光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251221001

多通道微波光子收发模块集成技术研究

盛顺锋[1],刘　婷[1],王茂旭[1],汤振华[1],高　晖[2],燕　阳[2],肖永川[1*]

（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,南京 210039）

摘　要： 面向新一代相控阵系统的小型化、大瞬时带宽以及高精度探测应用需求,文章提出一种多通道微波光子收发模块集成技术。重点研究了以薄膜铌酸锂调制芯片为核心的光电多芯片之间的高效耦合与高频互连技术,以及四通道收发模块的高频封装技术。通过对模块架构指标和混合集成技术的优化,该收发模块具有2～18 GHz的工作带宽,收发噪声系数低于9.4 dB,通道间相位一致性优于16°。四通道收发模块体积仅80 cm×40 cm×15 cm,为相控阵子阵系统提供了宽带、小尺寸的收发前端。

关键词： 相控阵；收发模块；微波光子技术；混合集成技术；光电混合封装；薄膜铌酸锂调制器

中图分类号： TN385　**文章编号：** 1001－5868(2026)01－0081－07

Integration Technology for Multichannel Microwave Photonic Transceiver Modules

SHENG Shunfeng[1], LIU Ting[1], WANG Maoxu[1], TANG Zhenhua[1], GAO Hui[2],
YAN Yang[2], XIAO Yongchuan[1]

（1. China Electronics Technology Group Corporation 44th Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. China Electronics Technology Group Corporation 14th Research Institute, Nanjing 210039, CHN）

Abstract: In this study, an integration technique for multichannel microwave photonic transceiver modules is proposed to address the demands for miniaturization, large instantaneous bandwidths, and high-precision detection in next-generation phased array systems. We focus on achieving efficient coupling and high-frequency interconnection between optoelectronic multichips centered on thin-film lithium niobate modulation chips. In addition, a high-frequency packaging technology is developed for four-channel transceiver modules. Upon optimization of the module architecture metrics and hybrid integration techniques, the transceiver module achieves an operating bandwidth of 2～18 GHz, a transmit/receive noise figure below 9.4 dB, and interchannel phase consistency better than 16°. The four-channel transceiver module measured only 80 cm×40 cm×15 cm, providing a broadband, compact transceiver front end for phased array subarray systems.

Key words: phased array; TR modules; microwave photonic technology; hybrid integration technology; optoelectronic hybrid packaging; thin-film lithium niobate modulator

0　引言

相控阵具有波束捷变、高增益和空间合成能力强的特点。随着隐身飞机、无人机等新型装备的广泛应用以及空间电磁环境的日益复杂,相控阵系统被要求具备更大的阵列规模、更大的瞬时带宽、更优异的抗电磁干扰能力,并能在有限的阵面内集成更多功能单元[1-2]。然而,传统电子相控阵收发前端

收稿日期：2025－12－21.

*通信作者：肖永川

依赖大量的微波集成电路，每个单元通道均需配备独立的移相器、衰减器、放大器等，使得阵面前端的体积、重量与功耗大幅增加[3]。受限于“电子瓶颈”，传统电学收发组件存在易受电磁干扰、带宽受限且一致性较差等问题。为消除误差，需要配合复杂的控制算法。因此，为了突破这些瓶颈，亟需开展新体制的收发前端技术的研究[4-6]。

微波光子技术通过光子信号承载、传输、处理微波信号，将微波光子技术应用于相控阵中，可以实现超宽带信号的收发与延时控制，大幅提升工作频率、瞬时带宽、幅相调控等指标[7-10]。然而，基于微波光子的阵面前端同样面临集成化的挑战。尽管分立光学器件的微波光子组件验证了收发前端的可行性，但因体积大、稳定性差，分立收发前端难以满足工程化需求。随着集成光子技术的发展，在众多材料体系中，薄膜铌酸锂凭借其高电光系数、低光学损耗等优势在超宽带、高效率电光调制器中得到大量应用。因此，薄膜铌酸锂材料成为开展高速电光调制及微波光收发集成的理想选择[11-14]。

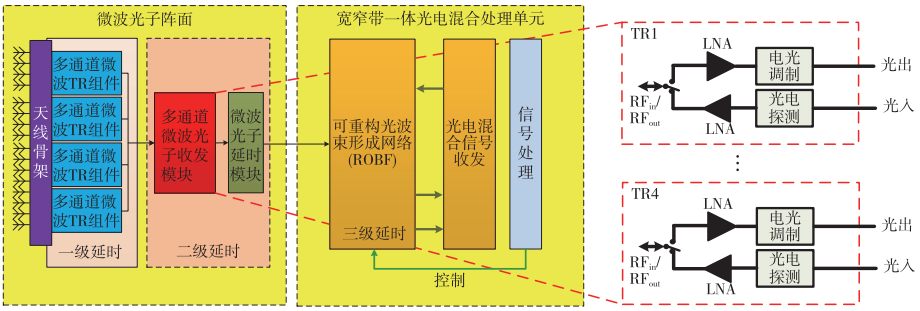
微波光子收发前端需集成激光器、电光调制器、探测器等众多有源/无源器件，而不同材料体系间的差异为高密度集成带来挑战。此外，微波与光子芯片之间的光电多芯片混合集成也是实现高度集成面临的挑战之一[15-17]。因此，研究者开展了大量的基于薄膜铌酸锂的异构集成技术研究，通过解决片间耦合的模场失配问题来有效降低光损耗[18]。同时开展了光电芯片之间的高频互连以及组件的高频封装技术研究，通过优化金丝/金带以及腔体结构提高射频信号的稳定传输与通道之间的一致性[19]。

本文面向相控阵子阵系统的宽带低噪声收发需求，设计了四通道的微波光子收发组件，解决了光芯片与探测器的高效耦合问题，并实现了微波光子收发模块的小型化与集成化。开展了光电多芯片混合集成设计以及高频组件封装方法分析，以满足收发前端阵列化、小型化及高可靠的应用需求。

1 收发模块架构设计

1.1 总体架构设计

多通道微波光子收发模块在光控相控阵系统中位于微波收发模块后端，具有将后级的变频、延时和放大等微波综合网络等拉远的作用，使得阵面更简洁。面向宽带相控阵系统的高精度探测需求，四通道微波光子收发集成模块应具有大瞬时带宽、低噪声系数和高发射功率，以提高小目标信号和微弱信号的侦查能力。因此，四通道微波光子收发集成模块的工作频段设计为2～18 GHz，发射增益大于15 dB，收发链路噪声系数小于15 dB，多通道微波光子收发模块架构如图1所示。



(a)微波光子相控阵架构示意图　　(b)多通道微波光子收发模块架构示意图

图1　多通道微波光子收发模块架构

图1(a)展示了微波光子收发模块在相控阵中的位置，图1(b)给出了基于薄膜铌酸锂的调制探测光引擎的四通道收发模块架构。下行射频信号通过前置低噪声放大器放大后，再经过电光调制器转换到光域，并输出到模块外部；经过调制后的光信号输入模块上行通道，并通过光纤耦合到高速光电探测器，最后转换到射频域放大输出。上下行通道采用射频开关实现信号切换。

1.2 模块指标计算

收发模块采用外部调制方案，薄膜铌酸锂调制器的插损不到5 dB、半波电压不到3 V，有效提高了链路的射频增益。为了平衡增益与输入P-1，模块接收链路的前级微波放大采用20 dB，发射链路后级的微波放大部分，经两级共放大了40 dB，图2为收发模块的链路功率预算图。

外调微波光子链路的射频增益和噪声系数可

表示为：

$$G_{\mathrm{EOOE}}=10\lg\left[\left(\frac{I_{\mathrm{dc}}}{V_{\pi\mathrm{RF}}}\right)^2 Z_{\mathrm{in}}Z_{\mathrm{out}}\right]$$
$$NF=10\lg\frac{N_{\mathrm{out}}}{G_{\mathrm{EOOE}}\kappa_{\mathrm{B}}TB} \tag{1}$$

式中，I_{dc}为探测器的输出光电流，$V_{\pi\mathrm{RF}}$为电光调制器的半波电压，Z_{in}和Z_{out}分别为输入输出阻抗。N_{out}为链路总噪声，κ_{B}为玻尔兹曼常数，T=290 K为标准噪声温度，B为传输带宽。

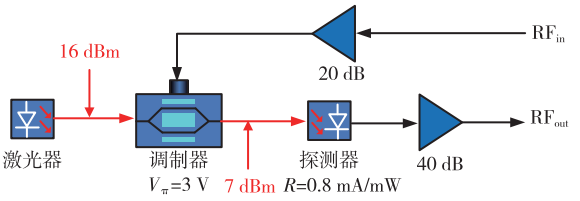
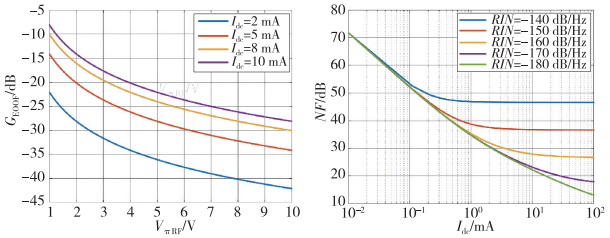


图 2　收发模块收发链路功率预算

图 3(a)为不同光电流下射频增益随调制器半波电压的变化曲线，可以看到提高探测器光电流及降低调制器半波电压均可提高链路射频增益。图 3(b)为不同激光器*RIN*噪声下链路噪声系数随光电流的变化曲线，使用*RIN*噪声低的激光器以及增加链路的光电流，则可降低链路的噪声系数。



(a) 不同光电流情况下，外调射频增益随半波电压的变化关系　(b) 不同激光器*RIN*噪声条件下，噪声系数随光电流的变化关系

图 3　射频增益和噪声系数与链路参数之间的关系

微波光收发模块为微波前级放大、微波光子链路、微波后级放大的级联系统，射频增益和噪声系数由公式(2)表示。收发模块中本征微波光子链路的理论射频增益为−24 dB，因此微波收发模块的发射链路射频增益为 16 dB，接收链路的射频增益为−4 dB。微波光子链路的理论噪声系数为 32 dB，微波前级和后级放大的噪声系数为 2.5 dB，因此微波光收发模块的收发链路噪声系数为 12.91 dB。

$$G=G_1+G_2+G_3+\cdots$$
$$F=F_1+\frac{F_2-1}{g_1}+\frac{F_3-1}{g_1g_2}+\cdots \tag{2}$$

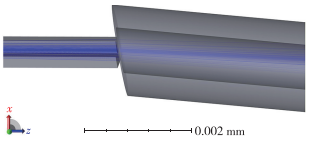
当模块输入射频功率大于等于−10 dBm时，此时微波前级后级放大输出均未饱和。所设计的微波光子收发模块在 2～18 GHz工作带宽下实现接收射频增益至少为−5 dB，发射链路增益至少为 15 dB，噪声系数不超过 15 dB的性能。

2　光电芯片集成设计

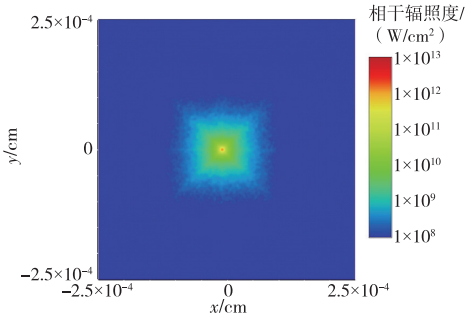
2.1　调制探测光引擎设计

收发模块的光学功能区主要完成电光/光电转换，将调制器与探测器贴装在同一陶瓷基板上构成薄膜铌酸锂调制探测光引擎。为了降低链路光损耗，提高模块增益，需要重点优化调制器与光纤之间、探测器和光纤之间的耦合设计。

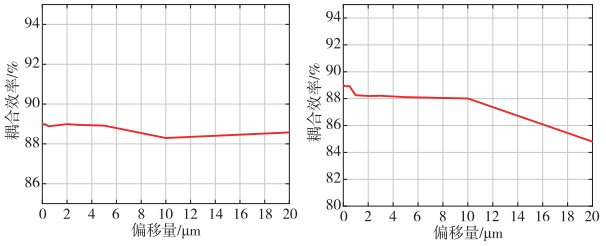
调制器光纤耦合模型如图 4(a)，在芯片上采用



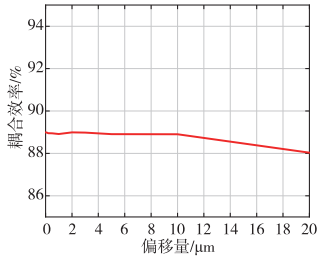
(a) 阵列光纤耦合模型



(b) 阵列光纤最佳耦合效率下的光纤接收端面光斑



(c) x方向耦合效率容差曲线　(d) y方向耦合效率容差曲线

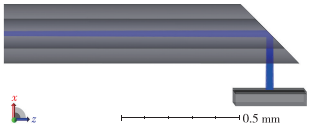


(e) z方向耦合效率容差曲线

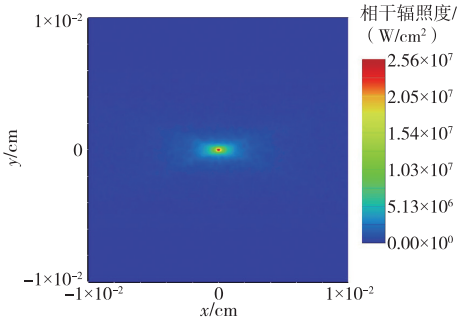
图 4　薄膜铌酸锂波导与光纤耦合分析

倒锥结构的模斑转换器将光波导中的模斑直径扩大到6.5 μm，图4(b)中纳米波导有超过88%的光耦合到模斑转换器波导中。调制器芯片端面设计为斜10°，光纤耦合角度与水平面呈斜15°，有效抑制在阵列光纤(FA)耦合点的背向光反射，在x,y,z方向偏移±10 μm范围内仍然能保持88%以上的耦合效率。通过基于FA的高效耦合设计，调制器芯片与光纤的端面耦合损耗低至0.6 dB。

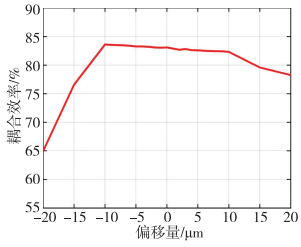
光纤探测器耦合模型如图5(a)所示，光信号经45°端面的单模光纤全反射至下层的18 GHz高速探测器光敏面中。直径为30 μm的光敏面接收到光纤出射的椭圆形光斑，最大耦合效率83.6%。在水平偏移±10 μm的误差内依然保持82%以上的耦合效率，垂直偏移±3 μm的误差内耦合效率高达81%。通过探测器的高效耦合设计，耦合损耗低至0.78 dB，并具有较高的空间容差性。



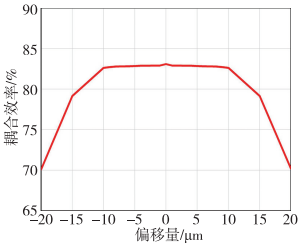
(a) 探测器光纤耦合模型



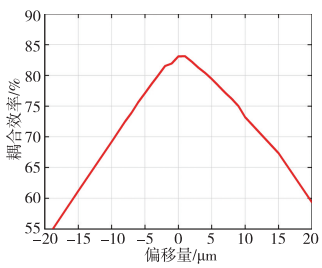
(b) 探测器最佳耦合效率下的光敏面光斑



(c) x方向耦合效率容差曲线



(d) y方向耦合效率容差曲线

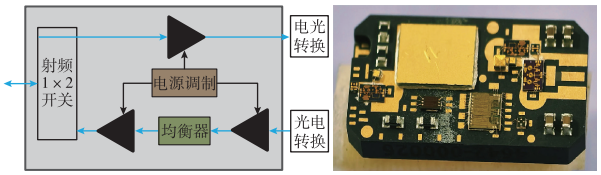


(e) z方向耦合效率容差曲线

图5 探测器与光纤耦合分析

2.2 一体化微波收发模组设计

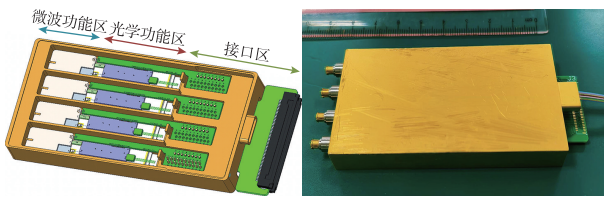
微波放大功能单元的原理图和实物图分别如图6(a)和(b)所示。针对发射链路的微波放大设计，在两级引入了功率均衡芯片，以避免过高增益导致的自激，并优化发射链路的带内幅相一致性。针对接收链路的设计，射频信号进入收发开关后，在进行电光调制前，首先通过低噪声放大器抬高增益，同时压低接收噪声，削弱由于电光/光电变换带来的损耗及噪声的影响。收发链路切换的射频开关采用电源调制控制的切换方式，进一步提升单通道的收发隔离度。



(a) 宽带微波功能单元的功能设计 (b) 微波陶瓷功能单元实物图

图6 微波放大功能单元的原理图和实物图

微波收发功能单元的主要功能是实现上下行微波放大与收发切换，该功能单元采用低温共烧陶瓷(LTCC)单基板实现，其结构图和实物图分别如图7(a)和(b)所示。考虑到光学功能区的电光调制与光电探测射频信号平面存在1.6 mm左右的高度差，与探测器互连的陶瓷基板设计下沉结构，使得陶瓷基板与绝缘体上薄膜铌酸锂(LNOI)强度调制器的射频信号处于同一水平面，在陶瓷基板内部完成射频信号的穿层设计，将上行信号转移到顶部输出。同时为了降低串扰、抑制谐振，对增益较高的上行通道采用掩埋设计，并在放大芯片增加盖板达到隔离信号的目的。

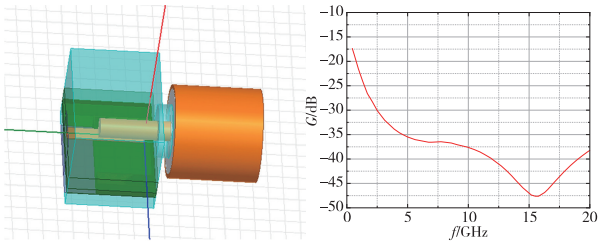


(a) 收发模块集成结构示意图 (b) 收发模块实物图

图7 收发模块的结构图和实物图

解决微波芯片与探测器芯片、调制器芯片之间的高频互连问题，能够进一步提高收发前端的集成

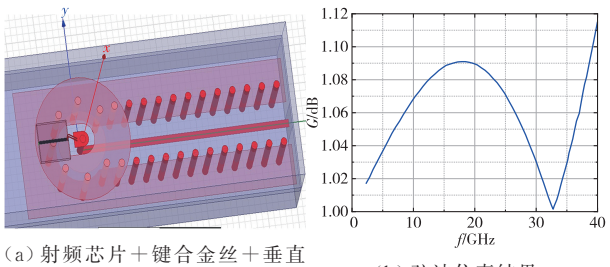
度，并有效降低阵面尺寸和功耗。因此，需要重点开展光电芯片与连接器之间、金丝/金带等之间的互连仿真设计。图 8 对模块管壳上 SMP 连接器与微波芯片上微带线之间的高频传输进行了建模和仿真设计，仿真结果表明 SMP 射频接口与金丝之间可以实现 DC-20 GHz 信号的宽带传输。



（a）SMP 连接器　　（b）金带互连仿真结果

图 8　SMP 连接器与金带互连仿真

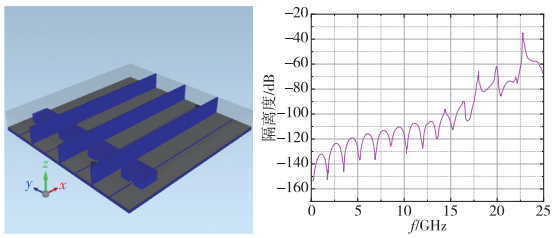
此外，对射频连接的垂直过渡位置进行如图 9 所示的仿真设计优化。经过驻波优化后的射频垂直过渡结构在 2～40 GHz 频率范围内驻波小于 1.12，特别在 2～18 GHz 频段范围内驻波小于 1.10，所设计的收发模块射在 2～18 GHz 这一频段范围内可以实现良好的宽带幅相特性。



（a）射频芯片＋键合金丝＋垂直过渡＋带状线的仿真模型　　（b）驻波仿真结果

图 9　射频连接的垂直过渡位置的仿真设计优化结果

四通道收发模块的腔体设计需避免谐振频率落在器件工作频域之内，并避免多通道间的串扰。对四通道收发模块腔体隔离度进行建模仿真与优化，如图 10 表明优化后的腔体在 20 GHz 频率范围内，通道间隔离度均大于 50 dB，保证了发射信号与接收信号之间、不同通道之间均具有良好的隔离度。

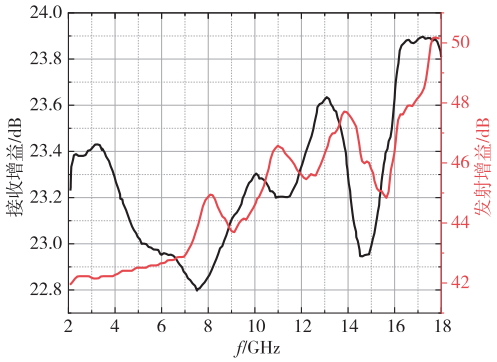


（a）腔体隔离仿真模型　　（b）通道间隔离仿真结果

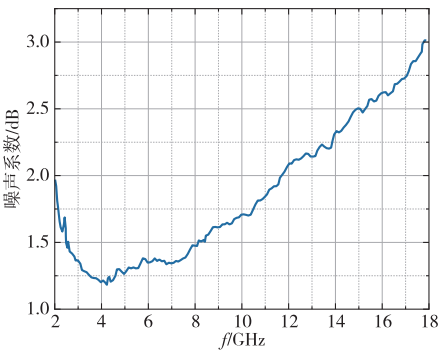
图 10　四通道收发模块腔体隔离度的仿真优化结果

3　实验结果与讨论

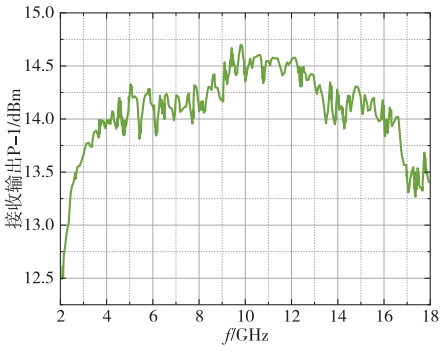
微波功能区的陶瓷基板放大模组决定了收发模块的整体指标，对微波陶瓷基板电路模组进行测试得到如图 11 的测试结果。微波放大模组的接收增益超过 20 dB，发射增益超过 40 dB，均优于设计值，保证了更高的链路增益；接收噪声系数低于 2.5 dB，有效降低收发模块的噪声系数；接收链路的输出 P-1 功率大于等于 12 dBm，为收发模块提供了足够大的线性功率区间联合微波功能区和光学功能区对微波光



（a）接收/发射增益-频率曲线



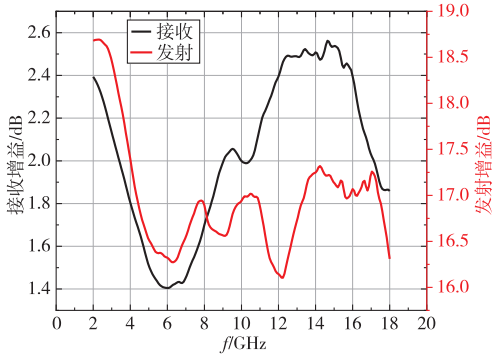
（b）接收噪声系数频率曲线



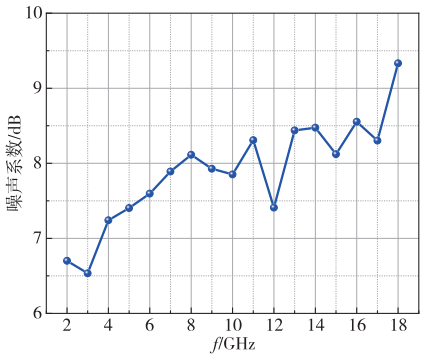
（c）接收输出 P-1 频率曲线

图 11　微波芯片测试结果

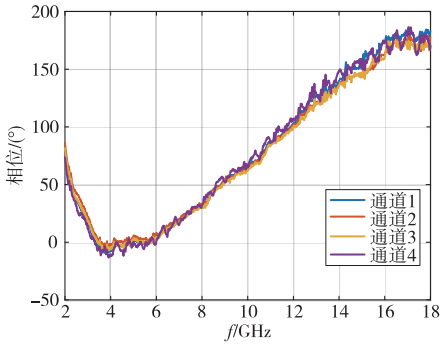
子收发模块进行整体测试，测试结果如图12所示。模块增益在2～18 GHz范围内波动小于3 dB，因此微波光子收发模块的工作频率为2～18 GHz。发射增益大于16.1 dB，实现了足够大的发射功率。微波光子收发模块的自收发链路噪声系数不小于9.4 dB，保证了模块对微弱信号探测能力。此外，四通道之间在全频段具有良好的相位一致性，且小于等于16°。



（a）接收发射增益-频率曲线



（b）噪声系数频率曲线



（c）通道间相位一致性

图12 模块指标测试结果

表1列出了所设计的四通道微波光子收发模块的主要性能指标。通过对模块的整体架构、高效耦合及高频集成技术开展研究，使得模块性能达到了预期设计值，具有良好的大瞬时带宽、低噪声的性能。

表1 主要技术指标满足性对比

指标名称	设计值	实测值
工作带宽	2～18 GHz	2～18 GHz
增益	≥－5 dB(接收)	≥1.4 dB(接收)
	≥15 dB(发射)	≥16.1 dB(发射)
幅度平坦度	±2 dB	±1.3 dB
噪声系数	≤15 dB	≤9.4 dB
相位一致性	≤18°	≤16°

4 总结

本文面向相控阵子阵系统的收发一体模块的需求，研究了一种四通道微波光子收发模块的混合集成技术。通过对模块架构及指标的分析与设计，达到工作频率范围为2～18 GHz，收发链路噪声系数小于等于9.4 dB，发射增益大于等于16.1 dB的指标。本文重点对薄膜铌酸锂调制探测光引擎的高效耦合技术开展了研究，实现了光纤与调制芯片之间的耦合损耗低于0.6 dB/端面，光纤与探测器耦合效率低至0.78 dB。对多通道收发模块的高频金丝/金带互连以及高频腔体封装技术开展了优化设计，达到了通道间相位一致性优于16°的指标。所提出的大瞬时带宽、低噪声系数、高集成的四通道微波光子收发模块，体积较分立模块体积减小一倍，能支撑相控阵子阵前端的小尺寸、高精度探测应用。

参考文献：

[1] Kebe M, Yagoub M C E, Amaya R E. A survey of phase shifters for microwave phased array systems[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2025, 53(6): 3719-3739.

[2] Zhang W, Liu Y, Cui Z, et al. Steerable multibeam reflector antenna for space application [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025, 40(10): 48-57.

[3] Zhang Q, Liu H, Yu Y, et al. Developments and challenges of silicon-based millimeter-wave integrated phased arrays: system, circuit, and device modeling[J]. Science China Information Sciences, 2025, 68(9): 191401.

[4] 张汉生，郭若海，王志刚，等. 一种面向相控阵雷达的多维牛顿正交匹配追踪算法[J]. 信号处理，2025，41(7)：1165-1177.
Zhang Hansheng, Guo Ruohai, Wang Zhigang, et al. A multi-dimensional newtonized orthogonal matching pursuit algorithm for phased array radar[J]. Journal of Signal Processing, 2025, 41(7): 1165-1177.

[5] 程 岩，王六春，梁志伟，等. 宽带相控阵天线阵面移相器与延时器的控制算法研究[J]. 微波学报，2025，41(4)：71-76.
Cheng Yan, Wang Liuchun, Liang Zhiwei, et al. Research on

the control algorithm of phase shifter and real-time delayers of wideband phased array antenna[J]. Journal of Microwaves, 2025, 41(4): 71-76.

[6] Shafiq Z, Anagnostou D E, Podilchak S K. A computer controlled phase and magnitude self-calibration methodology for phased array antennas[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2024, 4(2): 213-232.

[7] 丁　鹏, 陈　诺, 彭若雪, 等. 基于激光器RIN抑制的宽带低噪声微波光传输技术[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 269-273.
Ding Peng, Chen Nuo, Peng Ruoxue, et al. Broadband low-noise microwave optical transmission technology based on laser RIN suppression[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 269-273.

[8] 刘　婷, 汤振华, 王茂旭, 等. 振动下微波光收发链路附加相位噪声研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(6): 986-989.
Liu Ting, Tang Zhenhua, Wang Maoxu, et al. Analysis of additional phase noise of microwave optical transceiver link under vibration perturbation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(6): 986-989.

[9] Chen J, Xiong R, Yu H, et al. Microwave Photonic Synthetic Aperture Radar: systems, experiments, and imaging processing [Technical Committees[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2025, 13(2): 314-328.

[10] Shi S, Niu H, Shi W, et al. Integrated optical tunable delay line and microwave photonic beamforming chip: a review[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(7): 2400663.

[11] 郑帅峰, 刘佰畅, 田自君, 等. 铌酸锂M-Z电光强度调制器光辐射模研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(1): 74-78.
Zheng Shuaifeng, Liu Baichang, Tian Zijun, et al. Study on the radiation-mode light of the lithium niobate electric-optical intensity modulator with M-Z optical waveguide[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 74-78.

[12] Ding Y, Shang C, Yu W, et al. Microwave photonic sideband selector based on thin-film lithium niobate platform[J]. Chinese Optics Letters, 2024, 22(3): 031304.

[13] 刘佳旭, 周桥玲, 周敬杰, 等. 基于慢波电极薄膜铌酸锂电光调制器的超短光脉冲产生[J]. 半导体光电, 2025, 46(4): 608-615.
Liu Jiaxu, Zhou Qiaoling, Zhou Jingjie, et al. Ultrashort optical pulse generation based on thin-film lithium niobate electro-optic modulators with slow-wave electrode[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(4): 608-615.

[14] Feng H, Ge T, Guo X, et al. Integrated lithium niobate microwave photonic processing engine[J]. Nature, 2024, 627(8002): 80-87.

[15] Paul B, Sertel K, Nahar N K. Photonic beamforming for 5G and beyond: a review of true time delay devices enabling ultra-wideband beamforming for mmWave communications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 75513-75526.

[16] 张郭勇. 光电共封装技术及其在光学相控阵中的应用研究[J]. 电子与封装, 2025, 25(6): 40-48.
Zhang Guoyong. Research on co-packaged optics technology and its application in optical phased array[J]. Electronics & Packaging, 2025, 25(6): 40-48.

[17] Zhou J, Xin K, Zhao X, et al. Recent progress in optoelectronic applications of hybrid 2D/3D silicon-based heterostructures[J]. Science China Materials, 2022, 65(4): 876-895.

[18] Rosborough V, Grant H, Musolf J, et al. Photonic wire bonding *via* two-photon polymerization laser lithography for hybrid integration[J]. Proc. of SPIE, 2023, 12424: 124240Q.

[19] Zhang Y, Tian W, Wang H, et al. High-frequency transmission characteristic analysis of TSV-RDL interconnects [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(1): 89-97.

作者简介：

盛顺锋(1998—)，女，硕士，工程师，主要研究方向为微波光子技术；

肖永川(1990—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为微波光子组件设计、光电多芯片混合集成技术。