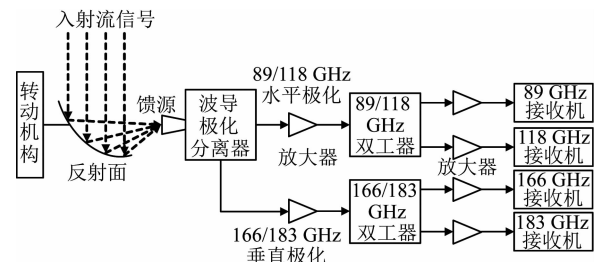


图 3 基于双工器和波导极化分离器的分频技术
Fig. 3 Frequency separation technique based on duplexers and waveguide polarization separators

双工器具有将一个信号频谱分成两个频率范围的功能, 它被广泛应用于 4G 无线通信、雷达、宽带和 WLAN 等不同的领域. 文献[6]将双工器运用于 4G 无线通信系统中, 该双工器包含两个基于三角形开环谐振器的带通滤波器, 其窄带特性更加适用于当代无线通信系统. 文献[7]设计的 L/X 波段双工器基于低温共烧陶瓷工艺, 由 L 波段低通滤波器和 X 波段带通滤波器组成, 该双工器尺寸小、电气性能指标高, 在雷达领域内得到应用. 文献[8]提出一种采用 U 型槽线谐振器和双模槽线谐振器的双工器, 可以提高各频段之间的隔离度, 在宽带和 WLAN 领域得到有效应用.

常见的双工器有微带双工器, 基片集成双工器, 介质双工器, 波导双工器等. 文献[9]采用微带形式设计了一种基于开路/短路耦合线的新型双工器, 工作频点为 1.8 GHz 和 2.1 GHz, 带内插损为 2 dB, 隔离度大于 40 dB. 文献[10]描述了一种 X 波段基片集成波导双工器, 其带内插损为 2.1 dB, 带外抑制可达 37.5 dB. 文献[11]设计了一种基于耦合谐振器的波导双工器, 两个通带的中心频点为 9.5 GHz 和 10.5 GHz, 双工器的最小插损为 0.43 dB, 最大回波损耗为 22 dB, 性能良好. 国外立方星 TEMPEST 搭载的微波辐射计, 其工作频率在 90 ~ 183 GHz 之

间,采用波导器件实现射频部分的频率分离^[12].考虑到实现体积、双工器性能等方面的要求,本文采用波导双工器来实现大气微波探测仪的频率分离功能.文献[13]同样采用波导双工器实现分频,由于工作频率达到 220 ~ 325 GHz 这样的高频,通带内的平均插损达到 8 dB 左右,双工器性能恶化严重,因此在高频段,波导双工器的合理设计与加工有着重要的意义.

在之前的工作中^[14],已经对波导双工器的设计优化方法进行详细的论述,采用等效电路法求得两个带通滤波器的初始参数,然后通过模式匹配法来优化整个双工器参数^[15-20].之前的工作只进行了仿真验证,并没有进行加工与测试.本文从实际加工的角度,仿真分析了膜片陡直度和膜片厚度对双工器性能的影响,并且根据结论对机械加工工艺提出合理的要求.通过加工方案的改进,得到了满意的加工样品,测试结果与仿真结果相吻合,充分验证了波导双工器设计与优化方法的可行性.

1 双工器设计

基于气象监测对大气微波探测仪系统的要求,166/183 GHz 双工器的性能指标要求如表 1 所示.

表 1 166/183 GHz 双工器性能指标
Table 1 Performance indicators of the 166/183GHz diplexer

参数	指标要求
通带 1 频率范围	(165.5 ± 1.5) GHz
通带 2 频率范围	(183 ± 8) GHz
最大带内插损	1.5 dB
最小带外抑制(通带 1)	20 dB, 175 ~ 191 GHz
最小带外抑制(通带 2)	20 dB, 164 ~ 167 GHz
输入输出端口最小回波损耗	15 dB

166/183GHz 双工器的结构如图 4 所示,该双工器包含两个电感膜片耦合的带通滤波器和用于连接滤波器与输入端口的 H 面带膜片 T 形结.设计双工器的基础就是设计两个不同频率的带通滤波器,T 形结将两个带通滤波器和输入端口连接起来,通过对 T 形结参数的合理优化,从而达到阻抗匹配和增加两个带通滤波器隔离度的要求.

由于双工器的工作频段在 150 ~ 200 GHz 之间,输入输出端口选用标准波导口 WR5 ($a = 1.295$ mm, $b = 0.648$ mm).为了减小机械加工的难度同时增加膜片的可靠性,膜片厚度不能无限薄^[21],滤波

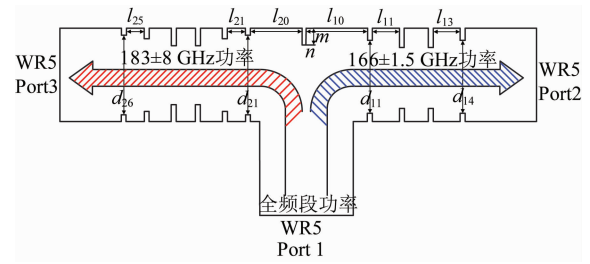


图 4 166/183 GHz 双工器结构图(包含功率流向)

Fig. 4 Structure diagram of 166/183 GHz diplexer with the direction of power flow

器的膜片厚度设定为 0.4 mm.双工器的理论分析和参数的优化过程已在之前的文章^[14]中进行论述,主要有以下几个步骤:

1) 等效电路法求滤波器参数初值

选择切比雪夫型低通原型滤波器,根据双工器性能指标中对带外抑制、带宽、阻带频率以及带内纹波系数的要求,计算出 166 GHz 和 183 GHz 两个滤波器的阶数 n 分别为 3 阶和 5 阶.之前为了提高滤波器的性能,两个滤波器的阶数 n 分别为 7 阶和 9 阶,现在降低了阶数,通过参数优化提高滤波器性能,这样更便于加工,减少了加工的累积误差.查表求得归一化元件值 $g_0 \sim g_{n+1}$.然后进行频率变换,可得到阻抗变换器的阻抗变换系数 $K_{p,p+1}$ ($p = 0, 1, 2, \dots, n$),并计算等效电路中各并联电抗值 $X_{p,p+1}$ ($p = 0, 1, 2, \dots, n$).最后根据集总参数电路模型与电感膜片耦合滤波器几何尺寸之间的关系,得到滤波器的参数 l_p 和 d_q ($p = 1, 2, \dots, n; q = 1, 2, \dots, n + 1$).通过等效电路法计算得到的滤波器参数初值,其精度很低,所以要进一步优化.

2) 模式匹配法优化双工器参数

模式匹配法的理论基础就是通过电场和磁场切向分量在不连续面上的匹配来求得双工器的广义散射矩阵,从而进行参数优化.本文设计的双工器包含两种不连续单元,即 H 面双边不连续单元和 H 面带膜片 T 形结单元.通过切向电磁场匹配得到两个基本单元的广义散射矩阵,然后通过两端口与两端口级联,两端口与三端口级联,最后得到整个双工器的广义散射矩阵 S .

将等效电路法得到的两个滤波器参数作为优化初值,根据广义散射矩阵 S 来对双工器进行优化,优化算法采用随机优化算法求极值,使目标函数 $f_d(Q)$ 为最小,如式(1)所示.

$$\begin{cases}
 f_d(Q) = \sum_i (X_i^1)^2 + \sum_i (Y_i^1)^2 + \sum_j (Z_j^1)^2 \\
 \quad + \sum_i (X_i^2)^2 + \sum_i (Y_i^2)^2 + \sum_j (Z_j^2)^2 \\
 X_i^1 = \begin{cases} \omega_{1i}(a_i - |20\lg S_{11}(f_i^1)|) & |20\lg S_{11}(f_i^1)| < a_i \\ 0 & |20\lg S_{11}(f_i^1)| \geq a_i \end{cases} \\
 Y_i^1 = \begin{cases} \omega_{2i}(|20\lg S_{21}(f_i^1)| - b_i) & |20\lg S_{21}(f_i^1)| > b_i \\ 0 & |20\lg S_{21}(f_i^1)| \leq b_i \end{cases} \\
 Z_j^1 = \begin{cases} \omega_{3j}(c_j - |20\lg S_{21}(f_j^1)|) & |20\lg S_{21}(f_j^1)| < c_j \\ 0 & |20\lg S_{21}(f_j^1)| \geq c_j \end{cases} \\
 X_i^2 = \begin{cases} \omega_{4i}(a_i - |20\lg S_{11}(f_i^2)|) & |20\lg S_{11}(f_i^2)| < a_i \\ 0 & |20\lg S_{11}(f_i^2)| \geq a_i \end{cases} \\
 Y_i^2 = \begin{cases} \omega_{5i}(|20\lg S_{31}(f_i^2)| - b_i) & |20\lg S_{31}(f_i^2)| > b_i \\ 0 & |20\lg S_{31}(f_i^2)| \leq b_i \end{cases} \\
 Z_j^2 = \begin{cases} \omega_{6j}(c_j - |20\lg S_{31}(f_j^2)|) & |20\lg S_{31}(f_j^2)| < c_j \\ 0 & |20\lg S_{31}(f_j^2)| \geq c_j \end{cases}
 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $i = 51, j = 30$ 分别是带内带外取的频点个数, f_i^1, f_j^1 和 f_i^2, f_j^2 分别是两滤波器带内带外所取频点, a_i 是最小回波损耗取 15 dB, b_i 是最大带内插损取 0.5 dB, c_j 是最小带外抑制取 20 dB, 权重 $\omega_{1i}, \omega_{2i}, \omega_{3j}, \omega_{4i}, \omega_{5i}, \omega_{6j}$ 都取 1, $Q = (m, n, l10 \dots, l13, d11 \dots, d14, l20 \dots, l25, d21 \dots, d26)$ 为双工器尺寸参数。

在双工器的优化中, 需要考虑到双工器的带内和带外特性, 所以目标函数 $f_d(Q)$ 的选取必须兼顾双工器的插入损耗、回波损耗和带外抑制特性。构建目标函数 $f_d(Q)$ 取最小, 目的在于使两个滤波器的带内回波损耗大于 15 dB, 带内插损小于 0.5 dB, 带外抑制大于 20 dB。

优化算法采用随机优化, 即在双工器尺寸参数 Q 的定义域内产生均匀分布的自然变量, 如式(2)所示, 然后带入目标函数求取目标值, 逐次比较, 更新最优值, 当目标函数小于 0.1 或者迭代次数大于 50000 时, 迭代终止, 求得双工器尺寸参数的最优值。该优化算法属于全域优化, 方法简单, 易于实现。

$$Q = Q_l + \text{random}(0,1)(Q_h - Q_l), \quad (2)$$

其中 Q_h 为双工器尺寸参数的上边界, Q_l 为双工器尺寸参数的下边界。

3) 有限元法验证双工器模型

HFSS(High Frequency Structure Simulator) 是基于电磁场有限元方法的全波三维电磁场仿真软件。通过模式匹配法优化得到 166/183 GHz 双工器参数

带入 HFSS 软件中进行仿真。通过不同方法的对比验证, 验证结果如表 2 和图 5 所示, 可以得出模式匹配法与有限元法的仿真结果相似, 证明了基于模式匹配法优化波导双工器的可行性。

表 2 166/183 GHz 双工器仿真结果对比

Table 2 Comparisons of 166/183GHz diplexer simulation results

仿真方法	最大带内插损/dB	最小回波损耗/dB	通带 1 最小带外抑制/dB	通带 2 最小带外抑制/dB
模式匹配法	0.036	20.932	29.65	32.895
有限元法	0.051	19.482	28.843	34.666

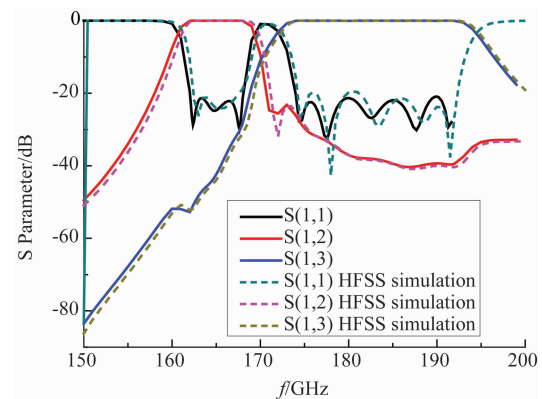


图 5 166/183GHz 双工器特性对比

Fig. 5 Property comparisons of the 166/183GHz diplexers

2 影响因素分析

166/183 GHz 双工器工作频段很高, 因此器件对加工精度要求很高, 并且实际的加工工艺也会对双工器的性能产生影响。在之前的工作中^[14], 详细分析了该双工器的误差灵敏度和金属表面材质对其性能的影响。仿真结果表明, 双工器对参数尺寸的敏感度较大, 因此加工精度应该保证在 ± 0.01 mm 以内, 并且实际金属表面材质会恶化双工器带内插损, 使其增大到 2 dB 左右。双工器的两个带通滤波器是基于电感膜片耦合而成, 因此电感膜片对双工器性能影响较大, 下面主要分析膜片陡直度和膜片厚度的影响。

在实际机械加工中, 受到现有加工工艺的限制, 双工器电感膜片壁陡直度不是绝对的 90° , 用铣刀加工谐振腔的时候存在一个圆倒角, 图 6 为倒角半径在 0.1 ~ 0.3 mm 之间变化对双工器性能影响对比图。由仿真结果可以看出, 倒角半径对通带的中心频率有一定的影响, 半径增大, 中心频率也随着增

大,带宽和双工器的其他特性基本保持不变. 倒角半径从 0.1 mm 变化到 0.2 mm 时,双工器的特性变化不大,但是半径从 0.2 mm 增加到 0.3 mm 时,中心频率明显增加,考虑到加工难度和为了保证双工器良好的性能,加工时采用半径为 0.2 mm 的倒角.

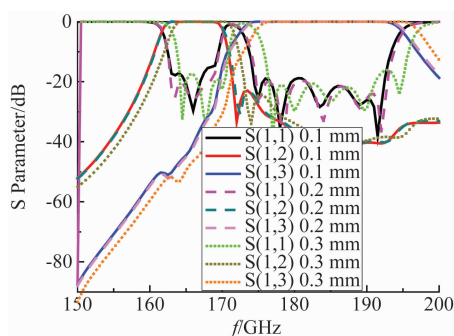


图6 不同倒角半径下双工器特性
Fig. 6 Properties of the diplexers with different fillet radii

在双工器参数优化中,为了减小加工难度,将电感膜片的厚度设定为 0.4 mm,但是受到加工精度的影响,膜片厚度也会发生变化,同时带来双工器性能的改变. 图 7 为膜片厚度在 0.35 ~ 0.45 mm 之间变化双工器 $S(1,2)$ 参数的变化曲线. 由仿真结果可知,随着膜片厚度增大,通带带宽变窄,中心频率几乎保持不变,但是带外抑制有所增加. 膜片厚度在 0.39 ~ 0.41 mm 之间变化时,双工器的性能基本保持不变,因此机械加工精度应该保证在 ± 0.01 mm 以内.

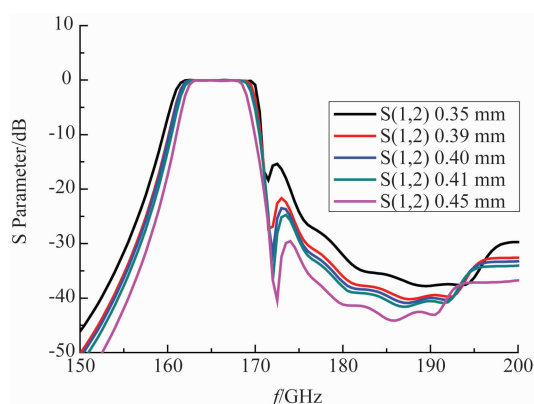


图7 不同膜片厚度下双工器的 $S(1,2)$ 参数
Fig. 7 $S(1,2)$ parameters of the diplexers with different iris thicknesses

3 加工与测试

采用机械加工的形式,加工精度应保证在 ± 0.01

mm 之内,铣刀半径选择 0.2 mm,加工完成后在腔体表面进行镀金操作. 为了便于铣刀加工,需要将双工器切割成两部分进行加工. 在加工的过程中,尝试了两种不同的切割方法,第一种将双工器沿着 H 平面从中间切割,第二种沿着 H 平面切割,将双工器分成本体和盖板两部分. 第一种方法切割了电力线,对场分布产生影响,引起能量的泄漏,如果存在封装不严密、对位不精确的情况,将大大影响整个双工器的性能^[22],同时测试结果也证明了这一点,因此采用第二种切割方式. 第一次加工出现了加工缺陷,如图 8 所示,每一个倒角的位置都出现一个凹陷处,且面积较大,导致双工器分频性能完全丧失. 之后改进工艺进行重加工,加工实物图如图 9 所示.

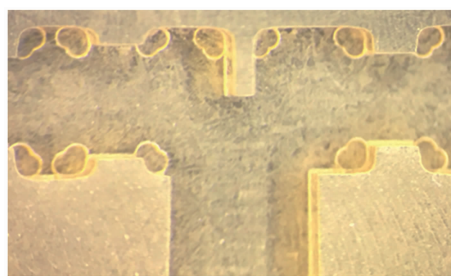


图8 首次加工双工器内腔缺陷
Fig. 8 Defects of the the diplexer cavity at the first machining

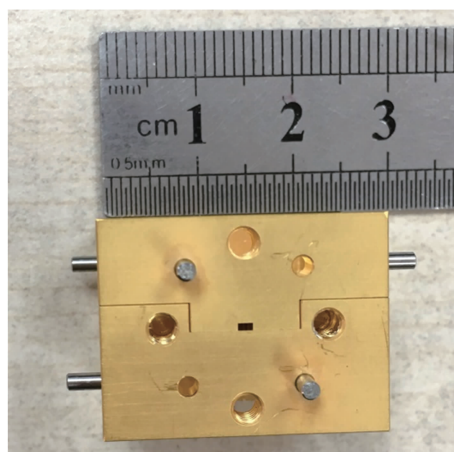


图9 改进加工之后波导双工器实物图
Fig. 9 Photograph of the waveguide diplexer after machining improvement

测试平台包括矢量网络分析仪 (Keysight N5247A) 和频率扩展模块,可将测试频率扩展到 220 GHz,来测量双工器散射参量频域特性,系统测试端口为标准矩形波导口 WR5.

为了更好地对双工器实际情况进行仿真,使用

HFSS 软件仿真时,将膜片与腔体接触的倒角半径设置成 0.2 mm,对于金属表面材质不能选用默认的理想导体(PEC),设置为材料金,厚度为 0.003 mm,表面粗糙度为 0.001 mm,然后再进行全波仿真分析,仿真结果如图 10 和表 3 所示.利用矢量网络分析仪对加工好的双工器进行测试,测试结果如图 10 和表 3 所示.

表 3 166/183 GHz 双工器仿真和测试结果

Table 3 Simulation and measurement results of 166/183 GHz diplexer

数据来源	最大带内插损/dB	最小回波损耗/dB	通带 1 最小带外抑制/dB	通带 2 最小带外抑制/dB
仿真结果	1.14	20.668	27.341	37.078
测试结果	1.474	15.173	27.611	37.672

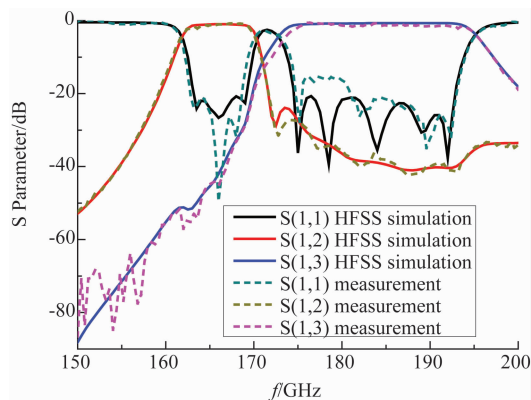


图 10 166/183 GHz 双工器仿真和测试特性
Fig. 10 Properties of the 166/183GHz diplexer based on simulation and measurement

从仿真和测试结果来看,两者相差不大,散射参数的曲线也基本吻合.对于带内插损和回波损耗而言,实测结果比仿真结果略差一些,可能的原因有:1)双工器工作频段较高,器件对尺寸灵敏度很大,加工精度会很大程度影响器件的性能;2)上下两腔可能封装不严密,部分能量可能会泄漏,从而导致插损增大;3)器件表面粗糙度以及金属镀膜质量也会影响其性能;4)测试过程中带来的误差.总体测试结果而言,两个通带内的最大插入损耗小于 1.5 dB,输入端口的最小回波损耗大于 15 dB,带外抑制也达到了 27 dB 以上,这些指标都满足系统要求.

4 结论

针对微小卫星大气微波探测仪,文本采用等效电路法和模式匹配法优化设计了 166/183 GHz 波导

双工器,实现了探测仪射频前端的频率分离功能.在仿真验证阶段,同时考虑到实际加工对器件的影响,具体分析了膜片陡直度和膜片厚度对双工器性能的影响,为了保证双工器的良好性能,选用半径为 0.2 mm 的铣刀进行加工,加工精度应保证在 ± 0.01 mm 之内.通过加工与测试,166/183 GHz 双工器的带内插损小于 1.5 dB,回波损耗大于 15 dB,两通带的带外抑制都达到 27 dB 以上,满足系统的性能指标,体积较小,适合于微小卫星平台的应用.

References

- [1] Reising S C, Gaier T C, Padmanabhan S, et al. Microwave and millimeter-wave radiometers for CubeSat deployment for remote sensing of the earth's atmosphere[C]. *Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 2014 39th International Conference on. *IEEE*, 2014: 1-1.
- [2] Selva D, Krejci D. A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation[J]. *Acta Astronautica*, 2012, **74**:50-68.
- [3] CUI Guang-Bin, MIAO Jun-Gang, ZHANG Yong-Fang. Design of waveguide array frequency selective surface filter in sub-millimeter wave band[J]. *Acta Physics Sinica* (崔广斌, 苗俊刚, 张勇芳. 亚毫米波段波导阵列结构频率选择性滤波器设计. *物理学报*), 2012, **61**(22):224102-224102.
- [4] CUI G B, ZHAO H B, ZHANG Yong-Fang, et al. A millimeter and sub-millimeter wave frequency selective surface beamsplitter for geostationary orbit microwave radiometers[J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(11):114101.
- [5] ZHANG Yu, ZHANG Sheng-Wei, WANG Zhen-Zhan, et al. Technology development of atmospheric humidity sounding of FY-3 satellite[J]. *Aerospace Shanghai* (张瑜, 张升伟, 王振占, 等. FY-3 卫星大气湿度微波探测技术发展. *上海航天*), 2017, **34**(4): 52-61.
- [6] Salehi M R, Keyvan S, Abiri E, et al. Compact microstrip diplexer using new design of triangular open loop resonator for 4G wireless communication systems[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2016, **70**(7): 961-969.
- [7] Wang Z, Lai J, Bu S, et al. A compact quasi-lumped LTCC diplexer for radar application[C]. *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2010 International Conference on. *IEEE*, 2010: 860-863.
- [8] Deng H, Zhao Y, He Y, et al. Compact diplexer with slot-line resonators for wideband and WLAN applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(11): 2480-2484.
- [9] Feng W, Hong M, Che W. Microstrip diplexer design using open/shorted coupled lines[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2016, **59**:123-127.
- [10] Sirci S, Martínez J D, Vague J, et al. Substrate integrated waveguide diplexer based on circular triplet combline filters[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, **25**(7):430-432.
- [11] Skaik T F, Lancaster M J, Huang F. Synthesis of multiple output coupled resonator circuits using coupling matrix optimisation[J]. *IET microwaves, antennas & propagation*,

- 2011, **5**(9):1081–1088.
- [12] Reising S C, Gaier T C, Kummerow C D, *et al.* Overview of temporal experiment for storms and tropical systems (TEMPEST) CubeSat constellation mission [C]. *Microwave Symposium (IMS)*, 2015 *IEEE MTT-S International. IEEE*, 2015:1–4.
- [13] Skaik T, Lancaster M, Ke M, *et al.* A micromachined WR-3 band waveguide diplexer based on coupled resonator structures [C]. *Microwave Conference (EuMC)*, 2011 *41st European. IEEE*, 2011:770–773.
- [14] WANG Jing, ZHANG Sheng-Wei, LUO Yang-Jin, *et al.* Development of terahertz waveguide diplexer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王婧, 张升伟, 罗阳锦, 等. 太赫兹波导双工器研究. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(4): 493–500.
- [15] Zappelli L. An equivalent circuit for thick centered irises in rectangular waveguide [C]. *Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO)*, 2014 *International Conference on. IEEE*, 2014:1–4.
- [16] Alós E A, Zaman A U, Kildal P S. Ka-band gap waveguide coupled-resonator filter for radio link diplexer application [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, **3**(5):870–879.
- [17] ZHAO Xing-Hai, SHAN Guang-Cun, ZHENG Ying-Bin, *et al.* MEMS rectangular waveguide filter at 140 GHz [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵兴海, 单光存, 郑英彬, 等. 140 GHz MEMS 矩形波导滤波器. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(2): 165–169.
- [18] Leal-Sevillano C A, Cooper K B, Ruiz-Cruz J A, *et al.* A 225 GHz circular polarization waveguide diplexer based on a septum orthomode transducer polarizer [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(5): 574–583.
- [19] Yao H W, Abdelmonem A E, Liang J F, *et al.* Wideband waveguide and ridge waveguide T-junctions for diplexer applications [J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 1993, **41**(12):2166–2173.
- [20] Ofli E, Vahldieck R, Amari S. Novel E-plane filters and diplexers with elliptic response for millimeter-wave applications [J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2005, **53**(3):843–851.
- [21] DU Yi-Jia, BAO Jing-Fu, ZHAO Xing-Hai, *et al.* Terahertz micromachined waveguide filter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (杜亦佳, 鲍景富, 赵兴海, 等. 太赫兹微加工波导滤波器. *电子与信息学报*), 2012, **34**(3): 728–732.
- [22] Jastram N, Al-Tarifi M A, Boskovic L, *et al.* On the split-block realization of millimeter-wave ridge waveguide components [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018.