

激光与光电子学进展

OOK 与 BPSK 兼容激光通信性能分析

朱福南^{1,2,3}, 李佳蔚³, 鲁绍文³, 陈卫标^{1,2,3*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;³中国科学院上海光学精密机械研究所航天工程部, 上海 201800

摘要 为适应空间激光通信组网技术,多体制复用的通信方式应运而生。发送端采用强度调制器兼容实现了开/关键控(OOK)和二进制相移键控(BPSK)调制,接收端通过内差探测方式兼容实现了这两种调制信号的解调。在实际工程应用中,激光通信系统中散粒噪声、电子器件热噪声不可避免地会影响通信性能,在此基础上,进一步分析了强度调制器偏压点误差量与光学滤波器带宽大小对于非相干OOK和相干BPSK通信信噪比的影响。仿真结果表明:光学滤波器带宽对非相干OOK通信性能影响较大,接收光功率 -46 dBm时,1 nm滤波带宽的非相干OOK信噪比开销约1.26;接收光功率 -50 dBm以下时,20 nm滤波带宽的相干BPSK信噪比开销小于0.02。非相干OOK无编码通信灵敏度在1.25 Gbit/s速率时需满足 -46 dBm@ 10^{-6} ,光滤波带宽应不大于0.8 nm,强度调制器偏压误差应控制在半波电压的1%以内。在消共模噪声和优化光滤波带宽条件下,1.25 Gbit/s速率的BPSK无编码通信灵敏度满足 -55 dBm@ 10^{-6} 。

关键词 激光通信;多体制复用;强度调制器;内差解调;光滤波带宽

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232184

Performance Analysis of OOK and BPSK Compatible Laser Communication

Zhu Funan^{1,2,3}, Li Jiawei³, Lu Shaowen³, Chen Weibiao^{1,2,3*}¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Laboratory of Space Laser Engineering, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To adapt to the networking technology of space laser communication, the multi-system multiplexed communication mode was developed. In the transmitter, an intensity modulator is used to realize on-off keying (OOK) and binary phase shift keying (BPSK) modulation compatibility; while in the receiver, demodulation of these two modulation signals is realized via intradyne detection. In practical engineering applications, shot noise and thermal noise of electronic devices in laser communication system will inevitably affect the communication performance. Accordingly, the influences of bias point error of intensity modulator and optical filter bandwidth on the signal-to-noise ratio of incoherent OOK and coherent BPSK communication are further analyzed herein. Simulation results show that the optical filter bandwidth significantly influences the incoherent OOK communication performance: the incoherent OOK SNR overhead of 1 nm filter bandwidth is approximately 1.26 when the received optical power is -46 dBm; the coherent BPSK SNR overhead of 20 nm filter bandwidth is less than 0.02 when the received optical power is below -50 dBm. If the codeless communication sensitivity of incoherent OOK is required to meet -46 dBm@ 10^{-6} at the rate of 1.25 Gbit/s, the optical filter bandwidth should not be greater than 0.8 nm, the bias error of the intensity modulator should be controlled within 1% of the half-wave voltage. Under the condition of common-mode noise elimination and optimized optical filter bandwidth, the codeless sensitivity of BPSK communication at 1.25 Gbit/s rate is satisfactory to -55 dBm@ 10^{-6} .

Key words laser communication; multi-system multiplexed; intensity modulator; intradyne demodulation; optical filter bandwidth

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-10-24; 录用日期: 2023-11-01; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 上海市自然科学基金 (21ZR1427700)

通信作者: *wbchen@siom.ac.cn

1 引言

随着空间激光通信技术发展不断成熟,低地球轨道(LEO)-LEO、地球同步轨道(GEO)-GEO、LEO-GEO等多种激光通信链路的实现促进了多体制复用通信技术、激光微波混合组网的发展。许多国家开始将空间激光通信系统搭载在LEO和MEO卫星星座上,以建立全球卫星通信服务。Space-X在2019年同时发射了60颗LEO卫星,采用1 Gbit/s的星间激光通信^[1]。索尼计算机科学实验室在2020年成功演示了9颗LEO卫星间的激光通信,通信速率为100 Mbit/s^[2]。美国国家航空航天局(NASA)计划向国际空间站发送集成激光通信中继演示(LCRD)调制解调器和放大器终端(ILLUMA-T),以展示激光通信中继能力^[3]。空间激光通信组网技术正如火如荼地开展。为了提高空间激光通信链路互联的灵活性、适应多种空间激光通信应用场景,多体制兼容的激光通信系统设计相当重要^[4-5]。在要求高通信灵敏度、长距离通信的条件下,可采用相干二进制相移键控(BPSK)通信体制;在要求较低速率、较短距离通信的条件下,可采用非相干开/关键控(OOK)通信体制。多体制复用通信方式可实现多条空间链路之间互联,可时分复用,兼具空分复用,为空间激光通信组网技术的重要组成部分。相对于单体制激光通信来说,多体制复用通信建链更灵活,非相干OOK通信相比相干BPSK通信来说,仅需时钟恢复,通信建链更容易,两者相互辅助,根据实际数传需求和通信距离切换方式,大大增加了通信建链成功的概率。

2008年日本信息与通信技术所初步提出基于数字信号处理的相干/非相干兼容光学接收^[6],采用高速现场可编程逻辑门阵列(FPGA)算法恢复解调。2016年日本宇宙航空研究开发机构提出光通信和K α 波段雷达相融合的通信体制,采用归零差分相移键控(DPSK)和OOK调制方式^[7]。文献[8]采用可调谐差分群时延(DGD)元件实现了DPSK、OOK以及脉位调制(PPM)接收解调。德国宇航局(DLR)模拟了GEO-Ground的BPSK/正交相移键控(QPSK)数字相干解调^[9-10]。2021年,NASA在激光通信中继演示实验计划的基础上,开展GEO-地面站之间的双向激光通信实验,同时验证调制兼容技术^[11]。Poornachari等^[12]在2020年提出一种BPSK到QPSK和QPSK到16进制正交振幅调制(16QAM)两阶段的全光调制格式转换系统,并进行了仿真验证,但尚未进行实际通信性能验证。电子科技大学的王永塔^[13]在2019年实现了基于同相/正交(IQ)调制器的QPSK/BPSK/OOK的多调制兼容系统,完成了硬件系统研制,并分析了强度调制器马赫-曾德尔调制器(MZM)偏置点自适应方法,但未进行相应的接收解调。2022年长春理工大学赵贺等^[14]采用双IQ调制器结构提高了传输速率,可实现双偏振相位调制格式,分析了调制格式切换原理,通过

Optisystem软件进行了方案的仿真验证,搭建了实验系统同时离线采集数据完成了数字相干解调,但未进行实时调制解调实验验证。

根据文献[15],在基于90°光桥接器的BPSK相干通信接收方式中,内差相干解调与零差相干解调相比不需要较高的本振激光器可调谐带宽需求,且易于兼容实现多种通信体制,光电耦合程度更低,因此,本文采取内差解调方式。在此基础上,通过控制iXblue强度调制器工作在不同偏压点,兼容实现了BPSK和OOK调制。既仿真分析了基于掺铒光纤放大器(EDFA)下影响非相干OOK和相干BPSK通信接收信噪比(SNR)的主要因素,又分别在两种调制模式下进行了在线通信实验和性能分析。实验验证了光滤波器带宽和强度调制偏置工作点偏差量对非相干OOK通信性能的影响,以及光滤波器带宽和共模噪声对相干BPSK通信性能的影响,从而为多体制复用通信方案设计提供参考依据。

2 基本原理

非相干OOK与相干BPSK兼容激光通信方案示意如图1所示。发射端将Gbit/s以上的高速信号调制至iXblue强度调制器,并通过偏压控制模块(bias control)切换调制工作模式为OOK或BPSK。1556 nm波段的发射信号光经过光衰减器和EDFA后,通过带宽可调的光学滤波器后进入90°光桥接器。桥接器输出的混频信号经平衡探测器实现光电转换,得到 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 两路正交信号。而后通过高速模数(AD)采集转换为数字量 $I(kT_s)$ 和 $Q(kT_s)$ 。采集后信号首先通过IQ均衡(IQ equalization)、自动增益控制(AGC)和低通滤波(low-pass filter)进行处理,然后在相干BPSK模式下通过载波跟踪(carrier track)和时钟恢复(clock recover)解调得到通信数据,在非相干OOK模式下通过时钟恢复获得通信数据。内差相干解调方式需保证发射和本振激光器的拍频信号控制在几十MHz内,故需根据实际工作条件通过wavelength comp模块实时闭环控制或者开环调节本振激光器波长。载波跟踪和时钟恢复环路均采用二阶理想锁相环实现^[16]。高速AD的采样时钟频率设置在5 GHz左右,采样时钟由基频(base clock)和可调谐频率 Δf 通过上变频(DUC)得到, Δf 依据时钟恢复环路输出值控制直接数字合成(DDS)相位进行实时调整。

图1中,强度调制器是实现高速射频信号调制至光载波的关键器件,其是基于铌酸锂(LiNbO₃)晶体的电光调制器。当晶体的上下两电极外加电场时,其折射率会随电压成正比变化,因此,强度调制器对于信号光的电光调制作用可表示为

$$E_o = \sqrt{P_s} \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \times \exp\left[j\left(\omega_0 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \varphi_s\right)\right], \quad (1)$$

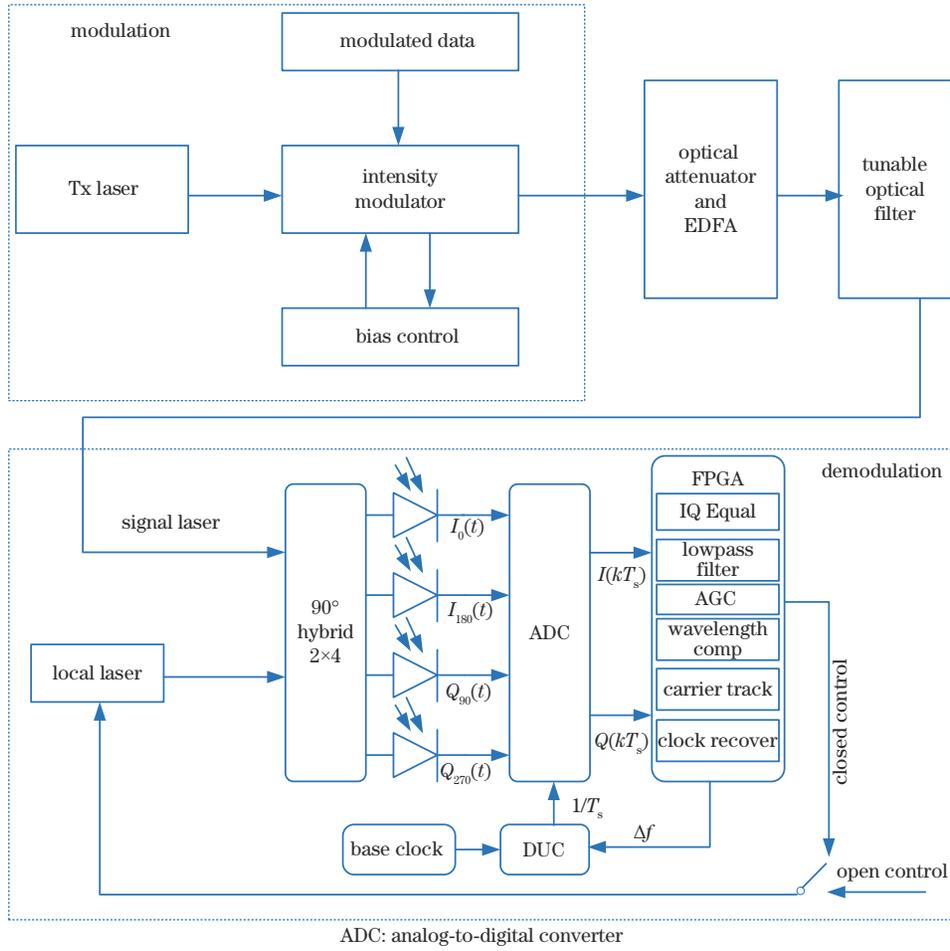


图 1 非相干 OOK 与相干 BPSK 兼容空间激光通信方案

Fig. 1 Scheme of incoherent OOK and coherent BPSK multiplexed space laser communication

式中： φ_1 为上支路加载的电场所引入的传输相位差； φ_2 为下支路加载的电场所引入的传输相位差； φ_s 为初始相位； P_s 为接收信号光功率； ω_0 为光载波频率。当强度调制器工作在推挽模式时， $\varphi_1 = -\varphi_2$ 。此时若加载在强度调制器射频(RF)端电压为 $V_{RF}(t)$ ，加载在直流(DC)端的工作偏置电压为 V_{DC} ，则信号光电场和光功率可表示为

$$\begin{cases} E_o = \sqrt{P_s} \cos(\varphi_1) \times \exp[j(\omega_0 t + \varphi_s)], \varphi_1 = \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{DC} + V_{RF}(t)] \\ P_o = E_o \cdot E_o^* = \frac{P_s}{2} [1 + \cos(2\varphi_1)] \end{cases}, (2)$$

式中： V_π 为MZM半波电压，即在调制器上下支路产生大小为 π 相位变化时所需加载电压。

强度调制器输出光功率与偏置电压关系如图2所示。当 $V_{DC} = (2n + 1) \frac{V_\pi}{2}$ 时，强度调制器工作在OOK调制模式，根据 V_{DC} 的具体位置又可分为工作在正的正交偏置点 (quad+, $V_{DC} = \frac{3V_\pi}{2} + 2nV_\pi$) 或负的正交偏置点 (quad-, $V_{DC} = \frac{V_\pi}{2} + 2nV_\pi$)；当 $V_{DC} =$

$(2n + 1)V_\pi$ 时，强度调制器工作在BPSK调制模式。OOK和BPSK调制模式下的光电场和输出功率可表示为

$$\begin{cases} E_{ook} = \sqrt{P_s} \cos\left\{\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left[m(t) \frac{V_\pi}{2} + V_{DC}\right]\right\} \times \exp[j(\omega_0 t + \varphi_s)] \\ P_{ook} = E_{ook} \cdot E_{ook}^* \\ E_{BPSK} = \sqrt{P_s} \cos\left\{\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot [m(t)V_\pi + V_{DC}]\right\} \times \exp[j(\omega_0 t + \varphi_s)] \\ P_{BPSK} = E_{BPSK} \cdot E_{BPSK}^* \end{cases}, (3)$$

式中： $V_{RF}(t) = m(t) \frac{V_\pi}{2}$ ， $m(t)V_\pi$ 分别为两种模式下加载在RF端的高速调制信号。强度调制器的偏置电压工作点易受外界温度、应力等因素的影响，故需通过反馈控制实现偏压点的工作稳定性，保证通信调制信号的高消光比。在强度调制器偏置工作点反馈控制过程中，向DC端加载微弱低频的扰动信号^[17]，而后通过检测强度调制输出端的扰频误差信号幅值大小，进行偏置工作点闭环控制。此时 V_{DC} 可进一步表示为

$$V_{DC} = V_{DC,opt} + V_r + V_{err}, (4)$$

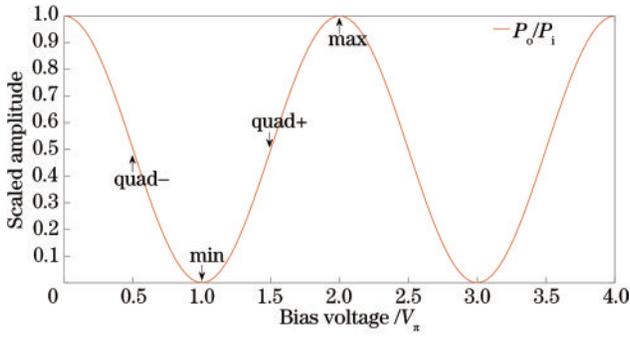


图 2 强度调制器输出光功率与偏置电压关系

Fig. 2 Relationship between output optical power of intensity modulator and bias voltage

式中: V_{DC_opt} 为最佳偏置工作点电压; V_r 为扰频信号; V_{err} 为偏置工作电压控制误差。

强度调制偏置工作点存在偏差,会导致发射信号光电场幅值降低,进而导致非相干 OOK 模式下调制信号消光比和有效接收光功率降低。非相干 OOK 模式下的 Q 值可表示为

$$Q_{ook} = \frac{R(P_{max} - P_{min})}{\sigma_{n1} - \sigma_{n0}}, \quad (5)$$

式中: R 为探测器电流响应度,单位 A/W,一般为 0.8~1 A/W; P_{max} 为传输码“1”时的功率, P_{min} 为传输码“0”时的功率; σ_{n1} 为传输码“1”时的噪声电流标准差; σ_{n0} 为传输码“0”时的噪声电流标准差。

而对于激光通信系统来说,最重要的参数指标是信噪比,可直接反映出通信误码率水平。在高斯噪声

信道条件下, BPSK 相位调制模式下的误码率 (BER) 表达式^[18]为

$$R_{BER-BP} = 0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{R_{SNR}/2}). \quad (6)$$

非相干 OOK 强度调制模式下的误码率^[19]表达式为

$$R_{BER-ook} = 0.5 \left[1 - \operatorname{erf}(Q_{ook}/\sqrt{2}) \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-Q_{ook}^2/2)}{Q_{ook}}, \quad (7)$$

式中: erfc 为互补误差函数; $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2)$

du 。信噪比越大, BPSK 通信误码率越小; Q_{ook} 越大, 非相干 OOK 通信误码率越小。

在本文通信方案中,调制信号光经过 EDFA 实现了功率放大,降低了对于探测器输入功率的要求,但同时也引入了放大自发辐射 (ASE) 噪声。假设 EDFA 的自发辐射因子为 n_{sp} , ASE 的单偏振噪声功率谱和噪声功率^[19-20]可表示为

$$\begin{cases} S_{ase} = n_{sp}(G-1)h\nu \\ P_{ase} = S_{ase}B_o \end{cases}, \quad (8)$$

式中: B_o 为光学滤波器全带宽,单位为 nm; S_{ase} 为 ASE 噪声功率谱密度; $h\nu$ 为单个光子能量; G 为 EDFA 的放大倍数。

2.1 非相干 OOK 模式通信信噪比分析

OOK 调制模式下,不需要本振激光器进行相干,故经 EDFA 放大和 90° 光桥接器^[21]后的 4 路传输光电场主要为放大后的信号光和光带宽内的 ASE 噪声,可表示为

$$\begin{cases} E_{ook-0} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_s} \\ \left\{ \sqrt{GP_s} \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left[m(t) \cdot \frac{V_\pi}{2} + V_{DC} \right] \right\} \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s0})] + \sum_{k=-\frac{B_o}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_o}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{ase}\Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k\Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} \\ E_{ook-90} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_s} \\ \left\{ \sqrt{GP_s} \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left[m(t) \cdot \frac{V_\pi}{2} + V_{DC} \right] \right\} \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s1})] + \sum_{k=-\frac{B_o}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_o}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{ase}\Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k\Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} \\ E_{ook-180} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_s} \\ \left\{ \sqrt{GP_s} \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left[m(t) \cdot \frac{V_\pi}{2} + V_{DC} \right] \right\} \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s2})] + \sum_{k=-\frac{B_o}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_o}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{ase}\Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k\Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} \\ E_{ook-270} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_s} \\ \left\{ \sqrt{GP_s} \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left[m(t) \cdot \frac{V_\pi}{2} + V_{DC} \right] \right\} \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s3})] + \sum_{k=-\frac{B_o}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_o}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{ase}\Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k\Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: k_s 为桥接器内信号光输入 PBS 的分光比,一般取值 0.5; $\Delta\nu$ 为频率间隔。在这种情况下,经光电探测器转换后电流可表示为

$$I_{\text{ook}} = R(E_{\text{ook}} \cdot E_{\text{ook}}^*) + I_n' = I_s + I_n = \frac{GP_s R}{8} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} \cdot \left[m(t) \cdot \frac{V_\pi}{2} + V_{\text{DC}} \right] \right] \right\} + I_n, \quad (10)$$

式中: I_n 为噪声电流, 主要包括热噪声、散粒噪声、ASE 噪声和拍频噪声。假定调制信号 $m(t)$ 时间均值为 0, 且由于物理信号无负频率而将 ASE 噪声按照单边带处理, 最终推得各噪声电流为

$$\begin{cases} I_n = I_{n-T} + I_{n-\text{shot}} + I_{n-\text{ase}} + I_{\text{ns-ase}} + I_{\text{nase-ase}} \\ I_{n-\text{ase}} = RP_{\text{ase}}/4 \\ I_{n-T} = \sqrt{4KT/R_L \cdot B_e} \\ I_{n-\text{shot}} = \sqrt{2qR(GP_s/8 + P_{\text{ase}}/4) \cdot B_e} \\ I_{\text{ns-ase}} = \frac{R}{2} \sqrt{GP_s} \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \left[\frac{V_\pi}{2} m(t) + V_{\text{DC}} \right] \right\} \cdot \sum_{k=0}^{B_o/2\Delta\nu} \sqrt{S_{\text{ase}} \Delta\nu} \cdot \cos(2\pi k \Delta\nu t + \varphi_k - \varphi_s), \\ \bar{I}_{\text{ns-ase}}^2 \approx \frac{R}{2} GP_s \frac{R}{4} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_{\text{DC}} + \frac{V_\pi}{2}) \right] + \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_{\text{DC}} - \frac{V_\pi}{2}) \right] \right\} P_{\text{ase}} \cdot \frac{1}{4} \\ I_{\text{nase-ase}} = \frac{1}{2} \sum_{k>j} S_{\text{ase}} \Delta\nu \cos[2\pi(k-j)\Delta\nu t + \varphi_k - \varphi_j], k, j \in [0, +\frac{B_o}{2\Delta\nu}], k > j \end{cases} \quad (11)$$

式中: q 为电子电量; B_e 为探测器 3 dB 带宽; R_L 为负载电阻; K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度; I_{n-T} 为热噪声电流; $I_{n-\text{shot}}$ 为散粒噪声电流; $I_{n-\text{ase}}$ 为 ASE 噪声电流; $\bar{I}_{\text{ns-ase}}^2$ 为信号光与 ASE 的拍频噪声电流均方值; $I_{\text{nase-ase}}$ 为 ASE 与 ASE 不同频率间的拍频噪声电流, 忽略不计。从而可以得到非相干 OOK 模式下的信噪比为 $R_{\text{SNR-ook}} = \frac{I_s^2}{\bar{I}_n^2}$ 。

图 3 仿真给出了光滤波带宽与非相干 OOK 信噪比开销 $R_{\text{SNR-overhead}}$ 的关系曲线(以 0.2 nm 光滤波带宽时的信噪比为基准)。图 4 仿真给出了强度调制偏置工作点偏差量与非相干 OOK 的 Q 值开销关系曲线(光滤波带宽固定设置为 0.2 nm, 以 MZM 最佳偏置工作点 $V_{\text{DC,opt}}$ 为基准, 偏移 $\pm V_\pi/4$ 范围)。仿真参数的设

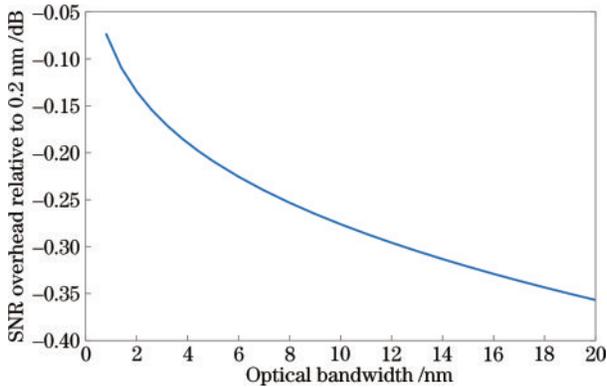


图 3 光滤波带宽与非相干 OOK 信噪比开销的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve between optical filter bandwidth and incoherent OOK SNR overhead

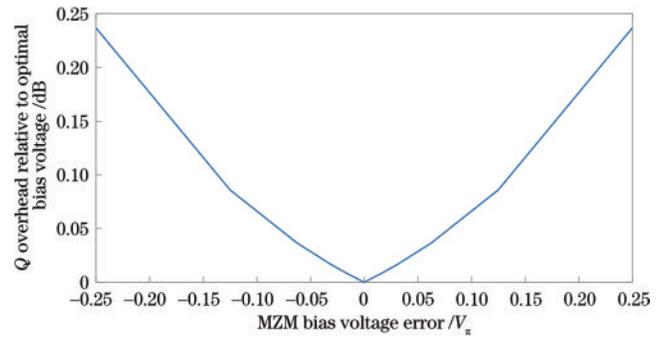


图 4 强度调制偏置工作点偏差量与非相干 OOK Q 值开销的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between intensity modulation bias voltage deviation and incoherent OOK Q overhead

置如表 1 所示, 光学滤波器带宽既要覆盖星间多普勒范围(一般为 ± 6 GHz), 又要考虑收发波长相互隔离, 提高空间光收发隔离度, 故滤波带宽范围设置为 0.2~20 nm。由仿真可知: 随着光滤波带宽的增加, 非相干 OOK 信噪比开销逐渐增大并趋于稳定, 1 nm 滤波带宽以下信噪比开销小于 1.26 (约 0.1 dB); 随着强度调制偏置工作点偏差量增大, 非相干 OOK 的 Q 值呈线性变化, 且在最佳工作点左右对称, 偏差量在半波电压 V_π 的 1% 以内时, Q 值开销小于 0.005 dB。

仿真时信噪比开销和 Q 值开销定义为

$$R_{\text{SNR-overhead}} = \lg(R_{\text{SNR-act}}) - \lg(R_{\text{SNR-0.2nm}}), \quad (12)$$

$$Q_{\text{overhead}} = \lg(Q_{\text{ook,opt}}) - \lg(Q_{\text{ook}}). \quad (13)$$

表 1 OOK 仿真参数的设置

Table 1 Setting of OOK simulation parameters

Receiver power P_s /dBm	EDFA gain /dB	Temperature /°C	Optical filter bandwidth /nm	Detector bandwidth /GHz
-46	35	30	0.2-20	1.8@-3 dB

2.2 相干 BPSK 模式通信信噪比分析

BPSK 调制模式下,调制信号光经过 EDFA 放大

后,接收信号光与本地激光器同时进入 90°光桥接器进行相干,相干后输出 4 路光电场^[19]可表示为

$$\begin{cases}
 E_{\text{BP-0}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_s} \\
 \left\{ \sqrt{GP_s} \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot [m(t) \cdot V_\pi + V_{\text{DC}}]\right] \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s0})] + \sum_{k=-\frac{B_s}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_s}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{\text{ase}} \Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k \Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} + \\
 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_{\text{LO}}} \sqrt{P_L} \cdot \exp[j(\omega_L t + \varphi_{\text{LO}})] \\
 E_{\text{BP-90}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_s} \\
 \left\{ \sqrt{GP_s} \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot [m(t) \cdot V_\pi + V_{\text{DC}}]\right] \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s1})] + \sum_{k=-\frac{B_s}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_s}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{\text{ase}} \Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k \Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} + \\
 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_{\text{LO}}} \sqrt{P_L} \cdot \exp\left[j(\omega_L t + \varphi_{\text{L1}} - \frac{\pi}{2})\right] \\
 E_{\text{BP-180}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_s} \\
 \left\{ \sqrt{GP_s} \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot [m(t) \cdot V_\pi + V_{\text{DC}}]\right] \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s2})] + \sum_{k=-\frac{B_s}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_s}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{\text{ase}} \Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k \Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} - \\
 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1-k_{\text{LO}}} \sqrt{P_L} \cdot \exp[j(\omega_L t + \varphi_{\text{L2}})] \\
 E_{\text{BP-270}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_s} \\
 \left\{ \sqrt{GP_s} \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \cdot [m(t) \cdot V_\pi + V_{\text{DC}}]\right] \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi_{s3})] + \sum_{k=-\frac{B_s}{2\Delta\nu}}^{\frac{B_s}{2\Delta\nu}} \sqrt{S_{\text{ase}} \Delta\nu} \cdot \exp[j(\omega_0 t + 2\pi k \Delta\nu t + \varphi_k)] \right\} - \\
 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{k_{\text{LO}}} \sqrt{P_L} \cdot \exp\left[j(\omega_L t + \varphi_{\text{L3}} - \frac{\pi}{2})\right]
 \end{cases} \quad (14)$$

式中:本地激光器光电场表示为 $E_L = \sqrt{P_L} \cdot \exp[j(\omega_L t + \varphi_L)]$; P_L 为本振光功率; k_{LO} 为光桥接器内本振激光输入 PBS 的分光比,一般取值 0.5。

相比非相干 OOK 模式, BPSK 模式下的噪声类型更多,主要包括探测器热噪声、本振光和信号光的散粒噪声,光放大的 ASE 噪声以及各种拍频噪声。其中本振光与 ASE 的拍频噪声不属于共模噪声,不可通过平衡探测后差分消除,信号光-ASE 光和 ASE 光-ASE 光拍频噪声属于共模噪声,可通过差分消除^[17],差分电流 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 可表示为

$$\begin{cases}
 I(t) = R(E_{\text{BP-0}} E_{\text{BP-0}}^* - E_{\text{BP-180}} E_{\text{BP-180}}^*) + I_n' \\
 Q(t) = R(E_{\text{BP-90}} E_{\text{BP-90}}^* - E_{\text{BP-270}} E_{\text{BP-270}}^*) + Q_n'
 \end{cases} \quad (15)$$

式中: I_n' 和 Q_n' 表示 I 和 Q 通道除 ASE 之外的其余噪声。 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 信号经过高速 AD 采集后进行数字锁相,使锁相相位差 $\omega_0 t - \omega_L t + \varphi_s - \varphi_L$ 逐步闭环控制至

某个相位误差值 $\theta_e(t)$ 附近。

BPSK 模式下,经过平衡探测后的主要噪声电流为

$$\begin{cases}
 I_n = Q_n = I_{n-T} + I_{n-\text{shot}} + I_{\text{nl-shot}} + I_{\text{ns-ase}} + I_{\text{nase-ase}} + I_{n-\text{ase}} \\
 I_{n-\text{ase}} = RP_{\text{ase}}/4 \\
 \bar{I}_{\text{ns-ase}}^2 \approx \frac{R}{2} GP_s \frac{R}{4} \left\{ 1 + \cos\left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_{\text{DC}} + V_\pi)\right] + \right. \\
 \left. \cos\left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_{\text{DC}} - V_\pi)\right] \right\} P_{\text{ase}} \cdot \frac{1}{4}
 \end{cases} \quad (16)$$

经过差分消共模噪声后电流主要包括

$$\begin{cases}
 I_n = Q_n = I_{n-T} + I_{n-\text{shot}} + I_{\text{nl-shot}} \\
 I_{n-\text{shot}} = \sqrt{2qR(GP_s/4 + P_{\text{ase}}/4 + P_L/4)} \cdot B_e \\
 \bar{I}_{\text{nl-ase}}^2 = R^2 P_L \frac{P_{\text{ase}}}{2} \frac{B_e}{B_o}
 \end{cases} \quad (17)$$

式中:热噪声 I_{n-T} 主要与工作温度 T 相关,与非相干 OOK 模式下保持一致。根据信号电流和噪声电流可计算得到 BPSK 模式下的信噪比为 $R_{\text{SNR-BP}} = \frac{I_s^2}{I_n^2 + Q_n^2} = \frac{I_s^2}{2I_n^2}$ 。仿真设置参数如表 2 所示,锁相相位误差对通信

性能的影响是显著的,通常要求锁相后的相位误差标准差不大于 10° 。图 5 仿真给出了 0.2 nm 和 20 nm 光滤波带宽下,接收光功率与 BPSK 信噪比开销的关系曲线(以 0.2 nm 光滤波带宽时的信噪比为基准),其信噪比开销定义为

$$R_{\text{SNR-overhead}} = R_{\text{SNR-20nm}} - R_{\text{SNR-0.2nm}} \quad (18)$$

表 2 BPSK 仿真设置参数

Table 2 Simulation parameters for BPSK

Receiver power /dBm	Local laser power /dBm@BPSK	EDFA gain /dB	Optical filter bandwidth /nm	Detector bandwidth /GHz	Phase error /($^\circ$)
-60~-50	-4	35	0.2/20	1.8@-3 dB	10

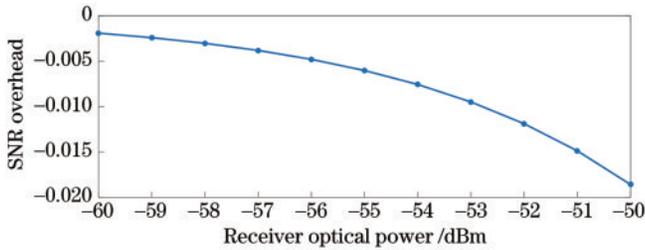


图 5 接收光功率与 BPSK 信噪比开销的关系曲线(0.2 nm 和 20 nm 光滤波带宽)

Fig. 5 Relationship curve between received optical power and BPSK SNR overhead (0.2 nm and 20 nm optical filter bandwidth)

仿真可知:随接收光功率的增加,光滤波带宽引起的 BPSK 信噪比开销逐步增大,变化量呈指数趋势,但实际光滤波带宽对于 BPSK 通信信噪比的影响较小;在 -50 dBm 接收光功率以下,20 nm 滤波带宽的信噪比开销小于 0.02。图 6 仿真给出了在 0.2 nm 光滤波带宽下,有无共模噪声条件下接收光功率与 BPSK 信噪比开销关系曲线。随着接收光功率的增加,共模噪声对于信噪比影响增大,此时的信噪比开销定义为

$$R_{\text{SNR-overhead}} = R_{\text{SNR-without common noise}} - R_{\text{SNR-with common noise}} \quad (19)$$

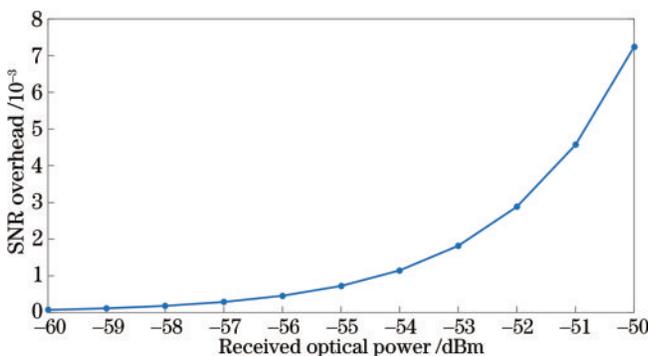


图 6 接收光功率与 BPSK 信噪比开销的关系曲线(有无共模噪声)

Fig. 6 Relationship curve between received optical power and BPSK SNR overhead (with or without common noise)

3 分析与讨论

非相干 OOK 与相干 BPSK 兼容激光通信实验装置如图 7 所示,其中高速信号调制解调和强度调制偏压控制在数字信号处理(DSP)部分实现,本振激光器为 1556 nm 波段的 NKT 激光器,发射激光器由光迅激光器种子源和自研驱动组成,调制发射信号通过驱动器放大后加载至 iXblue 强度调制器,EDFA 为自研光放大模块,可调谐光滤波器型号为 BVF-200。相关的实验参数如表 3 所示。

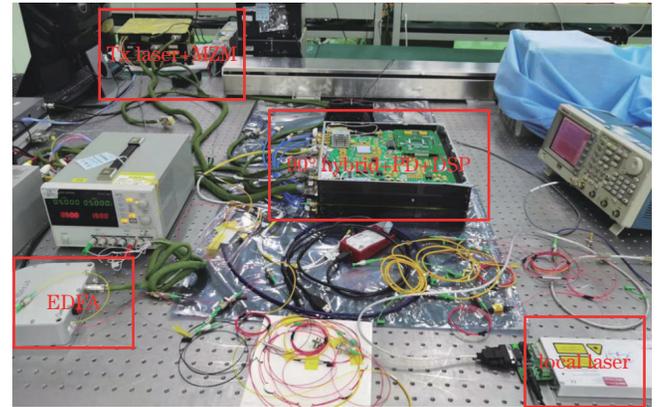


图 7 实验实物图

Fig. 7 Actual experimental setup

实验中,非相干 OOK 模式和相干 BPSK 模式共用通信收发光路,若是非相干 OOK 模式,则关闭本振激光器,且 DSP 处理时跳过波长补偿和载波跟踪模块,直接进行时钟恢复;若是 BPSK 模式,则开启本振激光器。下文以 10 为底对误码率求对数。

在 1.25 Gbit/s 非相干 OOK 模式下,local laser 关闭,Tx laser 通过 MZM 加载高速调制信号,并控制 MZM 工作在正交点;调节可调光衰减器,控制进入 EDFA 的信号光功率;EDFA 输出光信号进入可调谐光滤波器,对放大后的信号光进行不同带宽的滤波;滤波后信号进入 90° hybrid 和 PD 完成光电转换,最终在 DSP 实现通信解调和数据处理。图 8 给出了不同光滤波带宽与非相干 OOK 通信性能的变化关系[图 8(a)]

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameter

Laser linewidth /kHz	Local laser power / dBm @BPSK	EDFA gain /dB	Optical filter bandwidth /nm	Detector bandwidth /GHz	Communication rate /(Gbit/s)
<6	-4	37@1556 nm	≤20	1.8@-3 dB	1.25@OOK 1.25/2.5@BPSK

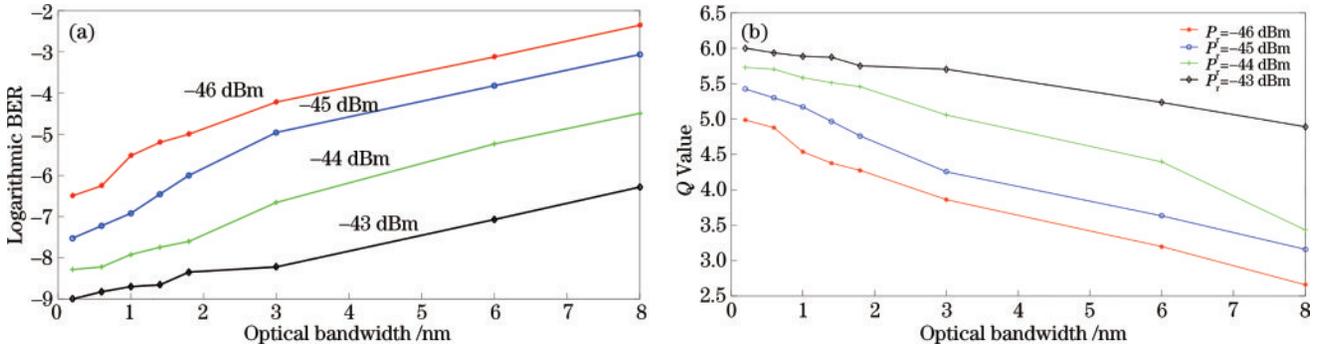


图 8 光滤波带宽与非相干 OOK 通信性能关系曲线。(a)对数误码率;(b)Q 值

Fig. 8 Relationship curve between optical filter bandwidth and incoherent OOK communication performance. (a) Logarithmic BER; (b) Q value

为对数误码率,图 8(b)为 Q 值]。在固定的接收光功率条件下,随着光滤波带宽的增大,Q 值降低,通信误码率增大,但单位滤波带宽下对非相干 OOK 通信对数误码率的影响逐渐降低。若要求通信灵敏度满足 -46 dBm@10⁻⁶,则光滤波带宽应不大于 0.8 nm;在接

收光功率 -46 dBm 时,1 nm 滤波带宽下的 Q 值开销约 0.5。图 9 直观地给出了在接收光功率 -46 dBm 时,0.2 nm 和 0.6 nm 光滤波带宽下非相干 OOK 接收信号眼图,眼图 Q 值分别为 5.8 和 5.3。

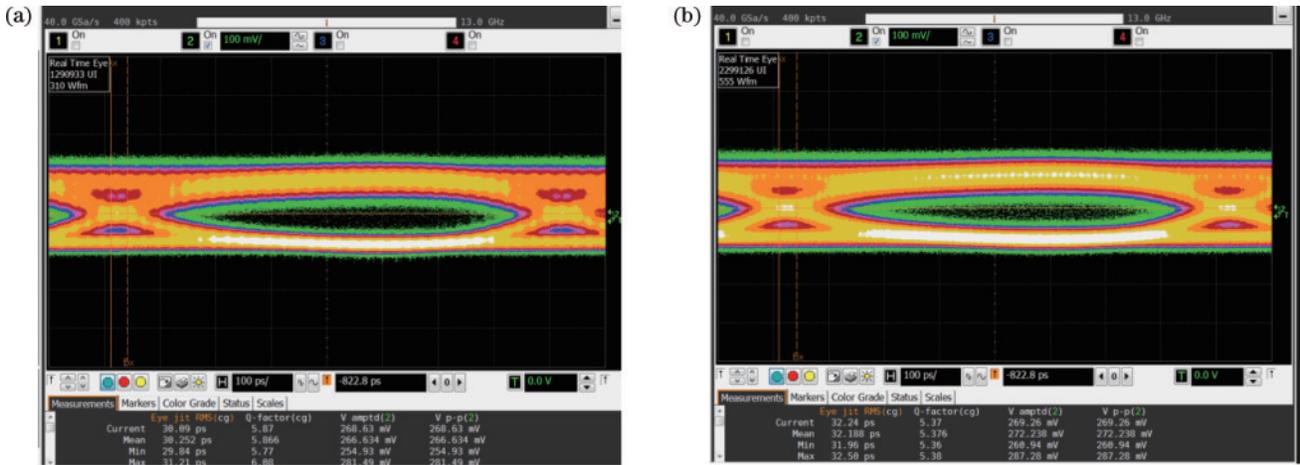


图 9 不同光滤波带宽下非相干 OOK 接收信号眼图。(a)0.2 nm;(b)0.6 nm

Fig. 9 Eye diagrams of incoherent OOK receiving signal under different optical filtering bandwidths. (a) 0.2 nm; (b) 0.6 nm

在 1.25 Gbit/s 非相干 OOK 模式下,调节可调光衰减器,使进入 EDFA 的信号光功率为 -46 dBm,同时将可调谐光滤波器带宽设置为 0.2 nm,通过 DSP 闭环调节加载在 MZM 的 DC 端偏置工作电压,测试得到了强度调制器工作电压与非相干 OOK 通信对数误码率关系曲线,如图 10 所示。本实验中所采用的强度调制器半波电压为 6.2 V,其中 1 个最佳工作点电压为 -1.61 V。结果表明:随偏置工作电压偏差量的增大,非相干 OOK 的对数 BER 开销逐渐增大,基本呈线性关系;工作电压偏差在 0.5 V 内(占半波电压约 8%)时,对数 BER 开销不超过 0.7 dB。工程上,MZM 偏压

误差控制要求一般在 1% 及以上,此时对非相干 OOK 通信误码率的影响可忽略不计。

在 1.25 Gbit/s BPSK 模式下,local laser 开启,同时调谐 local laser 波长使其和 Tx laser 的拍频信号频差在 20 MHz 以内;Tx laser 通过 MZM 加载高速调制信号,并控制 MZM 工作在最小点;可调谐光滤波器带宽依次设置为 2 nm 和 20 nm,同时,在每个滤波带宽下调节可调光衰减器,改变进入 EDFA 的信号光功率,得到接收光功率与 BPSK 通信性能关系曲线,如图 11 所示,图 11(a)为误码率,图 11(b)为信噪比。在 -61 dBm~ -53 dBm 接收光功率范围内,随接收光功率的增加,光

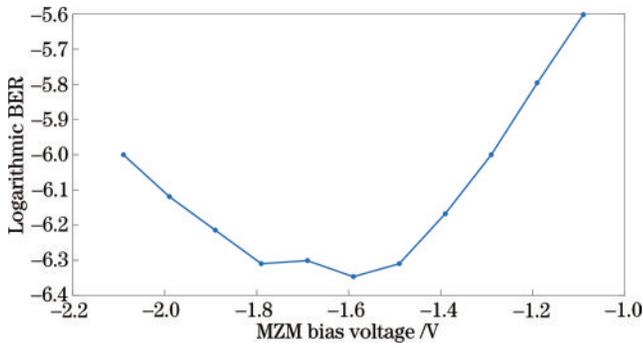


图 10 强度调制偏置工作电压与非相干 OOK 通信对数误码率关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between intensity modulation bias voltage and incoherent OOK logarithmic BER

滤波带宽对 BPSK 信噪比的影响逐步增大, 2 nm 和 20 nm 滤波带宽下的 BPSK 通信灵敏度偏差约 1 dBm@ 10^{-3} , 信噪比偏差约 1 dB。探测器最佳带宽为通信符号速率的 1/2, 实际通信速率和探测器带宽间不匹配, 引入了额外的信噪比恶化。2 nm 带宽下, 1.25 Gbit/s

BPSK 无编码通信灵敏度为 $-55 \text{ dBm}@10^{-6}$ 。

在 2.5 Gbit/s BPSK 模式下, 调整平衡探测器 (PD) 与高速 AD 的连接方式: 1) 为桥接器 0° 和 90° 输出经过平衡探测器的直接差分信号分别作为 I 和 Q 路信号; 2) 为桥接器 0° 和 180° 输出经过平衡探测器的 P 端差分作为 I 路信号, 桥接器 90° 和 270° 输出经过平衡探测器的 P 端差分作为 Q 路信号, 两种连接方式示意如图 12 所示。分别在两种连接方式下进行通信灵敏度测试, 以评估共模噪声对于 BPSK 通信性能的影响, 测试结果如图 13 所示。在接收光功率低于 -50 dBm 时, 共模噪声的影响可忽略不计; 在接收光功率高于 -50 dBm 时, 随接收功率的增大, 共模噪声的影响也逐渐增大, 呈指数变化; 在消共模噪声的条件下, 随信噪比的增大可快速收敛至无误码。这主要是由于在低信号功率时, 信号光-ASE 拍频噪声对信噪比影响较小, 故两种连接方式的误码率差异较小。在最佳噪声抑制条件下, 2.5 Gbit/s 速率 BPSK 无编码通信灵敏度为 $-49 \text{ dBm}@10^{-6}$ 。

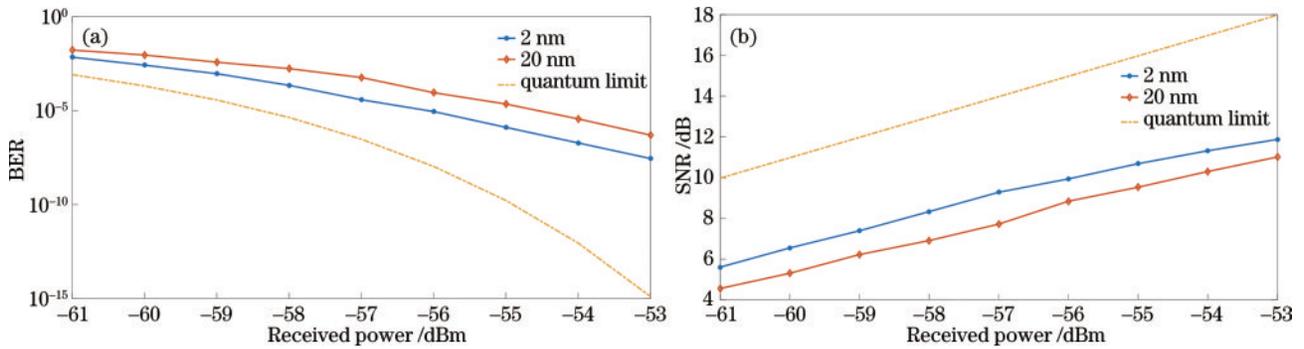


图 11 接收光功率与 BPSK 通信性能关系曲线。(a)BER; (b)SNR

Fig. 11 Relationship curves between received optical power and BPSK communication performance. (a) BER; (b) SNR

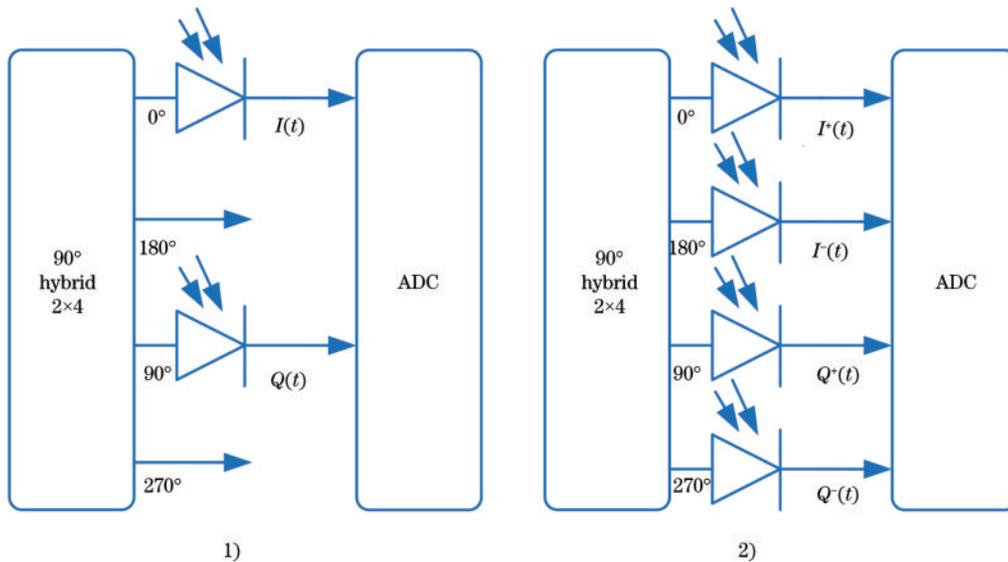


图 12 平衡探测器与高速 AD 连接方式

Fig. 12 Connection method of balanced detector and high-speed AD

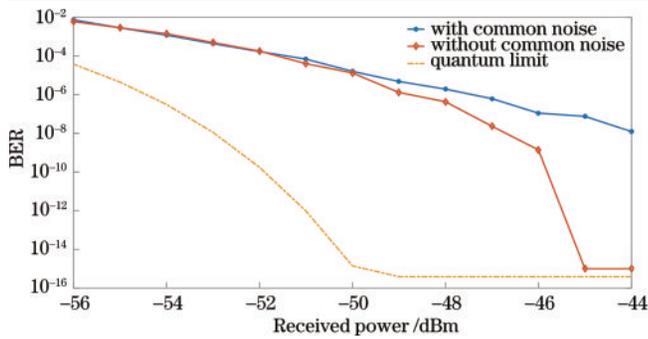


图 13 共模噪声与 BPSK 误码率的关系曲线 (10^{-14} 及以下对应无误码)

Fig. 13 Relationship curve between common noise and BPSK BER (below 10^{-14} indicates no error)

4 结 论

本文基于 iXblue 强度调制器和内差相干探测方式实现了相干 BPSK 和非相干 OOK 相兼容的激光通信调制与解调。建立了两种模式兼容的激光通信收发装置,分析和实验验证了光滤波器带宽和强度调制偏压点偏置量对非相干 OOK 通信性能的影响,以及光滤波器带宽和共模噪声对 BPSK 通信性能的影响,为多体制复用的空间激光通信方案设计提供参考依据。分析结果表明,使用 EDFA 对接收光功率进行放大,降低了平衡探测器输入功率门限,但同时也引入了 ASE 噪声,其 ASE 噪声大小受光学滤波带宽限制,带宽越大,ASE 噪声及其拍频噪声分量占比越大,对通信信噪比影响越大。仿真和实验表明,光滤波带宽大小对于非相干 OOK 通信性能的影响大于 BPSK,非相干 OOK 通信灵敏度在 1.25 Gbit/s 速率下达到 -46 dBm@ 10^{-6} 时,要求光滤波带宽在 0.8 nm 以下,而 BPSK 无编码通信灵敏度在 1.25 Gbit/s 速率下达到 -55 dBm@ 10^{-6} 时,在 2.5 Gbit/s 速率下达到 -49 dBm@ 10^{-6} 时,光滤波带宽仅需 2 nm。此外,还分析了 MZM 固有的偏压特性对非相干 OOK 通信性能的影响,在可容忍偏压误差范围内,影响可忽略。分析了平衡探测器和高速 AD 两种连接方式对 BPSK 通信性能的影响,其主要体现在接收光功率高于 -50 dBm 时,随功率的增大误码率差异呈指数变化。

在后续的工作中,本文方案可应用 IQ 调制器,从而兼容 QPSK 通信体制。同时也可在通信收发信号增加差分和解差分模块,从而兼容 DPSK 通信体制。

参 考 文 献

[1] Toyoshima M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 693-699.

[2] Iwamoto K, Nakao T, Ito T, et al. Small optical intersatellite communication system for small and micro satellites[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10096: 100960T.

[3] Robinson B S, Shih T, Khatri F I, et al. Laser communications for human space exploration in cislunar space: ILLUMA-T and O2O[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10524: 105240S.

[4] 任伟杰, 孙建峰, 周煜, 等. 多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1206002.

Ren W J, Sun J F, Zhou Y, et al. Multi-system compatible coherent detection technology of satellite laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1206002.

[5] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 20220393.

Li R, Lin B J, Liu Y C, et al. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 20220393.

[6] Toyoshima M, Shoji Y, Kuri T, et al. Development of real-time 3-Gbit/s BPSK optical coherent receiver using field programmable gate array for free-space laser communications[C]//Proceedings of the 26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), June 10-12, 2008, San Diego, CA. Virginia: AIAA Press, 2008: 5423.

[7] Chishiki Y, Yamakawa S, Takano Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390D.

[8] Christen L, Lizé Y, Nuccio S, et al. Variable rate, multi-format receiver design for 10 to 40 Gb/s DPSK and OOK formats[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 3828-3833.

[9] Sufof J, Poliak J, Calvo R M. Demonstration of intradyne BPSK optical free-space transmission in representative atmospheric turbulence conditions for geostationary uplink channel[J]. Optics Letters, 2017, 42 (11): 2173-2176.

[10] Conroy P, Sufof J, Poliak J, et al. Demonstration of 40 GBaud intradyne transmission through worst-case atmospheric turbulence conditions for geostationary satellite uplink[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): 5095-5101.

[11] Krainak M A, Luzhanskiy E, Li S X, et al. A dual format communication modem development for the Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) program [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8610: 86100K.

[12] Poornachari P, Samathuvamani A P, Madhan G. Design of all pass filter based all optical modulation format conversion with dispersion compensation[J]. Tierärztliche Praxis, 2020, 40: 848.

[13] 王永塔. 多制式相干光调制器的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

Wang Y T. Research and implementation of multi-system coherent light modulator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[14] 赵贺, 张鹏, 杨志群, 等. 多调制格式兼容的空间激光高速通信调制仿真与实验研究[J]. 中国激光, 2022, 49 (7): 0706004.

Zhao H, Zhang P, Yang Z Q, et al. Simulation and

- experimental research of multimodulation format compatible space laser high-speed communication modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0706004.
- [15] Schaefer S, Gregory M, Rosenkranz W. Coherent receiver design based on digital signal processing in optical high-speed intersatellite links with M-phase-shift keying[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 111614.
- [16] Derr F. Coherent optical QPSK intradyne system: concept and digital receiver realization[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(9): 1290-1296.
- [17] 朱福南, 鲁绍文, 李佳蔚, 等. 一种强度调制器偏压误差信号检测装置及方法: CN113067636B[P]. 2022-06-28.
Zhu F N, Lu S W, Li J W, et al. A device and method for detecting bias error signal of intensity modulator: CN113067636B[P]. 2022-06-28.
- [18] Kikuchi K, Tsukamoto S. Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(13): 1817-1822.
- [19] 岳朝磊. 空间高码率零差相干激光锁相与通信技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
Yue C L. Study of laser phase locking and homodyne coherent detection technology for high bit rate space communication[J]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [20] Bao J, Bastien S P, Sunak H R, et al. Analysis of noise performance in rare-earth-doped fiber optical amplifiers in the 1.3- μm and 1.55- μm wavelength bands[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1679: 220-231.
- [21] 侯培培, 周煜, 职亚楠, 等. 晶体双折射自由空间 2×4 90° 光学桥接器[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3413-3418.
Hou P P, Zhou Y, Zhi Y N, et al. Free space optical 2×4 90° hybrid based on crystal birefringence[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3413-3418.