

激光与光电子学进展

高线性波分复用模拟光链路的设计及实现

黄宁博^{1,2*}, 吴远大²¹郑州大学物理学院, 河南 郑州 450001;²河南仕佳光子科技股份有限公司, 河南 鹤壁 458030

摘要 面向多路射频模拟信号的高线性传输需求, 基于强度调制-直接探测的原理, 提出了基于波分复用技术的模拟射频光传输方案; 利用高线性度模拟直调半导体激光器、波分复用器、模拟光电探测器, 设计了基于微波光子技术的波分复用射频光传输链路, 该链路具有低串扰、低失真、链路增益可调等性能。利用该链路进行了直调激光器、驱动控制电路、射频光发射模块和光接收模块的样机研制。对所研制出的样机进行了实验测试。测试结果表明: 通道增益可在 $-30\sim 10$ dB 调谐, 通道内基波与二次谐波抑制比高于 50 dB, 相邻及非相邻通道间射频串扰均低于 60 dB, 相位一致性在 $\pm 5^\circ$ 以内。针对不同的信号输入功率, 在线调整链路增益, 改善链路的信噪比或非线性失真效应。设计和研制的样机可用于低频段射频信号的光纤传输。

关键词 光纤通信; 射频光传输; 直调半导体激光器; 模拟光链路

中图分类号 TN913.7; TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213173

Design and Implementation of High-Linearity Wavelength Division Multiplexing Analog Optical Link

Huang Ningbo^{1,2*}, Wu Yuanda²¹School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;²Henan Shijia Photons Technology Co., Ltd., Hebi 458030, Henan, China

Abstract To meet the transmission demand of radio-frequency (RF) signals, a radio-over-fiber (RoF) transmission link was designed based on an intensity-modulation/direct-detection scheme, employing high-linearity directly modulated semiconductor lasers, array waveguide gratings, and analog photodetectors. This link achieves low crosstalk, low harmonic distortion, and a variable link gain. Directly modulated semiconductors and control circuits, an analog RF transmitter, and receiver modules are designed and fabricated. Experimental results indicate that the link gain can be tuned in the range of $-30\sim 10$ dB, the second harmonic suppression ratio exceeds 50 dB, the crosstalk among channels is lower than 60 dB, and the phase difference is within $\pm 5^\circ$. For different input RF powers, the link gain can be tuned online to improve the noise figure or to reduce the nonlinear distortions of the RoF link. This design and prototype can be used for L-band RF signal transmission.

Key words optical fiber communications; radio-over-fiber; directly-modulated semiconductor lasers; analog optical links

1 引言

在当前的光纤通信网络中, 占据通信流量主导地位的是电信、数据中心领域的数字光通信。但在传统的微波模拟通信领域, 基于微波技术和光通信技术的微波光子学最近呈现爆发式增长, 并发展出微波光子通信系统。微波光子学主要研究微波和光波的相互作

用, 其应用领域有雷达、通信、电子战等^[1-2]。微波光子技术以其低损耗、高带宽、抗电磁干扰等优势, 在过去的 20 多年里, 探索用光的方式来传输和处理微波信号一直是微波光子学领域的研究热点^[3-7]。

在射频光传输 (Radio-over-Fiber, RoF) 应用中, 直调方案与外调方案是两种较为成熟且常用的链路设计方案, 其主要差异在于电-光调制器件。在直调方案

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2200205)

通信作者: huangnb@siphotons.com

中,采用直调激光器(Laser diode, LD)和光电探测器(Photodetector, PD)对光载波进行强度调制光纤传输后,直接由光电探测器探测接收到的光功率,恢复出射频调制信号^[8-10]。直调方案在短距离、Ku波段及以下频段的应用中以其低成本、高性能而占据主导优势。在外调制方案中,连续发射激光器与外调制器共同组成光发射机。外调制方案可实现对K、Ka频段的信号传输、信号处理,具有高带宽、大动态范围、低噪声等优异性能^[11-15],但外调制方案的缺点是系统复杂、成本高。

鉴于当前的射频光传输多为单路点到点或点到多点类型,面向多路射频信号传输需求,本文基于射频直调光传输方案,采用波分复用(Wavelength division multiplexing, WDM)技术,从射频光通信中的有源光发射、光接收及无源光器件的性能原理着手,针对射频信号传输中的增益、串扰、噪声、相位一致性、非线性失真等关键指标,设计了小型化、低功耗直调半导体激光器及其驱动控制电路;基于直调激光器、探测器、波分复用模块,完成了波分复用射频光收发链路的设计和实现。该光收发传输链路系统的信号传输频段为0.5~2.0 GHz,增益在线可调,二次谐波抑制比高于50 dB,不同通道间相位差在±5°以内,三阶交调产物抑制比高于60 dB。在多路射频信号传输应用中,可以通过增减收发端的光模块数量来达到多路射频信号传输的目的。

2 射频光传输系统结构设计

2.1 模拟直调激光器强度调制-直接探测原理

对模拟直调激光器来说,当所加载的偏置电流变化时,其输出光功率即随之线性变化,可直接实现射频电信号到光信号的转换,完成对光信号强度的调制。外调制方案则是采用连续发射的光载波与光调制器匹配使用,可以实现强度、相位等的多维度调制。

在接收探测端,光电探测器所用的光电二极管是平方率检测器件,它直接对输入光功率进行检测,并将光功率转换为光电流,实现光强度探测。基于直调激光器和光电探测器的强度调制-直接探测(Intensity modulation-Direct detection, IM-DD)方案具有成本低、系统结构简单的优势。

对于直调激光器,其驱动电流由直流偏置电流和交流调制电流决定。当激光器的直流偏置电流为 I_B 、射频调制电流信号为 $I_m \cos \omega_m t$ (调制信号电流幅度为 I_m ,角频率为 ω_m ,初相位设为0)时,流过激光二极管的总电流为

$$I(t) = I_B + i(t) = I_B + I_m \cos \omega_m t, \quad (1)$$

即流过激光二极管的总电流包括静态直流偏置电流和动态射频调制电流。

对于正弦调制信号,当射频调制信号的功率为 P_m

时,在50 Ω阻抗匹配系统应用中,流过激光二极管的调制电流幅度约为 $I_m = \sqrt{2P_m/Z_0}$,其中 $Z_0 = 50 \Omega$ 为负载阻抗。当激光器控制在恒定温度、恒定直流偏置电流时,激光器输出为单纵模光载波。当射频调制信号加载到直调激光器后,激光器输出的调制光电场时域表达式^[16-17]为

$$E(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\{j[\omega_c t + n(\omega_m t + \theta)]\} \times \left\{ J_n(\beta) + \frac{m}{4} [J_{n-1}(\beta) \exp(-j\theta) + J_{n+1}(\beta) \exp(j\theta)] \right\}, \quad (2)$$

式中: E_0 为光载波振幅; ω_c 为光载波角频率; ω_m 为射频调制信号角频率; θ 为调制信号初相位; m 为强度调制指数; β 为频率调制指数; J_n 为 n 阶贝塞尔函数。在 $m \ll 1$ 的小信号强度调制近似下,二阶及以上调制边带分量可忽略不计,调制信号初相位设为0,在不考虑啁啾的情况下,式(2)可简化为

$$E(t) \approx E_0 \sum_{n=-1}^{+1} J_n(\beta) \exp[j(\omega_c + n\omega_m t)]. \quad (3)$$

从调制光波的时域表达式或傅里叶变换频谱中可以看出,在小信号调制下,直调半导体激光器的强度调制频谱主要包括光载波、上一阶边带信号。对于直调激光器输出调制光功率,在上述调制信号下,根据激光器输出光功率-驱动电流的线性关系,光功率的时域表达式^[17]可描述为

$$P(t) = P_0(1 + m \cos \omega_m t), \quad (4)$$

式中: P_0 为激光器的偏置电流为 I_B 时对应的输出光功率。光电探测接收端采用P-I-N结构的光电二极管,光电探测器对输入的光功率有响应,将输入光功率转换为光电流,所得到的光电流时域表达式为

$$I(t) = R \cdot P(t) \approx R \cdot P_0(1 + m \cos \omega_m t) = I_0(1 + m \cos \omega_m t), \quad (5)$$

式中: R 为光电探测器的响应度; I_0 为直流响应电流。光电探测器将光发射端的强度调制直接转换为电流。输出光电流部分除直流外,还有与发射端调制指数、接收端光功率和响应度有关的调制信号电流。在射频光传输链路中,饱和输入光功率、偏置电压等对探测器的非线性效应(谐波失真、交调失真等)有重要影响^[18]。这样射频信号经过电-光-电的转换,就实现了射频信号从源端到终端的传输。

2.2 基于直调激光器的光收发模块设计

为满足空间和质量受限型应用平台对器件体积、质量和功耗的要求,设计了小体积的高线性度直调激光器,其体积比传统蝶型直调半导体激光器减小50%以上,质量不超过4 g。激光器射频输入采用接地共面波导(CPW)形式,同时器件内置半导体致冷器(Thermal-electrical cooler, TEC)、热敏电阻(Thermistor)、背光探测器(Monitor photodiode,

MPD)、光隔离器等。为抑制射频信号通过直流通路泄露造成的射频信号功率损失,激光器内置了 BiasTee 结构。对激光器射频特性进行了 $50\ \Omega$ 阻抗匹配设计。面向模拟传输应用时,激光器的线性度是重要的指标要求。在直调激光器的封装设计方面,与系统线性度相关的指标包括半导体激光器芯片、阻抗匹配、射频调制线性度等。在半导体激光器芯片上,首先选出 P - I 曲线线性度好的芯片,再封装成器件;同时在

器件级测试激光器的射频输入 1 dB 压缩点、二次谐波、噪声系数等指标,筛选出射频输入 1 dB 压缩点高于 17 dBm、 P - I 曲线饱和电流高于 100 mA、0 dBm 输入,且 1 GHz 频点处基波与二次谐波抑制比高于 50 dB、频率小于 2 GHz 时,噪声系数小于 38 dB 的直调激光器器件,用于模拟信号的光发射机。

所设计的激光器内部逻辑电气结构及激光器实物如图 1 所示。

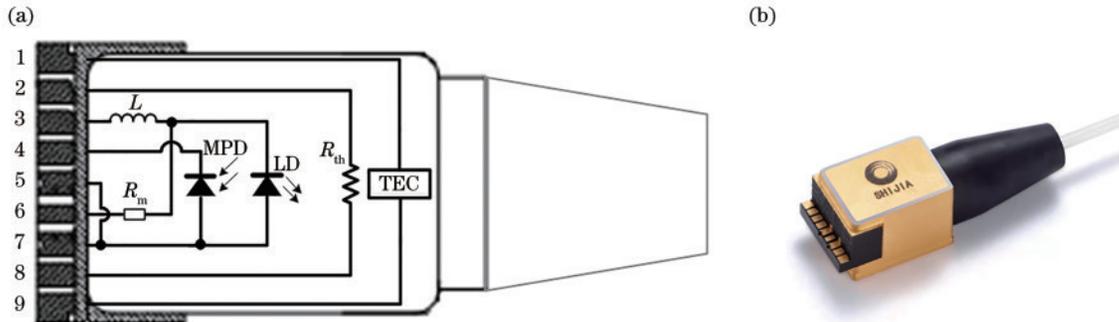


图 1 直调激光器。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 1 Directly-modulated laser. (a) Schematic structure; (b) physical picture

对于光发射模块,在完成激光器设计的基础上,为保证激光器在 $-40\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 稳定工作,根据激光器的功能特性,设计了直流恒流偏置驱动电路和高精度温度控制电路,用于给激光器提供合适的偏置电流和工作温度点。对于直流偏置电流驱动电路,采用了双运放负反馈的方式给激光器提供约 60 mA 的偏置电流,使得激光器工作于 P - I 曲线线性中点附近,以保证激光器输出合适的光功率,同时在该静态工作点处射频调制的谐波失真较小。对于温度控制电路,采用比例-积分-微分(P-I-D)反馈控制回路,实现对激光器工作温度的设置。在波分复用系统中,也通过温控电路来调整每个光发射模块的波长通道的峰值波长,使得该波长与波分复用器的低损耗中心波长范围匹配,降低波分复用器阵列波导光栅(Array waveguide, AWG)引起的光路损耗。

对于光接收模块,接收端光载射频信号通过波分解复用器 AWG-DEMUX 转换为八路单波长的光信号,每一路光信号再分别输入到一个光电探测器模块上。光电探测器将接收到的光信号转换为电信号。由于电-光-电的转换损耗和波分复用器的插损较大,为提高信号强度,在光电探测器后端增加了可变增益放大器,用于微调不同通道间的增益一致性。为了补偿电-光-电转换损耗和波分复用器插入损耗,在光电探测器后端再通过可变增益放大器(Variable gain amplifier, VGA)对射频信号进行增益补偿并调整不同通道间链路增益的一致性。在接收端的线性度设计方面,使用高饱和输入光功率的光电探测器芯片进行光路耦合和射频封装,激光器和探测器直连的 1 dB 压缩点高于 17 dBm,二次谐波抑制比高于 50 dB,三阶交调失真产物抑制比高于 60 dB。

为降低波分复用器插入损耗,采用高斯光谱型 AWG。由于阵列波导光栅对热敏感,在 $-40\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 其通道中心波长会随着温度发生漂移。为降低高低温下 AWG 波长漂移引起的不同波长插入损耗不一致,在 AWG 设计中采用绝热型 AWG。单波长光发射模块和光接收模块的原理示意图如图 2 所示。

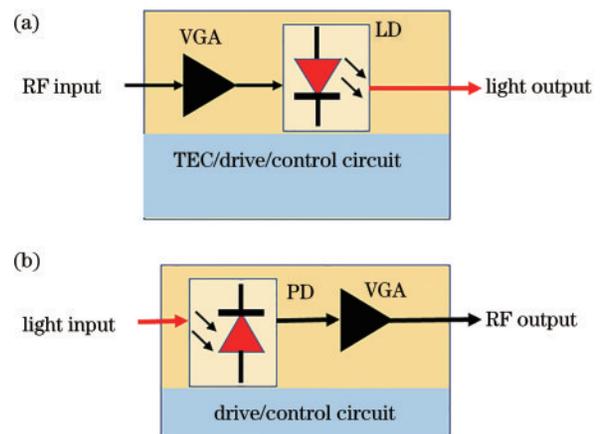


图 2 直调光发射模块和接收模块原理示意图。(a)光发射模块;(b)光接收模块

Fig. 2 Functional diagram of optical transmitter and receiver.

(a) Optical transmitter; (b) optical receiver

2.3 链路整体设计

在卫星通信、雷达天线拉远应用中,系统主要关注电-光-电转换损耗。而通常激光器和探测器都具有较大的电光和光电转换损耗,例如直调激光器的电光转换损耗典型值为 $15\sim 20\ \text{dB}$,光电探测器的光电转换损耗典型值为 $10\ \text{dB}$,在不考虑传输引入的传输损耗时,背靠背的射频光传输损耗典型值一般为 $25\sim 30\ \text{dB}$ 。

在中短距离的低频段传输应用中,可以采用在光上或者电上对此损耗做补偿。由于光放大器的性能指标如噪声、体积等比同样放大倍数的电放大器指标要差一些,因此,在本方案设计中,采用在激光器射频输入前端和探测器后端增加可变增益放大器来补偿激光器和探测器的光电转换损耗,并调整 8 个通道间射频信号的幅度增益的一致性。

在应用中,射频光传输系统所面临的工作环境一般在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,这个环境温度对数字光通信系统而言,只需保证高低温下的消光比及误码率即可。而对模拟射频传输应用来说,温度范围的变化对链路射频

性能至关重要。因此,射频光传输系统中,性能与温度密切相关的光发射机要采用温控系统来保证激光器工作于恒定温度。

为传输 8 路射频信号,在光发射端,8 路射频信号分别加载到 8 个不同波长的光发射模块上,再通过合波器阵列波导光栅(AWG-MUX)进行合波后由一根光纤输出。在光接收端,光信号首先通过波分复用器(AWG-DEMUX)进行解复用,将 8 个波长的信号光分别输入到对应的光电探测模块,进行光电转换并调整 8 个通道间信号的幅度一致性。为满足以上要求,所设计的整机结构如图 3 所示。

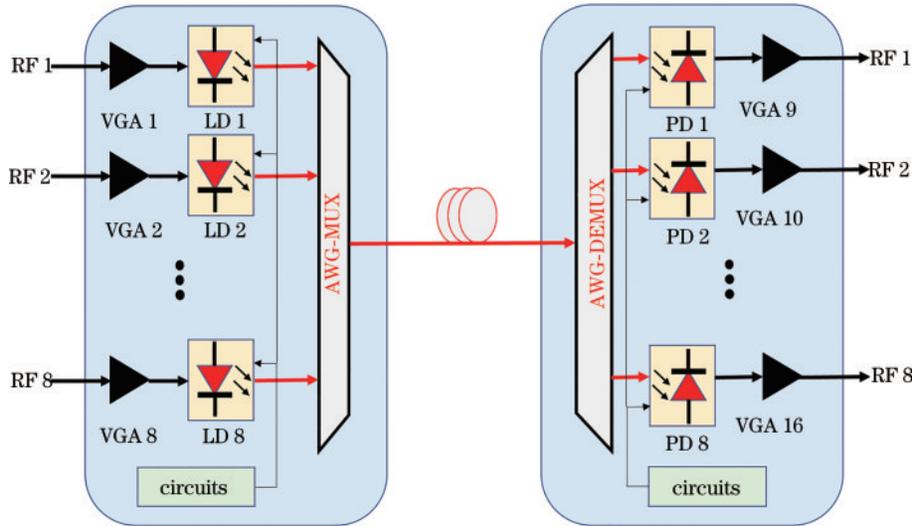


图 3 射频光传输链路整体设计方案

Fig. 3 Design scheme of the WDM RoF link

基于该设计方案,所研制的 8 通道射频光传输链路实物如图 4 所示。

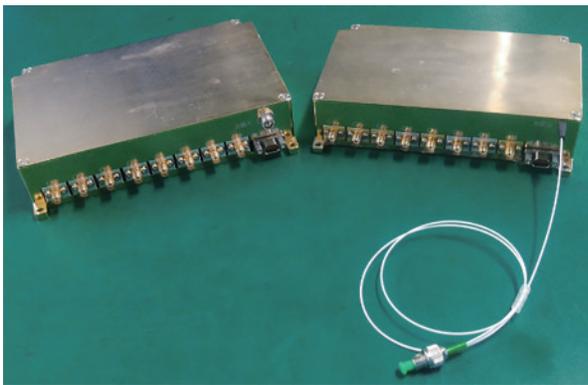


图 4 8 通道射频光传输收发端模块样品

Fig. 4 Prototype of eight-channel RoF transmitter and receiver modules

3 样机测试

所研制的发射端和接收端样机的射频接口均为射频同轴接口,发射和接收端光口通过光纤引出,供电及上位机软件控制接口为通用 9 针电接口,对所研制的

样机进行了测试,测试项包括通道增益、噪声系数、二次谐波抑制比、三阶交调产物抑制比、通道间串扰、通道间相位一致性等。测试设备包括矢量网络分析仪 (VNA, Keysight N5227A, 10 MHz~67 GHz)、光波元件分析仪 (Keysight N4373D, 10 MHz~67 GHz)、微波源 (Anritsu MG3694C, 40 GHz)、频谱仪 (Keysight N9010A, 9 kHz~44 GHz)、噪声系数分析仪 (Agilent N8975A, 10 MHz~26.5 GHz)、微波探针台等。

首先对每个通道链路的增益进行测试。通过调节可变增益放大器 (VGA) 的增益值,每个通道的增益变化量可以在 $-30\sim 10\text{ dB}$ 变化,当调整每个通道的增益基本一致时,对 8 个通道的增益及相位一致性进行测试。测试条件:矢量网络分析仪输出射频功率 -10 dBm ,中频带宽设置为 1 kHz (低频段时设备自动降低中频带宽设置),扫频测试。测试结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,射频光传输链路 8 个通道间的增益一致性可通过串口通信来微调 VGA 的增益进行调整,通道间增益差可以控制在 $\pm 2\text{ dB}$ 以内。若待发送信号功率电平不同,通过调整每个通道的增益,来调整每个通道的动态指标,例如:对小信号传输来说,更关注的是信号经过传输后的信噪比、噪声系数等指标,

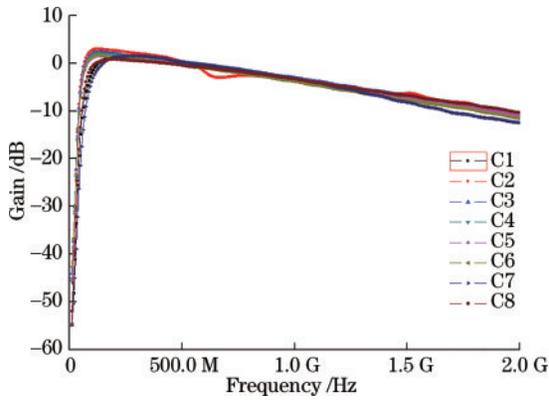


图 5 8 个通道链路增益

Fig. 5 Gain of eight-channel RoF links

这种情况下由于链路的整体噪声系数主要取决于第一级的噪声系数,此时可以通过增大该通道低噪声放大器的前置放大倍数来降低链路的噪声系数;当传输较大功率的信号时,需要考虑降低整个链路的非线性效应,包括二次谐波失真、三阶交调等;由于链路的非线性效应主要是由发射端的调制器件产生的,故此时需要降低 VGA 的增益,防止输入到直调激光器的射频功率较大而引起激光器的非线性效应。在增益为 0 dB、射频输入频率为 0.5 GHz、功率为 -5 dBm 时,所测试得到的 8 个通道的基波与二次谐波的抑制比均在 50 dB 以上,三阶交调产物比基波低 60 dB 以上。

对多通道的射频信号传输来说,通道间串扰对信号传输质量有重要影响。在波分复用射频光传输系统中,引起射频信号串扰的因素包括射频电路设计、波分复用器件 AWG 的光路串扰等电和光的混合串扰,最终全部体现在射频输出串扰上。在本设计方案中,通过射频屏蔽有效降低了电通道间的串扰;同时由于所选用的 AWG 的非相邻通道间光串扰低于 35 dB,所对应的电串扰可以控制在 70 dB 以下。8 个通道中 C4 通道的串扰测试结果如图 6 所示。首先用 VNA 测试了 C4 通道的增益,然后 VNA 接收端分别接另外 7 个通道的输出端。

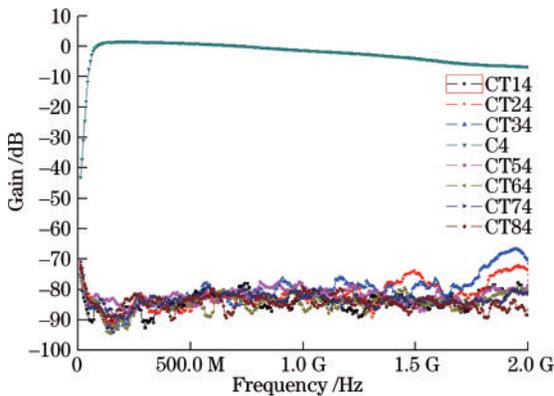


图 6 C4 通道链路增益及对其他通道的射频串扰

Fig. 6 Link gain of C4 and RF crosstalk to the remaining 7 channels

对通道间相位一致性也进行了测试,通过调整不同通道间的电延时和光纤长度一致性,不同通道间的相位差在 $\pm 5^\circ$ 以内,如图 7 所示。

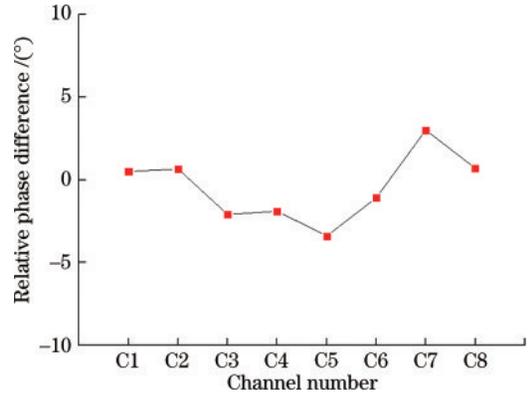


图 7 8 个通道间相对相位差

Fig. 7 Relative phase variations among 8 channels

在使用 VNA 测试完模块链路的整体结构后,使用微波源对射频光发射端的一个通道加载 1 GHz、功率为 -10 dBm 的射频信号,在频谱仪上监测射频光接收模块的输出信号质量。频谱仪的测试结果表明,链路增益设置为 0 dB,射频光收发模块用于传输 1 GHz 的微波信号时,信号经过传输后无明显畸变。射频光收发链路通道 1 的接收端频域信号如图 8 所示。

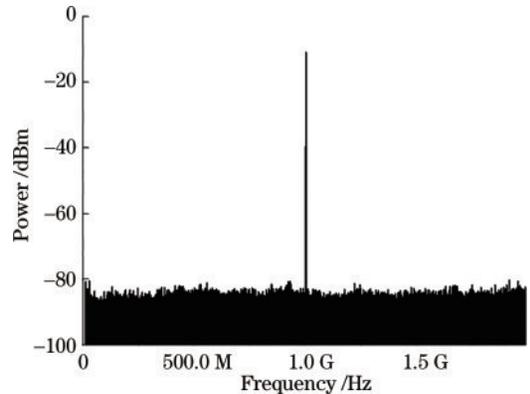


图 8 射频光收发链路通道 1 的接收端频域信号

Fig. 8 Frequency domain signal quality after transmission through C1

从以上测试结果可以看出,对于链路通道增益,可以通过调整放大器的增益来实现不同通道间的增益均衡。对于 500~1000 MHz 频段内产生的二次谐波,可以通过调整激光器的偏置电流点使得所有通道的二次谐波抑制比均在 50 dB 以上,三阶交调产物抑制比(相对于基波)高于 60 dB,8 个通道间相位差在 $\pm 5^\circ$ 以内。在发射端加载 1 GHz 正弦信号传输时,接收端收到的信号无明显畸变。

4 结 论

提出了基于波分复用技术的多路射频光传输方

案,设计了高线性、低串扰、低失真、波分复用射频光传输收发系统的核心光电子器件和原理样机,并实现了小体积低功耗模拟直调半导体激光器及其驱动控制电路、整机射频光收发模块硬件及上位机软件控制等软硬件的样机研制。对所研制的样机进行了测试,通道增益可在 $-30\sim 10$ dB调谐,通道内基波与二次谐波抑制比高于 50 dB,相邻及非相邻通道间射频串扰低于 60 dB、相位一致性在 $\pm 5^\circ$ 以内,基波与三阶交调产物抑制比高于 60 dB。样机测试数据表明,该样机可用于 L 波段多路射频信号的光纤传输领域。

参 考 文 献

- [1] Seeds A J. Microwave photonics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 877-887.
- [2] Yao J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 832-846.
- [4] 高军萍, 赵盟盟, 卢嘉, 等. 基于单个强度调制器产生宽光学频率梳系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0913001.
Gao J P, Zhao M M, Lu J, et al. Wide optical frequency comb system based on single intensity modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0913001.
- [5] Huang N B, Li M, Ashrafi R, et al. Active Fabry-Perot cavity for photonic temporal integrator with ultra-long operation time window[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3105-3116.
- [6] 黄蓝锋, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于单光路偏振复用的微波瞬时频率测量方案[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1929002.
Huang L F, Li Y J, Zhao S H, et al. Microwave instantaneous frequency measurement based on single lightpath polarization multiplexing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1929002.
- [7] Jackson K P, Newton S A, Moslehi B, et al. Optical fiber delay-line signal processing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(3): 193-210.
- [8] Yonetani H, Ushijima I, Takada T, et al. Transmission characteristics of DFB laser modules for analog applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(1): 147-153.
- [9] Urick V J, Bucholtz F, McKinney J D, et al. Long-haul analog photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(8): 1182-1205.
- [10] Dagli N. Wide-bandwidth lasers and modulators for RF photonics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7): 1151-1171.
- [11] Cox C, Ackerman E, Helkey R, et al. Direct-detection analog optical links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1375-1383.
- [12] Ackerman E I, Burns W K, Betts G E, et al. RF-over-fiber links with very low noise figure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2441-2448.
- [13] Ackerman E, Wanuga S, Kasemset D, et al. Maximum dynamic range operation of a microwave external modulation fiber-optic link[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(8): 1299-1306.
- [14] Farwell M L, Chang W S C, Huber D R. Increased linear dynamic range by low biasing the Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 779-782.
- [15] 朱伟, 李晶, 裴丽, 等. 基于偏振延时干涉的瞬时频率测量系统的分析与优化[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2107001.
Zhu W, Li J, Pei L, et al. Analysis and optimization of instantaneous frequency measurement system based on polarization time delay interference[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2107001.
- [16] Bjerkan L, Royset A, Hafskjaer L, et al. Measurement of laser parameters for simulation of high-speed fiberoptic systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(5): 839-850.
- [17] Williams K J, Esman R D, Dagenais M. Nonlinearities in p-i-n microwave photodetectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 84-96.