

面向中短距应用的差分自相干光纤传输系统

蔡轶^{1*}, 姜晨旭¹, 王霄洲², 王甫涵³, 田中星¹, 孙林¹, 王晓玲¹, 刘宁¹, 沈纲祥¹, 周俊², 郝祥勇³, 庞胜清³¹苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006;²科大亨芯半导体技术有限公司, 江苏 苏州 215200;³亨通集团有限公司, 江苏 苏州 215200

摘要 基于 4 电平脉冲幅度调制(PAM4)的强度调制直接检测(IMDD)是目前中短距应用的主要解决方案之一。然而, 基于高阶脉冲调制的 IMDD 方案检测灵敏度明显下降。另一方面, 拥有更高灵敏度的标准相干检测技术又面临成本和复杂度方面的挑战。因此, 自零差相干检测(SHCD)和差分检测等自相干检测方案, 因其优于 PAM4 的性能和低于标准相干检测的硬件成本而在新一代中短距应用中具备优势。本文综述和比较自零差相干以及差分自相干检测(DSCD)系统各自的特征、优点和挑战。文中进一步针对光功率受限和光信噪比受限的不同传输场景, 分析比较基于 SHCD-正交相移键控(QPSK)和 DSCD-差分正交相移键控(DQPSK)方案的系统性能, 展示了 DSCD-DQPSK 系统相较其他方案在硬件成本和系统性能方面的综合优势。

关键词 光通信; 相干检测; 自相干检测; 差分调制; 数字信号处理

中图分类号 TN911.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230751

1 引言

随着 5G、云计算、增强现实(AR)和虚拟现实(VR)技术的发展, 以及物联网设备和智能终端数量逐年增加, 网络中所产生的数据流量呈指数型增长。而作为数据中心内和数据中心间流量的主要承载者, 高速高性能中短距通信系统的规模和数量需要大幅增加以满足持续增长的需求。目前, 实现中短距传输仍以强度调制直接检测(IMDD)系统为主^[1-4]。当前主流的高速 IMDD 系统采用 4 电平脉冲幅度调制(PAM4), 对于传统数据中心内部光互连场景下的短距传输具有复杂度较低、实现较为简单的优势^[5-6]。针对 IMDD-PAM4 系统, 研究人员在接收端使用不同的均衡技术提升系统通信速率和传输距离^[7-10]。然而, 基于高阶脉冲幅度调制的 IMDD 方案的检测灵敏度随调制阶数的升高明显下降^[11], 使得系统性能受限。并且该类系统难以使用偏振复用技术提升频谱效率, 将无法满足未来高速高性能光传输系统的需求。另一方面, 基于相干检测技术的光传输系统拥有更高的灵敏度, 且可使用偏振复用技术提升频谱效率^[5], 但是相对于中短距光纤传输场景来说成本和复杂度过高^[12-14]。因此只有降低相干检测技术方案的成本和功耗, 同时保持较高的接收机灵敏度, 才能使相干光传输系统成为适合中

短距数据传输的技术方案。相干检测技术从长距下沉至中短距光纤传输系统的挑战主要来自光电器件成本和数字信号处理(DSP)芯片对功耗的提升。特别是典型的相干光传输系统要求接收端配备窄线宽本振激光器, 对于低成本低功耗要求的中短距传输尚不适用。近年有研究从降低功耗角度对高复杂度的 DSP 算法进行优化^[15], 也有通过使用模拟信号处理取代数字信号处理^[16-18], 在一定程度上降低所需功耗。然而这些技术都没有解决接收端要求窄线宽本振激光器的问题。

为能免除接收端窄线宽本振激光器的要求, 从而降低系统所需器件成本, 可以采用以下两种方案: 1) 信号与本振同源的自零差相干检测(SHCD); 2) 基于差分调制格式的差分自相干检测(DSCD)。

2005 年, 东京国家和信息通信研究所的 Miyazaki 和 Kubota^[19]提出一种基于偏振复用的 SHCD 系统, 将信号和载波分别在光的 X 偏振和 Y 偏振分量进行传输, 在接收端偏振分离实现零差检测。但相对于常规偏振复用系统而言, 其频谱效率降低 50%。随着空分复用(SDM)技术的发展, 东京国家和信息通信研究所于 2013 年提出使用 SDM 技术的 SHCD 系统^[20-21], 通过 19 芯多芯光纤(MCF)实现空分复用, 使用正交相移键控(QPSK)调制格式, 一根纤芯传输远端本振, 其余纤

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-20; 录用日期: 2023-06-12; 网络首发日期: 2023-06-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2903000)、国家自然科学基金(62275185, 62250710164)

通信作者: *yicai@suda.edu.cn

芯传输信号,每通道速率为 10 Gbit/s,在 18 根纤芯中分别实现 16 通道波分复用(WDM),实现总速率为 2.88 Tbit/s 的 10 km 传输。2017 年,Sowailem 等^[22]提出一种双向传输 SHCD 系统用于短距离传输,使用高阶正交幅度调制格式(QAM),分别在 500 m、2 km、10 km 的单模光纤(SMF)距离下实现了 530 Gbit/s 32QAM、448 Gbit/s 16QAM、320 Gbit/s 16QAM 传输。同年,华中科技大学刘德明团队^[23]将 SHCD 用于光接入网的下行传输方案,使用 MCF 实现 6×200 Gbit/s PDM-16QAM 的 37 km 传输。2021 年,华中科技大学唐明团队^[24]使用非制冷分布式反馈(DFB)激光器演示了实时 400 Gbit/s DP-16QAM 和 600 Gbit/s DP-64QAM 双向 SHCD 系统,最远传输距离分别达到 40 km 和 5 km。然而,SHCD 方案仍面临着信号和远端本振的光路不匹配、对发射端激光器线宽较敏感以及传输后远端本振偏振态难追踪等问题^[25]。

第二种思路的 DSCD 方案是基于差分调制格式,使用前后两个相邻信号的相对相位信息实现自相干信号解调^[26-29]。该方案对于激光器线宽具有高容忍度,无需使用载波相位恢复,可以使用大线宽激光器达成相干检测,从而降低系统成本同时获得较高接收机灵敏度。与 SHCD 方案相比,DSCD 方案不存在两个信号传输光路不匹配而影响性能的问题。并且,如本文给出的最新研究结果显示,在接收机电噪声为主要损伤的系统中,DSCD 与 SHCD 理论性能相同。而在光放大器引入的光噪声占主导的系统中,DSCD 性能优于 SHCD。因此,DSCD 技术提供了一个低成本低功耗的高速高性能光纤传输系统方案^[30]。

本文将综述比较 IMDD、SHCD 和 DSCD 等光纤传输系统方案。本研究中 SHCD 和 DSCD 系统分别采用 QPSK 调制格式和差分正交相移键控(DQPSK)调制格式,将分析 SHCD 与 DSCD 系统的硬件复杂度,以及在不同线宽场景下仿真比较二者对于路径差异的容忍度。还将在电噪声主导的应用场景下,推导并验证 SHCD 系统的最佳功率分离比,对比 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的性能。在复杂噪声场景下讨论 SHCD 系统功率分离比优化策略,进一步仿真对比不同噪声比情况下 SHCD 和 DSCD 系统灵敏度。在光噪声主导场景下,对比 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的性能。最后,通过光纤传输仿真对比上述三类系统的中短距传输性能,从而显示 DSCD-DQPSK 系统的综合技术优势。

2 系统基本原理

2.1 SHCD 系统原理

相干检测相比直接检测方案可实现更高的灵敏度和频谱效率,然而,由于传统相干检测需要窄线宽本振激光器和较复杂的 DSP 算法,目前尚不适用于要求低

成本低功耗的中短距传输应用。

SHCD 系统通过对传统相干检测进行简化,放宽了系统对于本振激光器频率漂移和线宽的要求,同时可以移除 DSP 中的频率偏移补偿和载波相位恢复算法^[22]。如图 1 所示,SHCD 系统发射端的激光源输出被分为两部分,一部分用于调制信号,另一部分作为远端本振,不经过调制,直接传输到收发机 2 的接收机进行相干检测。发射端 DSP(Tx DSP)经数模转换(DAC)后,通过相位调制器调制为光信号,调制后的光信号和未经调制的远端本振(LO)可分别表示为

$$E_s(t) = \sqrt{P_s \cdot (1-R)} \cdot \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)] \cdot a(t) \exp[j\varphi(t)], \quad (1)$$

$$E_{LO}(t) = \sqrt{P_s \cdot R} \cdot \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)], \quad (2)$$

式中: P_s 为光信号平均功率; R 为功率分离比;远端本振和光信号有相同的频率 ω_s 和相位噪声 φ_s 。

收发机 1(transceiver 1)的信号通过光环形器 1(C1)经光纤 1(fiber 1)传输至收发机 2(transceiver 2),收发机 1 的远端本振通过光环形器 2(C2)经光纤 2(fiber 2)传输至收发机 2。到达收发机 2 的信号通过光环形器 3(C3)进入其接收机的信号端口,远端本振则通过光环形器 4(C4)进入相应接收机的本振端口,从而实现相干检测。收发机 2 向收发机 1 的信号与远端本振传输与以上过程类似,只是传输方向相反。

信号和远端本振来自同源激光器,因此放宽了对于激光器频率漂移和线宽的要求,使用较低成本激光器。同时在信号和远端本振光路严格匹配的情况下,信号和远端本振有相同的中心频率和相位噪声,无需使用频率偏移补偿和载波相位恢复模块。但是,信号和远端本振各自经过一条光纤进行传输,可能存在光路不匹配的问题,这将会降低系统对于线宽的容忍度。同时,由于双向传输的需求,收发机 1 和收发机 2 分别需要 2 个光环形器以实现同一光纤内的光信号与远端本振激光器的对传。在不考虑噪声和其他因素的影响下,SHCD 系统相干检测后可以得到的电信号表示为

$$I_{SHCD}(t) = P_s \sqrt{R \cdot (1-R)} \cdot a(t) \exp[j\varphi(t)], \quad (3)$$

式中:当 $R=0.5$ 时,所获取的电流信号 $I_{SHCD}(t)$ 最大。

相干检测后的电信号经过模数转换器(ADC)转为离散数字信号,通过接收端 DSP(Rx DSP)实现信号损伤补偿、检测判决及纠错解码。SHCD 系统通过接收到的信号与远端本振混合后进行相干检测,理想情况下能够消除频率偏移和激光器相位噪声对系统性能的影响,然而由于信号与远端本振传输光路不匹配,激光源线宽越大对于路径匹配的要求就越加严格^[24, 31]。高插入损耗光环形器的存在,会限制 SHCD 系统有效光功率^[31]。除此之外,对于偏振复用的 SHCD 系统传输后的远端本振偏振态不稳定,需要在光域进行偏振追踪从而提高硬件复杂度。并且光域偏振跟踪速度有

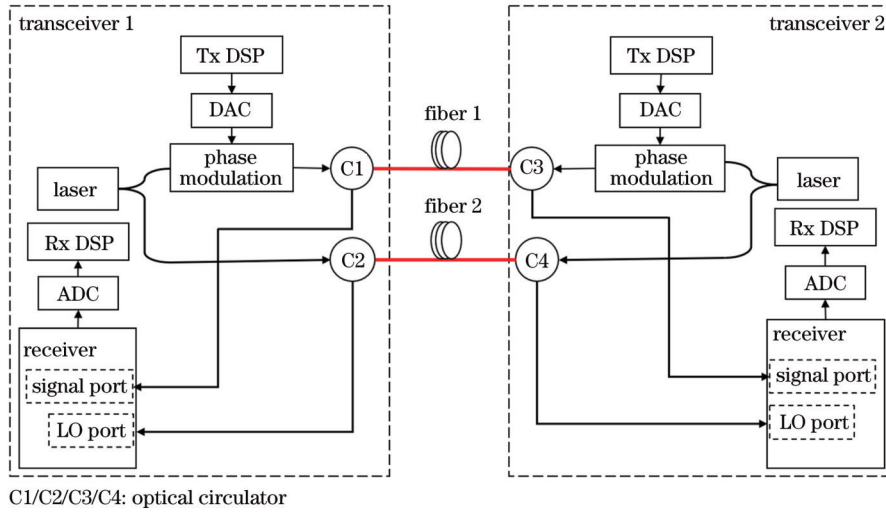


图 1 SHCD 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a SHCD system

限,当前所达成的最高跟踪速度为 200 krad/s^[25]。另一个解决方案是通过增加额外的 Hybrid 引入互补偏振拍频项,在 DSP 中通过 3×2 自适应均衡实现偏振追踪^[32-33]。

2.2 差分自相干检测系统原理

差分自相干检测可利用前后两个相邻符号的相对相位信息实现自相干检测,因此不需要接收端的本振激光器,同时对发射端激光器线宽所导致的相位噪声具有较强的抵抗能力^[34]。并且差分调制对非线性相位

损伤也具有更强的抵抗能力,在非线性场景下的系统性能表现更好^[35]。图 2 为 DSCD-DQPSK 系统整体结构,与 SHCD 系统相比,DSCD 系统无需远端本振的参与,不存在两根光纤长度之间需要匹配的问题,也无须使用光环行器。收发机 1 发射端 DSP 数据经数模转换后,调制为光信号经光纤传输至收发机 2,在 DQPSK 接收机中进行差分检测。差分检测后的信号经模数转换后,通过接收端 DSP 实现信号的损伤补偿、判决及纠错解码。收发机 2 向收发机 1 的传输与以上过程类似。

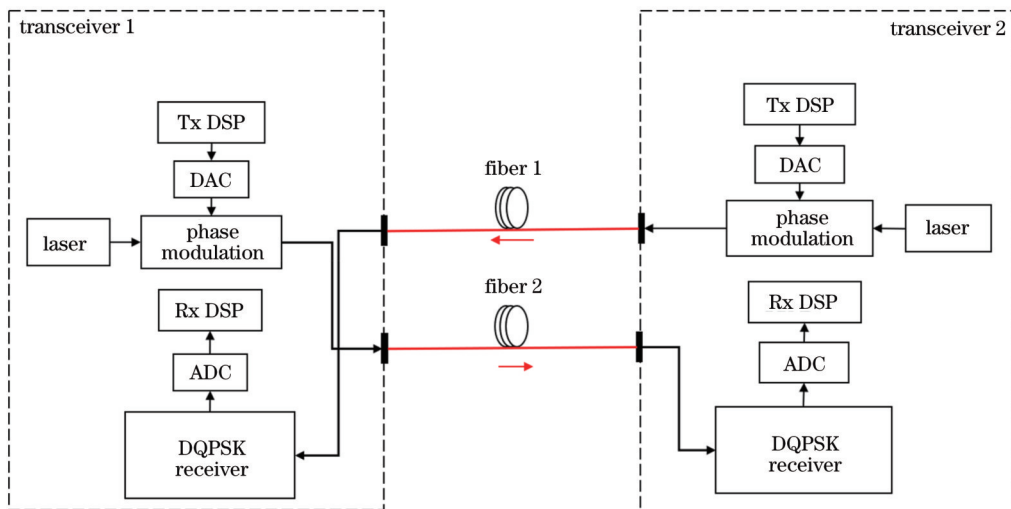


图 2 DSCD-DQPSK 系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a DSCD-DQPSK system

如图 3 所示,接收到的 DQPSK 信号经过 3 dB 分光器分离出两路光信号,获得两个功率相同相位差为 90°的信号分量 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$,

$$E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_s(t) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)] a(t) \exp[j\varphi(t)], \quad (4)$$

$$E_2(t) = j \frac{1}{\sqrt{2}} E_s(t) = j \sqrt{\frac{P_s}{2}} \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)] a(t) \exp[j\varphi(t)]. \quad (5)$$

光信号 $E_1(t)$ 经过一个分光器再次分出两路光信号,上臂的光信号经过一个符号周期的延时 T 获取到相邻符号信息,下臂的光信号经过相移 φ_1 ,经过耦合之后

获得两路光信号 $E_3(t)$ 和 $E_4(t)$, 另一路光信号 $E_2(t)$ 也经过类似处理过程可获得两路光信号 $E_5(t)$ 和 $E_6(t)$ 。

$$E_3(t) = \frac{1}{2} E_1(t - T) - \frac{1}{2} E_1(t) \exp(j\varphi_1), \quad (6)$$

$$E_4(t) = j\frac{1}{2} E_1(t - T) + j\frac{1}{2} E_1(t) \exp(j\varphi_1), \quad (7)$$

$$E_5(t) = \frac{1}{2} E_2(t - T) - \frac{1}{2} E_2(t) \exp(j\varphi_Q), \quad (8)$$

$$E_6(t) = j\frac{1}{2} E_2(t - T) + j\frac{1}{2} E_2(t) \exp(j\varphi_Q), \quad (9)$$

式中: φ_1 设置为 $\pi/4$, φ_Q 设置为 $-\pi/4$, 保证在两路信号间产生 90° 相位差。经过平衡探测器 (BD) 后获得 DSCD 系统的电信号, 表示为

$$I(t) = I_1(t) + I_Q(t) \cdot j = \frac{P_s}{2} \cdot a(t) a(t - T) \exp\left\{j\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi}{4}\right]\right\}, \quad (10)$$

式中: $a(t)$ 为当前时刻的幅度信息; $a(t - T)$ 为下一时刻的幅度信息; $\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t - T)$ 表示相邻符号之间的相对相位信息。

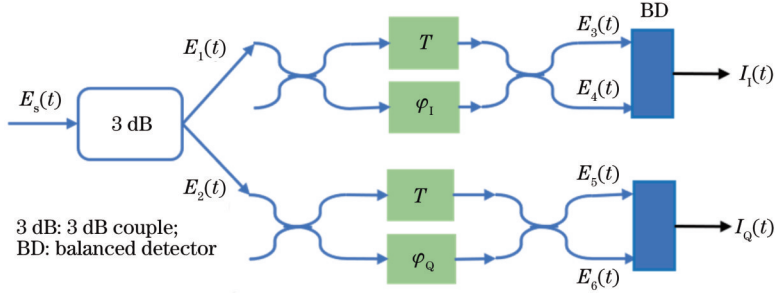


图 3 DSCD-DQPSK 接收机结构图

Fig. 3 Schematic diagram of a DSCD-DQPSK receiver structure

DSCD 系统的核心是通过一个符号的延时获得一个参考光信号进行相干, 得到相对相位信息, 不需要在接收端使用高性能的本振激光源。这一技术方案综合了简化的相干系统结构, 以及相干检测系统的高灵敏度和高性能等特点, 并可通过偏振复用进一步提升频谱效率。传统的偏振复用差分自相干检测在光域追踪信号的偏振态^[36], 其偏振追踪速度较低。另一种方案是通过增加冗余拍频项在数字域使用自适应均衡实现偏振追踪^[37]。还有一种使用 RZ 码型的差分调制信号, 能够使偏振复用信号无需数字域偏振解复用^[38]。综合这些技术, DSCD 系统中短距光传输应用提供了一个具有性能和成本平衡优势的解决方案。

3 仿真结果分析与讨论

本节首先从系统架构角度对 SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的硬件复杂度进行分析比较。然后, 分析讨论 SHCD 系统中信号和远端本振在不同线宽情况下对光路不匹配的容忍度。之后, 针对光纤传输系统中起主导作用的不同噪声来源, 将系统分为电噪声损伤为主的光功率受限系统和光噪声损伤为主的光信噪比 (OSNR) 受限系统, 结合 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 及 DSCD-DQPSK 等技术方案分别进行研究比较。

本节所讨论比较的各种系统在不同场景下的性能均采用 MATLAB 软件进行系统建模和仿真运算获得。各仿真场景中的激光器、标准单模光纤 (SSMF)、色散补偿光纤 (DCF)、光放大器和光滤波器半峰全宽 (FWHM) 等共性参量如表 1 所示。

表 1 共性系统参量

Table 1 Common system parameters

| Parameter | Value |
|--|-------------------------|
| Symbol rate / (GBaud · s ⁻¹) | 100 |
| Sample rate / (GSa · s ⁻¹) | 200 |
| Symbol number | 1 × 10 ⁶ |
| Bits per symbol | 2 |
| Wavelength / nm | 1550 |
| Tested laser linewidth / MHz | 0.5, 1.5, 3 |
| Fiber dispersion / (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹) | 17 |
| Fiber attenuation / (dB · km ⁻¹) | 0.2 (SSMF), 0.6 (DCF) |
| Fiber length per span / km | 80 |
| Noise figure of optical amplifier / dB | 5.8 |
| Speed of light / (m · s ⁻¹) | 299792458 |
| Rx optical filter for signal / GHz | 200 (Gaussian FWHM) |
| Rx optical filter for LO / GHz | 20 (Gaussian FWHM) |
| Rx ADC bandwidth / GHz | 70 (Bessel 3 dB cutoff) |

3.1 简化相干系统复杂度比较

表 2 列出了偏振复用 (PDM) SHCD-QPSK 系统和偏振复用 DSCD-DQPSK 系统所需要的关键光电器件。其中, SHCD-QPSK 系统需要 2 个偏振分束器 (PBS) 分离出信号和远端本振的正交偏振分量, 以及 2 个 90° Hybrid 和 4 个 BDs 实现对所接收信号的相干检测。SHCD 系统还需要一个光域偏振控制器 (PC), 在接收机进行相干检测前动态跟踪和调整从发射端传来作为本振的激光源偏振态, 避免相干检测时出现因本振光偏振态的变化引起的输出信号在某一偏振方向功率衰落的问题。此外, SHCD 系统还需要 4 个光环

形器(optical circulator)来实现单根光纤内信号与远端本振的双向传输。

对应地,DSCD-DQPSK系统需要一个PBS分离出两路正交偏振分量,以及2个差分解调器件和4个BDs实现差分解调及自相干检测。其偏振跟踪功能可在数字域通过DSP实现。其中对于偏振复用的DQPSK信号可以通过一个差分解调器同时对正交偏振分量实现差分检测,之后使用4个PBS获取对

应偏振分量的同向分量和正交分量,如此可以节省1个差分解调器件但相应增加3个PBS。而上述SHCD系统中的PC和光环形器在DSCD-DQPSK系统中是不需要的。综合比较之下,SHCD系统所需的器件更多,且光环形器无法集成到接收机。而DSCD-DQPSK系统接收机所需光电器件均可集成实现,显示出差分自相干系统在简化硬件结构方面的优势。

表2 SHCD-QPSK和DSCD-DQPSK系统所需器件

Table 2 Devices required for SHCD-QPSK and DSCD-DQPSK systems

| PDM-system | 90° hybrid | Differential demodulation | PBS | PC | BD | Optical circulator |
|------------|------------|---------------------------|-----|----|----|--------------------|
| SHCD-QPSK | 2 | 0 | 2 | 1 | 4 | 4 |
| DSCD-DQPSK | 0 | 2 | 1 | 0 | 4 | 0 |

3.2 光路不匹配影响下的简化相干系统

本小节分析信号和远端本振传输路径差异不匹配对系统性能的影响,设置SHCD系统光信号和远端LO的路径差异所导致的相对延时,仿真不同线宽情况下对路径差异的容忍度。虽然SHCD系统接收端的信号和远端本振来自同源激光器,使得SHCD系统对于线宽的容忍度得到提高,能够使用大线宽激光器

工作,但是信号和远端本振传输路径长度不同,SHCD系统对于这一路径差异问题非常敏感。

图4显示了不同OSNR下使用不同线宽(LW)激光器时,SHCD-QPSK和DSCD-DQPSK系统对于路径差异长度的容忍度。其中图4(a)和(b)分别显示了OSNR为17 dB和20 dB时,不同线宽下路径差异容忍度的仿真结果。

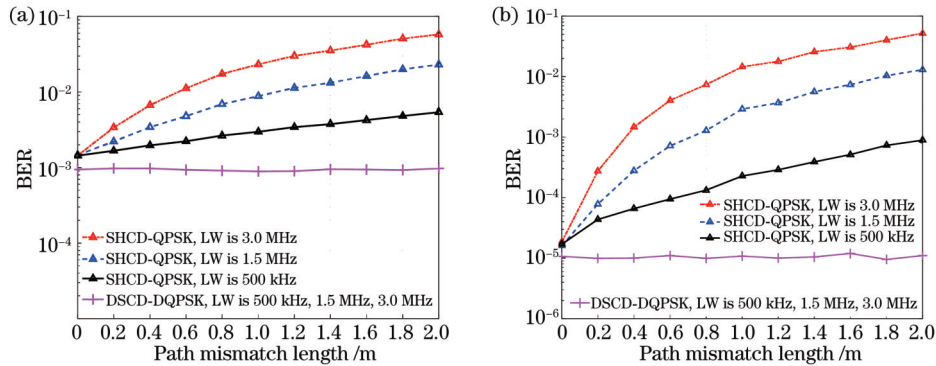


图4 不同线宽的激光源条件下,SHCD-QPSK与DSCD-DQPSK系统对于光传输路径差异的容忍度比较。(a) 17 dB OSNR; (b) 20 dB OSNR

Fig. 4 Comparison of tolerance for transmission-path mismatch between SHCD-QPSK and DSCD-DQPSK systems under different laser linewidths. (a) 17 dB OSNR; (b) 20 dB OSNR

首先可以看出,对于SHCD系统,在固定OSNR下,使用的激光器线宽越大,SHCD系统对于路径差异的限制越严格。具体而言:当OSNR为17 dB,激光器线宽为3 MHz,SHCD系统路径差异为60 cm时,误码数上升1个数量级;当激光器线宽为500 kHz时,SHCD系统对于路径差异容忍度提高,60 cm路径差异引起误码数仅增加了50%。当OSNR为20 dB,可以观察到相似的结论,SHCD系统的光源线宽越大,对于路径差异要求越严格。此外,相同线宽条件,在高信噪比的情况下,随着路径差异的增加,SHCD系统的性能下降更快。当OSNR为20 dB时,激光器线宽为3 MHz时,60 cm的路径差异引起误码数上升2个数量

级,当激光器线宽为500 kHz时,60 cm路径差异引起SHCD系统的误码数增加了5倍,远低于2个数量级的水平。

在高OSNR情况下,随着路径差异的增加,线宽相位噪声成为SHCD系统性能劣化的主要因素。而对DSCD-DQPSK系统而言,由于对传的两条光纤链路之间所传输的光信号间没有任何关联,光链路间的路径差异对DSCD-DQPSK系统性能不会有任何影响。

3.3 光功率受限系统

如图5所示,在光纤通信系统中不同位置引入的噪声,可分为光噪声和电噪声两类。对于有光纤放大

器的系统,发射机(Tx)发出的光信号 $x(t)$ 在传输过程中受到光噪声 n_{optic} 的影响,在接收机(Rx)进行检测后,受到接收机内部的电噪声 n_{elec} 影响。

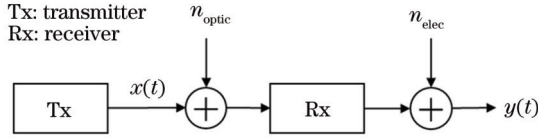


图 5 光纤通信系统中的噪声来源

Fig. 5 Noise sources in optical communication system

在光功率受限系统中,无光放大器光传输链路的系统传输距离受限于在接收端所能获得的光信号功率。这类系统中,光信号在传输过程中不会叠加光放大器引入的光噪声,但信号功率随传输距离增长不断衰减。因而在整个系统中,接收机中的光电探测器和电放大器所带来的电噪声成为主要噪声源。对于给定的电放大器噪声功率,光功率受限系统的性能随着接收机光电检测后获得的电信号功率的提升而提升。

由式(3)可知,SHCD系统光源的分离比 $R=0.5$,即本振占总功率比例为0.5时,能获得最大的光电检测信号功率。因此在接收机中电噪声占主要地位的情况下,分离比为0.5的SHCD系统性能最优。图6为SHCD-QPSK系统在不同的远端本振与信号功率比情况下的仿真研究所得误码率曲线,系统速率为200 Gbit/s。可以看出与理论预期一致,在只有电噪声的情况下,不同的信噪比下SHCD系统的最佳功率分离比固定,都是在发射端光源分离比为0.5:0.5时得到最低的误码率(BER)结果。

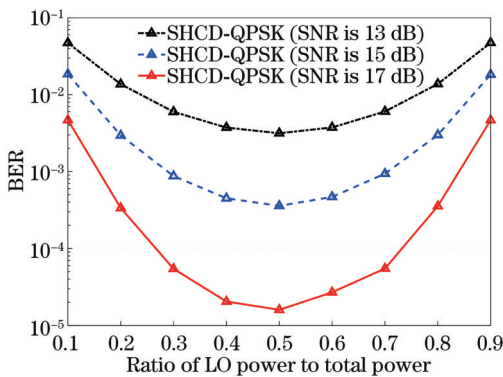


图 6 SHCD-QPSK 系统在只有电噪声的情况下不同本振与信号功率分离比对应的误码率曲线

Fig. 6 Effect of different power separation ratios on the BER of SHCD-QPSK systems with dominant electrical noise

在这种情况下的SHCD-QPSK系统所获得电信号为

$$I_{\text{SHCD}}(t) = \frac{P_s}{2} \cdot a(t) \exp[j\varphi(t)]. \quad (11)$$

设定QPSK和DQPSK调制格式的信号幅度均为

1,即式(10)和(11)中的 $a(t)=1$,则DSCD-DQPSK经过光电检测所获得的电信号为

$$I(t) = I_i(t) + I_q(t) \cdot j = \frac{P_s}{2} \cdot \exp\left\{j\left[\Delta\varphi(t) + \frac{\pi}{4}\right]\right\}. \quad (12)$$

比较式(11)和(12)可见,相同接收光功率条件下,理论上DSCD-DQPSK与SHCD-QPSK系统得到相同的光电检测后电信号功率,也即在电放大器噪声为主的系统中拥有相同的理论背靠背(BTB)性能。

图7显示了光功率受限单偏振系统中,最佳功率分离比下的SHCD-QPSK、DSCD-DQPSK和IMDD-PAM4系统在200 Gbit/s传输比特率下的理想背靠背性能曲线,其中在3种系统中都设置相同的电噪声。可见要达到 1×10^{-3} BER, DSCD-DQPSK和SHCD-QPSK系统所要求的接收光功率为-10.6 dBm,而IMDD-PAM4系统所要求的接收光功率为-5.7 dBm。因此与IMDD-PAM4系统相比,DSCD-DQPSK和SHCD-QPSK的接收机灵敏度提升了4.9 dB。而在这种光功率受限系统场景下,DSCD-DQPSK与SHCD-QPSK系统的理想BTB性能相同也与前述的理论预期相符合。

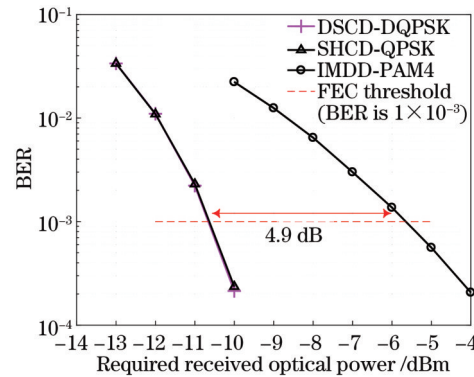


图 7 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 在 200 Gbit/s 传输速率下的理想背靠背性能曲线

Fig. 7 Ideal BTB performance curves of IMDD-PAM4, SHCD-QPSK, and DSCD-DQPSK systems at 200 Gbit/s transmission

3.4 OSNR 受限系统

对于光传输链路中含有光放大器的系统,接收到的信号光功率可以通过提高光放增益来提升,然而信号在传输过程中会被引入光噪声,从而形成OSNR受限系统。在这种情况下,SHCD系统的发射端光源分离比需要根据系统中光噪声和电噪声的相对值进行优化。在光噪声和电噪声功率占比不同情况下,对SHCD系统发射端光源最佳功率分配比的研究中,增加了接收端对远端LO三种不同光域滤波设置下的仿真分析和比较。三种光域滤波设置包括理想LO滤波(即完全滤除远端LO光噪声)、20 GHz LO滤波(即远

端 LO 经过 20 GHz 滤波) 及无光域 LO 滤波。在这 3 种情况下, 图 8 分析了系统中光噪声和电噪声功率占比不同时, SHCD 系统光源的最佳功率分离比变化趋势。其中, 在理想 LO 滤波 (ideal noise-less LO) 和 20 GHz LO 滤波 (20 GHz-filtered LO) 情况下, LO 占比的变化趋势相同, 即随光噪声占比增高而递减。当电噪声功率为系统噪声的主要来源时, 与 3.3 节的推导和分析相同, SHCD 系统的远端本振和信号功率分离比为 0.5:0.5 是最佳功率分离比。当系统中的光、电噪声功率比从 -5 dB 逐渐提高到 15 dB 时, SHCD 系统的远端本振和信号最佳功率分离比相应从 0.5:0.5 逐步降低到 0.2:0.8。当光噪声和电噪声同时存在时, SHCD 系统发射端光源的最佳功率分离比与光噪声的大小相关, 最佳功率分离比会出现变化。这是因为分配到远端本振的光功率无法帮助提升分离传输的信号 OSNR。随着光噪声占比提高, 需要减少远端本振功率占比从而相应提升信号功率占比来减少光噪声带来的系统性能损伤。而为降低系统成本, 远端 LO 不使用窄带光滤波器 (filter-less LO), 与另外两条曲线趋势不同, 最佳 LO 功率占比呈现先增后减的趋势。在光噪声和电噪声功率比值由 -5 dB 增加到 0 dB 时, LO 最佳功率占比呈增加趋势。在光噪声逐渐增多时, 曲线走势与其余两条曲线相同, 呈现降低趋势。

而对于差分自相干系统而言, 所有发射光功率均为信号功率, 不存在上述 SHCD 系统中本振和信号间功率分配问题。为与实际低成本传输系统更加符合, 图 9 的仿真结果设置激光源线宽为 1 MHz, 使用掺饵光纤放大器 (EDFA) 对光信号补偿光纤传输损耗, 引入光噪声, 远端 LO 经过相同设置的 EDFA, 补偿远端 LO 由于光纤传输而导致的损耗, 经过放大后, 接收端的远端 LO 和信号功率比值仍保持不变。在接收端信号经过全带宽为 200 GHz 的光滤波器, 远端 LO 可选择经过全带宽为 20 GHz 的窄带光滤波器, 或不过。

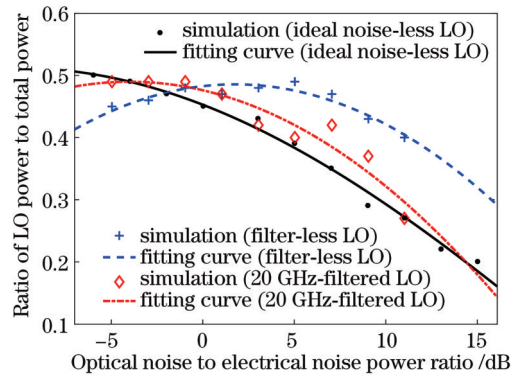


图 8 对于不同光噪声和电噪声平均功率占比, SHCD 系统在三种类型远端 LO 光域滤波设置下的发射端光源最佳功率分离比

Fig. 8 Optimal transmitter laser power separation ratio of the SHCD system for three different optical filtering configurations on the remote LO at various power ratios of optical and electrical noise

且考虑实际传输系统中接收机的带宽限制因素, 在接收机内部设置 3 dB 截止频率为 70 GHz 的 3 阶贝塞尔滤波器。且值得注意的是, 仿真设置均假设 SHCD 系统的信号和远端 LO 传输路径完全匹配。

对上述光噪声和电噪声功率占比不同的情况, 在光噪声和电噪声功率比值为 -5 dB、5 dB、10 dB 和 15 dB 四种情况下分别对 SHCD 和 DSCD 系统进行仿真比较, SHCD-QPSK 系统使用不同光域滤波设置的远端 LO 进行仿真, 其中不同噪声场景 SHCD-QPSK 系统均按上述图 8 中的仿真优化结果设置发端光源功率最佳分离比, 图 9(a) 显示分析了 DSCD-DQPSK 系统和不同类型 SHCD-QPSK 系统达到 1×10^{-3} 误码门限所需要的接收光信号功率。针对图 9(a) 中在光噪声与电噪声比值为 10 dB 的情况, 图 9(b) 显示了 DSCD 和使用不同类型远端 LO 的 SHCD 系统的性能曲线。

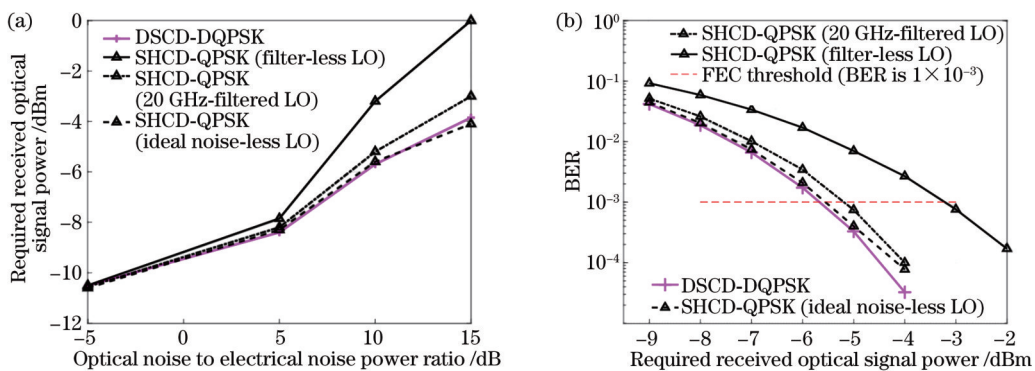


图 9 DSCD 和 SHCD 系统的接收机灵敏度比较。(a) 不同噪声功率比值, BER 达到 1×10^{-3} 门限所需接收信号光功率; (b) 在光、电噪声功率比为 10 dB 时, DSCD 和 SHCD 系统 BER 与 OSNR 性能曲线比较

Fig. 9 Receiver sensitivity comparison of the DSCD and SHCD systems. (a) Required received optical signal power of DSCD and SHCD systems at 1×10^{-3} BER under different noise power ratios; (b) comparison of BER and OSNR curves between DSCD and SHCD systems, when power ratio of optical and electrical noise is 10 dB

在光噪声与电噪声功率比值为 -5 dB 时, DSCD 系统和使用不同类型远端 LO 的 SHCD 系统所需接收光信号功率非常接近。在光噪声与电噪声功率比值为 5 dB、 10 dB 和 15 dB 时, 远端 LO 理想滤波情况下, 达到 1×10^{-3} 误码门限, SHCD 系统所需接收光信号功率分别为 -8.3 dBm、 -5.6 dBm 和 -4.1 dBm, DSCD 系统所需接收光信号功率分别为 -8.4 dBm、 -5.7 dBm 和 -3.9 dBm。其中, 在光噪声与电噪声比值为 15 dB 时, 理想情况下 SHCD 系统灵敏度优于 DSCD 系统 0.2 dB。然而实际情况下, SHCD 系统不能忽视光噪声对远端 LO 的影响, 当无光域 LO 滤波时, 达到相同的 BER 时, SHCD 系统所需接收光信号功率分别为 -7.9 dBm、 -3.2 dBm 和 0 dBm。随着光噪声的增加, 无光域 LO 滤波的 SHCD 系统灵敏度劣化, 因而 DSCD 系统灵敏度相比 SHCD 系统分别提升 0.5 dB、 2.5 dB 和 3.9 dB。通过对远端 LO 增加一个额外的半峰全宽为 20 GHz 的窄带光滤波器, SHCD 系统的接收机灵敏度可分别提升至 -8.2 dBm、 -5.2 dBm 和 -3 dBm。在不同的光噪声与电噪声比值情况下, 随着 SHCD 系统对远端 LO 的处理不同, 系统性能出现差异, 且随着光噪声与电噪声比值逐渐增大, 使用不同类型远端 LO 的 SHCD 系统的性能差异越来越明显, 理想 LO 滤波的 SHCD 系统可获得最佳性能。

需要注意的是, 实际情况下远端 LO 与噪声叠加且理想 LO 滤波无法实现, 通过对 LO 增加窄带光滤波器可提升系统灵敏度, 然而额外的窄带光滤波器会增加系统实现成本。在光、电噪声功率比为 10 dB 和 15 dB 时, 相比 20 GHz LO 滤波的 SHCD 系统, DSCD 系统灵敏度分别提升 0.5 dB 和 0.9 dB。DSCD 系统无需增加额外的成本, 实现了与理想 LO 滤波的 SHCD 系统相当的灵敏度, 优于 20 GHz LO 滤波的 SHCD 系统灵敏度。并且当存在传输路径差异时, SHCD 系统的灵敏度进一步劣化, 从而显示出 DSCD 系统更大的优势。

图 10 显示比较了传输距离为 80 km 时 OSNR 受限的 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的性能。仿真中使用光放大器补偿信号在光纤传输过程中的功率衰减。SHCD-QPSK 系统发射端光源分离比设置为 $0.5:0.5$, 其 OSNR 定义为发射总功率 (即信号和远端本振功率之和) 与光噪声功率的比值。因为引入了光放大器放大接收到的信号光功率, 在此类 OSNR 受限系统中, 光电探测后加入的电噪声损伤可忽略不计。图中结果显示, BER 达到 1×10^{-3} 前向纠错 (FEC) 误码门限, IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统所需的 OSNR 分别为 24.5 dB、 19 dB 和 18.5 dB。可见 SHCD-QPSK 系统性能比 PAM4 系统提升了 5.5 dB, 而 DSCD-DQPSK 系统又比 SHCD-QPSK 系统性能进一步提升了 0.5 dB。

图 11 显示比较了 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和

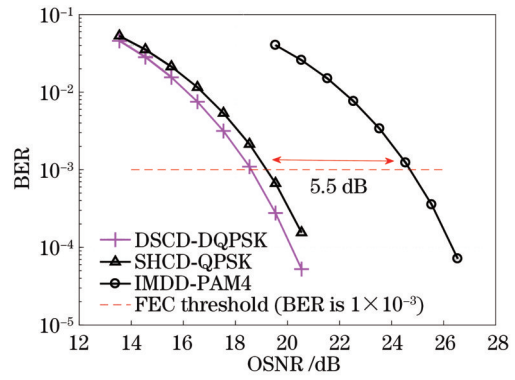


图 10 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的 BER 与 OSNR 性能曲线

Fig. 10 BER and OSNR performance curves of the IMDD-PAM4, SHCD-QPSK, and DSCD-DQPSK systems transmission distances

DSCD-DQPSK 系统 $80 \sim 400$ km 光纤传输仿真性能。该组仿真研究中, 系统设置为每经过一个 80 km 跨段标准单模光纤传输后使用色散补偿光纤来补偿色散, 标准单模光纤传输损耗 0.2 dB/km, 色散系数 17 ps/(nm·km), 色散补偿光纤长度设置为 1 km, 传输损耗为 0.6 dB/km, 并在下一跨段传输前使用光放大器补偿当前跨段信号光功率衰减, 光放大器的增益为 16.6 dB, 噪声系数为 5.8 dB。在接收端, 除了三套系统中均设有的用以滤除所接收信号中光噪声的窄带光滤波器外, 在 SHCD-QPSK 系统中还增加了用于滤除远端本振中光噪声的窄带光滤波器。同时三套系统中接收机一侧也均设定了等量的电噪声。在以上同等的系统设置下, 80 km 传输后, IMDD-PAM4 系统达到的 7.5 dB Q 因子无法满足 9.8 dB 的 FEC 门限, 而 SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 性能 Q 因子则分别可达到 12.5 dB 和 13 dB, 显示出 DSCD-DQPSK 优于 SHCD-QPSK 的系统性能。在 160 km 传输后, DSCD-DQPSK 系统 Q 因子仍可达到 9.8 dB 的 FEC 门限, 而 SHCD 系统的 Q 因子无法满足 FEC 门限要求。

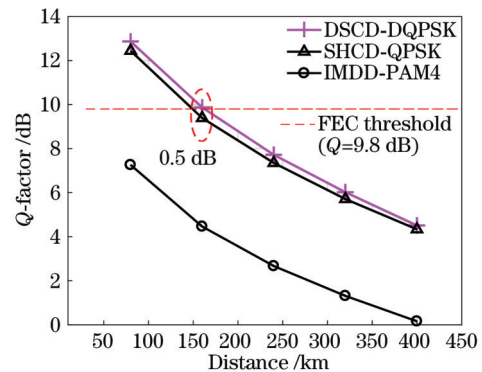


图 11 不同传输距离下, IMDD-PAM、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统的性能曲线

Fig. 11 Performance curves of the IMDD-PAM4, SHCD-QPSK, and DSCD-DQPSK systems at different transmission distances

4 结 论

本文以面向中短距光纤传输的简化相干系统解决方案为目标,对 IMDD-PAM4、SHCD-QPSK 和 DSCD-DQPSK 系统进行了分析比较。通过理论分析、硬件结构比较及相应性能仿真可知,相较于 IMDD、SHCD 系统,DSCD 系统是实现复杂度和传输性能综合最优的中短距传输解决方案之一。具体仿真研究显示,DSCD 系统对激光器线宽和传输路径差异具有更高容忍度。针对不同比例的光纤传输链路噪声和接收机电噪声,本文推导并仿真验证了 SHCD 系统发射端光源的最佳功率分离比。在光功率受限系统中,DSCD-DQPSK 与 SHCD-QPSK 系统灵敏度相当,相比 IMDD-PAM4 系统则灵敏度提升 4.9 dB。相对于 IMDD 系统灵敏度的提升是以相干检测系统采用功耗更高的 DSP 为代价,如何进一步降低 DSP 功耗是后续 DSCD 系统研究的一项重要内容。在 OSNR 受限系统中,SHCD-QPSK 在使用窄带光滤波器滤除远端 LO 的噪声时,可提升系统性能,但同时也增加了系统实现成本。而 DSCD-DQPSK 系统不存在此类问题,系统具有更低的复杂度和成本,以及更高的接收机灵敏度。在功率受限和 OSNR 受限场景中,具有更低实现复杂度、更好实用性的 DSCD-DQPSK 系统均表现出与理想 SHCD-QPSK 系统相当的接收机灵敏度。此外,SHCD-QPSK 系统需要避免传输路径差异和远端本振中噪声导致的系统性能劣化,而这些问题的解决将带来系统实现成本的增大。综上所述,基于 DSCD-DQPSK 的光纤传输系统为中短距光传输提供了一个具有实用化潜力、性能与成本平衡优化的解决方案。

参 考 文 献

[1] Zhang J W, Yu J J, Chien H C. EML-based IM/DD 400G (4×112.5 -Gbit/s) PAM-4 over 80 km SSMF based on linear pre-equalization and nonlinear LUT pre-distortion for inter-DCI applications[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.

[2] Pang X D, Ozolins O, Zhang L, et al. Beyond 200 Gbps per lane intensity modulation direct detection (IM/DD) transmissions for optical interconnects: challenges and recent developments[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, March 3-7, 2019, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2019: W4I. 7.

[3] Pang X D, Ozolins O, Lin R, et al. 200 Gbps/lane IM/DD technologies for short reach optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 492-503.

[4] 杨静宇, 李梦岩, 吉妍, 等. IM/DD O-SEFDM 系统生成方法及检测器研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1906005.
Yang J Y, Li M Y, Ji Y, et al. Research on the generation method and detector of IM/DD O-SEFDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906005.

[5] 余建军, 迟楠, 陈林. 基于数字信号处理的相干光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
Yu J J, Chi N, Chen L. Coherent optical communication technology based on digital signal processing[M]. Beijing: Posts

& Telecom Press, 2013.

[6] 朱子岳, 赵梦鑫, 张一尘, 等. 高速 IM-DD 模式复用通信系统中基于神经网络的 MIMO 均衡技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1406003.
Zhu Z Y, Zhao M X, Zhang Y C, et al. MIMO equalization technology based on neural network in high-speed IM-DD mode division multiplexing transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406003.

[7] Karinou F, Stojanovic N, Prodaniuc C, et al. Solutions for 100/400-Gb/s Ethernet systems based on multimode photonic technologies[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(15): 3214-3222.

[8] Liu G N, Zhang L, Zuo T J, et al. IM/DD transmission techniques for emerging 5G fronthaul, DCI and metro applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 560-567.

[9] Yi L L, Liao T, Huang L Y, et al. Machine learning for 100 Gb/s/ λ passive optical network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(6): 1621-1630.

[10] Dai X X, Li X, Luo M, et al. LSTM networks enabled nonlinear equalization in 50-Gb/s PAM-4 transmission links[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(22): 6079-6084.

[11] Szczerba K, Westbergh P, Agrell E, et al. Comparison of intersymbol interference power penalties for OOK and 4-PAM in short-range optical links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(22): 3525-3534.

[12] Elbers J P, Eiselt N, Dochhan A, et al. PAM4 vs coherent for DCI applications[C]//Advanced Photonics 2017 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, PS), July 24-27, 2017, New Orleans, Louisiana. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: SpTh2D. 1.

[13] Chagnon M. Optical communications for short reach[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(8): 1779-1797.

[14] Perin J K, Shastri A, Kahn J M. Data center links beyond 100 Gbit/s per wavelength[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 44: 69-85.

[15] Kupfer T, Bisplinghof A, Duthel T, et al. Optimizing power consumption of a coherent DSP for metro and data center interconnects[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: Th3G. 2.

[16] Nambath N, Raveendranath R K, Banerjee D, et al. Analog domain signal processing-based low-power 100-Gb/s DP-QPSK receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3189-3197.

[17] Nambath N, Anghan M, Thaker N, et al. First demonstration of an all analog adaptive equalizer for coherent DP-QPSK links [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: M3D.5.

[18] Perin J K, Shastri A, Kahn J M. Design of low-power DSP-free coherent receivers for data center links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4650-4662.

[19] Miyazaki T, Kubota F. PSK self-homodyne detection using a pilot carrier for multi-bit/symbol transmission with inverse-RZ signal[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(6): 1334-1336.

[20] Puttnam B J, Sakaguchi J, Mendinueta J M D, et al. Investigating self-homodyne coherent detection in a 19 channel space-division-multiplexed transmission link[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1561-1566.

[21] Puttnam B J, Luis R, Delgado-Mendinueta J M, et al. High-capacity self-homodyne PDM-WDM-SDM transmission in a 19-core fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21185-21191.

[22] Sowailem M Y S, El-Fiky E, Morsy-Osman M, et al. Self-homodyne system for next generation intra-datacenter optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27834-27844.

- [23] Feng Z H, Xu L A, Wu Q, et al. Ultra-high capacity WDM-SDM optical access network with self-homodyne detection downstream and 32QAM-FBMC upstream[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 5951-5961.
- [24] Gui T, Wang X F, Tang M, et al. Real-time demonstration of homodyne coherent bidirectional transmission for next-generation data center interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 1231-1238.
- [25] Gui T, Cao J T, Chen X, et al. Real-time single-carrier 800 Gb/s DP-64QAM demonstration using bi-directional self-homodyne coherent transceivers with 200 krad/s endless active polarization controller[C]//26th Optoelectronics and Communications Conference, July 3-7, 2021, Hong Kong, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: T5A. 5.
- [26] Swanson E A, Livas J C, Bondurant R S. High sensitivity optically preamplified direct detection DPSK receiver with active delay-line stabilization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(2): 263-265.
- [27] Cho P S, Grigoryan V S, Godin Y A, et al. Transmission of 25-Gb/s RZ-DQPSK signals with 25-GHz channel spacing over 1000 km of SMF-28 fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(3): 473-475.
- [28] Gnauck A H, Winzer P J. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 115-130.
- [29] Winzer P J, Raybon G, Song H Y, et al. 100-Gb/s DQPSK transmission: from laboratory experiments to field trials[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(20): 3388-3402.
- [30] Nanou M, Politi C, Stavdas A, et al. High-speed, high-performance DQPSK optical links with reduced complexity VDFE equalizers[J]. *Photonics*, 2017, 4(4): 13.
- [31] Cheng J C, Xie C J, Tang M, et al. A comparative study of intradyne and self-homodyne systems for next generation intradatecenter optical interconnects[C]//2019 24th Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 7-11, 2019, Fukuoka, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [32] Ji H L, Li J C, Li X F, et al. Beyond mrad/s polarization tracking speed of complementary polarization-diversity coherent receiver for remote LO[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, March 6-10, 2022, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: W1G.3.
- [33] Ji H L, Li J C, Li X F, et al. Complementary polarization-diversity self-coherent homodyne receiver with rapid polarization tracking for remote LO[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, March 6-10, 2022, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: Tu3B.3.
- [34] Savory S, Hadjifotiou A. Laser linewidth requirements for optical DQPSK systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(3): 930-932.
- [35] Cai Y. Coherent detection in long-haul transmission systems [C]//OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [36] van den Borne D, Jansen S L, Gottwald E, et al. DQPSK modulation for robust optical transmission[C]//OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [37] Nagarajan R, Rahn J, Kato M, et al. 10 channel, 45.6 Gb/s per channel, polarization-multiplexed DQPSK, InP receiver photonic integrated circuit[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 386-395.
- [38] Liu X, Chandrasekhar S. Direct detection of 107 Gb/s polarization-multiplexed DQPSK with electronic polarization demultiplexing[C]//OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.

Differential Self-Coherent Optical Fiber Transmission Systems for Short and Medium Reach Applications

Cai Yi^{*}, Jiang Chenxu¹, Wang Xiaozhou², Wang Fuhan³, Tian Zhongxing¹, Sun Lin¹, Wang Xiaoling¹, Liu Ning¹, Shen Gangxiang¹, Zhou Jun², Hao Xiangyong³, Pang Shengqing³

¹*School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;*

²*Hengxin Semitech Co., Ltd., Suzhou 215200, Jiangsu, China;*

³*Hengtong Group Co., Ltd., Suzhou 215200, Jiangsu, China*

Abstract

Significance As cloud computing, the Internet of Things, and 5G technologies rapidly develop, global network traffic has experienced exponential growth. This surge in traffic, both within and between data centers, has fostered an ever-increasing demand for high-speed and high-performance optical fiber transmission systems for short- and medium-reach distances. Currently, the intensity-modulation and direct-detection (IMDD) system employing four-level pulse amplitude modulation (PAM4) is the primary solution for cost-sensitive short- and medium-reach transmission scenarios. The IMDD system features a simple structure, low power consumption, and low cost. However, it utilizes only the amplitude dimension of the optical carrier to transmit information, leaving other optical domain dimensions untapped. Additionally, the IMDD system's limited receiver sensitivity poses a challenge when higher-order modulation formats are tried to improve spectral efficiency. Coherent detection systems with higher receiver sensitivity are characterized by utilizing the

polarization, phase, and amplitude of optical carriers to transmit information, which leads to higher spectral efficiency. However, their practical implementation in short- to medium-reach transmission scenarios brings about challenges including increased system complexity, higher power consumption of digital signal processing (DSP) chips employed in coherent detection systems, and the need for a high-performance narrow linewidth laser as a local oscillator (LO). These factors limit the widespread adoption of coherent detection in such scenarios.

To this end, researchers have explored simplified coherent schemes, including self-homodyne coherent detection (SHCD) and differential self-coherent detection (DSCD) schemes for new-generation short- and medium-reach transmission systems. These schemes strike a balance between system performance and complexity, with higher receiver sensitivity than IMDD systems, and less complexity and costs than standard coherent detection. Among these schemes, the SHCD scheme has caught considerable attention. The SHCD system eliminates the need for a narrow linewidth laser as an LO on the receiver side by splitting the laser power at the transmitter between the transmitted signal and a remote LO. This allows utilizing an uncooled large linewidth laser in SHCD systems while the receiver sensitivity remains high. Extensive research efforts have been devoted to advancing the development of this scheme. The DSCD scheme, based on a differential modulation format, provides an alternative approach. It utilizes the relative phase information between two adjacent signals for self-coherent signal demodulation. A notable advantage of this scheme is its high tolerance to laser linewidth, which eliminates the need for LO and carrier phase recovery at the receiver side. Consequently, it enables the utilization of large linewidth lasers for coherent detection to reduce system cost and improve receiver sensitivity. In contrast to the SHCD scheme, the DSCD scheme overcomes the performance degradation caused by mismatched transmission paths of the signal and the remote LO. Recent research findings presented in our paper highlight that, in systems where receiver electrical noise is the primary impairment, the theoretical performance of DSCD is equivalent to that of SHCD. Additionally, DSCD outperforms SHCD in systems dominated by optical noise introduced by optical amplifiers. As a result, the DSCD technology provides a promising solution for high-speed and high-performance optical fiber transmission systems. Its advantages include high receiver sensitivity, low-cost implementation, and low power consumption, thus making itself an appealing choice in the field.

Progress In terms of receiver sensitivity, implementation complexity, and performance in optical power-limited and optical signal-to-noise (OSNR) limited regimes, we review and compare the optical transmission schemes, including IMDD employing PAM4, SHCD employing quadrature phase shift keying (QPSK) modulation, and DSCD employing differential quadrature phase shift keying (DQPSK) modulation. In recent years, the IMDD system faces challenges in improving system transmission rates, while the SHCD system has gained attention as a low-cost, and high-performance solution. Sowailem's group from McGill University demonstrates a bidirectional SHCD scheme employing optical circulators for short-reach systems. Deming Liu's research group from Huazhong University of Science and Technology presents an SHCD system leveraging a large linewidth distributed feedback (DFB) laser as a downstream transmission solution for optical access networks. Ming Tang's research group from Huazhong University of Science and Technology proposes a real-time 400 Gbit/s bidirectional SHCD transmission by employing low-cost uncooled large linewidth DFB lasers for data center interconnects.

However, the practical implementation of an SHCD system still encounters challenges. Bidirectional transmission of signals and remote LOs requires additional optical circulators in SHCD transceivers (Table 2). Furthermore, the sensitivity of the SHCD system to transmission path differences increases with the utilization of larger laser linewidth (Fig. 4). In contrast, the DSCD system exhibits high tolerance for laser linewidth and is unaffected by transmission path differences. In optical power-limited systems, the DSCD-DQPSK system yields comparable performance to the SHCD-QPSK system with optimal power separation ratio (Fig. 6), which is significantly better than the IMDD-PAM4 system (Fig. 7). In OSNR-limited systems, the remote LO quality is inevitably affected by optical noise, which influences the optimal laser power separation ratio (Fig. 8) and the receiver sensitivity of the SHCD system (Fig. 9). Implementing a narrow bandwidth optical filter for the remote LO can filter out a portion of the noise and enhance system performance but at the expense of additional costs. Conversely, in OSNR-limited systems, the receiver sensitivity of the DSCD-DQPSK system is superior to that of the SHCD-QPSK system, and it does not require an additional narrow bandwidth optical filter.

Conclusions and Prospects In conclusion, both the SHCD and DSCD schemes realize a significant improvement in receiver sensitivity compared to the IMDD scheme. However, the increased DSP complexity and power consumption for coherent detection is a price for this improvement. Additionally, the SHCD system faces challenges from transmission path differences and noise within the remote LO, and addressing the challenges will increase the system implementation costs. Thus, further reducing DSP power consumption, system complexity, and cost is an important direction for future research for simplified self-coherent schemes. However, compared with the IMDD-PAM4 system and the SHCD-QPSK system, the proposed DSCD-DQPSK system is inherently advantageous and promising for short- and medium-reach optical fiber transmissions.

Key words optical communications; coherent detection; self-coherent detection; differential modulation; digital signal processing