

光接入网高灵敏度 低成本相干通信技术

High-Sensitivity and Low-Cost Coherent Communication Technology for Optical Access Network

唐明/TANG Ming, 李伟昊/LI Weihao, 冯振华/FENG Zhenhua

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)



摘要: 基于高性能通信多芯光纤(MCF),提出了一种波分空分混合复用光接入网(WSDM-OAN)架构,并采用MCF中间芯传输本征光、外层芯传输信号光的方式在下行传输(DS)中实现了空分自零差相干探测(SHCD)。相关实验表明,所提出的接入系统下行总传输速率可达4.8 Tbit/s,而且无需采用频偏补偿和相位恢复算法,并可采用10 MHz线宽的分布反馈(DFB)激光器。此外,提出了一种由单抽头复蝶形有限冲击响应(FIR)滤波器、4个N抽头实FIR滤波器和4×4多输入多输出(MIMO)FIR滤波器构成的简化自适应均衡(AEQ)算法。相关实验表明,所提出的AEQ与2×2 MIMO结构AEQ性能相近,与4×4 MIMO结构AEQ相比功率代价小于1 dB。当滤波器抽头数25时,可降低59%的实数乘法数。

关键词: OAN; MCF; SHCD; AEQ

Abstract: A hybrid wavelength division and space division multiplexing optical access network (WSDM-OAN) based on high-performance communication multi-core fiber (MCF) is proposed in this paper. To realize the self-homodyne coherent detection (SHCD) in downstream (DS), the MCF inner cores transmit the local oscillator light, while the outer cores transmit the signal light. The related experiments show that the total transmission rate of the proposed system is up to 4.8 Tbit/s in DS, and carrier frequency offset compensation algorithms and phase recovering algorithms are not required. The distributed feedback (DFB) lasers with 10 MHz linewidth can be adopted in this proposed system. A simplified adaptive equalization (AEQ) algorithm, which consists of a 1-tap complex-valued butterfly finite impulse response (B-FIR) filter, four N-tap real-valued FIR filters, and a 3-tap 4×4 multiple-input multiple-output (MIMO) FIR filter is also proposed. The experiment results show that the proposed AEQ share the same performance with 2×2 MIMO AEQ, and the power penalty is less than 1 dB compared with 4×4 MIMO AEQ. When using 25-tap filters, the number of real multipliers can be reduced by 59%.

Key words: OAN; MCF; SHCD; AEQ

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20190925.1553.002.html>

网络出版日期: 2019-09-26

收稿日期: 2019-07-20

光接入网(OAN)作为最靠近用户侧的光网络,长期以来承载了大量的用户数据业务。无源光网络(PON)以低成本、低功耗、共享基础设施和支持多用户接入等特点被广泛应用于OAN中。受到不断

增长的数据业务的驱动,PON的技术标准历经多次演化。吉比特无源光网络(GPON)和以太网无源光网络(EPON)、非对称10 G EPON(XG-EPON)和10 G GPON(XG-GPON)、40 G PON第2阶段(NG-

PON2)等技术标准受到了广泛关注与讨论。最新的NG-PON2技术标准要求PON能够支撑至少40 km范围的40 Gbit/s下行、10 Gbit/s的上行传输速率,国际电信联盟电信标准分局(ITU-T)最终确立时分和波

分复用(TWDM)-PON技术为NG-PON2的实现方式,利用多个波长传输时分复用(TDM)数据帧^[1-3]。

为简化网络层结构,减少有源器件使用,降低系统基建费用与维护成本,人们希望将城域网与接入网逐步融合,这就要求PON能覆盖更长的传输距离^[3]。以第5代移动通信网络(5G)、云计算、超高清视频为代表的新型应用则对接入网带宽的需求日益增加,从而对PON的容量、速率、可扩展性、频谱灵活性及其利用率等提出了更高的要求^[4-5]。总体来说,覆盖广范围和长距离,支持大容量和高传输速率,满足低成本、低功耗和多用户接入,具有良好可扩展性和灵活性的PON将会是未来的发展趋势。

受限于灵敏度、频谱效率、非线性检测等因素,强度调制-直接检测(IM-DD)技术难以应对OAN的发展趋势。为实现对OAN容量、速率和覆盖范围的全面升级,相干通信技术不失为一种良好的解决方案。基于偏振复用、高阶调制格式和相干探测的数字相干通信技术,具有高频谱效率、高灵敏度、信号损

伤可电域补偿等特点。相比于IM-DD技术在提高传输速率、延长传输距离、可扩展性(扩容)上具有天然的优势,如图1所示。然而,传统的用于骨干网通信的相干光通信技术存在系统结构复杂、硬件成本高昂、器件功耗较大等问题,难以直接移植到对成本敏感的接入网中。针对接入网的应用场景,必须“软硬兼施”,从系统设计和数字信号处理(DSP)2个角度着手,对相干通信系统做出合理的设计与简化。

1 基于自零差相干探测(SHCD)的波分空分混合复用(WSDM)-OAN架构

采用低成本器件可有效降低相干通信技术的成本,但受限于低成本器件的带宽,在高传输速率下势必会出现严重的码间串扰(ISI)。有效地利用有限的带宽资源,采用具有高频谱效率的高阶调制格式十分必要。然而高阶调制格式对载波频率偏移(CFO)和相位噪声(PN)敏感,不仅对激光器的线宽、频率稳定性、可调谐性有着较高的要求,同时也需要在接收端DSP模块中采用

复杂的频偏补偿和相噪恢复算法,这极大地增加了光网络单元(ONU)的成本。SHCD技术通过将发射端激光器出射的激光分出一部分光,作为本振光以用作接收端的相干探测,可利用发射端激光器的同源相干性消除经典的相干探测所带来的频率偏移和相位噪声,提高对激光器线宽的容忍度。这不仅可以简化接收机DSP中的频偏补偿和相噪恢复模块,同时使得在发射端采用低成本的非制冷激光器成为可能,能够有效地降低系统的复杂度与成本。SHCD可通过偏振复用(PDM)、空分复用(SDM)等方式实现,PDM的方式即通过两正交偏振态分别传输信号光和本振光,该方式牺牲了信号光场的PDM维度,降低了一半的频谱效率,在高速传输的情形下并不适用。SDM的方式则是通过多路空间信道分别传输信号光和本振光,多芯光纤(MCF)则凭借着空分信道串扰小、数目多、一致性好等特点尤其适合高速、大容量的传输场景。

另一方面,TDM-PON采用用户分占不同时隙共享带宽的方式实现低成本的多用户接入,其ONU中的接收机需要工作在高于所分配的比特速率下,在高传输速率的需求下会极大地增加ONU的成本,同时其基于功率分配的广播属性也带来了额外的功率损耗,单一的TDM-PON技术难以应对高速率、广覆盖的OAN的发展趋势^[3]。基于波长分配的WDM-PON在功率代价上更具优势,而用户分占波分复用信道独享带宽的特性也使得其能够支持

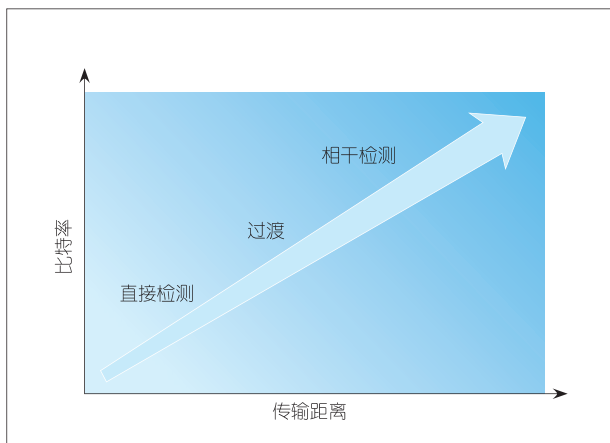


图1 直检相干技术演化趋势

更大的传输速率。

1.1 系统架构

在OAN系统架构上,我们在波分复用(WDM)-PON的基础上引入MCF以实现多路空间信道的并行传输,扩展了PON的复用维度(SDM),使其能更好地支撑大容量、可扩展的发展趋势^[6-8]。为实现广覆盖的OAN,同时更好地支撑高速传输下的高阶调制格式,我们进一步引入SHCD以提升ONU接收机的灵敏度,延长PON的传输距离,扩展其传输速率。同时SHCD架构可降低对发射端激光器的要求和ONU的成本^{[5][9][10]}。基于SHCD的WSDM-OAN系统架构如图2所示。在光线路终端(OLT)中,对 m 个激光器分别进行 $N+1$ 等分的分光, N 份用作 N 路空间信道的信号光调制,1份用作本振光。相比于传统的WDM-PON,只采用 m 个激光器

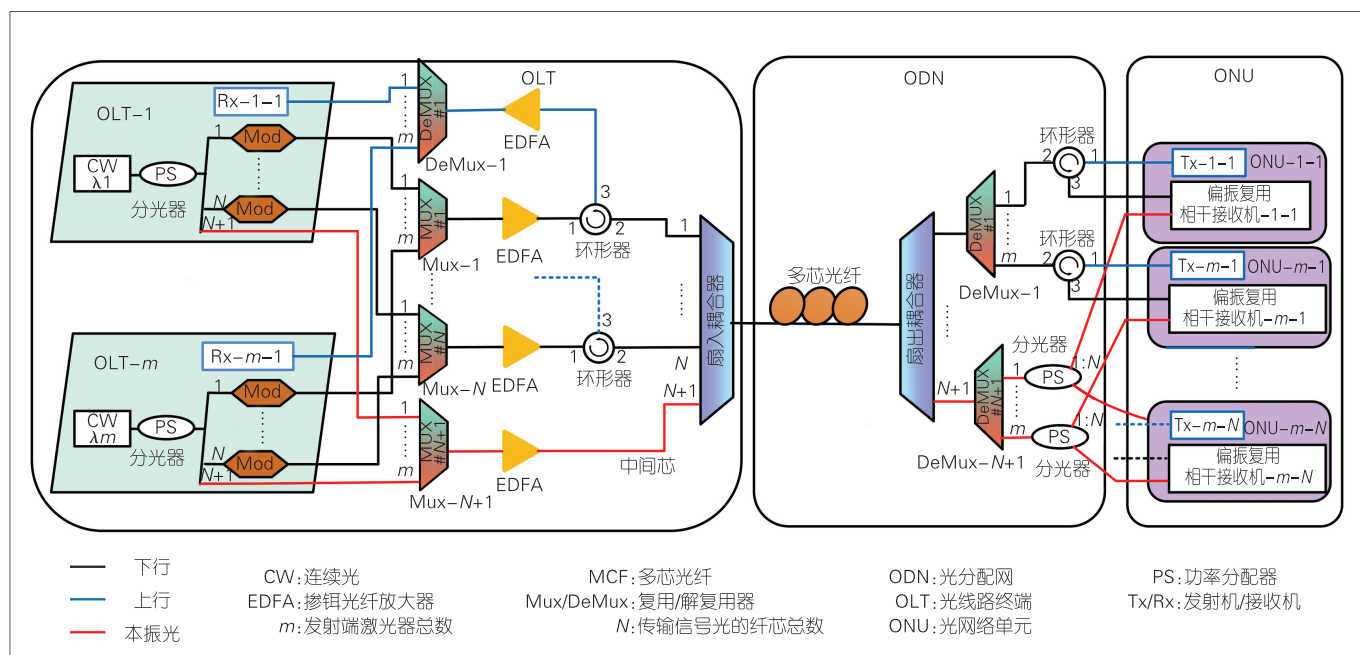
即可实现 $N \times m$ 位用户接入,在文献[8-9]中我们也曾演示过利用单个激光器、马赫·曾德尔调制器(MZM)调制器和微波信号源生成光频梳,作为WDM信号源的方式。下行信号的调制可采用基于偏振复用(PDM)的具有高频谱效率的多级正交幅度调制(M-QAM)的单载波调制技术,也可采用OFDM等多载波调制技术^[9-10]。 $N \times m$ 路信号光经调制后先通过 N 个波分复用器耦合为 N 路 m 波的WDM信号,经 N 个掺铒光纤放大器(EDFA)放大后经光环形器并由扇入器件从 N 根单模光纤(SMF)耦合进MCF相应的纤芯中实现SDM,本振光则通过波分复用器后经扇入器件耦合进MCF的中间芯。经MCF传输后,信号光由扇出设备耦合到 N 根SMF中实现空间解复用,并由 N 个波分解复用器实现波长分配,将各信号分支分发给 $N \times m$ 个ONU,本振光在

经过扇出设备后由波分解复用器分波,并由功率耦合器对每个波长进行 N 等分的分光,然后分发给相应的ONU用作相干探测。而上行传输则可采用具有高频谱效率的IM-DD调制格式。

1.2 实验结果

实验装置具体如图3所示,图3a)即为所采用的弱耦合(芯间串扰 <-45 dB)7芯光纤横截面结构图,光纤总长37 km,在1550 nm处光纤各纤芯损耗 <0.3 dB/km,色散 17 ± 1 ps/(nm·km),与SMF相似。图3b)为本课题组自研的连接SMF和MCF所用的低损耗扇入/扇出空分复用/解复用耦合器。

在下行传输中采用中间芯传输本振光,外层芯传输信号光的方式实现SHCD。4个激光器构成WDM光源,采用双偏矢量光调制器(PDM-IQM)实现PDM-16 QAM-



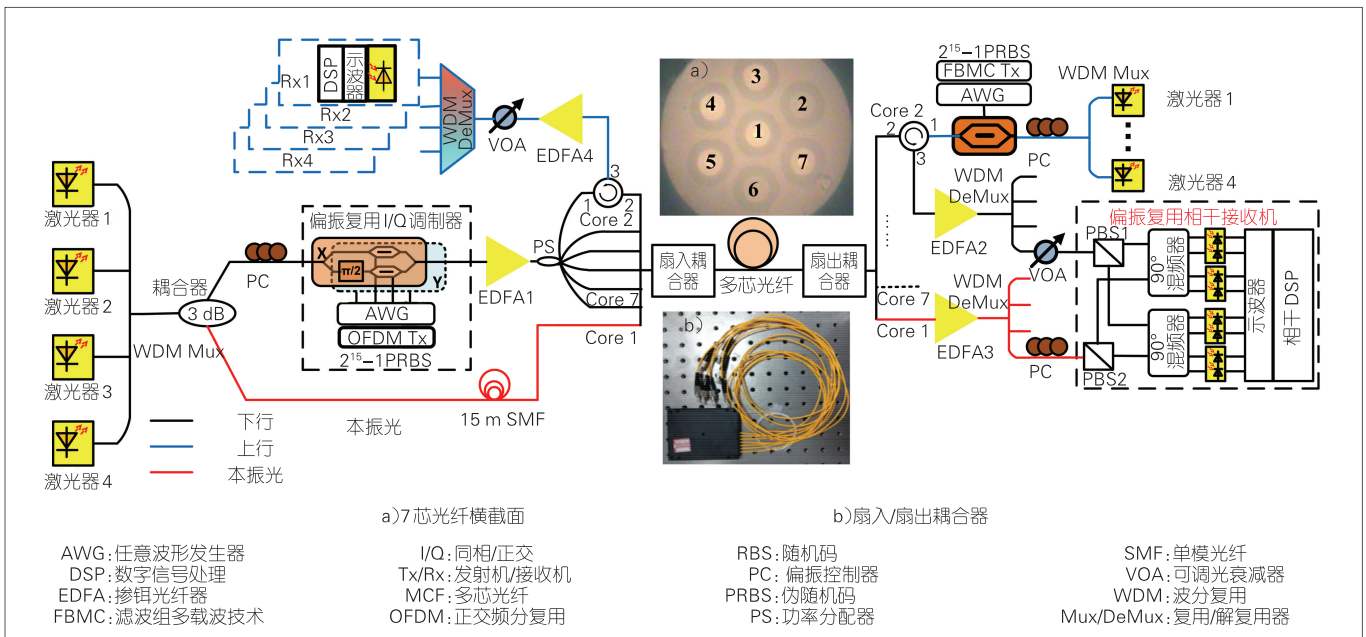
▲图2 基于自零差相干探测的波分空分混合复用光接入网系统架构

OFDM信号的调制。任意波形发生器(AWG)工作在25 GS/s的采样速率下,最后采用商用的相干接收机进行相干接收。将数字采样示波器(DSO)用作模数转换器(ADC),工作在80 GS/s的采样速率下,在MATLAB中利用去掉了频率补偿和相位恢复的经典偏振复用的相干光正交频分复用(PDM-CO-OFDM)解调算法实现对信号的离线处理,

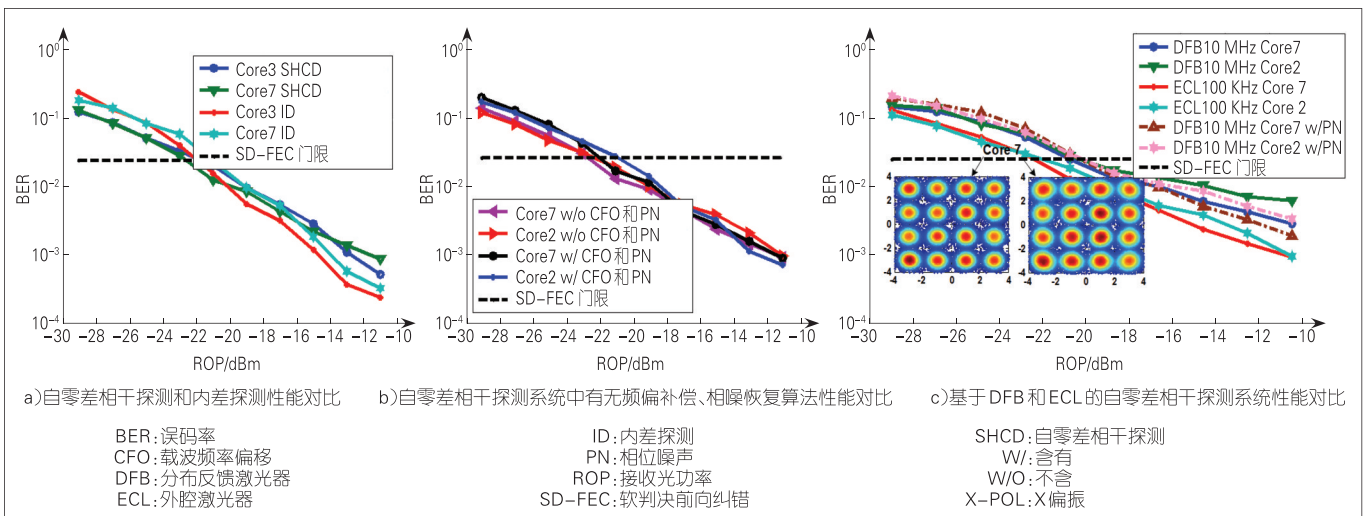
对应的单波传输速率为200 Gbit/s。实验中在接收机前采用偏振控制器(PC)以避免本振光经MCF传输后某偏振方向上可能的载波衰落问题。另外,由于实验所采用的相干接收机中跨组放大器(TIA)的偏置电压尚未优化,导致接收机的灵敏度不高。因此在波长解复用之前,分别采用2个EDFA对信号光和本征光进行了放大,并将输入相干接

收机的本振光功率固定在13 dBm。

为说明SHCD架构在性能和成本上的优势,我们在OLT中采用2种激光器:窄线宽(约100 kHz)外腔激光器(ECL)以及10 MHz线宽的DFB激光器,经典的相干系统在接收端采用额外的激光器用作本振光源,其中心频率相比于载波频率有所偏移,对应于内差探测。图4 a)、b)对应的实验中采用的是ECL,另



▲图3 基于自零差相干探测的波分空分混合复用光接入网系统实验装置图



▲图4 自零差相干探测架构传输实验

外采用 20% 的软判决前向纠错 (SD-FEC), 对应的误码率 (BER) 门限 2.4×10^{-2} 。(1) 我们对 SHCD 和内差探测 2 种架构进行了对比, 如图 4 a)。可见在低接收光功率 (ROP) 下, SHCD 性能略优, 这是由于内差探测的相噪恢复算法在低 ROP 下计算误差较大; 而在高 ROP 下, SHCD 略差于内差探测, 主要是由于 SHCD 的本振光经 EDFA 放大后光信噪比 (OSNR) 有所劣化, 若采用高灵敏度的相干接收机, 则无需利用 EDFA 对本振光放大, SHCD 将会具有更好的性能。(2) 我们分别对比了基于 SHD 的传输架构在 DSP 中含 PN、CFO 补偿和不含 PN、CFO 补偿时的性能, 如图 4 b)。在低 ROP 时, 无 PN 和 CFO 补偿的性能略优; 在高 ROP 时, 含 PN 和 CFO 补偿的性能更优, 这同样是由于低 ROP 时 PN 和 CFO 补偿算法的精度引起的。但总体来看, 整体差异不大, 这表明采用 SHCD 架构消除 DSP 中 CFO 和 PN 补偿模块具有可行性。(3) 为得到基于 MCF 的 SHCD 架构对激光器线宽的容忍度, 探索采用低成本的大线宽激光器的可能, 我们分别采用线宽约 100 kHz 的 ECL 和线宽约 10 MHz 进行了下行传输实验, 并在本征光支路加入一根 15 m 的光纤补偿由 EDFA 引入的延时差, 具体如图 4 c) 所示。对比基于 ECL 和 DFB 的下行传输 BER 曲线可知, 在 SD-FEC 门限上, 采用 10 MHz 的 DFB 引入的功率代价相比于采用 100 kHz 的 ECL 小于 2 dB。而采用相位补偿算法后, 基于 DFB 的 SHCD 系统性能在高 ROP 下略有提

升, 低 ROP 下基本相当, 表明在 SHCD 架构中采用低成本的大线宽激光器具有可行性。

其次, 为展示所提出的同源相干 WSDM-OAN 的扩容能力, 我们采用 4 个波长间隔 100 GHz 的 ECL 作为 WDM 信号的光源, 开展了 WSDM-OAN 的下行传输实验。在单波的下行传输实验中, MCF 各纤芯的一致性较好, 如图 5 a) 所示。WSDM-OAN 下行传输实验中, 为方便起见, 我们仅给出 7 号芯中各波分信道的传输结果, 如图 5 b) 所示。对比可知各波长信道性能相近。6 芯 4 波单波速率 200 Gbit/s 的 WSDM-OAN 总速率可达 4.8 Tbit/s, 基于更多波长的 WDM 和更多纤芯 MCF 的 SDM 能够支撑更大容量的 OAN 接入, 因而 WSDM-OAN 在扩充接入网容量上具有巨大潜力。

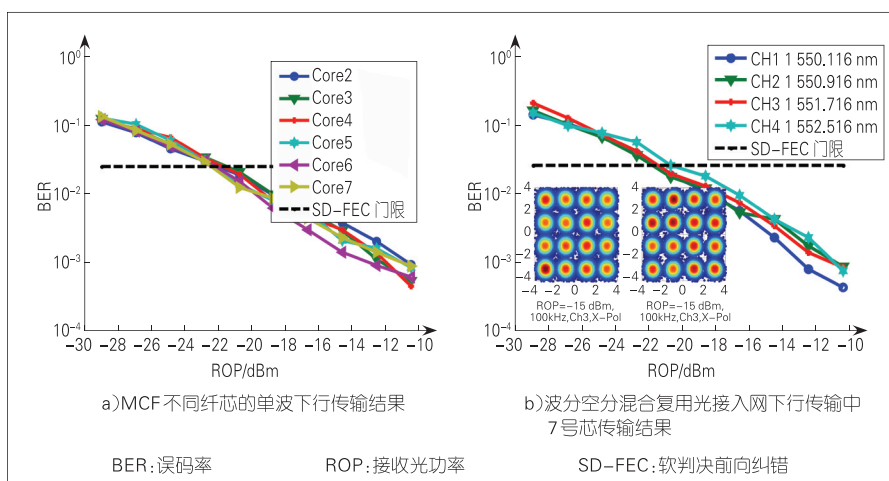
2 低计算复杂度简化自适应均衡 (AEQ)

上一节中所展示的 SHCD 传输已验证了去掉 DSP 中频偏补偿和相位恢复模块的可行性。而针对残留

色散、偏振模色散和低频衰落补偿的 AEQ 算法仍然具有较高的计算复杂度。进一步合理简化 DSP 不仅有利于实现低功耗、低成本的 ONU, 对构建低延时的移动前传/回传网络同样具有重要意义。K. MATSUDA 等人提出将 AEQ 中 N 抽头的蝶形有限冲击响应 (B-FIR) 滤波器拆分为单抽头的 B-FIR 滤波器和 2 个 N 抽头的 FIR 滤波器 (后续称为 KM-AEQ), 分别用于解偏振复用和补偿偏振无关信号损伤。该方案相比于由 4 个复值 FIR 滤波器构成的 2×2 多输入多输出 (MIMO) 结构 AEQ 计算复杂度近乎减半, 然而牺牲了对差分群时延 (DGD) 的补偿能力^[11], 同时对 X/Y 偏振和 I/Q 路信号之间的时间倾斜较为敏感^[12]。

2.1 AEQ 原理

针对短距相干接入的场景, 由色散引起的 I 路和 Q 路信号间串扰较小, 我们可进一步将 KM-AEQ 中 N 抽头复 FIR 滤波器实数化, 并引入由 16 个 3 抽头实 FIR 滤波器构成的 4×4 MIMO 结构 AEQ 补偿 X/Y 偏



▲ 图 5 不同复用信道性能测试

振和 I/Q 路信号间的时间倾斜,该结构亦可有效地补偿残留色散和 DGD,对应的 AEQ 结构具体如图 6 所示^[12]。

采用多级恒模算法更新单抽头的 B-FIR 和 2 个 N 抽头实 FIR 的抽头系数,分别对应式(1)和式(2)。

$$m_{pq} = m_{pq} + \mu e_p E_{p,mid2} \sum_{k=1}^N E_{q,in}^*(k),$$

$$(p,q) \in (X,Y) \quad (1)$$

$$h_{x/y} = h_{x/y} + \mu e_{x/y} \text{Re}(E_{x/y,mid2}) \text{Re}(E_{x/y,mid1}) \quad (2)$$

其中, μ 为步长, e 为误差项, $E_{p,mid1}$ 和 $E_{p,mid2}$ 滤波后的中间结果, $E_{x/y,mid1}$ 为连续 N 个经偏振解复用的中间结果构成的向量, $h_{x/y}$ 为 N 抽头实 FIR 的抽头系数, * 表示复共轭。

由于乘法运算对应的计算复杂度远高于加法运算,为比较不同结构 AEQ 的计算复杂度,我们列出每计算 2 个符号(X/Y 偏振)对应总实数乘法次数,如表 1 所示。可见,当抽头数 N 很大时,所提出的 AEQ 能减少近 75% 的乘法运算,极大地降低了 AEQ 的复杂度。

2.2 实验结果

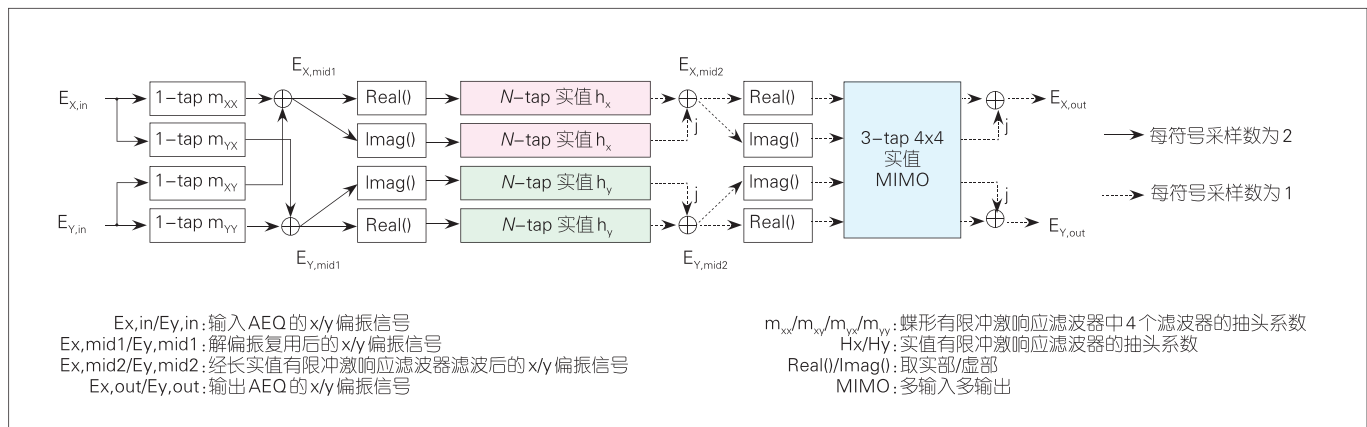
实验系统架构如图 7 所示,在

发射端 DSP 中离线生成经滚降系数 0.1 根升余弦滤波器滤波的 28 Gbaud PDM-16QAM 信号,利用采样速率 64 GS/s 的 DAC 转化为相应的模拟信号以驱动双偏矢量光调制器(DP-IQM)完成信号的调制,信号光经 5 km 的 SMF 传输后,经可调光衰减器(VOA)后与 13 dBm 的本振光混频,最后经相干探测后由采样速率 80 GS/s 的 ADC 转化成数字信号并交由接收端 DSP 处理。ADC

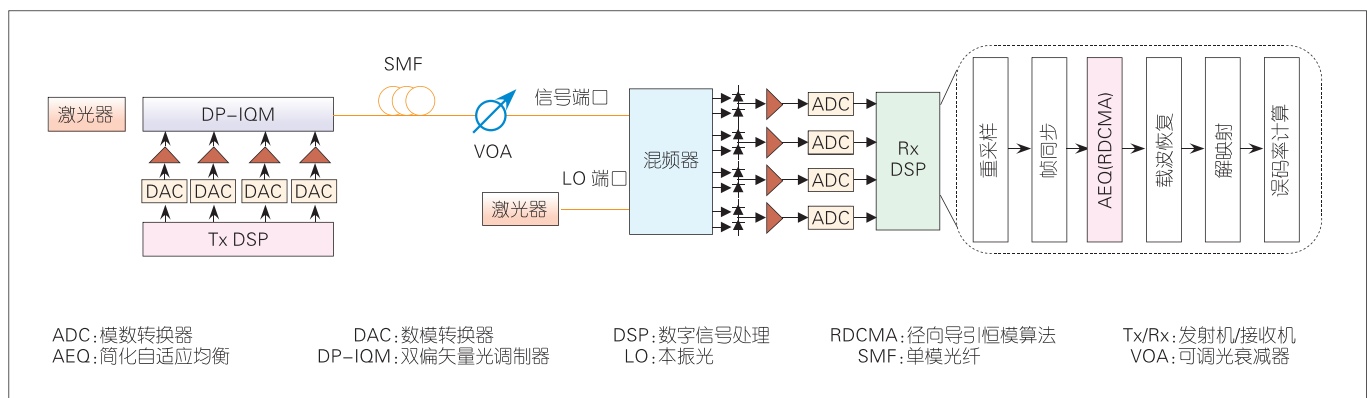
▼表 1 AEQ 实数乘法次数对比

算法	2 × 2/4 × 4 MIMO AEQ	KM-AEQ ^[11]	提出的 AEQ
实数乘法/次	16N	8N+16	4N+64

MIMO:多输入多输出 AEQ:简化自适应均衡 KM-AEQ:K.MATSUDA 等人提出的简化自适应均衡



▲图 6 简化自适应均衡结构



▲图 7 实验装置和接收端 DSP

与DAC共享时钟以消除时钟恢复算法,信号重采样至每符号2个采样点,经帧同步后由AEQ进行处理,采用径向导引恒模算法(RDCMA)更新FIR滤波器抽头系数。然后利用载波恢复算法补偿频率偏移和相位噪声,最后对符号进行判决并计算误码率。

我们比较了提出的AEQ和2×2 MIMO结构AEQ、4×4 MIMO结构AEQ以及KM-AEQ的性能,抽头数设为25以平衡性能与复杂度。由图8 a)、b)可知,无论是光背靠背还是经5 km传输后,相比于2×2 MIMO和4×4 MIMO结构AEQ,在硬判决门限 3.8×10^{-3} 上KM-AEQ的功率代价均超过2 dB,若在KM-AEQ上引入后置滤波器,KM-AEQ性能会显著改善,这表明KM-AEQ对X/Y偏振和I/Q路时间倾斜十分敏感;而所提出的AEQ则与2×2 MIMO结构AEQ性能相差无几,和4×4 MIMO结构AEQ相比也仅存在较小的功率代价,但是其对应的实数乘法总数却下降了59%。图8 c)展示

了所提出的AEQ相比于4×4 MIMO结构AEQ的相对功率代价随传输距离的变化关系,可见随着传输距离的延伸,所提出的AEQ相比于4×4 MIMO结构AEQ性能急剧劣化,这是由于色散所引起的I/Q路信号间串扰未得到有效的补偿,因而为支撑长距离的OAN系统,我们所提出的简化方案尚需要进行进一步地讨论。

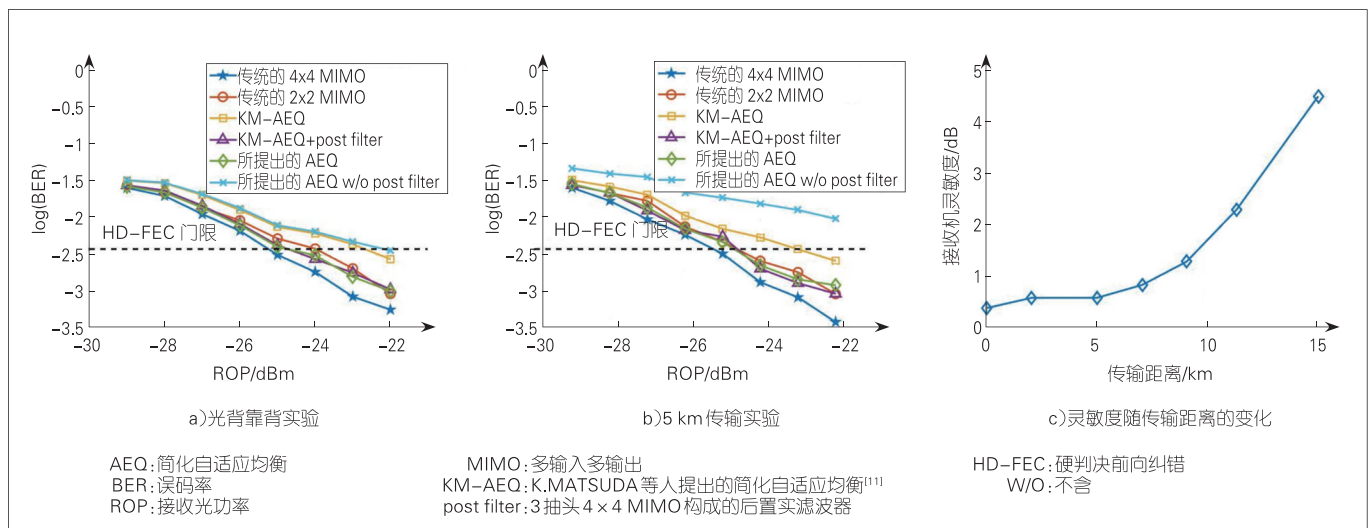
3 结束语

相干光通信技术具有高灵敏度、高频谱效率和信号损伤可电域补偿等特点,能够有效地实现对OAN容量、速率和覆盖范围的全面升级。为在接入网中实现低成本的相干光通信,我们提出了一种基于SHCD和MCF的WSDM-OAN架构,利用SHCD消除了DSP中的PN和CFO补偿模块,并展现了发射端采用10 MHz线宽的DFB激光器的可行性。下行利用7芯光纤的6个外层芯传输4路波分复用信号,WSDM-OAN的下行总速率可达

4.8 Tbit/s,能覆盖37 km的传输距离,并具有良好的可扩展性。此外,为实现低功耗的DSP,我们进一步提出了一种简化自适应均衡算法,采用单抽头复值B-FIR滤波器解偏振复用,4个N抽头实值FIR滤波器进行数字均衡,并利用3抽头的实值后置4×4 MIMO FIR滤波器补偿X/Y偏振和I/Q路信号间的时间倾斜。5 km的传输实验表明,所提出的AEQ和2×2 MIMO结构AEQ性能相近,和4×4 MIMO结构AEQ相比功率代价小于1 dB,然而滤波器抽头数为25时,其对应的实数乘法数减小了59%。

参考文献

- [1] NESSET D. NG-PON2 Technology and Standards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1136
- [2] FENG Z, Xu L, Wu Q, et al. Large-Capacity Optical Access Network Utilizing Multicore Fiber and Self-Homodyne Coherent Detection [C]//Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. USA: IEEE, 2017.DOI: 10.1364/OFC.2017.Th1K.2
- [3] ABBAS H S, GREGORY M A. The Next Generation of Passive Optical Networks: A



▲图8 AEQ性能测试

- Review[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 67: 53. DOI:10.1016/j.jnca.2016.02.015
- [4] LIU X, EFFENBERGER F. Emerging Optical Access Network Technologies for 5G Wireless [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 8(12): B70–B79
- [5] FENG Z H, LI B R, TANG M, et al. Multicore Fiber Enabled WSDM Optical Access Network with Centralized Carrier Delivery and RSOA Based Adaptive Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 7201309. DOI:10.1109/JPHOT.2015.2445103
- [6] LI B R, FENG Z H, TANG M, et al. Experimental Demonstration of Large Capacity WSDM Optical Access Network with Multicore Fibers and Advanced Modulation Formats[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 10997–11006. DOI:10.1364/OE.23.010997
- [7] FENG Z H, LI B R, TANG M, et al. Multicore Fiber Enabled WSDM Optical Access Network with Centralized Carrier Delivery and RSOA Based Adaptive Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 7201309. DOI:10.1109/JPHOT.2015.2445103
- [8] LI B, LIN G, FU S, et al. Experimental Demonstration of Symmetric WDM–SDM Optical Access Network Over Multicore Fiber [EB/OL].[2019–09–12]. https://www.researchgate.net/publication/303719451_Experimental_Demonstration_of_Symmetric_WDM-SDM_Optical_Access_Network_over_Multicore_Fiber
- [9] XIONG C X, TANG M, KE C J, et al. Experimental Demonstration of Ultra–Dense WDM–PON with 7–Core MCF Enabled Self–Homodyne Coherent Detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 99: 1. DOI:10.1109/JPHOT.2017.2677503
- [10] FENG Z, XU L, WU Q, et al. Ultra–High Capacity WDM–SDM Optical Access Network with Self–Homodyne Detection Downstream and 32QAM–FBMC Upstream [J]. 2017, 25(6): 5951–5961. DOI:10.1364/OE.25.005951
- [11] MATSUDA K, MATSUMOTO R, SUZUKI N. Hardware–Efficient Adaptive Equalization and Carrier Phase Recovery for 100–Gb/s/λ–Based Coherent WDM–PON Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(8): 1492–1497. DOI: 10.1109/JLT.2017.2784804
- [12] CHENG J, XIE C, TANG M, et al. A Low–Complexity Adaptive Equalizer for Digital Coherent Short–Reach Optical Transmission Systems[EB/OL].[2019–09–12]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2019-M3H.2>
- [13] XIE C, WINZER P. Increasing Polarization–Mode Dispersion Tolerance of Coherent Receivers by Joint Optimization of Chromatic Dispersion and Butterfly Equalizers[C]// Signal Processing in Photonic Communications. USA:IEEE,2013. DOI: 10.1364/SPPCOM.2013.SPM2E.5
- [14] ZHANG J W, YU J J, CHI N, et al. Time–Domain Digital Pre–Equalization for Band–Limited Signals Based on Receiver–Side Adaptive Equalizers[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20515. DOI:10.1364/oe.22.020515

作者简介



唐明, 华中科技大学教授、博士生导师; 主要研究领域为高速光纤通信系统; 先后主持国家自然科学基金优青项目、国家自然科学基金重点项目、国家“863”计划主题项目以及重点研发计划课题等; 发表 SCI 论文 80 余篇(近 5 年 60 篇), 被 SCI 他引 850 余次, Google Scholar 数据库中引超过 2 500 次, H 指数为 24。



李伟昊, 华中科技大学在读硕士研究生; 研究方向为高速光传输系统和光互连中的光电子器件集成。



冯振华, 华中科技大学博士研究生, 现任烽火通信科技股份有限公司工程师; 主要研究领域为中短距光纤通信系统, 发表论文 40 余篇, 拥有专利 10 项。