

面向数据中心光互连的高速光传输技术

High-Speed Transmission Technologies for Data Center Optical Interconnection

张帆/ZHANG Fan, 朱逸箫/ZHU Yixiao

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)
(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Peking University, Beijing 100871, China)



摘要: 数据中心光互连场景可分为数据中心内部和数据中心之间2大类。对于数据中心内部光互连,利用新型调制方案、高性能光器件和高速数字信号补偿算法是提升单通道速率的主要方式;对于数据中心之间光互连,结合单边带调制和非线性补偿算法克服色散功率衰落是重要研究方向。未来数据中心的升级依赖于光电器件和数字信号处理的共同进步。

关键词: 光互连;直接检测;自相干检测;数字信号处理

Abstract: Intra-data center and inter-data center optical interconnects are two categories of data-center application scenarios. For intra-data center optical interconnect, novel modulation schemes, high-performance optical devices and compensation algorithms for high-speed digital signal are enabling technologies to increase the line-rate; while for inter-data center optical interconnect, the combination of single-sideband modulation and digital nonlinear mitigation algorithm is the key approach to overcome the fiber dispersion induced power fading effect. The upgradation of future data-center interconnect relies on the development of both optoelectronic devices and digital signal processing.

Key words: optical interconnects; direct detection; self coherent detection; digital signal processing

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191011.1500.004.html>

网络出版日期: 2019-10-11

收稿日期: 2019-07-25

光纤通信系统由于其传输损耗低、可用带宽大、信道稳定等优点成为现代信息社会的重要基础设施。近年来,随着云计算、移动互联网、虚拟现实等新型宽带业务的发展,大数据时代数据容量的增长逐渐从超长距离传输的核心网向中短距离城域网络传输转移。在数据中心内部,数十万计算节点(服务器)存储和处理网络基础设施的大量云数据。因此,在以云服务和应用为主导的时代,数据中心(DC)贡献了

大部分的全球互联网协议流量。根据思科(Cisco)全球云指数预测:从2016—2021年,数据中心流量将以平均每年25%的速度增长近3倍多。到2021年底,全球超大数据中心数量将会增加到628个。与此同时,全球数据中心年流量将增长到20.6 ZB(1 ZB=10²¹ B)^[1]。与超长距离传输不同,短距离光传输和光互连对每比特成本和能耗更为敏感。如何实现低成本高速光传输,是光通信技术必须应对的重要课题。

根据传输距离划分,数据中心光互连的场景可以分为3类:数据中心内部、数据中心之间和扩展距离数据中心之间光互连^[2],具体如图1所示。对于数据中心内部光互连,其典型传输距离在300 m以内,这一场景占据了77%的数据流量。考虑到光模块的成本,由于垂直腔面发射激光器(VCSEL)能够在一块晶圆上制备,结合大纤芯直径的多模光纤(MMF)具有更高的耦合效率,因此基于VCSEL和MMF的强

度调制直接检测(IM-DD)一直是数据中心内部光互连的主要实现方式^[3-5]。对于传输距离在20 km以下的数据中心之间光互连,在这一距离范围内,多模光纤将出现严重的模式间色散导致码间串扰,于是标准单模光纤取而代之成为主要选择。另一方面,这一距离的链路衰减仍然较小,往往可以不采用光放大器以降低成本。考虑到接收功率灵敏度(RS)这一系统优化指标,先进的光电二极管例如高带宽雪崩光电二极管(APD)由于其RS比传统PIN光电探测器(PD)低得多,因此在这一场景下有着重要的应用^[6]。此外,色散的影响会随着波特率和距离而增大,在直接检测接收端平方律的影响下,可能会出现非线性的信号损伤,所以大多选择在零色散的O波段传输以避免这一问题。最后,扩展距离数据中心光互连对应着20~80 km的传输距离,此时通信波段从O波段转移到C波段以降低传输损耗,同时光放大器也逐渐被接受。相应地,色散的影响将

被进一步加重,色散导致的双边带功率衰落严重限制着传输速率^[7]。为此,当前的研究热点是采用一些自相干的调制方案如单边带信号^[8-11]避免这一效应。虽然直接检测收发机相比于相干检测仍具有成本上的优势,但随着速率的升级、相干收发机成本的降低,相干检测方案未来可能会逐步下沉到扩展距离数据中心光互连。

本文中,我们将从数据中心内部和数据中心之间2方面进行展开,介绍当前热门的几种数字调制和接收方案,并比较其优缺点。

1 数据中心内部光互连

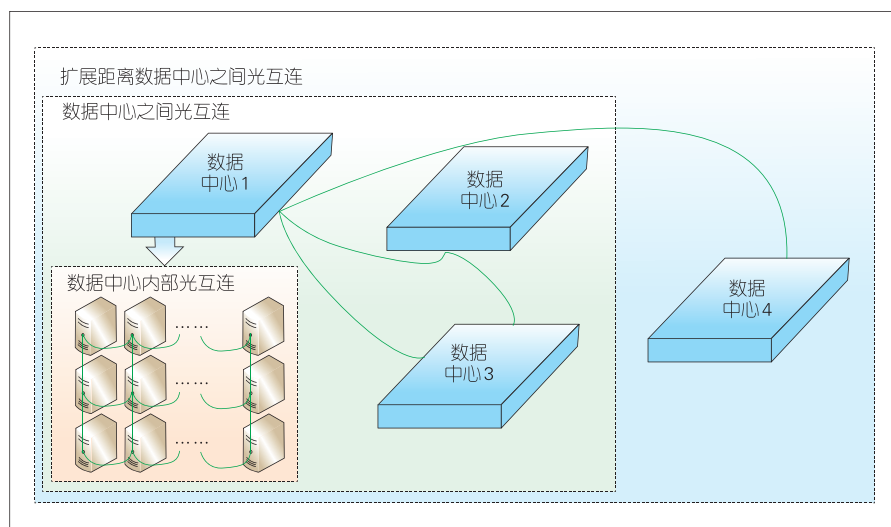
近年来,学术界的一个努力方向是借鉴长距离光纤传输系统的发展轨迹,将数字信号处理引入短距离光互连,以进一步补偿信道损伤,提升传输容量。但是,考虑到市场对短距传输收发机的成本关注度,直接套用数字相干的方案不太可行。另外,收发器的尺寸因子、端口密度、总物理连接数以及单位面积

上的比特率,这些都是决定数据中心总规模和能量利用率的重要参数。这些约束使得光模块在物理层面临着前所未有的挑战,下一代数据中心需要有创新的信号产生/检测方案和数字信号处理算法。

1.1 调制方案

从接口速率演进的角度来看,100 GE标准的主要实现方式为4路并行的开关键控(OOK)调制信号,单通道速率为25 Gbit/s。而面向400 GE标准,需要采用更高频谱效率的调制方式,以降低对光模块的带宽要求。目前,基于56 Gbaud的4电平脉冲强度调制(PAM4)信号已经被标准采纳。更进一步地,对于下一代800 GE或1 TE的接口标准,IM-DD仍将占据主流,其中4路并行每通道200/250 Gbit/s传输速率是一种较为可行的方案。这就需要发挥数字信号处理器(DSP)的作用,在35 GHz左右带宽的收发机上实现高速高频谱效率调制,并尽可能地提升接收灵敏度。接下来我们将介绍近几年来比较热门的3种数字调制技术:PAM、无载波幅度相位调制(CAP)和离散多音频调制(DMT)。

PAM调制通过增加发送符号的电平数来实现,是一种简单而又有效的方案。它相比传统的OOK频谱效率翻倍,从而降低了器件的带宽需求;但缺点是降低了功率预算,并增大了调制线性度的一些相差要求。在3种方案之中,PAM对数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC)的要求最低。此外,相比于



▲图1 数据中心光互连分类示意图

正交幅度相位调制(QAM)信号, PAM信号相当于省去了一个正交分量,因此PAM-M的频谱效率减半为 $\log_2(M)/2$ 。

CAP是另一种基于QAM信号的强度调制方案。对于基带的QAM信号,设计一对正交的上变频后的成型滤波器,通过分别卷积同相/正交(I/Q)分量实现信号的数字上变频。在上变频后左右边带相互共轭对称,因此变成一维实数信号。同时由于两个边带携带相同信息,因此其频谱效率与相同调制格式的信号相同。

DMT是一种基带的正交频分复用调制(OFDM),相比于传统的OFDM信号,只对其中一半的子载波(正频率)调制信号,而另一半子载波(负频率)上发送对应位置复共轭的信号,来保证整个DMT符号为实数。DMT调制的一大优势是,可以根据器件和链路的各个频率点的信噪比灵活地进行比特和功率加载,从而提升频谱效率。

图2为PAM/CAP/DMT 3种调制方案的收发端数字信号处理流程图。通过对比可以看出,PAM调制方案具有最低的计算复杂度。而CAP格式由于在中频进行IQ调制,因此在相同比特率和频谱效率的情况下,相比于PAM调制只需要一半的波特率,于是也降低了收发端DAC和ADC的采样率要求。对于DMT调制方案,由于需要进行傅里叶变换及其逆变换,因此具有最高的计算复杂度。而这一过程也使得信号具有较高的峰均比(PAPR),所以对DAC和ADC的量化比特数要

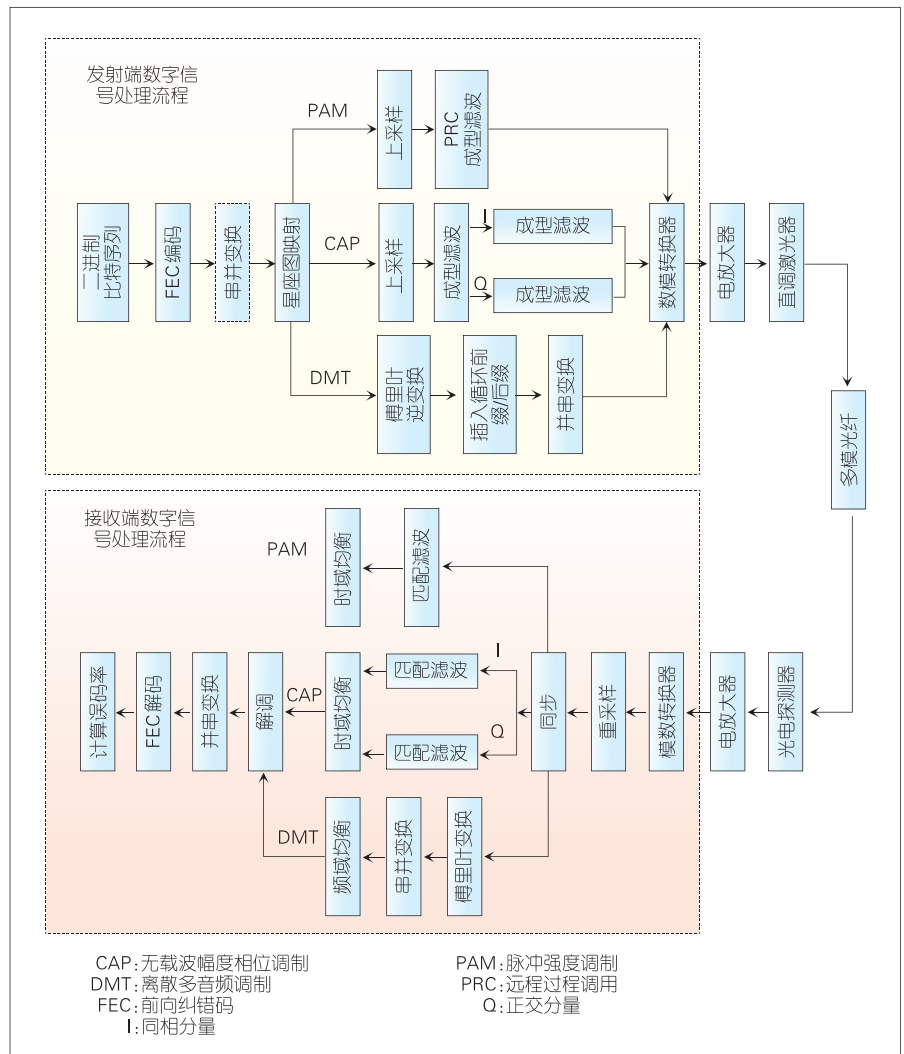
求很高。在接收端,不同于PAM和CAP常用的时域均衡,DMT因为信息调制在频域,因此可以对各个子载波采用1抽头的频域均衡,在信道估计和均衡过程中复杂度很低。

1.2 高速数字信号补偿算法

除了上述介绍的调制方案之外,通过DSP可以缓和收发端器件的带宽不足,以进一步适应高速传输的需求。

(1)预均衡^[12]。针对带宽受限系统,发射端预均衡是一种简单有效

的补偿方法。首先,在不做任何补偿的情况下发送数据,通过接收端的均衡器估计出系统端到端的时域或者频域响应,再将估计出系统响应的逆在时域与发送数据卷积(或者在频域与信号相乘),这样就能在发射端相对提升信号高频分量来抵抗器件的低通滤波效应。经过信道传输后,接收端可以实现较为平坦的信号频谱,从而降低码间串扰。这种方案的缺点是需要对每个特定系统都要进行一次基于负反馈的校准过程,灵活性较差。



▲图2 PAM/CAP/DMT的收发端数字信号处理流程图

(2)后均衡^[13]。后均衡也被称为接收端的超奈奎斯特技术。它的原理可以这样理解:对于一个带宽不足的信号,经过接收端均衡器之后,信号的高频分量被抬升以抑制码间串扰。与此同时,原本平坦的带内噪声的高频部分也被加重,劣化了最终的误码性能。后均衡方法首先在均衡器之后加入一个两抽头的数字后滤波器实现低通滤波,它的时域响应的 z 变换可以表示成: $H(Z) = 1 + \alpha z^{-1}, \alpha \in [0, 1]$ 。于是,在引入一个简单并且已知的码间串扰的前提下可以抑制均衡增强的带内噪声。其中, α 的值可以进行优化,使 $H(z)$ 的频域响应与均衡前的信号频谱尽可能相似。之后,这个

已知的码间串扰可以通过基于维特比译码算法的最大似然序列检测(MLSD)消除。后均衡方法不需要对发射端进行额外操作,并且可以根据系统带宽限制的严重程度优化数字后滤波器的抽头权重,灵活性较高,缺点是最大似然序列检测的算法复杂度和存储空间较大。

查找表算法(LUT)主要用于降低高速系统中与发送序列相关的模式损伤^[14]。它具有计算复杂度低、配置灵活等优点,可以应用于纠正强度调制直接检测系统中的非线性损伤问题。如图3所示,考虑前后共 $2M + 1$ 个符号对中间时刻符号的影响,所有可能的发送符号序列记为 $X(k - M:k + M)$ 。初始状态时

查找表中数据全部置零,滑动窗口每次选取发送序列中的 $2M + 1$ 个符号,并计算这种模式的地址,即查找表索引 i 。 $Y(k - M:k + M)$ 表示在接收端得到的恢复序列,发送序列和接收序列的中心符号相减得到误差 $e(k)$ 。随着滑动窗口不断向前移动,我们逐渐遍历了所有发送图案的误差值。假设查找表索引 i 中存入数据个数为 $N(i)$,则对应位置差值的平均值可以更新为:

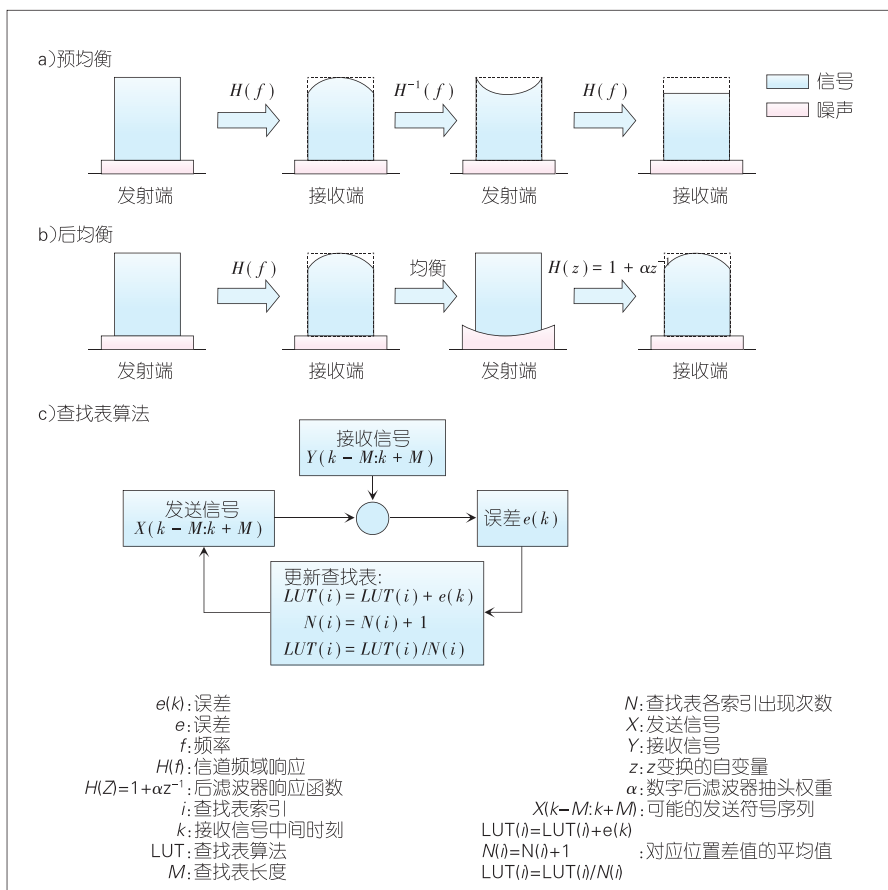
$$\begin{aligned} LUT(i) &= LUT(i) + e(k) \\ N(i) &= N(i) + 1 \\ LUT(i) &= LUT(i) / N(i) \end{aligned} \quad (1)$$

最后,将平均后的误差值在发射端对数据进行预畸变,以补偿器件的非线性损伤。这一方法的缺点是,存储空间会随着序列长度指数增长。

1.3 相关光发射器件的发展趋势

在这一小节,我们将介绍一些适用于数据中心光互连器件的发展趋势。

(1)单模 VCSEL。850 nm 波段的 VCSEL 和多模光纤已经被广泛地应用于数据中心内部实现单通道 10 Gbit/s 光互连应用。然而,未来的高速光互连需要达到单通道速率 100 Gbit/s 以上,并支持 300 m 的传输距离。即使采用高带宽的 OM4 型多模光纤,模式色散在这一距离下仍将成为限制因素。为此,已有的解决方案一种是减少 VCSEL 激发的纵模数量实现单模工作模式,另一种是通过氧化物孔径工程使得高阶纵模式泄露出去^[15]。基于单纵模 VCSEL, WU B. 等人实验演示了



▲图3 高速数字信号补偿算法

100 Gbit/s 的 DMT 信号传输 300 m 长的 OM4 光纤^[16]。R. PUERTA 等人的实验演示了 107.5 Gbit/s 单模 VCSEL 传输 100 m 的 OM4 光纤,作为对比,相同速率采用多模 VCSEL 只能达到 10 m 的传输距离^[17]。2017 年,C. KOTTKE 等人实验演示了创纪录的 113 Gbit/s DMT 信号传输 550 m OM4 光纤^[18]。

(2) 双边电吸收调制器。由于自身的技术成熟度,以及小尺寸、大带宽和高消光比等优势,电吸收调制器在短距离传输系统中得到了广泛应用。一般来说,电吸收调制器只有一个被调制的输出信号,另一个往往用于性能监测控制。在 2016 年,M. THEURER 等人通过集成两个电吸收调制器实现了同一波长上的双边输出模式。基于这一光源,M. THEURER 等人实验演示了可以适用于多通道短距离传输应用的 2×56 Gbit/s 不归零码(NRZ)信号生成^[19]。为了适应高阶调制格式,双边电吸收调制器可以通过两路二进制驱动信号的叠加产生 PAM4 调制信号,从而避免了高速 DAC 和线性电放大器的需求^[20]。进一步地,由于双边电吸收调制器输出波长相同,因此可以产生偏振复用信号。在这一方面,ZHONG K.P. 等人成功演示了 120 GBaud 的偏振复用 NRZ 信号的产生和传输^[21]。

(3) 硅基强度调制器。不同于前 2 种方案,基于硅基集成的外调制方案也具有低成本、小尺寸、互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容等优势。由于强度调制器的差分输入可以避免啁啾的产生,这种方案具

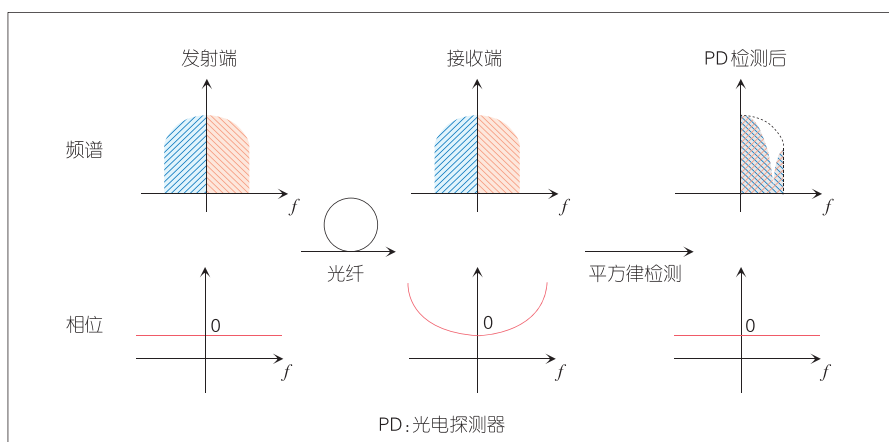
有最高的调制线性度。2018 年,北京大学 ZHANG F. 等人基于数字后均衡算法补偿器件和光纤链路的带宽不足,同时利用 22.5 GHz 带宽的硅基强度调制器实现了纪录性的 200 Gbit/s 的 PAM6 信号背靠背生成和 176 Gbit/s 的 PAM4 信号传输 1 km 标准单模光纤^[22]。

2 数据中心之间光互连

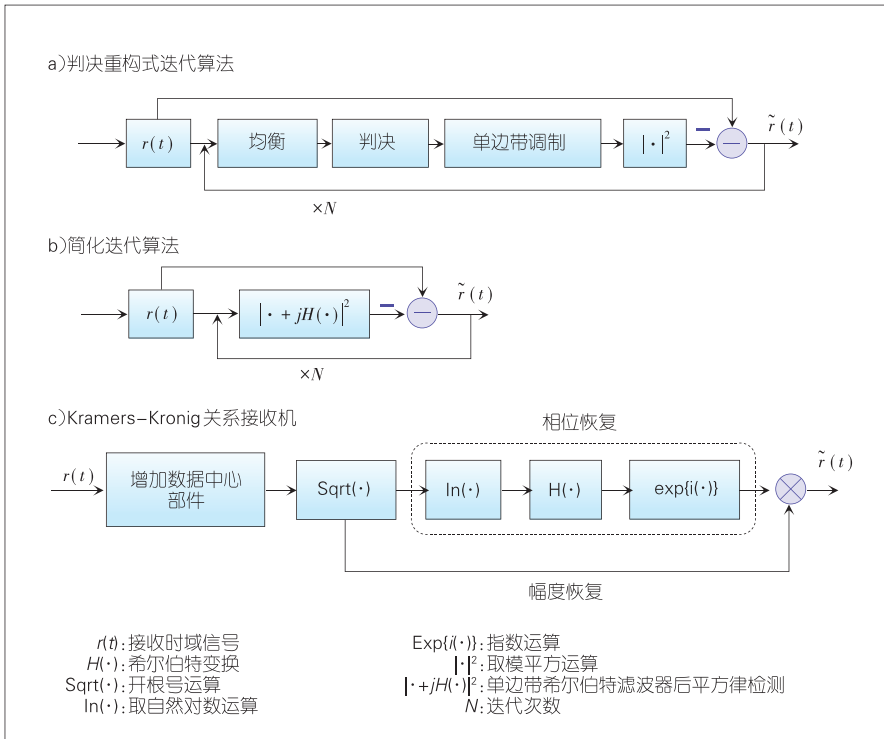
数据中心之间光互连典型传输距离 20 ~ 80 km。如图 4 所示,对于强度调制信号,在光纤传输的过程中,信号由于色散受到的相移正比于传输距离以及相对于中心频点频率的平方,因此左右边带的相移相同。而在 PD 平方律检测之后,信号会与其共轭分量相叠加,从而将色散由相位影响转化成幅度上的影响,最终导致频率选择性的功率衰落。为避免色散功率衰落效应,近年来学术界提出采用单边带调制信号作为中短距高速传输方案。

基于单探测器的光单边带传输系统,面临的主要问题是探测器对信号的平方律操作带来的信号-信号拍频串扰(SSBI)。为补偿这一损

伤,学术界陆续提出了几种有效的数字域补偿方案。如图 5 所示,英国的伦敦大学学院(UCL)大学研究组提出 SSBI 当作微扰项进行重构式迭代补偿^[23]。对接收到的信号进行信道均衡和判决解调后,重新进行调制以模拟发送信号,经过时刻同步后,对该信号进行取模和平方操作重构出 SSBI 损伤项,再与原始接收信号作差以抑制 SSBI 的影响。整个步骤可以迭代进行,从而逐步提高 SSBI 估计的精确度,实现线性接收。这一方法的缺点在于,迭代过程包含了均衡、解调和调制等步骤,计算复杂度较高。作为改进,美国诺基亚贝尔实验室^[24]和北京大学研究组^[8]提出了不包括均衡的迭代算法。将输入信号通过单边带滤波器、取模和平方操作直接重构出 SSBI 项,并通过多次迭代增加重构精度,相比于前一种方案大幅降低了计算复杂度。然而,由于单边带滤波器需要由希尔伯特滤波器实现,所以每次要进行一对傅里叶变换(FFT)和逆变换(IFFT),所以迭代过程的复杂度仍然较高。意大利 L'Aquila 大学研究组基于最小相位



▲图 4 色散功率衰落效应原理示意图



▲图5 信号-信号拍频串扰补偿算法流程图

条件,证明了单边带信号的对数幅度和相位间满足克拉默-克隆尼格(KK)关系,即互为希尔伯特变换对^[25]。如图5所示,根据接收到光电流可以恢复出接收光场的幅度分量,进而得到相位信息,最终线性重构出复数光场。KK关系接收机给出了理论上最佳的接收算法,它的缺点是算法中包含了对数等非线性操作,使得信号频谱在这一过程中发生展宽,因此接收端一般需要3倍以上符号率的上采样倍数。

在KK关系接收机提出之后,许多研究组对其加以改进以进一步降低复杂度。韩国KAIST研究组通过对对数函数进行一阶展开,避免了非线性运算,降低接收端采样率的要求。在112 Gbit/s单边带OFDM信号80 km标准单模光纤的传输实验中,他们用2倍上采样取

得了与6倍上采样相似的误码性能^[26]。另一种思路是从简化希尔伯特滤波器的角度出发,德国光量子研究所提出用有限长抽头滤波器进行近似^[27],从时域卷积避免了整个数据的FFT/IFFT变换,降低了处理时延和计算复杂度。在实验中,他们利用32个抽头的数字滤波器实现了KK关系接收机,并成功地将80 Gbaud的16 QAM信号传输了300 km标准单模光纤。此外,上海交大研究组通过将指数操作移到发射端,降低了信号的KK关系接收机对单边带信号的载波信号功率比(CSPR)需求^[28]。在CSPR为12 dB的虚载波单边带传输实验系统中,可以获得2 dB的接收功率灵敏度增益。

在单边带信号的基础之上,为了进一步提高传输速率和频谱效

率,华为研究组提出了孪生单边带调制方案。在具体实现时,基于单个双驱动调制器可以在左右边带同时传送不同信息,它们共享中间的光载波,从而实现传输容量的翻倍^[29]。而孪生单边带的一个难点是接收端光滤波器不够陡峭,残余对向边带在PD平方律检测后会与目标边带重叠,产生串扰影响误码性能。因此,华为研究组^[30]和复旦大学研究组^[31]对左右边带信号进行 2×2 联合均衡消除边带间串扰。此外,北京大学研究组提出了非对称孪生单边带方案,可以节省其中一个边带的保护间隔并获得更小的边带间串扰,在接收端可以避免联合均衡,提升系统灵活性。在实验中,他们分别演示了224 Gbit/s的非对称孪生单边带16 QAM信号最远传输距离240 km,以及基于32 QAM调制格式实现了80 km标准单模光纤传输最大速率300 Gbit/s^[32]。对称和非对称孪生单边带接收原理示意具体如图6所示。

3 结束语

随着各类宽带业务的不断发展,数据中心面临着前所未有的流量增长需求。下一代的光模块既要在硬件上增大收发端器件的调制带宽,又要考虑通过引入DSP,弥补收发机的非线性等问题,实现动态、灵活、精细的补偿。光电器件性能大大减轻DSP的压力,而DSP也能弥补器件的不足。此外,未来面向1.6 T以上的接口标准升级时,单一增大器件带宽变得非常困难,需要考虑更高维度、更高频谱效率的调



▲图6 对称和非对称孪生单边带接收原理示意图

制方案,低成本相干可能走进数据中心内部,成为具有竞争力的一大技术方案。

参考文献

- [1] Cisco.Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016 – 2021 White Paper[R]
- [2] ZHONG K P, ZHOU X, HUO J H, et al. Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: A Review of Current Technologies and Future Trends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 377. DOI: 10.1109/jlt.2018.2793881
- [3] ZUO T, ZHANG L L, ZHOU J, et al. Single Lane 150-Gb/s, 100-Gb/s and 70-Gb/s 4-PAM Transmission over 100-m, 300-m, and 500-m MMF Using 25-G Class 850nm VCSEL[C]// ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication. USA: IEEE, 2016: 974-976
- [4] XIE C J, DONG P, RANDEL S, et al. Single-VCSEL 100-Gb/s Short-Reach System Using Discrete Multi-Tone Modulation and Direct

- Detection[C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2015. DOI:10.1364/ofc.2015.tu2h.2
- [5] PUERTA R, AGUSTIN M, CHORCHOS L, et al. 107.5 Gb/s 850 nm Multi- and Single-Mode VCSEL Transmission over 10 and 100 m of Multi-Mode Fiber[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). USA: IEEE
- [6] ZHONG K P, ZHOU X, WANG Y G, et al. Amplifier-Less Transmission of 56Gbit/s PAM4 over 60km Using 25Gbps EML and APD [C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.tu2d.1
- [7] CHE D, HU Q, SHIEH W. Linearization of Direct Detection Optical Channels Using Self-Coherent Subsystems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 516. DOI:10.1109/jlt.2015.2510624
- [8] ZOU K H, ZHU Y X, ZHANG F, et al. Spectrally Efficient Terabit Optical Transmission with Nyquist 64-QAM Half-Cycle Subcarrier Modulation and Direct Detection[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2767. DOI:10.1364/ol.41.002767
- [9] LI Z, ERKILINC M S, SHI K, et al. SSBI Mitigation and the Kramers - Kronig Scheme in Single-Sideband Direct-Detection

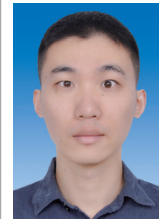
- Transmission with Receiver-Based Electronic Dispersion Compensation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 1887. DOI:10.1109/jlt.2017.2684298
- [10] CHEN X, ANTONELLI C, CHANDRASEKHAR S, et al. 218-Gb/s Single-Wavelength, Single-Polarization, Single-Photodiode Transmission over 125-Km of Standard Singlemode Fiber Using Kramers-Kronig Detection[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.th5b.6
- [11] LE S T, SCHUH K, CHAGNON M, et al. 8 x 256Gbps Virtual-Carrier Assisted WDM Direct-Detection Transmission over a Single Span of 200km[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2017. DOI:10.1109/ecoc.2017.8346088
- [12] 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.22.02051
- [13] LI J Q, TIPSUWANNAKUL E, ERIKSSON T, et al. Approaching Nyquist Limit in WDM Systems by Low-Complexity Receiver-Side Duobinary Shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1664. DOI: 10.1109/jlt.2012.2190972
- [14] REZANIA A, CARTLEDGE J C. Transmission Performance of 448 Gb/s Single-Carrier and 1.2 Tb/s Three-Carrier Superchannel Using Dual-Polarization 16-QAM with Fixed LUT Based MAP Detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4738. DOI:10.1109/jlt.2015.2467187
- [15] SHCHUKIN V, LEDENTSOV N N, KROPP J, et al. Single-Mode Vertical Cavity Surface Emitting Laser Via Oxide-Aperture-Engineering of Leakage of High-Order Transverse Modes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(12): 990. DOI: 10.1109/jqe.2014.2364544
- [16] WU B, ZHOU X, MA Y, et al. Single-Lane 112Gbps Transmission over 300 m OM4 Multimode Fiber Based on a Single-Transverse-Mode 850 nm VCSEL[C]// Processing on European Conference on Optical Communication. Germany: ECOC, 2016:1148-1150
- [17] PUERTA R, AGUSTIN M, CHORCHOS L, et al. Effective 100 Gb/s IM/DD 850-Nm Multi- and Single-Mode VCSEL Transmission through OM4 MMF[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 423. DOI:10.1109/jlt.2016.2625799
- [18] KOTTKE C, CASPAR C, JUNGnickel V, et al. High Speed 160 Gb/s DMT VCSEL Transmission Using Pre-Equalization[C]// Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w4i.7
- [19] THEURER M, WANG Y, ZENG L, et al. 2 x 56 GB/s from a Double Side Electroabsorption Modulated DFB Laser[C]// Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California. USA: OSA, 2016. DOI: 10.1364/ofc.2016.tu3d.6
- [20] THEURER M, ZHANG H Y, WANG Y, et al. 2

- × 56 GB/s from a Double Side Electroabsorption Modulated DFB Laser and Application in Novel Optical PAM4 Generation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 706. DOI:10.1109/jlt.2016.2597962
- [21] ZHONG K P, ZHOU X, WANG Y G, et al. Transmission of a 120–GBd PM–NRZ Signal Using A Monolithic Double–Side EML[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2176. DOI:10.1109/pt.2016.2586524
- [22] ZHANG F, ZHU Y, YANG F, ZHANG L, et al. Up to Single Lane 200G Optical Interconnects with Silicon Photonic Modulator [C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2019: Th4A.6. USA: OSA, 2019
- [23] LI Z, ERKİ, L, NÇ M S, PACHNICKE S, et al. Signal–Signal Beat Interference Cancellation in Spectrally–Efficient WDM Direct–Detection Nyquist–Pulse–Shaped 16–QAM Subcarrier Modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23694. DOI:10.1364/oe.23.023694
- [24] RANDEL S, PILORI D, CHANDRASEKHAR S, et al. 100–Gb/s Discrete–Multitone Transmission over 80–km SSMF Using Single–Sideband Modulation with Novel Interference–Cancellation Scheme[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2015. DOI:10.1109/ecoc.2015.7341665
- [25] MECOZZI A, ANTONELLI C, SHTAIF M. Kramers–Kronig Coherent Receiver[J]. Optical, 2016, 3(11): 1220. DOI:10.1364/optica.3.001220
- [26] BO T W, KIM H. Kramers–Kronig Receiver Operable without Digital Up Sampling[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 13810. DOI: 10.1364/oe.26.013810
- [27] FULLNER C, WOLF S, KEMAL J, et al. Transmission of 80–GBd 16–QAM over 300 km and Kramers–Kronig Reception Using a Low–Complexity FIR Hilbert Filter Approximation[C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). USA: IEEE, 2018
- [28] AN S, ZHU Q, LI J, et al. Modified KK Receiver with Accurate Field Reconstruction at Low CSPR Condition[C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. USA: OSA, 2019: M1H.3
- [29] ZHANG L, ZUO T, ZHANG Q, et al. Transmission of 112Gb/s+ DMT over 80–km SMF Enabled by Twin–SSB Technique at 1550nm[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ECOC.2015.7342027
- [30] ZHANG L, ZUO T, ZHANG Q, et al. Single Wavelength 248–Gb/s Transmission over 80–km SMF Based on Twin–SSB–DMT and Direct Detection[C]// ECOC 2016 – 42nd European Conference on Optical Communication. Germany: VDE, 2016:133–135
- [31] WANG Y, YU J, CHIEN H, et al. Transmission and Direct Detection of 300–Gbps DFT–S OFDM Signals Based on O–ISB Modulation with Joint Image Cancellation and Nonlinearity–Mitigation[C]// ECOC 2016 – 42nd European Conference on Optical Communication. Germany: ECOC, 2016: 142–144
- [32] ZHU Y X, RUAN X K, ZOU K H, et al. Beyond 200G Direct Detection Transmission with Nyquist Asymmetric Twin–SSB Signal at C–Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(17): 3629. DOI:10.1109/jlt.2017.2718098

作者简介



张帆, 北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 美国光学学会高级会员, 中国通信学会高级会员, 洪堡学者; 研究方向包括高速光传输、光互连和光子器件; 发表论文 150 余篇。



朱逸箫, 北京大学信息科学技术学院在读博士研究生; 研究方向包括中短距高速光传输; 发表论文 30 余篇。

专题预告

《中兴通讯技术》2020 年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	C–V2X 与智能车联网技术	中国移动研究院首席科学家 易芝玲 中国移动研究院高级工程师 潘成康
2	智能化通信应用芯片技术	中国科学院半导体研究所副所长 祝宁华
3	5G 核心网技术与挑战	工业和信息化部科技委信息网络专家组组长 赵慧玲
4	无线网络空中计算	中国科学技术大学教授 卫国
5	网络人工智能技术	电子科技大学教授 虞红芳
6	工业互联网技术与应用	中国信息通信研究院副总工 续合元