

## 基于时间交织相位分集检测的相干光接入系统

贝劲松<sup>1</sup>, 尹凡<sup>2</sup>, 钟一鸣<sup>1</sup>, 杨波<sup>1</sup>, 黄新刚<sup>1</sup>, 马壮<sup>1</sup>, 李正璇<sup>2\*</sup><sup>1</sup>中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;<sup>2</sup>上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

**摘要** 为了实现信号同相分量和正交分量的交替检测, 提出了一种基于预设频率偏移的相干探测方案。该方案所需的硬件数量与外差检测一致, 均为零差检测的一半。相关实验与仿真结果表明, 相比外差检测方案, 本方案不需要后续的下变频过程, 对接收机的带宽需求较低。为了解决该方案中色散、激光器频率偏移以及接收机带宽受限造成的信号失真问题, 提出了一种自适应实值均衡结构, 为相干检测在成本敏感接入网中的应用提供了一种低成本、低复杂度的解决方案。

**关键词** 光通信; 相干探测; 低成本相干; 接收机带宽; 频率偏移

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2306004

## Coherent Optical Access System Based on Time Interleaved Phase-Diversity Detection

Bei Jinsong<sup>1</sup>, Yin Fan<sup>2</sup>, Zhong Yiming<sup>1</sup>, Yang Bo<sup>1</sup>, Huang Xingang<sup>1</sup>,  
Ma Zhuang<sup>1</sup>, Li Zhengxuan<sup>2\*</sup><sup>1</sup>ZTE Corporation, Shenzhen, Guangdong 518057, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Specialty Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** In order to realize the alternate detection of the in-phase and quadrature components of the signal, a coherent detection scheme based on a preset frequency offset is proposed in this paper. The hardware quantity required by this scheme is the same as that of heterodyne detection, which is half of that of homodyne detection. Relevant experiments and simulation results show that, compared with the heterodyne detection scheme. This scheme does not require a subsequent down-conversion process and has a lower bandwidth requirement for the receiver. In order to solve the signal distortion caused by dispersion, laser frequency offset and receiver bandwidth limitation in this scheme, an adaptive real-value equalization structure is proposed. It provides a low-cost and low-complexity solution for the application of coherent detection in cost-sensitive access networks.

**Key words** optical communications; coherent detection; low-cost coherence; receiver bandwidth; frequency offset

**OCIS codes** 060.4510; 060.1660; 060.2330

## 1 引言

近年来, 5G 技术的应用使智能终端设备数量以及新型数据业务的数据量急剧增加, 如高清视频服务、云计算、物联网, 导致居民区和商务区的带宽需

求每年以 50% 的速度增长<sup>[1]</sup>。作为目前主流的接入方式, 光纤接入具有满足用户对高带宽需求的潜力。无源光网络(PON)大多采用树形结构、光分路器以及时分复用(TDM)方式实现多用户接入, 为接入网提供了一种高成本效益方案<sup>[2]</sup>。国际电信联盟

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-06-06; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 上海市科委项目(20511102400, 20ZR1420900)、111 计划(D20031)、中兴通讯研究基金

通信作者: \*zhengxuanli@shu.edu.cn

电信标准化部门(ITU-T)和电气与电子工程师协会(IEEE)两大国际标准组织相继推进了下一代无源光网络技术(NG-PON2)<sup>[3]</sup>和下一代以太网无源光网络技术(NG-EPON)<sup>[4]</sup>的标准化工作,并将时分和波分复用(TWDM)-PON 确认为 NG-PON2 的实现方式。由于 TWDM-PON 所需的无色光源等光器件产业链尚不成熟,运营商升级成本较高,因此,高速单波长 TDM-PON 得到了人们的广泛关注<sup>[5]</sup>。目前,运营商和各大系统集成商开始力推单波长 50G TDM-PON 的方案,且关于单波长 100G TDM-PON 方案的研究也已逐步展开。

随着传输速率的增长,基于直接检测(DD)技术的 TDM 系统逐渐难以满足高灵敏度、高传输容量等需求<sup>[6]</sup>,基于 DD 的自相干技术虽然可以采用高阶调制格式并在电域补偿色散,但会受信号拍频干扰的影响及高载波功率的限制<sup>[7]</sup>。相干检测方式具有高频谱效率、抗色散能力强和高灵敏度等诸多优势,成为未来无源光接入网的重要解决方案。但传统相干光通信系统的结构复杂、硬件成本高。在硬件数量方面,用基于 3×3 耦合器的相干接收系统可代替零差检测的相位分集方式,从而减少一个光电二极管(PD)的数量。此外,随着多种消除信号拍频干扰技术的发展,单 PD 结构也被广泛用来代替平

衡探测方式<sup>[8]</sup>,从而节省一半数量的 PD。在数字信号处理(DSP)方面,人们提出了多种简化载波相位恢复算法<sup>[9]</sup>。自零差相干检测方式<sup>[10]</sup>以及双差分编码<sup>[11]</sup>等方案的提出,避免了载波恢复过程,降低了接收端的复杂度。因此,针对低成本需求的接入网应用场景,需要研究降低相干通信方案复杂度的技术,即不仅要简化系统在光域上的结构,也要尽可能降低数字域上信号处理的复杂度。

本文提出了一种基于频率偏移的同相与正交分量(I-Q)交替检测方案,通过时分复用方式交替获取复信号的同相分量与正交分量,降低了传统相干检测系统的复杂度。实验结果表明,该方案在 50G-PON 系统中的检测效果较好。

## 2 基于频率偏移的 I-Q 交替探测原理

基于频率偏移的 I-Q 交替探测接收机结构如图 1(a)所示,与外差检测系统一致,该系统只需要一对平衡光电探测器(BPD)就能接收复信号。但与外差检测下变频得到复信号的方式不同,该系统分别从每个符号持续时间内的两个连续采样点得到信号的同相分量  $I$  和正交分量  $Q$ ,探测原理如图 1(b)所示。其中,LO 为本振信号,ADC 为模数转换器,  $S_k$  为接收符号。

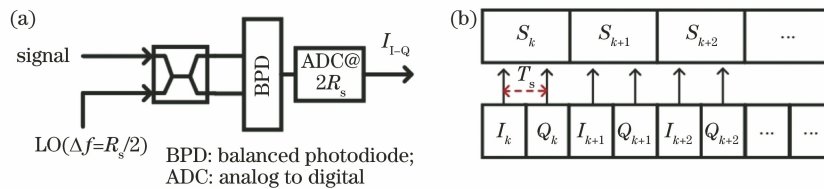


图 1 本方案的原理。(a) I-Q 交替探测结构;(b)信号接收方式

Fig. 1 Principle of our scheme. (a) Structure of the I-Q alternate detection; (b) signal receiving method

接收端的本振光与信号光之间的预设频率偏移为符号速率的一半( $R_s/2$ ),系统的采样率设定为符号速率的 2 倍(采样间隔  $T_s = R_s/2$ ),每个符号周期内两个连续的采样点可表示为

$$I_{k1} = R \sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\theta_s + 2\pi k \Delta f T_s + \theta_n), \quad (1)$$

$$I_{k2} = R \sqrt{P_s P_{LO}} \cos[\theta_s + 2\pi(k+1)\Delta f T_s + \theta_n] = R \sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\theta_s + 2\pi k \Delta f T_s + \pi/2 + \theta_n), \quad (2)$$

式中,  $I_{k1}$  和  $I_{k2}$  为第  $k$  个符号的连续两个采样点,  $R$  为二极管的响应度,  $P_s$  和  $P_{LO}$  分别为信号光与本振光的功率,  $\theta_s$  为信号自身的调制相位,  $\theta_n$  为相位噪声,  $2\pi k \Delta f T_s$  为激光器频率偏移造成的相位偏移。由于  $I_{k1}$  和  $I_{k2}$  为同一符号的两个采样点,因此,可认为其  $P_s$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_n$  是一致的,两个采样点间仅存在相

位差  $2\pi \Delta f T_s$ ,在预设的频率偏移与采样间隔下,该相位差为  $\pi/2$ ,则可将第  $k$  个接收符号表示为

$$S_k = I_{k1} + i I_{k2}, \quad (3)$$

式中,  $i$  为虚数单位。上述方案中,信号光与本振光之间设置的频率偏移等于信号符号速率的一半,介于零差与外差之间,属于内差范围。因此,在未进行脉冲成形的情况下,本方案对于接收机带宽的需求小于外差检测,且不需要数字域的下变频处理,为低成本相干检测的实现提供了一种新的解决方案。

## 3 实验结果及分析

用 10 Gbit/s 非归零码(NRZ)传输系统对该相干探测方案的可行性进行验证,具体实验装置如图 2 所示。在发送端,将一段伪随机序列(PRBS15)映

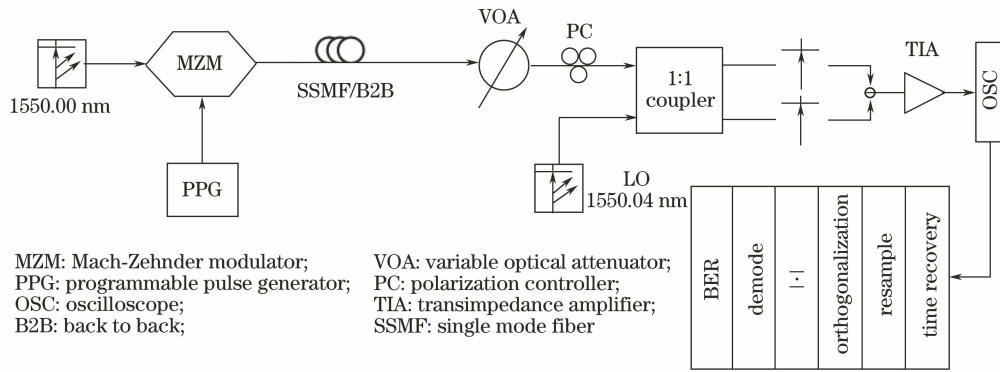


图 2 实验系统框图

Fig. 2 Block diagram of the experimental system

射成 NRZ 信号格式后载入可编程脉冲生成器 (PPG), 产生峰峰值为 2 V 的 NRZ 电脉冲信号, 由该信号驱动马赫-曾德尔调制器 (MZM) 进行强度调制, 激光源选一个工作波长为 1550.00 nm、线宽为 1 MHz 的分布式反馈 (DFB) 激光器。经背靠背 (B2B) 或 40 km 标准单模光纤 (SSMF) 传输后, 接收光信号依次通过一个可调光衰减器 (VOA) 及偏振控制器 (PC) 分别调整接收信号光功率及偏振态。用一个线宽小于 200 kHz 的可调激光器作为本振光源, 其中心波长为 1550.04 nm, 可提供 5 GHz 的频率偏移。信号光与本振光经 50:50 的光耦合器混合后由 BPD 进行光电检测, 探测器输出的电信号经跨阻放大器 (TIA) 放大后由数字存储示波器进行采样, 采样速率为 80 GSa/s。

先经过低通滤波、时钟恢复 (Time recovery) 并重采样 (Resample) 至 20 GSa/s。然后, 从串行信号中提取出交替出现的同相分量  $I$  及正交分量  $Q$  并得到符号速率为 10 Gbit/s 的 NRZ 信号。接收到的 NRZ 信号星座图如图 3(a) 所示, 由于相位噪声的存在, 该星座图呈现出两个环, 分别对应 0 电平及 1 电平。图 3(b) 为收发端激光器频率偏移量为 3 GHz (即存在额外 2 GHz 的频率偏移) 情况下的信号星座图, 可以发现, 同一符号连续两个采样之间的相位差不再是  $90^\circ$ , 此时信号的  $I$ - $Q$  分量相位出现失衡现象, 星座图呈现出两个椭圆环。采用正交化 (Orthogonalization) 算法对相位失衡的星座图进行修正, 可以有效解决  $I$ - $Q$  不平衡问题, 修正后的星座图如图 3(c) 所示。最后, 信号经取模判决 (Demode) 并计算误码率 (BER)。

后续数字信号处理在 Matlab 软件中进行, 信号

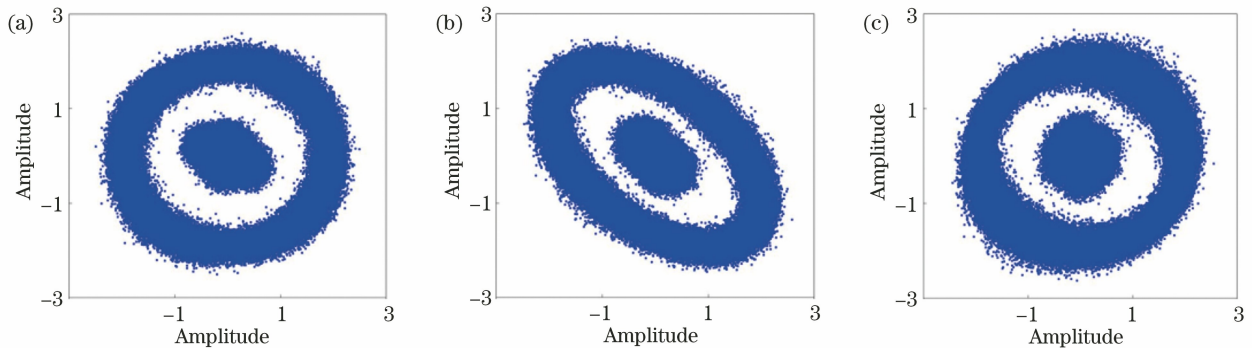


图 3 接收信号的星座图。(a) 无频率偏移; (b) 频率偏移为 2 GHz; (c) 修正后的星座图

Fig. 3 Constellation diagram of the received signal. (a) Without frequency offset; (b) frequency offset is 2 GHz; (c) revised constellation diagram

图 4(a) 为背靠背情况下, 零差检测、外差检测及本方案的误码率性能, 其中, ROP 为接收光功率, 采用的 4 阶贝塞尔低通滤波器带宽分别为 10 GHz、20 GHz 及 15 GHz, 以滤除带外噪声并为三种探测方案提供足够的带宽。可以发现, 在 7% 硬判决门

限 (FEC) 下, 本方案的灵敏度为  $-39$  dBm, 略低于零差检测, 且相比外差检测有 1 dB 的提升。这表明内差检测方案的性能处于零差与外差检测之间, 其设备复杂度与外差检测一致, 属于一种低成本方案。图 4(b) 为不同激光器频率偏移下的灵敏度损失

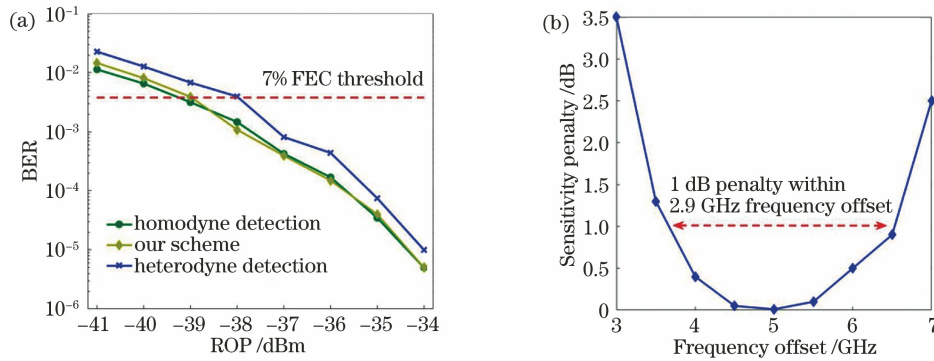


图 4 实验结果。(a)误码率性能;(b)频率偏移导致的灵敏度损失

Fig. 4 Experimental results. (a) Performance of BER; (b) sensitivity penalty caused by frequency offset

(Sensitivity penalty),在 2.9 GHz 的频率偏移范围内,造成的灵敏度损失小于 1 dB。可以发现,虽然正交化算法能有效解决 I-Q 不平衡问题,但不可避免地会导致一定程度的灵敏度损失。实际中 I-Q 相位失衡角的大小由采样间隔与频率偏移共同决定,因此,本方案的频率偏移容忍度与系统的符号速率正相关。

#### 4 50G-PON 的仿真

为了进一步评估光纤色散、接收机带宽、激光器频率偏移对该方案的影响,验证其在 50G-PON 系统中的检测性能,通过仿真对比了该方案与传统相干检测方案的性能。仿真均在 VPItransmission Maker 中实现,收发端的原理如图 5 所示,采用未经脉冲成形的 50 GHz 二电平脉冲幅度调制(PAM2)信号进行演示。在发射端,用线宽为 10 MHz 的激光源作为信号光,其中心波长为 1342.0 nm,由

50 GHz NRZ 脉冲信号驱动电吸收光调制器(EAM)进行强度调制。接收端的本振光源由一个线宽为 10 MHz 的激光器产生。BPD 的带宽及响应度分别为 35 GHz 及 0.7 A/W。针对零差检测、I-Q 交替探测以及外差检测,设置的本振激光器与发端激光源频率间隔均为其最佳频率偏移量,分别为 0 GHz、25 GHz、35 GHz。

针对短距离相干接入场景,SSMF 的色散系数为 3.75 ps/(km·nm)。在后续数字信号处理过程中,用实值均衡器代替正交化算法解决 I-Q 不平衡问题,并通过该滤波器消除色散及带宽限制造成的码间串扰(ISI)。对于零差及外差检测,用每符号两采样点的前向反馈均衡器(FFE)进行滤波,具体的数字信号处理流程如图 6 所示。

##### 4.1 均衡原理

本方案中用每个符号的连续两个采样点作为其

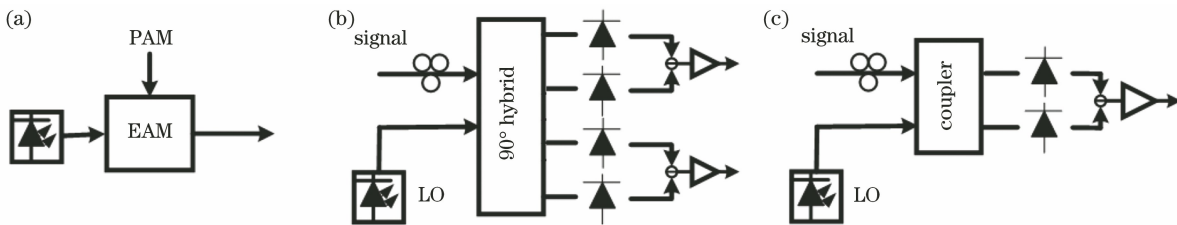


图 5 仿真框图。(a)发送端;(b)零差接收;(c)外差方案与本方案

Fig. 5 Simulation block diagram. (a) Sender; (b) homodyne reception; (c) heterodyne scheme and our scheme

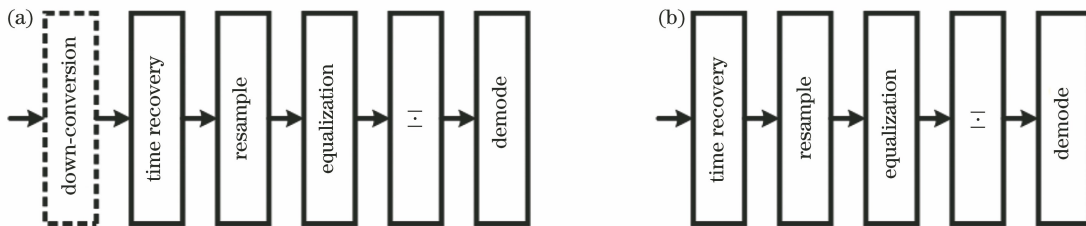


图 6 数字信号处理的流程。(a)零差与外差检测方案;(b)本方案

Fig. 6 Process of digital signal processing. (a) Homodyne and heterodyne detection schemes; (b) our scheme

同相分量  $I$  以及正交分量  $Q$ , 色散以及带宽限制造成的码间串扰都会造成严重的 I-Q 不平衡问题。因此, 采用一半符号周期间隔的实值线性滤波器对信号进行均衡, 其结构如图 7 所示。其中,  $x(n)$  为输入信号,  $h_{1/2}$  为  $I$  和  $Q$  分量中长度为  $N$  的实值滤波器抽头系数。

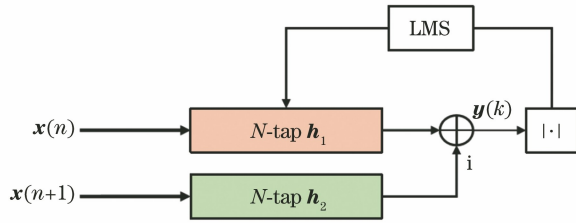


图 7 均衡器的结构

Fig. 7 Structure of the equalizer

用最小均方(LMS)算法对滤波器抽头系数进行更新, 代价函数的选取旨在最小化信号的幅度误差, 可表示为

$$y(k) = h_1 x(n) + i * h_2 x(n+1), \quad (4)$$

$$e = R_T^2 - |y(k)|^2, \quad (5)$$

$$h_1 = h_1 + \mu e h_1 x(n) x(n), \quad (6)$$

$$h_2 = h_2 + \mu e h_2 x(n+1) x(n+1), \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为步长,  $e$  为误差项,  $y(k)$  为滤波后的复信号,  $R_T$  为由训练序列得到的理论信号模值。本方案用基于训练序列的时域均衡方式对信号进行均衡

处理, 一些盲均衡方法如恒模算法(CMA)<sup>[12]</sup>及半径指向算法(RDA)同样适用于本方案。

### 4.2 仿真结果

首先对比了零差检测、外差检测和本方案在背靠背情况下的误码率性能, 结果如图 8(a)所示。可以发现, 在接收机带宽均为 35 GHz 的情况下, 零差检测在软判决门限  $10^{-2}$  (SD-FEC) 上的接收灵敏度为  $-35$  dBm, 外差检测的灵敏度比零差检测低 3 dB, 原因是外差检测的带宽严重受限。本方案的接收灵敏度为  $-32.5$  dBm, 介于零差检测与外差检测之间, 原因是本方案的信号带宽低于外差检测时的信号带宽, 受接收机带宽的影响较小。图 8(b)为背靠背传输情况下外差检测与本方案在不同频率偏移下的灵敏度损失。可以发现, 对于外差检测, 随着频率偏移的增加灵敏度损失将缓慢变大, 原因是接收机的带宽严重受限。频率偏移变小则会造成灵敏度损失急剧升高, 原因是信号频谱出现混叠, 在软判决门限  $10^{-2}$  下,  $[29 \text{ GHz}, 45 \text{ GHz}]$  频率偏移范围内的系统灵敏度损失小于 1 dB。本方案由于频率偏移导致的 I-Q 不平衡现象占主导地位, 灵敏度损失随着频率偏移的变小或变大缓慢提升,  $[17 \text{ GHz}, 37 \text{ GHz}]$  频率偏移范围内的灵敏度损失小于 1 dB。这表明外差检测与本方案对于频率偏移的容忍度基本类似, 在具体情况下可能有略微的差距。

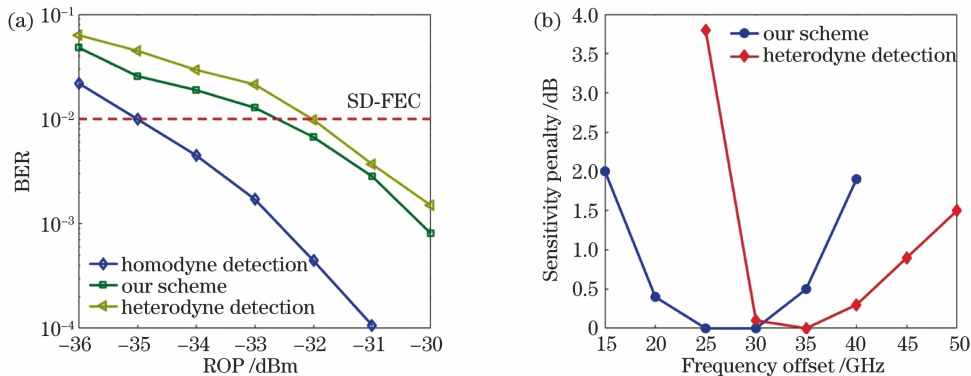


图 8 仿真结果。(a)不同方案的性能;(b)不同频率偏移导致的灵敏度损失

Fig. 8 Simulation results. (a) Performance of different schemes; (b) sensitivity penalty caused by different frequency offset

为了进一步测试本方案对于光纤色散的容忍度, 仿真了背靠背、经 20 km 和 40 km 单模光纤传输的误码率曲线, 结果如图 9 所示。可以发现, 经 20 km 和 40 km 单模光纤传输比背靠背情况下的接收灵敏度分别低 0.5 dB 和 1 dB, 这表明本方案采用的实数均衡器不能完全补偿色散, 但随着色散的增大, 灵敏度的下降速率逐渐变慢, 这对于短距离相干接收属于可接受的范围。

## 5 结 论

提出了一种基于频率偏移的 I-Q 交替检测方案, 通过时分复用方式获取复信号的同相分量与正交分量, 以取代传统零差检测的相位分集接收, 节省了一半数量的光电探测器件。相比外差检测, 该方案无需进行下变频, 且对接收机的带宽需求更低。此外, 还提出了一种自适应均衡算法, 能有效解决本

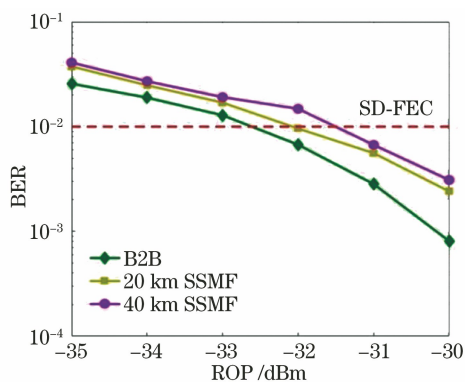


图 9 传输性能

Fig. 9 Transmission performance

方案中由色散、频率偏移及接收机带宽受限造成的信号失真问题。最后,通过实验与仿真验证了本方案的可行性,为低成本相干接入提供了一种有潜力的解决方案。

## 参 考 文 献

- [1] Miguez P. What applications are driving higher capacity in access?[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California. Washington, D. C.: OSA, 2018: M2B.1.
- [2] Zhu Y X, Yi L L, Yang B, et al. Comparative study of cost-effective coherent and direct detection schemes for 100 Gb/s/ $\lambda$  PON [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(9): D36-D47.
- [3] IEEE P802.3ca 50G-EPON task force [EB/OL]. [2021-04-20]. <http://www.ieee802.org/3/ca/>.
- [4] Luo Y Q, Zhou X P, Effenberger F, et al. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 587-593.
- [5] Xie C J, Winzer P J, Raybon G, et al. Colorless coherent receiver using  $3 \times 3$  coupler hybrids and single-ended detection[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1164-1171.
- [6] Tang M, Li W H, Feng Z H. High-sensitivity and low-cost coherent communication technology for optical access network[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 9-16.  
唐明, 李伟昊, 冯振华. 光接入网高灵敏度低成本相干通信技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 9-16.
- [7] Yu J J. Technologies for high-speed data center interconnection[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 2-8.  
余建军. 数据中心高速光互连技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 2-8.
- [8] Corcoran B, Foo B, Lowery A J. Single-photodiode per polarization receiver with signal-signal beat interference suppression through heterodyne detection [J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3075-3086.
- [9] Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery algorithm for coherent optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206002.  
徐文婧, 李岩, 刘宇暘, 等. 相干光通信载波相位恢复算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206002.
- [10] Mizukami H, Okamura Y, Hanawa M. Self-heterodyne detection of phase modulated signals using quadrature-phase-modulated and polarization-multiplexed pilot carrier [C]//OptoElectronics and Communications Conference and Photonics in Switching 2013, June 30-July 4, Kyoto, Japan. Washington, D. C.: OSA, 2013: TuPR\_19.
- [11] Walsh A J, Mountjoy J, Shams H, et al. Highly robust dual-polarization doubly differential PSK coherent optical packet receiver for energy efficient reconfigurable networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5218-5226.
- [12] Yu M H, Guo H X, Liu Y Y. Experimental research of an improved equalization algorithm for MPPM-QPSK optical communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1906004.  
于梦晗, 郭宏翔, 刘宇暘. 一种改进的MPPM-QPSK光通信系统的两模均衡算法实验研究[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1906004.