

小型化高集成宽带光收发组件

王茂旭¹, 于 优¹, 汤振华¹, 肖永川¹, 王 超¹, 高 晖²

- (1. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060;
2. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏南京 320100)

摘 要: 当前分立光子器件的体积和成本严重制约着微波光子技术在雷达系统中的应用。受限于当前的集成能力和材料体系,微波光子单片集成芯片短时间内难以实现工程应用。为满足雷达等应用场景对高集成微波光子器件的迫切需要,研制了一种新型小型化高集成光收发组件。该组件采用光电异构集成封装技术,将 MZM 调制器芯片、微波芯片、探测器芯片以及光环行器、波分复用器进行高度集成,单模块体积仅为 85 mm×35 mm×10 mm,与传统 MZM 调制器体积相当。实验结果表明,其性能可与传统分立元器件相媲美。在 6~18 GHz 范围内,组件能够实现±1.5 dB 的平坦度,上行能够实现 18 dB 以上的增益,下行能够实现-1 dB 以上的增益,且链路噪声系数小于 30 dB,平面化、小型化设计使其能够应用于相控阵雷达、电子战等多种应用场景,具有广阔的应用前景。

关键词: 光电异构集成; 小型化; 宽带; 微波光子

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210513

Miniaturized and highly integrated broadband optical transceiver assembly

Wang Maoxu¹, Yu You¹, Tang Zhenhua¹, Xiao Yongchuan¹, Wang Chao¹, Gao Hui²

- (1. The 44th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;
2. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 320100, China)

Abstract: At present, the volume and cost of discrete photonic devices severely restrict the application of microwave photonic technology in radar systems. Limited by the current integration capabilities and material systems, microwave photonic monolithic integrated chip is difficult to realize in a short time. Aiming at the urgent need for highly integrated microwave photonic devices in application scenarios such as radar, a new type of miniaturized and highly integrated broadband optical transceiver module was developed. The module adopted optoelectronic heterogeneous integrated packaging technology, which highly integrated MZM modulator chip, microwave chip, detector chip, optical circulator and wavelength division multiplexer. The size of a single module was only 85 mm×35 mm×10 mm, which was equivalent to the volume of a single MZM modulator. At the same time, its performance was comparable to the traditional discrete components. In the 6-18 GHz range, the component could achieve flatness of ±1.5 dB, gains of more than 18 dB in the uplink, and could achieve gains of more than -1 dB in the downlink and the link noise figure was less than 30 dB. The planarization and miniaturization design makes it can be used in phased array radar, electronic warfare and other application scenarios, and it has broad application prospects.

Key words: photoelectric hybrid integration; miniaturization; broadband; microwave photons

收稿日期:2020-12-26; 修订日期:2021-03-12

作者简介:王茂旭,男,工程师,硕士,主要从事光传输系统和光电器件集成封装等方面的研究。

0 引言

微波光子学是微波技术和光子技术相互融合的交叉学科,它重点研究微波和光子在机理上的相互作用,目标是用光子技术解决微波瓶颈问题,其研究主要集中在光载微波信号的产生、传输、控制处理、接收以及相应的系统集成^[1-2]。虽然微波光子学直到 20 世纪 80 年代末才在国际范围内得到认可^[3],但由于其工作频带宽、传输损耗低、相位线性度高、系统重量轻、接入灵活等优点,微波光子技术已在雷达、电子战、宽带无线接入网等诸多领域进行了大量的应用,展现了非凡的潜力^[4-8]。2013 年意大利国家光子网络实验室完成的全球首个光子雷达收发机,掀起了全球研究微波光子雷达的热潮^[9]。美国海军实验室更以“光子照亮雷达的未来”为题,将该技术在雷达应用中提到了极为重要的高度。

目前,微波光子链路的工程化应用主要基于分立器件,受制于分立元件微波光子链路体积大、一致性差、功耗高、价格昂贵等固有不足,高性能、高可靠性的微波光子集成器件是光子技术在雷达应用中的关键。现今,国内外关于微波光子集成技术的研究主要聚焦于光子集成芯片技术的研究,并取得了大量的成果^[10-12]。但当前这些芯片,大都功能单一,且只能在良好的实验室条件下应用^[12]。由于光子集成技术需要将大量有源、无源光子器件以及射频元件进行集成,这些属于不同材料体系的器件集成需要完成多材料平台融合。该融合技术难度较大,成本较高,且受限于目前芯片的加工能力,微波光子混合集成芯片的实际应用,还需较长时间^[2]。

针对雷达等应用对高集成微波光子器件的迫切需求,文中提出了一种基于光电异构集成封装的新型小型化光收发组件,该组件运用成熟光电芯片、微波芯片以及无源光器件实现三维异构集成封装。采用该种方式,既能实现良好的可靠性,又能在低成本下实现高集成度,是现阶段微波光子链路在雷达等工程应用中较为理想的集成方式。通过该方式实现的组件,单模块体积与传统 MZM 调制器体积相当,仅为 85 mm×35 mm×10 mm,可实现 6~18 GHz 微波信号收/发的光纤拉远,平面化、小型化设计使该组件可以同超宽带 TR 进一步集成。

1 组件的架构

1.1 组件系统架构

组件主要由集成化光收发前端模块(A 模块)和集成化光收发后端模块(B 模块)组成,其工作原理如图 1 所示。

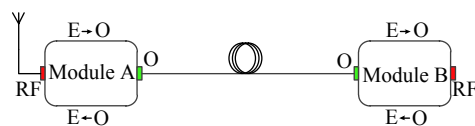


图 1 组件系统架构示意图

Fig.1 System architecture of components

A 模块位于天线阵面端,B 模块位于雷达后端,通过光纤进行信息传输,实现射频信号的拉远。当组件处于上行状态时,微波信号通过 B 模块完成射频预处理和电光转换后通过光纤传输至 A 模块,A 模块将信号还原为微波信号,并将信号放大后送至天线端。当组件处于下行状态时,A 模块将天线接收的微波信号进行放大和电光转换,然后通过光纤将接收号传输至 B 模块,B 模块完成信号的光电转换后将其输出至后端信号处理单元。

1.2 模块原理架构

模块原理架构如图 2 所示,A 模块靠近天线阵面端,主要完成天线端与后端信号的电光和光电转换。B 模块位于后端,主要完成天线端与后端信号的光电和电光转换。模块主要由射频部分、光电转换部分以及集成化光波分环形器组成。其中射频部分主要包括低噪声放大器(LNA)、射频开关、均衡器等,光电转换部分主要由 MZM 调制器、宽带探测器以及调制器控制电路等组成。

由于后端空间相较阵面端更充裕,所以外调制需要的大功率激光源也位于射频后端,B 模块和大功率激光器直接相连,A 模块所需连续光通过波分环形器解复用后传入 A 模块 MZM 调制器芯片输入端。

当组件上行时,B 模块处于接收状态,A 模块处于发射状态,其链路构成如图 3(a) 所示。

构成上行链路的主要器件及参数如表 1 和表 2 所示。

根据上述参数,设探测器芯片耦合后响应度为 80%,上行时波分探测器的损耗为 1 dB,可以对上行

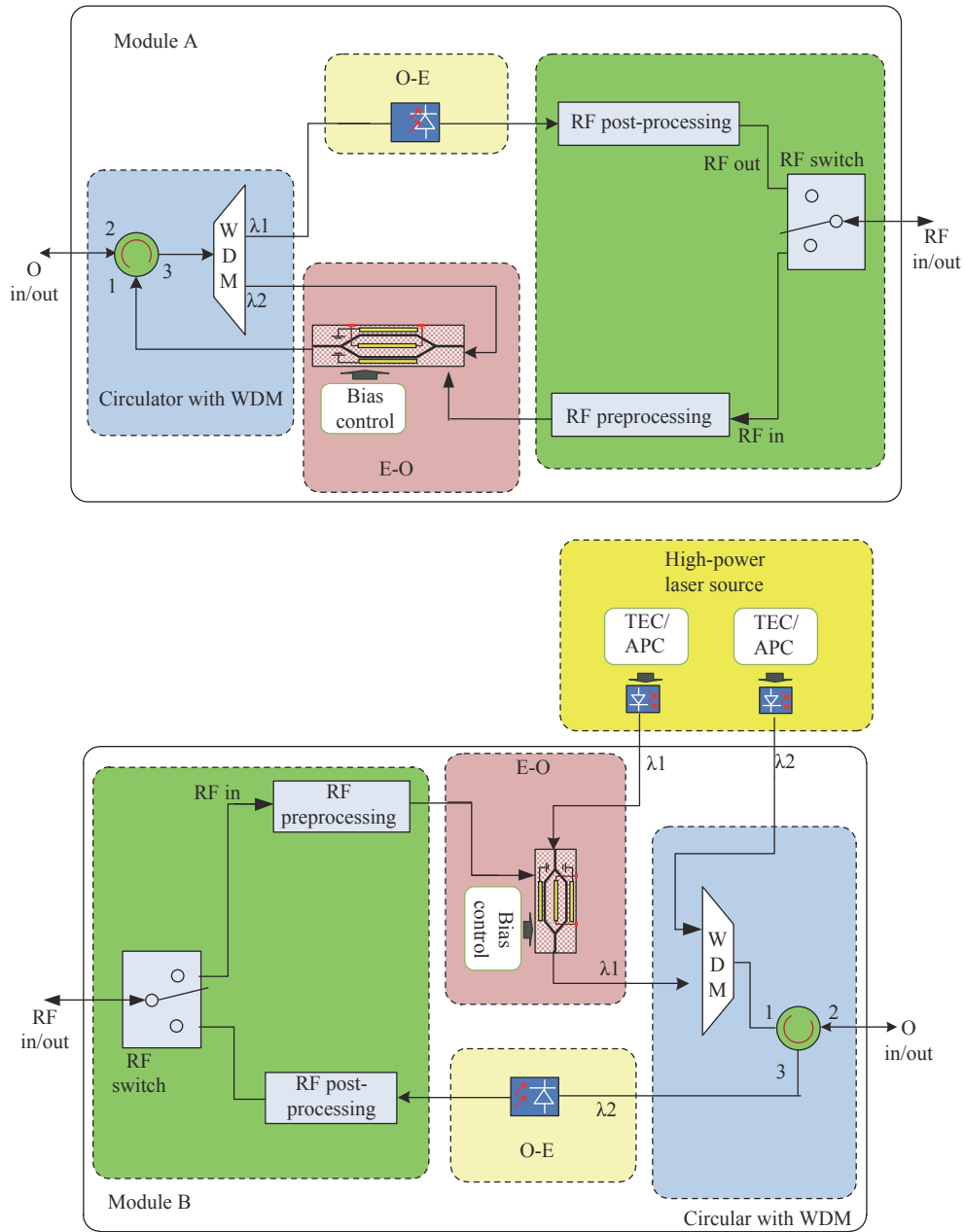


图 2 模块原理架构

Fig.2 Module principle architecture

链路的增益进行估算:

$$G_{up} = G_f + G_{opt} + G_b \quad (1)$$

式中: G_f 为前级射频链路的增益即前级放大器增益减去开关插损 $G_f=18.5$ dB; G_b 为后级射频链路的增益即后放大器增益减去开关插损 $G_b=33.5$ dB; G_{opt} 为光链路的射频增益, 其可由下式进行计算:

$$g_{opt} = \left(\frac{I_{dc}}{V_\pi} \right)^2 Z_{in} Z_{out} \quad (2)$$

式中: Z_{in} 、 Z_{out} 为输入、输出阻抗; V_π 为调制器芯片半

波电压; I_{dc} 为探测器芯片输出光电流。

$$I_{dc} = R_{pd} P_{laser} / 2L_M L_{OPT} \quad (3)$$

式中: R_{pd} 为探测器芯片耦合后的响应度; P_{laser} 为激光器输出功率, 为 50 mW; L_M 为调制器芯片光插损; L_{OPT} 为光链路的插损, 是波分环形器的插损、2 km 光纤的插损以及光纤弯曲造成的插损之和, 约为 4 dB。

将公式 (3) 代入公式 (2) 可得:

$$G_{opt} = 10 \log g_{opt} = 20 \log \left(\frac{R_{pd} P_{laser}}{2L_M L_{OPT} V_\pi} \right) + 34 \quad (4)$$

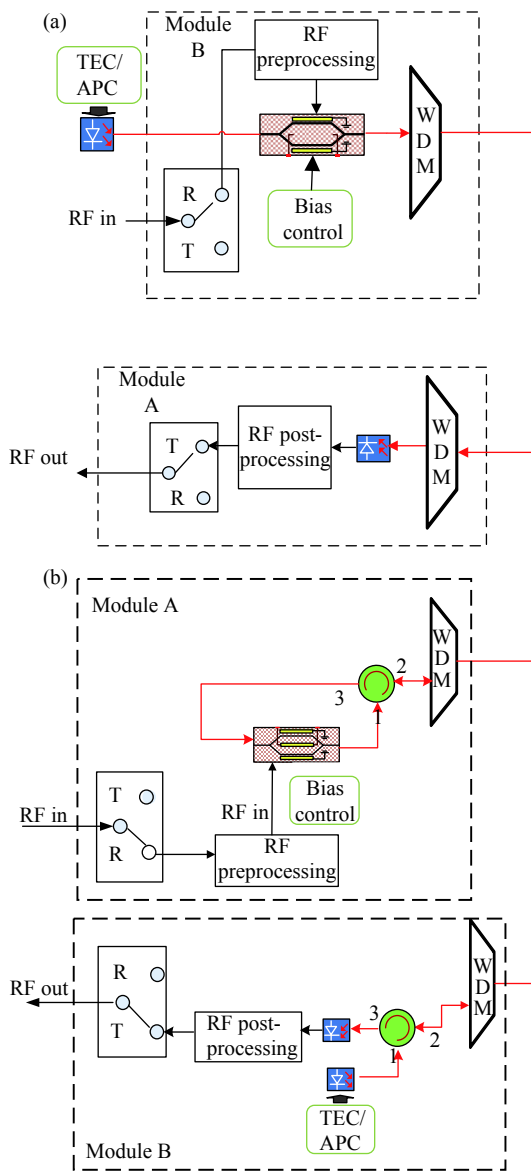


图 3 (a) 上行链路示意图; (b) 下行链路示意图

Fig.3 (a) Uplink diagram; (b) Downlink diagram

代入器件参数可得 $G_{opt} = -30$ dB, 则上行链路总增益 $G_{up} = 22$ dB。

当组件下行时, A 模块处于发射状态, B 模块处于接收状态, 其链路构成与上行链路相似, 主要区别在于下行时位于天线端的 A 模块调制器芯片所需连续光需通过波分环形器传递, 调制后的光信号也需通过波分环形器传递至后端 B 模块的光电探测芯片处。该过程由于需要通过四次波分环形器, 会造成 7 dB 的光插损。构成下行链路的主要元器件与上行相同, 主要区别为后级放大芯片仅有 IPA-0200-22 一级, 各器件主要指标如前所述, 此处不做赘述。运用

表 1 上行链路主要元器件表

Tab.1 List of main components of uplink

Name	Parameter	Producer
RF switch	HG127KB	MAT
Pre-amplifier	IPA-0220-22	IC Valley
MZM	15MZPE-50	CETC 44
Circulator with WDM	TA2236	CETC 44
PD	PD-20	CETC 44
Post amplifier 1	ILA-0118C	IC Valley
Equalizer	IEQ-02183	IC Valley
Post amplifier 2	IPA-0220-22	IC Valley
45° fiber module	GTZ1-124	CETC 44
MZM control plate	MZM_C1	CETC 44

表 2 元器件主要参数表

Tab.2 Main parameters of components

Name	Parameter	Typical characteristics
HG127KB	Frequency/GHz	DC-20
	Insertion loss/dB	1
	Isolation/dB	40
IPA-0220-22	Frequency/GHz	2-20
	Gain/dB	19.5
	P-1/dBm	21
	NF/dB	5
15MZPE-50	V_{π}/V	5@1 kHz
	Insertion loss/dB	4
	Frequency/GHz	DC-20
PD-20	Wavelength/nm	1 100-1 600
	Frequency/GHz	DC-20
	Responsivity	0.85@1 550 nm
ILA-0118C	Frequency/GHz	1-18
	Gain/dB	15
	P-1/dBm	17
	NF/dB	1.7

公式 (1), 对下行链路进行估算, 可得 $G_{down} = 1$ dB。

2 组件关键技术

2.1 光电混合集成结构

该组件需要将光、微波、控制电路等进行混合集成, 因为光电芯片的工艺、材料、结构与微波芯片区别较大, 所以合理的封装设计对性能的实现以及可靠性有举足轻重的作用。同时, 由于芯片均采用裸片的

形式,需要用金丝对各芯片进行连接。这种情况下,光芯片自带的尾纤若随意摆放容易打断金丝,影响器件可靠性。最后,由于腔体内部复杂,空间紧凑,很容易形成高频谐振,如何在有限的体积内形成有利于高频信号传输的腔体也是结构设计的难点。对于该组件,笔者等运用多种仿真工具,通过多轮实验和修改,最终设计了图 4 所示的腔体结构。采用该结构能够得到独立的射频传输空间,平整的光纤盘纤空间,能够有效保证该组件的可靠性和性能实现。

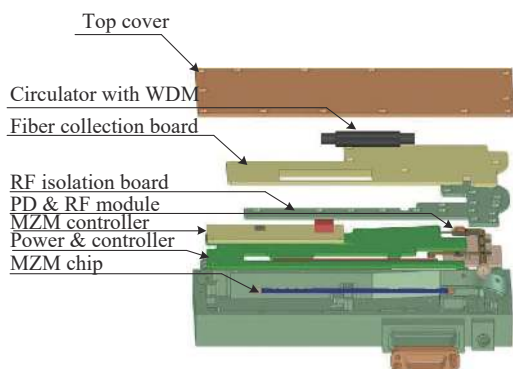


图 4 组件封装结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of component packaging

从图 4 可以看到该组件主要由调制器芯片及控制板、电源及控制板、探测器模组、微波部分以及集成波分环形器构成。其中,调制器芯片安装在独立的腔室内,其下部垫有专用的玻璃片以保证膨胀系数的匹配,防止芯片在高低温时因膨胀系数的失配发生断裂;电源及控制板除了完成相应功能外,还作为调制器芯片控制板的安装结构件,支撑调制器芯片控制板;射频隔离板和腔体结构配合能够形成独立的射频腔体以保证射频性能的实现,而且该结构在形成独立射频腔体的同时也为调制器芯片提供保护,并将电路部分与射频区域均物理隔离,能够有效防止串扰;射频隔离板下部腔体专门设计的光纤通道能够保证光纤安全转移到平整的顶层护板上进行盘纤处理;波分环形器在盘纤隔离护板上的位置经过拟真分析,能够保证光纤以最大的转弯半径进行固定,减小弯曲插损。

2.2 平面化光电探测器模组

光电探测器主要完成调制光信号的光电转换,为了保证组件的宽带特性,该组件采用本所自行研发的 20 GHz 光电探测器芯片,该芯片在 DC-20 GHz 性能优异,其归一化幅频响应如图 5 所示。

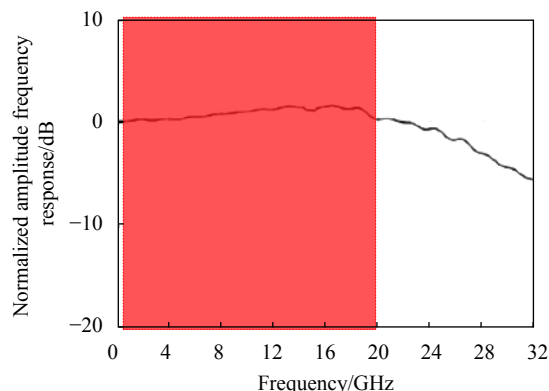


图 5 探测器芯片归一化幅频响应

Fig.5 Normalized amplitude frequency response of PD

对于探测器芯片的耦合,现有模拟产品一般采用金属化光纤直接耦合的方式。但是该耦合方式,需要支撑结构焊接固定金属化光纤,且光芯片需要立装,无法应用在该组件中。为了减小组件体积,提高集成度,该组件创新性地将数字光模块的 45° 光纤^[13]工艺引入到了模拟光传输模块中,如图 6 所示。

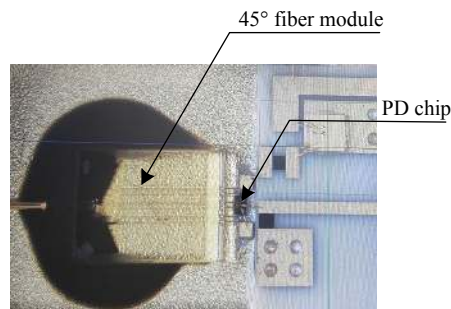


图 6 45° 光纤模组实物示意图

Fig.6 Picture of 45° optical fiber module

这种平面化耦合结构,能够大幅减小探测模块占用体积,仅需 5 mm×5 mm 的空间就能实现高效光电转换。而且由于采用平面化耦合方案,无需特定的结构支撑,只需一块平整的空间就可以实现探测器耦合,能够将探测模块放置在电路板、壳体等较为平整的地方,应用方便灵活。通过高精度耦合设备和专用的 45° 光纤,能够实现超过 80% 的耦合效率,足以满足工程化使用的要求。

2.3 集成化波分环形器

波分复用器和环形器市场均已有成熟产品,但这种独立封装的分立器件尺寸太大,不利于组件的小型化。该组件采用自由空间光集成技术,将滤光片和环

形器进行集成,其原理如图 7 所示。采用该结构的小型化波分环形器体积仅为商用波分复用器的一半,典型插损为 1.5 dB,隔离度大于 38 dB,性能较分立器件更为优异。

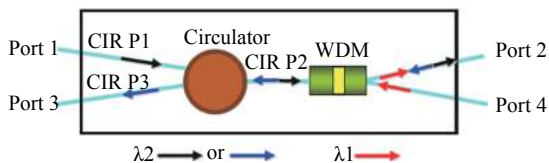


图 7 波分环形器结构示意图

Fig.7 Structure diagram of the circulator with WDM

3 实物及测试结果

通过上述关键技术,应用光电混合集成技术最终实现的组件如图 8 所示,其中 A 模块的尺寸为 85 mm×45 mm×10 mm, B 模块的尺寸为 85 mm×35 mm×10 mm,实现了高度集成化。

为了对组件进行测试,搭建了如图 8 所示的两个 50 mW 连续光激光器、集成化光收发组件、2 km 光纤构成的测试平台。通过该测试平台,可以拟真 B 模块位于后端, A 模块位于约 2 km 处天线阵面,通过单根光纤实现微波信号上/下行的场景。基于此测试系统,测量了链路的增益、平坦度、噪声系数以及相位线性度。其中,测试仪器采用的是德科技的 N5247A 微波网络分析仪,该仪器集成了噪声系数, P-1 等测量功能,通过该仪器可以直接测量器件的

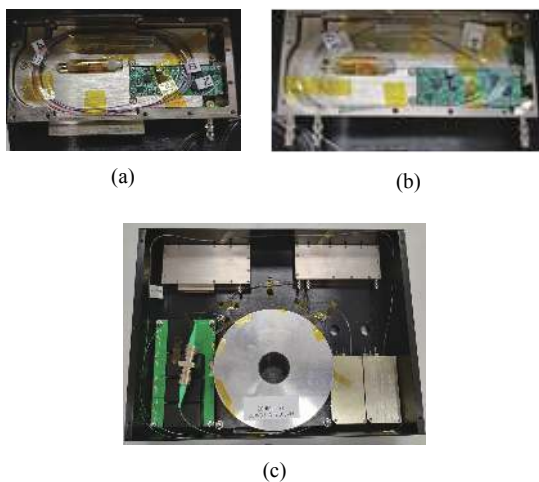


图 8 组件和测试平台实物图。(a) 模块 A; (b) 模块 B; (c) 测试平台

Fig.8 Photographs of the component and the test platform. (a) Module A; (b) Module B; (c) Test platform

S 参数、噪声系数以及相位线性度等指标。测试结果如图 9 和表 3 所示。测试结果表明,对于上行链路,在 6~18 GHz 频带内,该组件实现了超过 18 dB 的增益,±1.5 dB 以内的平坦度以及小于 33 dB 的噪声系数。对于下行链路,在 6~18 GHz 频带内,增益大于 -1 dB,平坦度在±1.5 dB 以内,而且全频带内噪声系数小于 30 dB。在雷达重点工作频段 8~12 GHz 范围内,上行链路与下行链路均实现了小于±5°的相位线

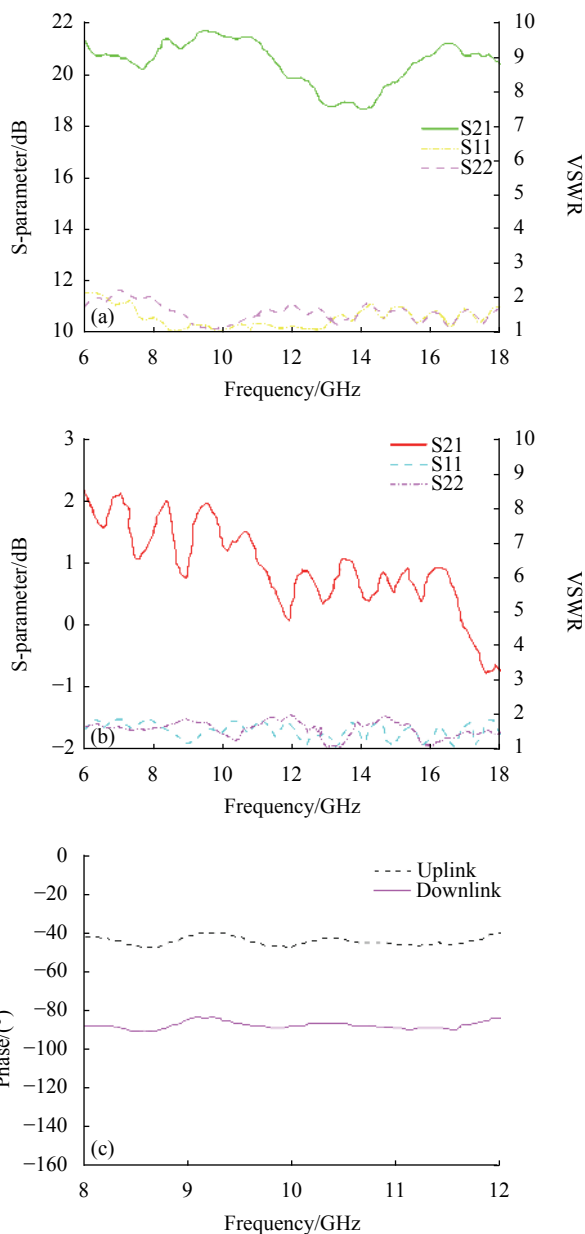


图 9 链路测试。(a) 上行链路 S 参数; (b) 下行链路 S 参数; (c) 相位线性度

Fig.9 Test curve of the link. (a) Uplink S-parameters; (b) Downlink S-parameters; (c) Phase linearity

性度。对于测试增益和理论计算之间的差异,主要是由于理论计算时未考虑芯片微组装之后的实际增益、各芯片之间的互联的损耗以及对光纤盘绕损耗估算的准确性,总的来说,测试结果和理论计算结果吻合,该组件在高集成度的情况下实现了媲美分立元器件搭建系统的性能。

表 3 测试结果表
Tab.3 Test results

Up-link	
Frequency/GHz	6-18
Flatness/dB	±1.5
Gain/dB	≥18.5
NF/dB	≤33
Phase linearity/(°)	≤±5(@8-12 GHz)
Down-link	
Frequency/GHz	6-18
Flatness/dB	±1.5
Gain/dB	≥-1
NF/dB	≤30
Phase linearity/(°)	≤±5(@8-12 GHz)

4 结 论

文中提出了一种小型化异构集成光收/发组件,该组件运用光电异构集成封装、平面化探测芯片耦合技术、集成化波分环形器等关键技术,将 MZM 调制器芯片、微波芯片、探测器芯片以及光环行器、波分复用器进行高度集成,实现了光电芯片和微波芯片以及无源光器件的异构集成,得到了良好的宽带性能。在 6~18 GHz 频率范围内,组件实现了±1.5 dB 的平坦度,且上行链路增益大于 18 dB,噪声系数小于 33 dB,下行链路增益大于-1 dB,噪声系数小于 30 dB。组件性能能够和分立元器件搭建系统相媲美。小型化、平面化封装使其应用于雷达、电子战等系统中时,能够有效减小系统体积,提高系统集成度,具有广阔的应用前景。未来,随着铌酸锂薄膜等技术的成熟,该组件的性能和集成度还能进一步提高,以满足其在雷达、电子战等场景大规模应用的需要。

参考文献:

- [1] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] He Gang, Qu Pengfei, Sun Lijun. Application status and trend of microwave photonic technology [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(5): 627-632. (in Chinese)
- [3] Berceci T, Herczfeld P. Microwave photonics—a historical perspective [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2010, 58(11): 2992-3000.
- [4] Xiao Yongchuan, Wang Chao, Zhang Hao, et al. Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using edfa [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 1-6. (in Chinese)
- [5] Wang Guodong, Zhao Shanghong, Li Xuan, et al. Optical generation scheme of microwave signals with multiple modulation formats [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0622002. (in Chinese)
- [6] Xie Taoran, Wang Zhaoying, Yuan Quan, et al. Generation of THz signal based on recirculating frequency-shifting loop with tunable frequency multiplication factor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S125001. (in Chinese)
- [7] Chen Dingyue, Zhang Yonghui, Zhou Renkui, et al. Precision conveyance of microwave photon transmit electricity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 210-215. (in Chinese)
- [8] Li Xiang, Wang Yalan, Ni Zizheng, et al. Broadband microwave frequency down-conversion using cascade Mach-Zehnder modulators to capture the target distance information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2622-2629. (in Chinese)
- [9] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [10] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [11] Qian Guang, Qian Kun, Gu Xiaowen, et al. Integrated chip technologies for microwave photonics [J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 262-280. (in Chinese)
- [12] Zou X H, Zou F, Cao Z Z, et al. A Multifunctional photonic integrated circuit for diverse microwave signal generation, transmission and processing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(6): 1800240.
- [13] Sun X P, Gao X Y. 45° fiber array: CN110579841A [P]. 2019-12-17.