



·高功率微波技术·

基于三角形插片结构的紧凑型波导双工器^{*}

王孟杰, 王邦继, 伍鹏程, 倪泰来, 刘庆想

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘 要: 为满足高功率微波系统功率容量和紧凑化需求, 提出了一种新型波导双工器。选用过模波导进行设计以提高功率容量, 引入三角形金属插片结构谐振腔设计滤波器并在其间引入波导弯头以实现紧凑化。采用微波网络方法对滤波器进行理论分析并设计了两个工作在 X 波段的滤波器, 选择终端短路法确定 T 型结尺寸并组成双工器。利用电磁仿真软件建模优化和仿真模拟, 并对实物进行测试。仿真与测试结果表明, 该波导双工器单通道工作时的功率容量分别大于 0.11 GW 和 0.12 GW, 两个通道的传输效率分别大于 83.9% 和 82.4%, 通道间隔离度大于 20 dB。此外还可以根据需求增加滤波器阶数和引入更多的波导弯头以提高空间利用率。

关键词: 波导双工器; 过模波导; 波导弯头; 三角形插片; 功率容量

中图分类号: TN814

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220206

Compact waveguide diplexer based on triangular insert structure

Wang Mengjie, Wang Bangji, Wu Pengcheng, Ni Tailai, Liu Qingxiang

(College of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To meet the power-handling capacity and compactness needs of high-power microwave system, a novel waveguide diplexer is proposed. Overmoded waveguides are introduced to improve power-handling capacity. The resonant cavity with triangular metal insert structure is introduced to design waveguide filters and waveguide bends are introduced to achieve compactness. The theoretical analysis of filter design is carried out by using microwave network method and two X-band filters are designed. Furthermore, the diplexer is formed after the size of T-junction is determined by using terminal short-circuit method. The results of simulation and practical test show that power-handling capacity of each channel of the diplexer is greater than 0.11 GW and 0.12 GW respectively, the transmission efficiency is higher than 83.9% and 82.4% respectively, and the isolation is above 20 dB. Besides, not only can the filter order be increased according to the demand, but also more waveguide bends can be introduced to improve the space utilization.

Key words: waveguide diplexer, overmoded waveguide, waveguide bend, triangular inserts, power-handling capacity

随着高功率微波技术的快速发展, 高功率微波辐射系统在整个系统中发挥的作用日益为人们所重视。近年来, 相控阵天线由于具有增益高、辐射效率高以及可以实现波束快速扫描等优点而被许多学者研究并引入到高功率领域中, 设计了工作在不同频段的多种类型的高功率相控阵天线^[1-4]。在一些特殊的应用场合中, 要求高功率相控阵天线能够同时工作在两个频段, 即在保证较高功率容量的前提下实现对两个频段的波束扫描。一种直接的方法是增大天线的工作带宽, 但是目前的研究中高功率相控阵天线的工作带宽较窄, 直接增大工作带宽相对困难。另一种方法是利用微波功率合成器进行非相干合成, 即在天线馈电端加入利用滤波器等组成的双工器实现两路频率不同的高功率微波的耦合输出, 实现相控阵天线对两个频段的波束扫描。国防科学技术大学研制了一款工作在 X 波段的基于过模波导的高功率微波准相干功率合成器^[5], 滤波器主波导横向截面尺寸为 44 mm × 30 mm, 实现了中心频率分别为 9.3 GHz 和 9.6 GHz 的高功率微波的耦合输出, 提高了微波输出能力, 功率容量达到了 5.6 GW

* 收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-10-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目; 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC0567)

联系方式: 王孟杰, wangmj_work@163.com。

通信作者: 王邦继, bangjiw@163.com。

以上。然而,在高频情况下,高功率微波辐射系统将更加复杂和紧凑,对各类器件的尺寸和空间分布提出了更高的要求,而对适用于高功率微波系统的波导双工器实现紧凑化少见报道。本文提出了一种满足高功率微波系统应用需求的新型紧凑型波导双工器,由2个采用过模波导设计的带有波导弯头的三角形插片滤波器和1个T型结组成。设计并加工了工作在X波段的双工器,仿真和测试结果表明其具有良好的传输效率和较高的功率容量。

1 滤波器设计

波导弯头经常被用在各类微波系统内,包括多种类型,其中一类是斜角波导弯头,主要作用是改变电磁波的传播方向^[6-7],本文意在通过引入此类弯头以实现滤波器的紧凑化。然而已有研究表明,矩形波导滤波器设计大多采用E面金属插片或者H面金属插片设计方法^[8-11],此种结构通常在某一方向的尺寸过大,并且其中的谐振腔与耦合结构的分布不利于引入波导弯头,难以实现紧凑化。强流相对论速调管放大器(RKA)的输出谐振腔采用三角形金属插片结构设计以使矩形波导的基模分布更加均匀,本文将其引入到滤波器设计中。研究发现,与传统的矩形插片滤波器相比,在由此种谐振腔设计的多阶滤波器中,相邻谐振腔间的耦合结构可以实现分离,如图1所示。



Fig. 1 Comparison of conventional filter with rectangular insert and novel filter with triangular insert

图1 传统滤波器与新型滤波器对比

分离之后的耦合结构之间的间隔只起到连接作用,因此可引入波导弯头。对此时的滤波器进行分析:由于此处波导弯头的主要作用是连接前后相邻的三角形插片,共同组成滤波器中的耦合结构,所以加入波导弯头的滤波器与不加入弯头的滤波器本质上是同一个等效电路,而谐振腔则分布在不同方向上,可以在不影响性能的前提下将原来较长的波导滤波器改变为紧凑型滤波器。

根据以上原理,设计一个工作在X波段的波导双工器。由于在该波导双工器的应用场合中,滤波器的方波导不可能是标准波导(工作频率为8.20~12.5 GHz的标准BJ-100波导尺寸为:22.86 mm×10.16 mm),因此以波导横截面尺寸为 $a = b = 25$ mm为例,设计的波导双工器如图2所示。

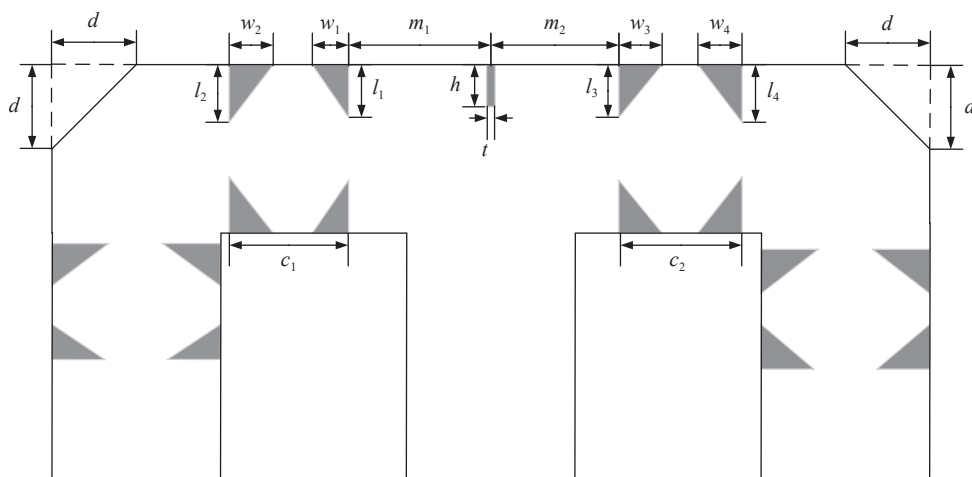


Fig. 2 Structure of the diplexer

图2 双工器结构图

为了准确设计过模波导滤波器以及对频率响应进行分析,采用微波网络方法进行研究与设计。根据 K 变换器理论可将低通原型滤波器电路转换成只含一种电抗元件的低通原型,再经过频率变换,即可得到带通阻抗匹配网络,其结构如图3所示: $K_{n,n+1}$ 是第 n 个和第 $n+1$ 个谐振单元间的阻抗变

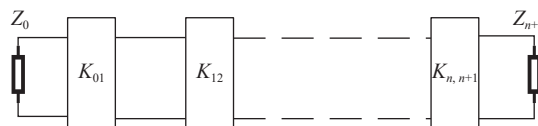


Fig. 3 Equivalent impedance matching network of a bandpass filter

图3 带通滤波器的等效阻抗匹配网络

换器,其作用是实现相邻谐振单元之间的耦合、匹配^[12];同时,若记 λ_g 为波导波长,则谐振单元为一段长度约为 $\lambda_g/2$ 的传输线。

记 λ_{g1} 、 λ_{g2} 和 λ_{g0} 分别为通带上下限和中心频率对应的波导波长, g_n 为低通原型元件值, Z_0 为特征阻抗,则滤波器各级 K 变换器可由阻抗变换公式得出

$$\frac{K_{01}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi W_\lambda}{2g_0g_1}} \quad (1)$$

$$\frac{K_{j,j+1}}{Z_0} = \frac{\pi W_\lambda}{2} \frac{1}{\sqrt{g_jg_{j+1}}}, \quad j = 1 \sim n-1 \quad (2)$$

$$\frac{K_{n,n+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi W_\lambda}{2g_ng_{n+1}}} \quad (3)$$

$$W_\lambda = \frac{\lambda_{g1} - \lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \quad (4)$$

记 $\bar{K}$ 为阻抗归一化结果,再根据散射参数法可知单个 K 变换器的 S 参数计算公式为

$$S_{21} = 20 \lg \left| \frac{j2\bar{K}}{1 + \bar{K}^2} \right| \quad (5)$$

利用计算机电磁仿真软件对耦合结构进行建模,与 K 变换器的 S 参数进行拟合,再对谐振单元进行建模及拟合,即可得到理想的滤波器模型。由于斜角波导弯头与前后的插片共同组成耦合结构,所以还需优化其尺寸。依据文献[7]结论斜角波导弯头的角度为 45° ,并且切角长度应与圆波导直径相同。然而通过仿真发现当切角长度 $d = 25$ mm时矩形斜角波导弯头的主模传输损耗较大,需要对其进行优化。优化对比结果如图4所示,当切角长度 $d = 15$ mm时波导弯头在9~10 GHz频段内的传输损耗最小,经过计算此时的主模传输效率达到99.6%以上。

根据上述方法和波导弯头尺寸初步设计中心频率在9.15 GHz和9.75 GHz的两个两阶滤波器,工作带宽各为100 MHz。三角形插片尺寸的选取直接影响滤波器的性能,主要分为深度 l (即向波导内延伸的长度)和长度 w ,在仿真软件中分析其各自的变化对滤波器性能影响的程度。图5给出了9.15 GHz滤波器设计过程中 l 和 w 各自变化时滤波器频率响应的部分结果(采用图2中的 w_3 、 l_3 、 w_4 、 l_4 进行标识),可以看出,三角形插片的深度 l 的变化相较于长度 w 的变化对滤波器性能的影响更大。

根据以上结论在仿真中合理选取和优化三角形插片的深度和长度可得9.15 GHz滤波器,同理可得9.75 GHz滤波器,其各自的传输系数和反射系数的频率响应结果如图6所示,两个滤波器的带内传输损耗均在0.1 dB以下,回波损耗均大于20 dB。

2 双工器设计

在完成滤波器设计的基础上,通过加载T型结构成双工器。文献[5]中滤波器的方波导尺寸较大,为了消除高次模,选用了尺寸相对较小的T型结,并在滤波器和T型结之间设计了阻抗变换器。而本文设计的滤波器方波导尺寸较小,高次模对传输性能的影响较小,因此T形结与滤波器的波导尺寸相同,无需设计阻抗变换器。由于T型结是一个三端口器件,但不能实现三个端口同时匹配,所以需要在T型结顶部插入一个宽为 t 、高为 h 的插片进行导波。选择终端短路法确定T型结两臂长度,为了保证两频段的滤波器通道具有良好的隔离度,一般需要调节两臂长度至各自中心频率约为 $\lambda_g/4$ 的奇数倍,使得各端口的终端短路,在公共端口处电场幅值反转,使能量都耦合到公共端口^[12]。在本次设计中,选取两臂长度约为两个滤波器各自中心频率的 $3\lambda_g/4$ 。此外,由于加工工艺对结构的要求,设计时采用三角形边缘带有圆角的插片模型,圆角半径根据实际加工需求分别设定为0.3 mm和1.5 mm,同

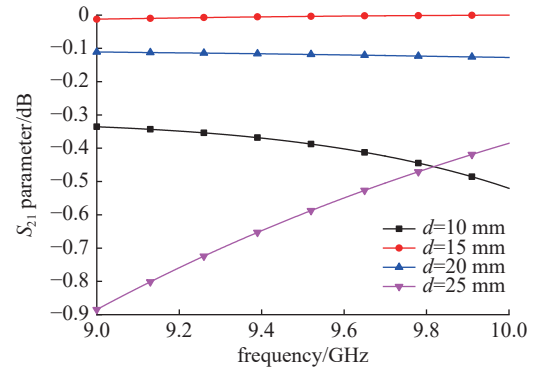
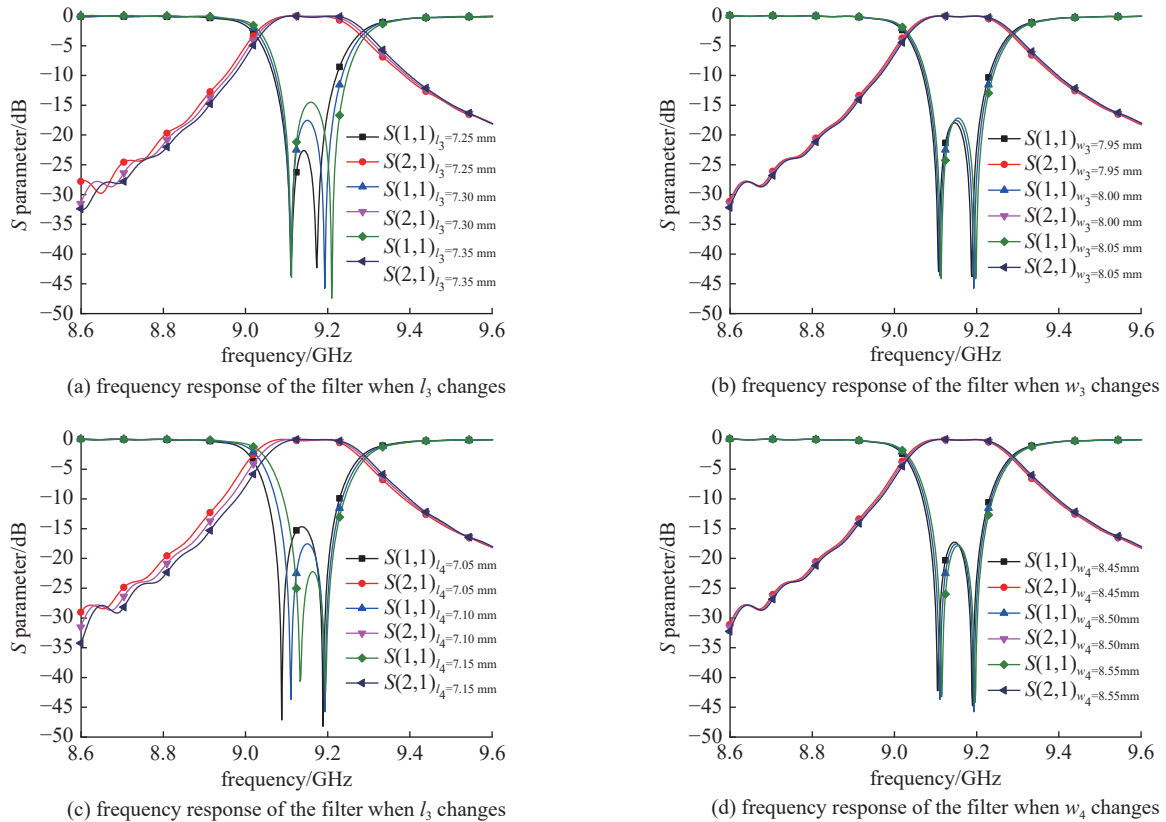


Fig. 4 Frequency response of the waveguide bend

图4 波导弯头的频率响应图

Fig. 5 Frequency response of the filter when l and w change图5 l 和 w 变化时滤波器的频率响应

时将金属插片和外围边界材料设置为具有 $1.6 \mu\text{m}$ 表面粗糙度的铝材质以模拟实际加工材质。最终的波导双工器仿真模型如图7所示。

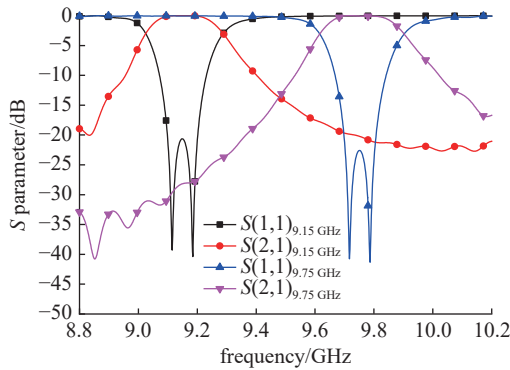


Fig. 6 Frequency responses of two filters with central frequencies of 9.15 GHz and 9.75 GHz

图6 中心频率分别为 9.15 GHz 和 9.75 GHz 滤波器的频率响应图

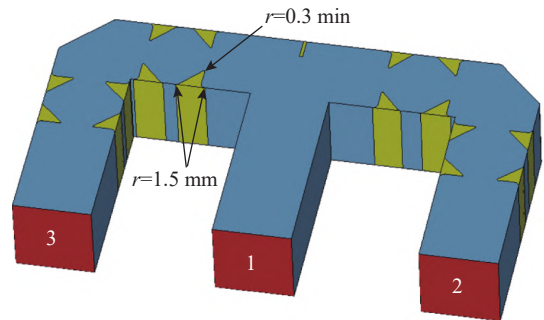


Fig. 7 Simulation model of the diplexer

图7 双工器的仿真模型

通过在仿真软件中建模和优化,得到了表1所示的一组双工器参数,对该组参数下的双工器频率响应进行仿真分析,结果如图8所示:在 $9.1 \sim 9.2 \text{ GHz}$ 内,回波损耗大于 20 dB ,传输损耗小于 0.28 dB ,传输效率高于 93.7% ;在 $9.7 \sim 9.8 \text{ GHz}$ 频段内,回波损耗大于 20 dB ,传输损耗小于 0.25 dB ,传输效率高于 94.4% 。两个通道的隔离度大于 20 dB 。

表1 优化参数值
Table 1 Optimized parameter values

(mm)

w_1	l_1	w_2	l_2	w_3	l_3	w_4	l_4	c_1	c_2	m_1	m_2	t	h
7.28	7.84	7.42	7.76	6.80	7.61	7.42	7.50	19.98	21.83	28.50	27.90	1.00	6.60

3 功率容量分析

本文选用过模方波导设计 X 波段波导双工器, 目的是提高整体的功率容量, 因此需要对双工器的功率容量进行分析。记 f 为频率, 单位为 MHz; E 为该频率下的击穿电场强度, 单位为 MV/m, 由 Kilpatrick 准则^[13] 可得真空状态下微波击穿电场强度为

$$f = 1.643E^2 e^{-8.5/E} \quad (6)$$

计算可得 9.15 GHz 和 9.75 GHz 下的微波击穿电场强度分别为 78.76 MV/m 和 81.17 MV/m。

记 P_C 为微波系统功率容量, $E_{\max}$ 为系统内电场强度最大值, 则有以下关系^[13]

$$P_C = \left(\frac{E}{E_{\max} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 \quad (7)$$

当端口平均输入功率为 0.5 W 时, 该双工器在 9.15 GHz 和 9.75 GHz 下的电场强度分布如图 9 所示, 9.15 GHz 频点系统内的最大电场强度为 5120 V/m, 9.75 GHz 频点系统内的最大电场强度为 5088 V/m, 场强最大点均位于谐振腔中心附近。由式(7)可得该双工器在两个频点下的功率容量分别大于 0.11 GW 和 0.12 GW, 满足高功率微波实用要求。

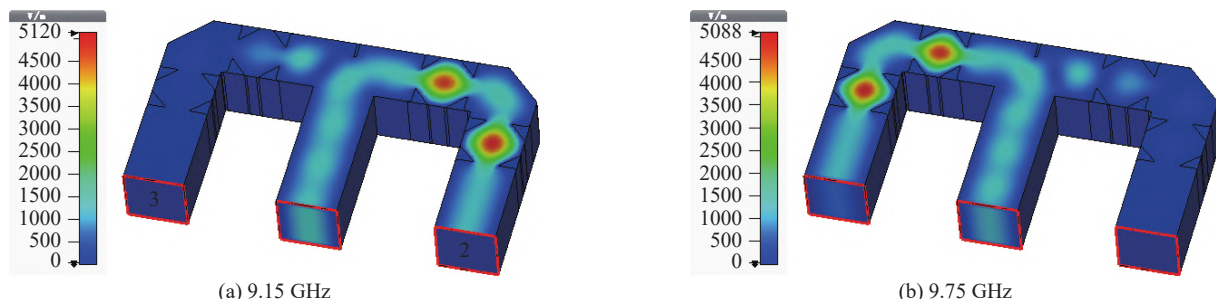


Fig. 9 Electric field distribution of the diplexer

图 9 电场强度分布图

4 实物加工与测试结果分析

该双工器的加工实物如图 10 所示。由于双工器采用过模方波导设计, 并且端口法兰为特制法兰, 因此实际测试时需要在双工器各端口和标准 BJ100 波导之间加载一段可以实现阻抗变换功能的波导法兰转换过渡段, 图 11 为组装后的测试照片。



Fig. 10 Photo of the diplexer

图 10 双工器的实物照片



Fig. 11 Photo of the diplexer test

图 11 双工器的测试照片

图 12 给出了仿真与测试的双工器频率响应, 可以看出: 实际测试与仿真得到的双工器频率响应吻合度较好; 9.1~9.2 GHz 频段内回波损耗大于 17 dB, 传输损耗小于 0.76 dB, 传输效率高 83.9%, 9.7~9.8 GHz 频段内回波损耗大于 20 dB, 传输损耗小于 0.84 dB, 传输效率高 82.4%, 两通道隔离度大于 20 dB。实际测得的传输损耗与仿真

值仍有偏差,主要原因有:(1)腔体内表面电阻引入了一些损耗,同时部分表面粗糙度可能未达到 $1.6\text{ }\mu\text{m}$;(2)测试时引入了测试附件,使得传输损耗增大;(3)器件对接以及封装不严密导致少量电磁能量泄露。表2给出了本文设计的双工器与文献[8-10]中已发表的E面和H面插片结构双工器的性能参数对比结果,可以看出,相较于传统矩形插片结构的双工器,三角形插片结构双工器的传输损耗较小,表现出了较好的性能,能够很好地应用在实际工程中。

5 结 论

本文利用理论分析、软件仿真和实物加工测试的方法,研究并设计了一款结构紧凑并且适用于高功率微波领域的新型波导双工器。该双工器工作在X波段,过模波导横截面尺寸为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,通过引入三角形金属插片谐振腔设计波导滤波器,实现相邻谐振腔之间的分离,在谐振腔之间引入波导弯头将其分布在不同方向以实现双工器的紧凑化,通过仿真计算,该双工器的各路传输效率均大于93.7%,功率容量均在0.11 GW以上。对双工器实物进行测试,结果表明各路传输效率均大于82.4%。此外,该双工器还可以推广至更多阶数,并根据实际需求加载多个波导弯头以提高系统的空间利用率,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Guo Letian, Huang Wenhua, Chang Chao, et al. Studies of a leaky-wave phased array antenna for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2366-2375.
- [2] Liang Yuan, Zhang Jianqiong, Liu Qingxiang, et al. High-power radial-line helical subarray for high-frequency applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4034-4041.
- [3] Yu Longzhou, Yuan Chengwei, He Juntao, et al. Beam steerable array antenna based on rectangular waveguide for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 535-541.
- [4] 秦洪才, 袁成卫, 宁辉, 等. 高功率平板波导螺旋阵列天线设计[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 023002. (Qin Hongcai, Yuan Chengwei, Ning Hui, et al. Design of high power helical array antenna fed from planar waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 023002)
- [5] 李国林, 舒挺, 袁成卫, 等. 基于过模波导的高功率微波准相干功率合成器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2658-2662. (Li Guolin, Shu Ting, Yuan Chengwei, et al. X-band quasi-coherent power combiner based on overmoded waveguides for high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2658-2662)
- [6] 戚蓝月. Ka波段模式变换器与波导弯头的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 8-10. (Qi Lanyue. Research on Ka-band mode converter and waveguide bend[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 8-10)
- [7] 杨同斌. 大功率太赫兹波传输器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 7-10. (Yang Tongbin. Research on electronic optics system and backward wave oscillator based on carbon nanotube cold cathode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 7-10)
- [8] Tao Shen, Zaki K A, Dolan T G. Rectangular waveguide duplexers with a circular waveguide common port[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(2): 578-582.
- [9] 张本全, 王锡良, 阮颖铮. K_u 波段波导型双工器的研制[J]. *通信学报*, 2004, 25(3): 161-166. (Zhang Benquan, Wang Xiliang, Ruan Yingzheng. Design of K_u -band waveguide duplexer[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(3): 161-166)
- [10] 高晓艳, 段江年, 李鸿斌, 等. 一种Ka频段波导双工器设计与验证[C]//2019年全国天线年会. 2019: 2174-2177. (Gao Xiaoyan, Duan Jiangnian, Li Hongbin, et al. Design and test of a Ka band duplexer[C]//2019 National Conference on Antennas. 2019: 2174-2177)
- [11] Zhang Yanqiu, Zhang Bo, Murong Haoding, et al. Design of 83GHz rectangular waveguide E-plane diaphragm bandpass filter[C]//13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). 2020: 1-3.
- [12] 张宇航. 双频高功率微波合成技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 14-18, 45-48. (Zhang Yuhang. Research on dual-frequency high power microwave synthesis technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 14-18, 45-48)
- [13] 赵玮琛, 张政权, 张健穹, 等. 侧馈式紧凑型扁波导螺旋阵列天线的设计[J]. *电子元件与材料*, 2018, 37(6): 78-82. (Zhao Weichen, Zhang Zhengquan, Zhang Jianqiong, et al. Design of helical array antenna fed from compact side-feed slab waveguide[J]. *Electronic Components and Materials*, 2018, 37(6): 78-82)

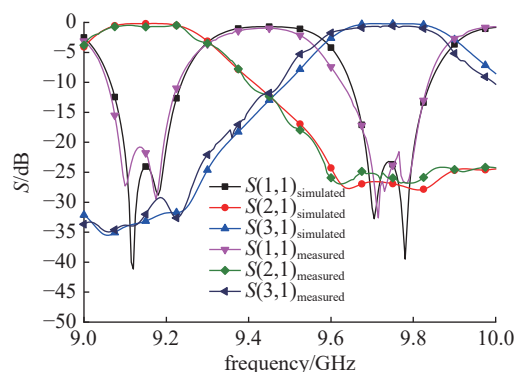


Fig. 12 Frequency response of the duplexer

图 12 双工器的频率响应图

表 2 双工器性能参数对比

Table 2 Comparison of duplexer performance

reference	insert structure	return loss/dB	insertion loss/dB
[8]	E-plane	>15	<2
[9]	H-plane	>20	<1
[10]	H-plane	>19	<0.8
this work	triangle	>17	<0.84