

DING Jiangqiao, JIANG Shenzhou, CHENG Jiasen, JIANG Luying, ZHU Haotian. Hybrid Network Based Broadband Diplexer Technology for Terahertz Space Exploration Systems (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(3): 776–784. CSTR:32142.14.cjss.2025–0098. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0098

太赫兹空间探测系统中混合网络型 宽带双工器技术*

丁江乔^{1,2} 蒋深舟^{1,2} 成加森²
蒋露颖² 朱皓天³

1(南京信息工程大学天长研究院 南京 210044)

2(南京信息工程大学电子与信息工程学院 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

3(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘要 太赫兹空间探测系统正向多通道、多谱段和超宽带方向快速发展. 提出基于波导混合网络型的 WR-4 频段全频带双工器, 用于双频段固态系统中本振信号的合路泵浦. 该双工器基于混合网络的防反射、高隔离耦合等特性, 结合高阶数低通滤波器级联实现, 整体结构鲁棒, 且易于计算机数控 (CNC) 制备并系统集成. 研究内容主要包括 WR-4 全频带覆盖混合网络型双工器的原理设计, 分立单元器件混合器、滤波器的电路设计, 混合网络型双工器的电路综合、优化及其 E 面分裂式 CNC 铣削加工. 实测结果表明, 该 WR-4 频段双工器能够实现全频带划分, 含 170~210 GHz 和 210~260 GHz 两个通道, 通道内插损低至 -1.5 dB 和 -1 dB, 其中一个通道的隔离高达 50 dB, 所有测试结果与仿真数据高度一致. 此外, 该固态双工器电路具有易结构加工、易系统集成、易通道扩展和易频率拓展等特点.

关键词 波导, 低通滤波器, 混合网络, 双工器, WR-4 波段, 太赫兹

中图分类号 TN61

Hybrid Network Based Broadband Diplexer Technology for Terahertz Space Exploration Systems

DING Jiangqiao^{1,2} JIANG Shenzhou^{1,2} CHENG Jiasen²
JIANG Luying² ZHU Haotian³

1(Tianchang Research Institute, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

2(Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology,
School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

3(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 民用航天预先研究项目 (D010203) 和国家自然科学基金项目 (12003011, 62171432) 共同资助

2025-06-24 收到原稿, 2025-12-05 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Terahertz space exploration systems are undergoing rapid advancement, with clear trends toward multi-channel operation, multi-spectral capabilities, and ultra-wideband performance. To address the requirements of such evolving systems, this paper introduces a novel waveguide hybrid network-based diplexer covering the entire WR-4 band. This device is specifically engineered for local oscillator signal combining and feeding in dual-band solid-state architectures. The design capitalizes on the inherent advantages of hybrid networks, including their excellent anti-reflection properties and high isolation between ports, while incorporating cascaded high-order low-pass filter to achieve precise frequency separation. This configuration results in a mechanically robust assembly that is readily manufacturable using Computer Numerical Control (CNC) techniques and easily integrated into larger systems. The development process encompassed several critical phases: initial conceptual and operational design of the hybrid-network diplexer for full WR-4 band coverage; detailed circuit design of individual components such as hybrid couplers and filters; followed by comprehensive circuit synthesis, optimization, and eventual physical realization through E-plane split-block CNC milling fabrication. Experimental verification confirms the diplexer's outstanding performance in dividing the complete WR-4 spectrum into two well-defined channels spanning 170~210 GHz and 210~260 GHz, respectively. The measured insertion loss remains remarkably low at -1.5 dB for the lower band and -1 dB for the upper band. Impressively, one channel demonstrates isolation characteristics reaching 50 dB, effectively minimizing inter-channel interference. All measured parameters show strong correlation with simulation results, validating both the design methodology and implementation approach. Beyond its core electrical performance, this solid-state diplexer circuit offers numerous practical benefits including simplified mechanical fabrication, straightforward system integration, effortless channel expansion, and straightforward frequency scaling. These attributes make the proposed design particularly suitable for next-generation terahertz systems requiring efficient signal separation and management, while providing a versatile platform for future system enhancements and architectural evolution. The combination of electrical performance, manufacturing practicality, and design flexibility positions this diplexer as an attractive solution for advanced terahertz applications.

Key words Waveguide, Low-pass filter, Hybrid network, Diplexer, WR-4 band, Terahertz

0 引言

太赫兹波 (0.1~10 THz) 介于微波与红外之间, 兼具强穿透性、分子指纹谱和高效抑制背景噪声等优势, 成为大气成分分析、云层微观结构反演、星际分子云探测及早期空间辐射观测的核心技术, 广泛应用于气象遥感和空间探测等前沿领域^[1-4]. 中国自 20 世纪 70 年代起自主部署风云系列气象卫星, 从早期探索到风云四号, 在气象参数探测能力、时空分辨率等方面均实现了很大提升^[5]. 其中, 毫米波和亚毫米波成像仪 (MMSTI) 是风云四号地球同步轨道气象卫星上的重要载荷之一, 实现 183, 380, 425 GHz 等多通道探测, 以获取地球亮温数据. 上述先进仪器的进一步升级, 将推动中国太赫兹遥感技术从国际并跑迈向国际领先, 同时需聚焦并突破多项太赫兹频段关键技

术, 包括高增益天线^[6]、准光系统^[7]、多路本振泵浦^[8]、高灵敏度混频器^[9]及低噪声放大器^[10]等. 其中, 多工器技术^[11]能够将多路不同频段信号合并, 然后单通道输出, 大幅度有效降低多通道系统中多路本振泵浦光路设计的复杂度, 已成功应用于宽频谱^[12]、多谱线探测系统^[8]和多通道上下行通信系统^[13]等. 本文聚焦 WR-4 频段双工器技术研究, 可用于 380 GHz 和 425 GHz 双通道谐波混频接收机的本振泵浦, 现有多工器有着高插入损耗和窄带特性的技术瓶颈, 导致接收机接收灵敏度降低和应用场景受限, 因此应重点关注低损耗、宽频带和固态集成等特点.

在太赫兹频段的多工器领域, 从方法角度区分, 主要有以下两类研究方法: 准光技术方法^[14], 主要应用于自由空间的频谱选择, 具有宽频带可调谐的优点, 但是不易于固态系统的集成; 基于电子学电路方

法^[11,15],典型的采用矩形波导结构,具有高 Q 值、低损耗、功率容量大、易固态化等优点,已成为太赫兹多工器等器件实现的首选传输线^[3,4,6,8,11,12].此外,也常采用基于超导薄膜的微带线^[15]或共面波导^[16]来实现,该类器件易于平面电路的集成,但需要高成本的微纳工艺,并且因介质损耗、辐射损耗等导致其损耗依然较大.通常,太赫兹多工器一般作为接收机系统中仅次于天线的第一级组件,其低插损性能的重要性不言而喻,能够有效减少系统的噪声系数,提高系统探测灵敏度,因此波导型双工器技术是重点.从电路结构角度区分,主要有以下几类:双模谐振器型多工器^[17,18],多采用大尺寸谐振器中的双模谐振特性,结合耦合路径进行通道的划分与设计,该类型器件结构最为紧凑、通道损耗低、隔离特性极高,但是往往通道的带宽较窄,与通道的耦合模式密切相关,通道数难扩展,调谐难度大;多级耦合型多工器^[19-22],主要由T结/Y结波导结构耦合多通道滤波器,其电路结构紧凑、通道损耗低、相位一致性高,但是通道间隔离特性互相影响,难以灵活划分通道,且通道位置布局有限,常用于窄带性的多工器研究,调谐参量多;混合网络耦合型多工器^[12,23,24],采用混合网络的高隔离、防反射特性、结合滤波器架构,具有易设计、易拓频、易扩通道等特点,多用于宽频带甚至超宽带双/多工器的实现.在混合网络型多工器方面,2016年,日本国立天文台开发出一款400 GHz混合网络耦合型多工器^[23],其各频段带宽约为6%,在带宽性能方面表现相对有限.2017年该机构进一步提出一种工作于275~500 GHz频段的混合网络耦合型双工器^[12],实现了高达60%的总带宽,显示出优异的宽带特性.然而该结构设计较为复杂,对加工精度要求极高(最小尺寸仅为30 μm),因此难以利用当前常规的CNC加工技术实现制备.相比本团队前期工作,W波段全覆盖宽带波导双工器采用的是减高波导结构,形成高通

滤波特性,其通带内波损耗仅为-15 dB,过渡带的频率比,即 $f_{\text{stop}}(-40\text{ dB})/f_{\text{cutoff}}(-3\text{ dB})$ 为0.85,该类型高通滤波器的回波损耗及其过渡带均不理想^[24].

综上,本文将综合混合网络结构与非均匀阻抗变换结构低通滤波器,形成全WR-4波段高低通道波导双工器原理架构,并基于CNC精密加工技术和E-面分裂式波导腔体加工方法实现器件制备.利用标准矢量网络分析仪及其扩展模块进行散射参数性能验证,实验结果表明该双工器具有低损耗、宽频带、固态集成和可靠性等特点,适用于空间探测应用中谐波混频接收机的双通道本振合路泵浦.

1 全频带双工器设计原理

本文旨在研制一款覆盖全WR-4波段的波导双工器,核心设计目标包括低插入损耗、宽工作带宽以及适应固态集成的可实现性,满足太赫兹空间探测系统的应用需求.结合前期调研,所设计的双工器采用图1所示原理架构,主要由90°混合网络单元和低通滤波器单元构成.从图1可以看到,输入端的第一个90°混合网络(定向耦合器)将WR-4全带宽信号按等功率分配为两路;每一路信号经低通滤波器选取低频段部分,并由第二个混合网络合成输出,实现同相合成.另一通道则利用第一个混合网络的定向特性,即被低通滤波器抑制的高频信号被完全反射,并由第一个混合网络的隔离端口输出,从而形成双工工作模式.该设计结构简洁、原理清晰,通过少量单元电路即可实现.

主要性能指标如下.

- (1) 双工特性: 双通道覆盖WR-4全波段.
- (2) 频带划分: 通道1为170~210 GHz, 通道2为210~260 GHz.
- (3) 通道内插入损耗小于2 dB.

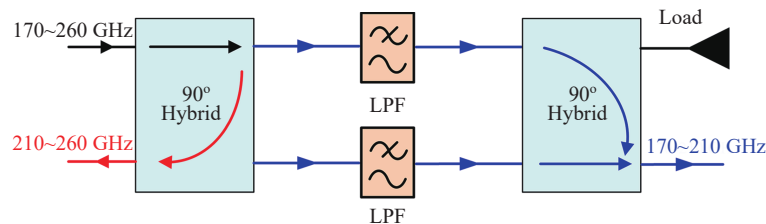


图1 混合网络型波导双工器架构

Fig. 1 Architecture of hybrid-type waveguide diplexer

(4) 通道内回波损耗优于-15 dB.

(5) 通道间隔离度优于-15 dB.

该双工器采用模块化设计流程, 先分别设计并优化各功能单元 (混合网络、低通滤波器), 以保证单元性能优异; 然后基于图 1 中的整体架构, 借助电磁仿真工具完成电路级综合与性能优化, 最终实现高性能、可集成的 WR-4 频段波导双工器.

2 分立单元电路设计

2.1 混合网络

在所设计的混合网络型波导双工器中, 混合网络 (即定向耦合器) 是核心功能模块之一, 其性能直接影响双工器的整体指标. 常用的典型结构为分支线型波导混合网络^[25], 该结构具有互易性、良好的定向耦合特性及设计实现简便等优点. 研究表明, 增加分支线电桥数量可有效改善幅度不平衡、回波损耗、隔离度及工作带宽等关键参数; 分支线电桥的长度 l 及间距 d 对隔离度和回波损耗影响显著, 初始设计值一般取为波导工作波长 λ 的 $1/4$; 根据耦合度要求 (本设计取 3 dB), 需合理设计分支线电桥宽度 w .

基于此, 设计如图 2(a) 所示六分支 3 dB 定向耦合器结构, 该结构适用于 E 面分裂式 CNC 加工工艺. 4 个端口 P1, P2, P3 和 P4 分别对应信号输入、输出、耦合及隔离端口. 通过 HFSS 软件进行电磁仿真与优化后, S 参数响应如图 2(b) 所示, 耦合器在全 WR-4 波段内实现了理想的功率均分, $|S_{21}|$ 和 $|S_{31}|$ 均接近 -3 dB, 带内回波损耗与隔离度均优于 20 dB, 绝大部分频段优于 25 dB, 幅度平衡优于 2 dB, 能够满足双工器对耦合器在功分、隔离及回波损耗等方面的性能需求.

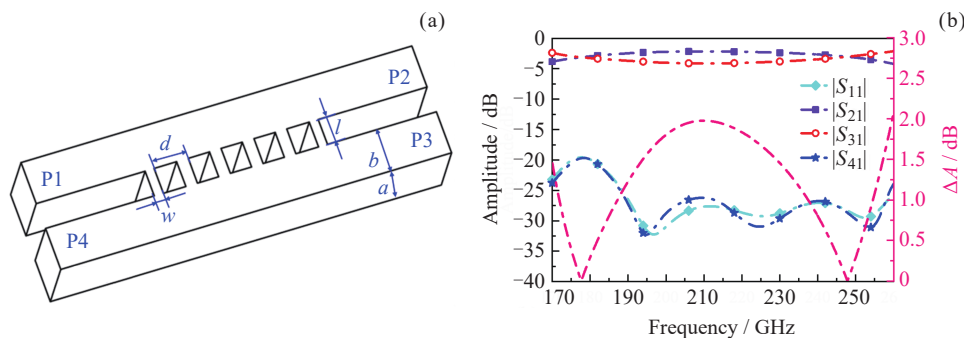


图 2 六分支混合网络结构 (a) 及其性能 (b)

Fig. 2 Structure (a) and performance (b) of 6-branch hybrid network

2.2 低通滤波器

如图 1 所示, 在混合网络型双工器中, 低通滤波器也是关键组件之一, 需要同时具备低插入损耗、宽通带及高频抑制等性能要求. 参考已报道的 WR-4 波导带通滤波器^[20], 准椭圆响应结构虽然具有较好的频率选择性和宽阻带, 但是存在带宽较窄的不足, 无法满足本设计对宽频带的需求. 因此, 这里采用经典波导低通滤波器拓扑^[26], 其由非均匀阻抗结构构建, 如图 3(a) 所示, 通过调控波导截面尺寸形成周期性阻抗变化, 窄截面 (低阻抗段) 相当于容性单元, 宽截面 (高阻抗段) 相当于感性单元, 二者交替排列形成滤波效应, 其等效电路如图 3(b) 所示. 对于相应的阶跃阻抗波导滤波器, 由于在波导结构中其特征阻抗与窄边 b 之间存在正比关系, 因此用宽 b 边波导段表示串联电感, 窄 b 边波导段表示并联电容, b 面结构如图 4(a) 所示, 通过改变滤波器内部波导的宽度, 使其宽窄逐渐变化, 达到抑制高次谐波的目的, 图中 $l_1 > l_2 > l_3 > l_4$, $w_1 < w_2 < w_3 < w_4$. 宽 b 边波导长度 w_1 , 窄 b 边波导长度 l_1 , 则 b 边波导长度比 R 可等效为特性阻抗比, 计算公式为

$$R = \frac{w_1}{l_1}. \quad (1)$$

图 4(b) 给出了 b 边波导长度比 R 在 2.5~2.9 范围内, 以步进 0.1 变化得到的低通滤波器插入损耗 S_{21} 响应结果, 可以看出随 R 增大, 滤波器带外抑制增强. 该拓扑结构中, 阻带抑制能力随阻抗比增大而提高. 为实现最优阻带特性, 设计中通过参数优化使高阻抗比达到加工可实现的最大值, 具体表现为高阻抗段宽边长度最大化以提升电感量, 低阻抗段窄边长度最小化以增强电容效应. 此外, 在 E 面分裂式加工拓扑中引入 0.1 mm 过渡圆角以减小边缘场畸变.

如图 5(a) 所示, 本文采用非均匀谐振腔阵列实现波导低通滤波, 核心参数根据目标频段 $1/4$ 波导波长初始设定, 后续结合感性耦合窗和全波仿真进行优化, 具体参数见表 1. 图 5(b) 的仿真结果表明, 该低通滤波器实现了 $160 \sim 210$ GHz 通带及 $210 \sim 260$ GHz 阻带, 带内回波损耗优于 -20 dB, 插入损耗小于 1 dB, 并且过渡带的频率比 $f_{\text{stop}} (-40 \text{ dB})/f_{\text{cutoff}} (-3 \text{ dB})$ 为 0.94 , 完全满足双工器对低通滤波器的性能要求. 该高性能滤波器为宽频带双工器的研制提供了兼具高频选择性和宽阻带特性的滤波器解决方案.

2.3 WR-4 波段双工器

基于前面讨论的两个关键组件的精准设计, 结合图 1 所示双工器原理, 构建如图 6(a) 所示 WR-4 频段双工器三维结构. 该结构包括输入端 P1、低频段输出端 P2、高频段输出端 P3 以及隔离端 P4, 所有均匀波导段采用标准 WR-4 矩形波导 (截面尺寸: $1.092 \text{ mm} \times 0.546 \text{ mm}$). 完成整体结构设计后, 基于 HFSS 软件, 进行全面的参数优化以获得最佳综合性能. 优化后的双工器 S 参数响应如图 6(b) 所示, 实现了低频 ($170 \sim 210$ GHz) 与高频 ($210 \sim 260$ GHz) 通道的频选特性, 并且各自通道内相对带宽高达 21% ,

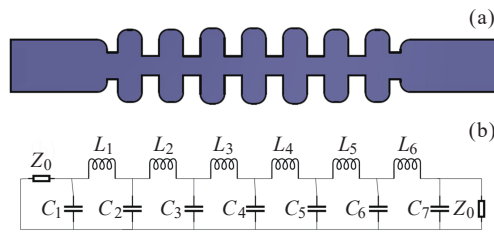


图 3 经典低通滤波器的结构构建 (a) 及其等效电路 (b)

Fig. 3 Classical low-pass filter. (a) Structural configuration, (b) equivalent circuit

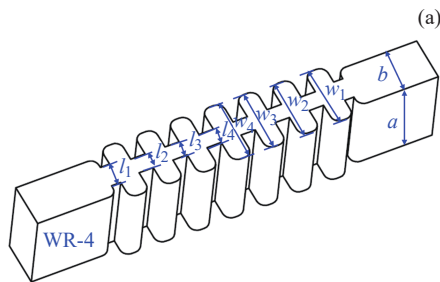


图 5 低通滤波器的三维结构模型 (a) 及其性能响应 (b)

Fig. 5 3D structural model of the low-pass filter (a) and its performance response (b)

实现 WR-4 全频段的划分; 两个通带之间的隔离度及通带内的回波损耗均优于 -15 dB, 上述结果均满足双工器的设计指标要求. 此外, 仿真结果表明, 与独立低通滤波器相比, 双工器通带内的回波损耗有所劣化. 这主要是由于混合耦合器与低通滤波器之间的波导连接存在阻抗不连续性, 信号产生反射并影响到阻抗匹配性能^[17,24].

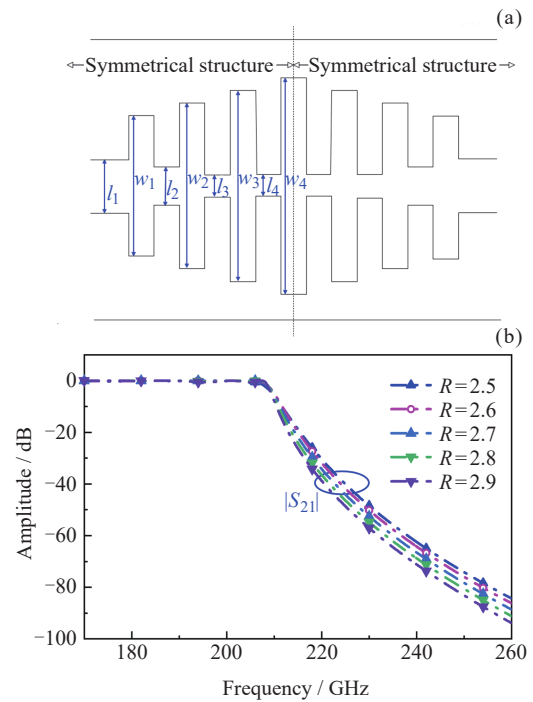
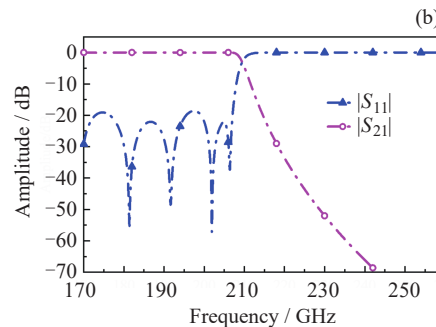


图 4 非均匀阻抗结构型低通滤波器. (a) 波导 b 面结构参数, (b) 滤波器传输特性随长度比 R 的变化曲线

Fig. 4 Non-uniform impedance structure low-pass filter. (a) Structural parameters of the waveguide b-plane, (b) variation curve of filter transmission characteristics with length ratio R



针对混合网络型双工器将采用 E 面分裂式 CNC 加工工艺的特点, 在上下腔体装配过程中, 会存在水平方向的定位偏差. 为了评估该偏差对双工器器件性能的影响, 构建了如图 7 (a) 所示偏移分析模型, 其中设定水平偏移量 (Shift) 在 $\pm 30 \mu\text{m}$ 范围内变动. 仿真结果如图 7(b) 中灰线所示, 在此偏移范围内, 双工器中心频率仅出现不超过 1 GHz 的轻微漂移, 且回波损耗等关键性能参数基本保持稳定. 这一分析证

实了该双工器结构对装配公差具有良好的适应性, 展现出优异的机械稳定性, 满足太赫兹空间探测系统对应力性、装配性、可靠性等方面的要求.

3 加工、装配与测试

研究所用器件的加工制造采用高精度数控铣削 (CNC) 工艺, 具体实施方案为, 基于 E 面剖分式对称加工方式, 通过数控机床在铝块上进行镜像结构加工. 加工过程中采用的刀具最小直径为 0.1 mm, 尤其是圆角部分的微细结构, 确保钻削半径与倒角曲率严格一致. 材料选用电导率为 $3.8 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 的铝, 在保证电磁性能的同时实现复杂结构加工. 此外, 为便于后期测试及使用, 通过集成多向波导弯折结构, 将 4 个信号端口优化分布在正交平面上, 同时各端口配备符合 UG-387 标准的微波法兰接口 (见图 8a). 为实现亚毫米级装配精度, 在模块内部设置高精度定位销孔及分布式紧固螺孔阵列. 紧凑化设计成型模块的整体尺寸控制在 $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (见图 8b).

将加工件上下装配并锁死螺钉后, 完成波导双工

表 1 低通滤波器物理尺寸 (单位: mm)

Table 1 Physical dimensions of the low-pass filter (Unit: mm)

Parameter	Value	Parameter	Value
a	1.092	w_1	0.756
b	0.546	w_2	0.76
l_1	0.28	w_3	0.79
l_2	0.208	w_4	0.79
l_3	0.2		
l_4	0.2		

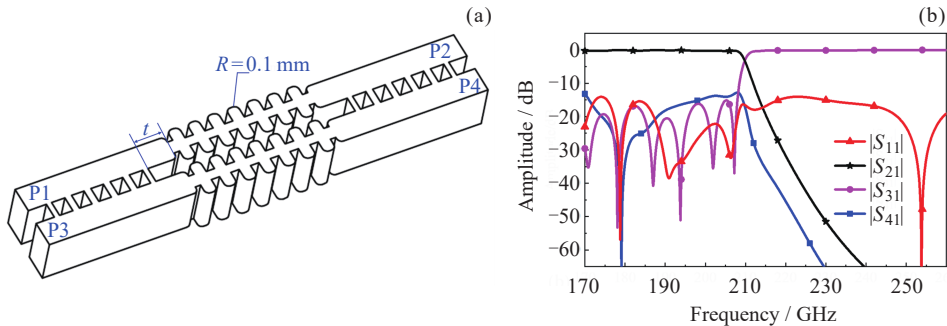


图 6 双工器的三维结构模型 (a) 及其性能响应 (b)

Fig. 6 3D structural model of the diplexer (a) and its performance response (b)

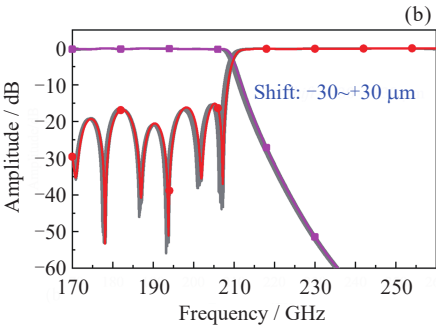


图 7 双工器的加工偏移结构模型 (a) 及其性能响应 (b)

Fig. 7 Offset analysis structural model of the diplexer (a) and its performance response (b)

器的 S 参数性能测试, 这里采用思仪 (Ceyear) 3672 XY 矢量网络分析仪, 结合 WR-4 波段频率扩展模块进行, 实测环境照片如图 8(c) 所示. 具体测试流程如下: 完成设备校准, 这里采用直通—反射—传输 (Through-Reflect-Line, TRL) 校准方法; 测量任意两端口间的 S 参数性能, 此时其余两个空闲端口需端接匹配负载以防止反射; 完成所有端口的测试.

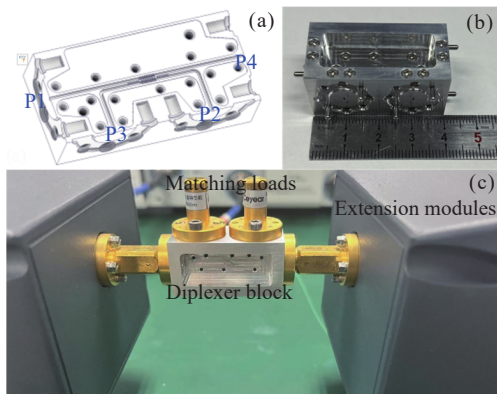


图 8 双工器的工装结构 (a)、装配后的腔体照片 (b) 以及测试环境 (c)

Fig. 8 Tooling structure of the diplexer (a), cavity photo after assembly (b), and test environment (c)

4 结果讨论

经上述实测过程, 获得双工器的测试结果, 涵盖传输、反射及隔离特性, 如图 9 所示. 值得注意的是, 为更精确地模拟该混合网络型波导双工器的实际电磁性能, 并与实测结果进行有效对比, 仿真模型中后期引入关键修正, 包括模型中增加波导弯头及其相应长度, 确保其几何形状与图 8 (a) 中的实际加工件一致; 将边界材料设置为等效电导率为 $1 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 的非理想材料, 以此模拟实际制造、装配等过程中, 因材料、粗糙度、装配误差等因素引入的附加插入损耗.

综上, 图 9 给出了实测性能与修正后的仿真结果对比分析. 从图 9(a)(b) 两个通道的传输特性来看, 在 WR-4 全频段 (170~260 GHz) 内, 有效实现了双工工作的性能, 低频段通道为 170~210 GHz, 高频段通道为 210~260 GHz, 这里在计算通道带宽时采用 3 dB 基准, 同时实测插损均与仿真值 (等效电导率 $1 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) 高度一致, 均控制在 1.5 dB 和 1 dB 左右. 输入端口的反射特性见图 9(c), WR-4 频段内的回波损耗稳定优于 -15 dB, 并且与仿真数据一致. 该双工器的隔离特性如图 9(d) 所示, 基本优于 -15 dB, 且高频段通道的隔离高达 50 dB, 与仿真数据也较一

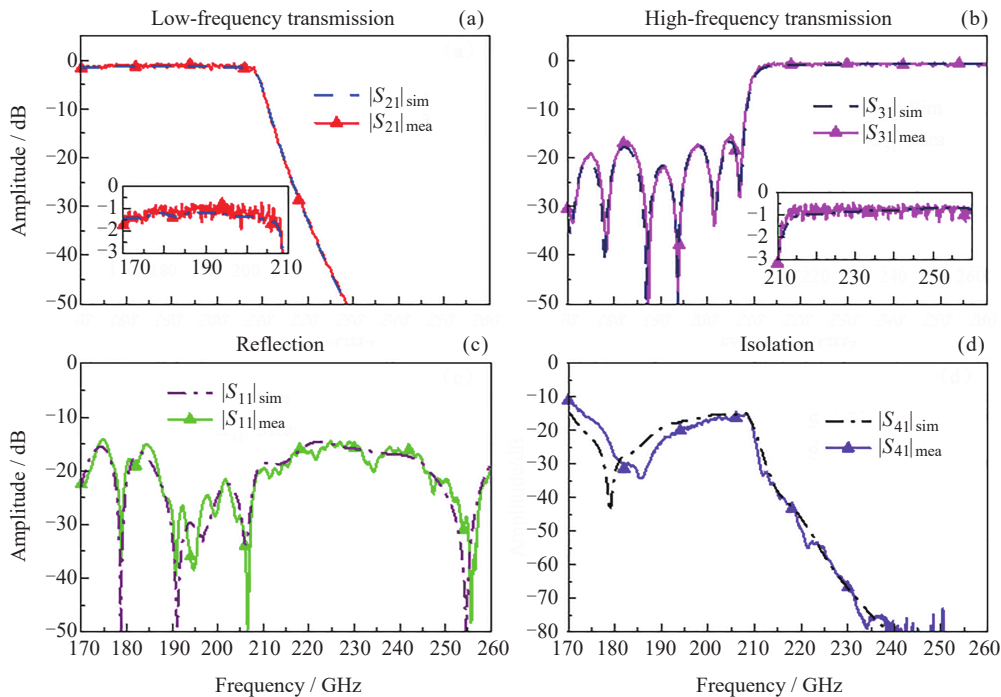


图 9 双工器仿真与实测结果对比

Fig. 9 Comparison of diplexer simulation and measured results

表 2 与已发表文献中双工器的性能对比
Table 2 Diplexer performance comparison with published references

Reference	f_0/GHz	FBW/(%)	IL/dB	RL/dB	Topology
[19]	132/145	3/5.1	1.2/0.8	20/18	Y-Junction
[21]	165.5/183	1.8/8.7	1.8/0.8	5.5/11.3	T-Junction
[22]	251.5/294	5.6/3.3	2/2	18/18	Y-Junction
This work	190/235	21/21.3	1.5/1	15/15	Hybrid network

致. 上述结果的对比分析表明, 该双工器在 WR-4 频段内具有优异的双工工作性能, 且与仿真结果高度一致, 验证了本文方法在设计、工艺和装配方面的可控性、可靠性与稳定性, 也表明其满足太赫兹空间探测系统的应用要求. 具体而言, 测试结果显示双工器在全频段内的插入损耗低于 2 dB, 回波损耗优于 -15 dB, 隔离度优于 -15 dB, 各项指标均达到设计要求, 体现了低损耗、高隔离和宽带特性.

进一步将所研制的 WR-4 波段宽带波导双工器与已有文献中的典型太赫兹波段双工器性能进行对比分析 (见表 2). 显然, 本文所提出的基于混合网络拓扑结构的双工器在宽频带性能方面表现出显著优势, 双通道带宽均达到 20% 以上, 实现了对 WR-4 波段的完整覆盖, 且在通道内插入损耗方面表现优异. 与传统的 T 型或 Y 型拓扑结构相比, 在带宽和隔离度方面具有明显优势. 此外, 该对比结果进一步验证了 CNC 数控加工技术在高频段波导器件加工中的可行性与优越性.

5 结论

面向太赫兹空间探测中固态双频系统的本振信号合路泵浦需求, 研制了一款基于 CNC 技术的全 WR-4 频段混合网络型宽带双工器. 通过协同采用混合网络与高阶低通滤波器设计, 实现了 170~210 GHz 与 210~260 GHz 两个子带的高效频率划分与耦合. 实测结果与仿真高度一致, 表明通道内具有低至 -1 dB 的插损、高达 50 dB 的隔离度以及全频带覆盖的宽带能力. 同时, 该双工器结构设计具备良好的加工容差能力, 易于 CNC 工艺实现和频率拓展, 同时易于系统的固态集成. 该研究为太赫兹多频段混频接收机提供了一种低损耗、高可靠的双工解决方案, 对推动太赫兹空间探测系统向多通道、宽带化、高集成方向发展具有重要意义.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] DONG Xiaolong, LIU Yang, HE Jieying, *et al.* Venus volcano imaging and climate explorer mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1047-1059 (董晓龙, 刘洋, 何杰颖, 等. 金星火山与气候探测任务 [J]. *空间科学学报*, 2022, **42**(6): 1047-1059)

[2] WANG Zhenzhan, WANG Wenyu, DONG Xiaolong, *et al.* Martian atmosphere study using THz limb sounder[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 778-786 (王振占, 王文煜, 董晓龙, 等. 太赫兹火星大气临边探测仿真研究 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(5): 778-786)

[3] CUADRADO-CALLE D, PIIRONEN P, AYLLON N. Solid-state diode technology for millimeter and submillimeter-wave remote sensing applications: current status and future trends[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2022, **23**(6): 44-56

[4] TREUTTEL J, GATILOVA L, CAROOPEN S, *et al.* 1200 GHz high spectral resolution receiver front-end of submillimeter wave instrument for JUpiter ICy moon explorer: part I - RF performance optimization for cryogenic operation[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2023, **13**(4): 324-336

[5] HE Jieying, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan, *et al.* Prospects for microwave atmospheric sounding of the new generation of Fengyun meteorological satellites[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1025-1035 (何杰颖, 张升伟, 王振占, 等. 风云气象卫星微波大气探测回顾与展望 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(6): 1025-1035)

[6] ZHAO Y, ZHANG S M, YE F, *et al.* Micromachined high gain diagonal horn array antenna with suppressed grating lobes for 190 GHz~250 GHz[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2025, **15**(3): 464-472

[7] ENDO A, KARATSU K, TAMURA Y, *et al.* First light demonstration of the integrated superconducting spectrometer[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**(11): 989-996

[8] NAKAJIMA T, HARATANI K, MIZUNO A, *et al.* Waveguide-type multiplexer for multiline observation of atmospheric molecules using millimeter-wave spectroradiometer[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, **41**(12): 1530-1555

[9] MEHDI I, SILES J V, LEE C, *et al.* THz diode technology: status, prospects, and applications[J]. *Proceedings of the*

- IEEE*, 2017, **105**(6): 990-1007
- [10] SCHLEE J, WADEFALK N, NILSSON P Å, *et al.* Cryogenic broadband ultra-low-noise MMIC LNAs for radio astronomy applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(2): 871-877
 - [11] TAN Z, ZHANG Q Y, LEI Y L, *et al.* Terahertz waveguide multiplexers: a review[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2023, **65**(7): 1925-1935
 - [12] GONZALEZ A, KOJIMA T, KANEKO K, *et al.* 275~500 GHz waveguide diplexer to combine local oscillators for different frequency bands[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, **7**(6): 669-676
 - [13] NIU Z Q, ZHANG B, ZHANG Y H, *et al.* Solid-state terahertz circuits for 6 G: a review[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2025, **34**(2): 373-400
 - [14] LIU Jia, ZHANG Xingang, ZHOU Weilai, *et al.* Design and analysis of the terahertz radiometer antenna system on satellite[J]. *Journal of Radio Science*, 2016, **31**(2): 406-412
 - [15] PASCUAL LAGUNA A, KARATSU K, THOEN D, *et al.* Terahertz band-pass filters for wideband superconducting on-chip filter-bank spectrometers[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(6): 635-646
 - [16] DING J Q, HU J, SHI S C. 350-GHz bandpass filters using superconducting coplanar waveguide[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(5): 548-556
 - [17] FENG Y N, ZHANG B, LIU Y, *et al.* A D-band manifold triplexer with high isolation utilizing novel waveguide dual-mode filters[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, **12**(6): 678-681
 - [18] DING J Q, NIE R H, ZHAO Y, *et al.* W-band dual-band filter and diplexer based on mixed TE₃₀₁- and TE₁₀₂-mode cavities[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2024, **45**(5/6): 556-573
 - [19] ZHAO X H, GLUBOKOV O, CAMPION J, *et al.* Silicon micromachined D-band diplexer using releasable filling structure technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, **68**(8): 3448-3460
 - [20] FENG Y N, ZHANG B, LIU Y, *et al.* A 200-225-GHz manifold-coupled multiplexer utilizing metal waveguides[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, **69**(12): 5327-5333
 - [21] SKAIK T, HUNYOR P, BEARDSLEY M, *et al.* CNC-machined and 3-D-printed metal G-band diplexers for earth observation applications[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2024, **14**(6): 1071-1078
 - [22] DING J Q, JIANG L Y, LEI Y L, *et al.* WR-3 wideband waveguide diplexers based on the perfectly symmetric Y-junction[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, **58**(13): 135003
 - [23] KOJIMA T, GONZALEZ A, ASAYAMA S, *et al.* Design and development of a hybrid-coupled waveguide multiplexer for a multiband receiver[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **7**(1): 10-19
 - [24] DING Jiangqiao, LEI Yalin, YAN Yutao, *et al.* Study on a

full W-band broadband waveguide diplexer[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, **38**(4): 45-49 (丁江乔, 雷雅淋, 闫玉涛, 等. 全 W 波段宽带波导双工器研究 [J]. *微波学报*, 2022, **38**(4): 45-49)

- [25] REED J. The multiple branch waveguide coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1958, **6**(4): 398-403
- [26] YANG M Y, WANG H Y, YANG T, *et al.* Design of wide stopband for waveguide low-pass filter based on circuit and field combined analysis[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, **31**(11): 1199-1202

作者简介



丁江乔 男, 1987 年出生于江苏省泰兴市, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为亚毫米波/太赫兹器件与技术、固态有源收发电路、空间探测技术等。
E-mail: jqding@nuist.edu.cn



蒋深舟 男, 1997 年出生于安徽省铜陵市, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹器件、固态电路。
E-mail: jiangsz1337@163.com



成加森 男, 1999 年出生于安徽省滁州市, 现为苏州伏波电子科技有限公司射频工程师, 主要研究方向为微波、毫米波器件产品开发与设计。
E-mail: chjs1999@163.com



蒋露颖 女, 2000 年出生于江苏省扬州市, 现为苏州伏波电子科技有限公司射频工程师, 主要研究方向为微波、毫米波器件产品开发与设计。
E-mail: j1378423143ly@163.com



朱皓天 男, 1989 年 10 月出生于江苏省南京市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹科学与技术、太赫兹星载辐射计系统及其关键技术。
E-mail: zhuhaotian@nssc.ac.cn