

# 激光与光电子学进展

## 超密集波分复用无源光网络的研究进展

马子洋<sup>1,2</sup>, 吴琼琼<sup>1,2</sup>, 李启华<sup>1,2</sup>, 高震森<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>广东工业大学信息工程学院, 先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;

<sup>2</sup>广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要** 超密集波分复用无源光网络凭借其信道间隔仅为几个 GHz、功率预算高达几十 dB 等优越性能, 可以实现用户数目和传输容量的大幅提升。从频谱效率提高、相干接收机简化、光子集成器件应用、数字信号处理优化等关键研究方向出发, 简述了国内外关于超密集波分复用无源光网络相关研究的最新进展情况, 探讨了其未来可能的研究方向和发展趋势。

**关键词** 光通信; 无源光网络; 超密集波分复用; 相干接收; 集成光学器件

中图分类号 TN919.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0500006

## Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network

Ma Ziyang<sup>1,2</sup>, Wu Qiongqiong<sup>1,2</sup>, Li Qihua<sup>1,2</sup>, Gao Zhensen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Advanced Institute of Photonics, School of Information Engineering,

Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Photonics Information Technology,

Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** An ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network can substantially increase the number of users and transmission capacity because it exhibits a channel spacing of only a few GHz, power budget of up to tens of dB, and other superior performance characteristics. Herein, the recent progress on the ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical networks at home and abroad was comprehensively reviewed based on several key research directions, such as the improved spectral efficiency, simplified coherent receivers, photonic integrated device application, and optimized digital signal processing. Moreover, possible research directions and development trends were discussed.

**Key words** optics communications; passive optical network; ultra-dense wavelength division multiplexing; coherent receive; integrated optics devices

**OCIS codes** 060.2330; 030.1640; 230.0040; 130.3120

## 1 引言

近年来, 光接入网的发展非常迅速, 光纤到户 (FTTH) 在许多实际场景中已经成为现实。无源光

网络 (PON) 技术作为光接入网的主流技术, 其独特优势得到了业界的认可, 在国内外受到了普遍重视, 现已进入规模应用阶段<sup>[1]</sup>。在目前使用的 PON 中, 时分复用无源光网络 (TDM-PON) 有着结构简

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-18; 录用日期: 2020-07-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1801301)、国家自然科学基金 (11904057)、广东省珠江人才引进创新创业团队项目 (2019ZT08X340)

\*E-mail: gaozhensen@gdut.edu.cn

单且成本低的优点,故商用光接入网多采用这种方案。但随着移动设备数量显著增长,以及 5G 和数据密集型应用等新兴移动技术的出现,用户的带宽需求正以每年近 50% 的速度增长, TDM-PON 的发展遇到了瓶颈<sup>[2]</sup>。为应对这种需求的增长,研究人员对能够实现单用户千兆级别传输速度的波分复用无源光网络(WDM-PON)技术产生了浓厚的兴趣<sup>[3]</sup>。WDM-PON 作为一种虚拟的“点对点”多信道传输系统,因每个用户独享一对波长,故系统在时域上没有限制,可以在大规模增加用户数量的同时,实现单用户的高速信息传输。

超密集波分复用无源光网络(UDWDM-PON)是一种利用相干接收完成波长分配和信息接收的技术,可以实现在仅几个 GHz 的超低波长间隔的条件下,保持高达几十 dB 的功率预算<sup>[4]</sup>。这种技术自提出以来被广泛研究,由于其在用户数量和传输容量方面的优势,已成为未来无源光网络的长期发展方向。本文针对 UDWDM-PON 关键技术的最新研究进行综述,将频谱效率提高、相干接收机简化、光子集成器件应用、数字信号处理优化等关键研究方向的发展进行归纳总结,并从信号质量、接收灵敏度、系统成本及实现复杂度等方面对比各种方案的优劣,展望其未来发展的方向。

## 2 研究进展

### 2.1 频谱效率提高

频谱效率定义为传输速率与所占带宽的比值,随着用户对通信速率需求的不断提高,频谱分配变得愈发紧张,频谱效率提高可使 UDWDM-PON 在有限的通信波段内传输信息的总容量更高。传统的商用 TDM-PON 普遍采用强度调制-直接探测(IM-DD)方式进行信息的加载和接收,强度调制一

般采用振幅键控(ASK)调制格式,这种调制信号所占的带宽与调制速率等同,频谱效率最高只能达  $1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。为了提高频谱效率,可以将目标集中在先进调制格式上,如:华中师范大学 Li 等<sup>[5]</sup>利用低成本马赫-曾德尔调制器(MZM)和分布反馈激光器(DFB),结合混合编码方式,完成了 DBPSK/ASK-2 的混合调制,频谱效率达到  $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ;文献[6-7]中使用单符号搭载多个比特信息的 QPSK、16QAM 等高阶调制格式,在波特率不变的情况下实现了传输速率的提升,同时实现了频谱效率的成倍提升;文献[8-9]中利用光偏振态之间相互正交的特性,实现了信息偏振态的复用,因每个偏振态上搭载的信息互不影响,复用信息的频谱效率成倍提升。

除了采用先进调制格式提升频谱效率这种常用的方式外,研究人员还提出了其他新方法。2015 年,华侨大学 Dong 等<sup>[7]</sup>利用 Nyquist 脉冲整形技术在发射端对数据进行预处理,产生了 16 个子载波,其原理如图 1 所示。图中每个子载波搭载  $10.08 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的 16QAM 信号,经过 Nyquist 脉冲整形后,频谱得到压缩。随后使用单载波调制技术(ISB)在多载波发生器输出的 75 路光载波上分别搭载处理后的数据,传输总容量可达  $75 \times 16 \times 10.08 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。75 路光载波之间波长间隔为 27.2 GHz,另外多载波发生器的输入为 5 个间隔为 27.2 GHz 的激光器,故系统总占用带宽为  $(75+4) \times 27.2 \text{ GHz}$ ,计算得到频谱效率可达  $5.628 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。2018 年,加泰罗尼亚理工大学 Velásquez 等<sup>[10]</sup>进一步验证了 Nyquist 脉冲整形对提高频谱效率的作用。实验结果显示,在传输速率不变的情况下,经过 Nyquist 脉冲整形的信号可以节省 25% 的频谱,频谱效率得到显著提升。这种方式

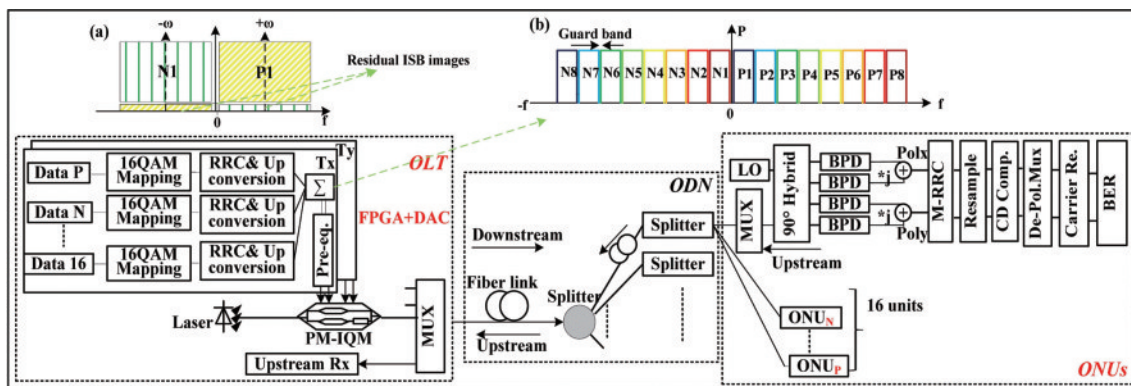


图 1 使用 Nyquist-ISB 调制的 UDWDM-PON 原理图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of UDWDM-PON using Nyquist-ISB modulation<sup>[7]</sup>

通过对信号作预处理整形,使载波频谱得到压缩,在不改变硬件条件的情况下,实现了频谱效率的提升,但这种方式需要在发射端进行复杂的数字信号处理,一定程度上提升了发射端功耗。

2017年,华中科技大学 Xiong 等<sup>[11]</sup>开创性地利用多芯光纤进行 UDWDM-PON 传输,如图 2 所示,在七芯光纤的 6 个外部光芯中传输 12 路通道间隔

为 12 GHz 的  $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  PDM-QPSK 信息,中心光芯中传输用于自零差相干接收的导频音。经计算,此系统传输的总容量可达  $2.88 \text{ Tbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,只占用 144 GHz 的带宽,频谱效率得到了极大提升。由于多芯光纤制备困难、成本高等因素的限制,这种方式近期很难在接入网中应用,但随着制备工艺不断完善,成本不断减低,此方法在未来将极具竞争力。

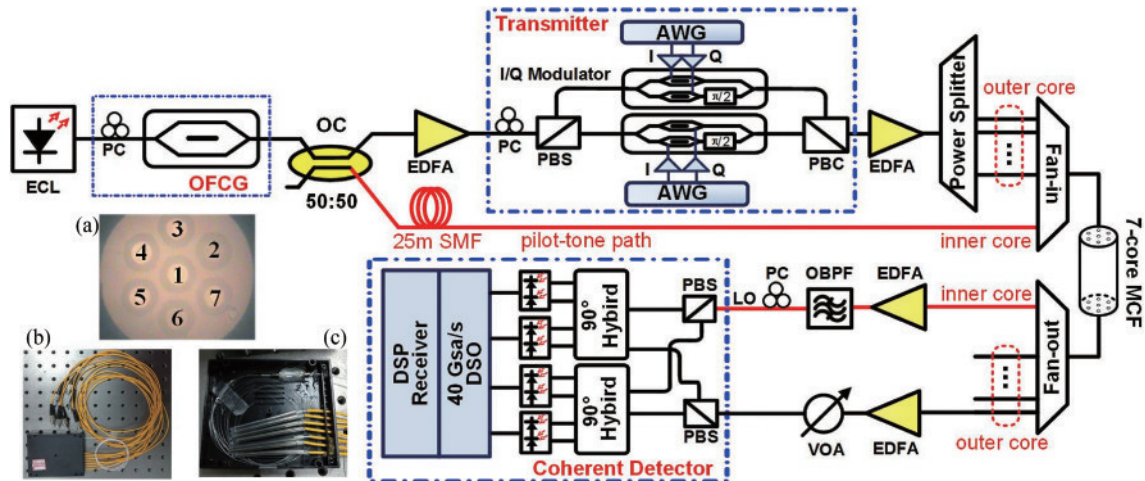


图 2 采用七芯光纤传输的 UDWDM-PON<sup>[11]</sup>

Fig. 2 UDWDM-PON using seven-core optical fiber transmission<sup>[11]</sup>

提高频谱效率是 UDWDM-PON 发展的必由之路,目前的方案主要是两个思路:一是利用先进调制格式提高单符号所能承载的信息比特数,在不改变波特率的基础上提高传输速率,进而完成频谱效率的提升。这是目前较为常用的方式,但其也有一定的弊端。当单符号上承载的比特数较大时,传输后的星座图难以区分,需利用一系列均衡算法才能恢复出原始信号,增加了系统运算的复杂度和操作难度。二是利用整形技术对频谱进行整形,在速率不降低的同时压缩频宽,达到了提升频谱效率的目的,但这种方式会受到 Nyquist 采样定理的限制,未来的发展难度较高。故想要进一步提升频谱效率,可能需要引用新的复用方式,如模分复用、轨道角动量复用等,需从新的维度上寻求突破。

## 2.2 相干接收机简化

利用相干接收技术是 UDWDM-PON 的一大特点,该技术具有较高的接收机灵敏度、固有频率选择性和线性检测能力,可以有效还原出光信号的振幅、频率、相位等信息。图 3 给出传统偏振分集相干接收机,由 1 个本振光源 (LO Laser)、2 个偏振分束器 (PBS)、2 个  $90^\circ$  混频器 ( $90^\circ$  Optical Hybrid)、4 个平衡探测器 (BPD) 以及模数转换器 (ADC) 和数字

信号处理组件 (DSP) 组成。信号光经过 PBS 后分成两个相互正交的偏振状态,与同被偏振分束的本振光在  $90^\circ$  混频器中混频,将 I/Q 信号进行分离,并得到与信号光特征一致的中频信号,随后通过平衡探测器转化为电信号,经过模数转换和数字信号处理,还原出发射端发送的信号。由于相干接收机中的光生电流大小与信号光和本振光的功率乘积成正比,故可以通过增大本振光源的功率来提高相干接收机的接收灵敏度。在相同误码率的条件下,相干接收机的接收灵敏度相比于 IM-DD 接收机,提高了数十倍甚至更高,因此利用相干接收技术的 UDWDM-PON 可以实现高达几十 dB 的功率预算。并且由于系统只能响应混频得到的中频信号,故可以通过调整本振光源的波长来选择接收信号的波长,避免了窄带宽滤波器的使用。传统的偏振分集相干接收机可以很好地还原出高速信号,但光接入网是一个对成本非常敏感的应用场景,传统相干接收机由于使用的光器件数目较多,结构复杂,难以实际商用。故研究人员针对降低相干接收机成本做出大量研究,提出了多种简化的相干接收机方案。

2012年,复旦大学余建军研究团队<sup>[12]</sup>利用两个 BPD 和两个 ADC 完成偏振分集的相干接收,如图 4

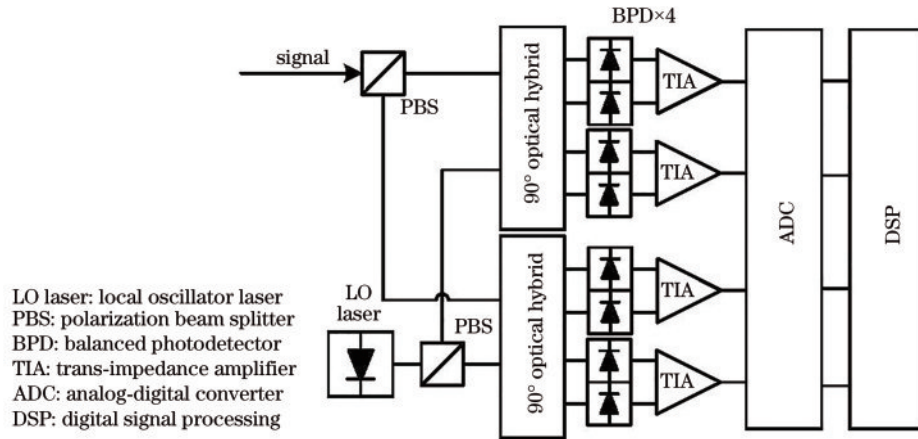


图 3 传统偏振分集相干接收机

Fig. 3 Traditional polarization diversity coherent receiver

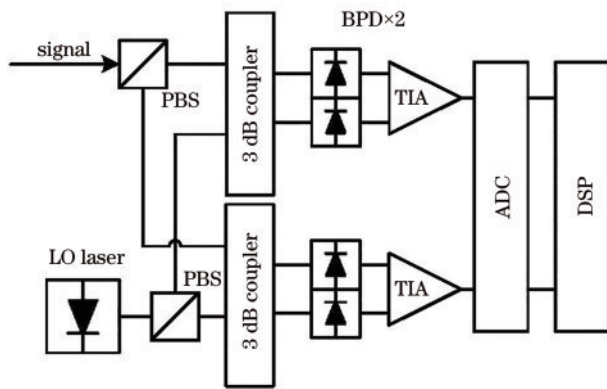


图 4 使用两个 BPD 的简化相干接收机结构图

Fig. 4 Structure diagram of simplified coherent receiver using two BPDs

所示,信号光和本振光都进行偏振分束,然后在耦合器中完成混频,混频后经过光电转换、模数转换和数字信号处理,解析出原始信号。值得注意的是这种简化方案无法直接分离出 I/Q 信号,必须在后续的数字信号处理中将中频信号下变频到基带,并添加 I/Q 分离模块才能实现。这种简化方案为后续进一步研究提供了参考和依据,即在接收端乃至发射端使用特殊的数字信号处理,代替硬件完成接收过程中的必要处理,通过减少硬件使用数量来降低接收机成本,简化了接收机结构。

伦敦大学 Savory 研究团队<sup>[13]</sup>将结构进一步简化,如图 5 所示,无须使用调节偏振态的硬件设备,仅使用单个 BPD 和单个 ADC 即可实现双偏振信号的接收。实现这一成果的关键是在发射端引入 Alamouti 偏振时间分组编码(PTBC)技术,对准备调制的信号进行了预处理。通过 PTBC 处理,信号符号被分配到不同时间组上,且组于组之间相互正

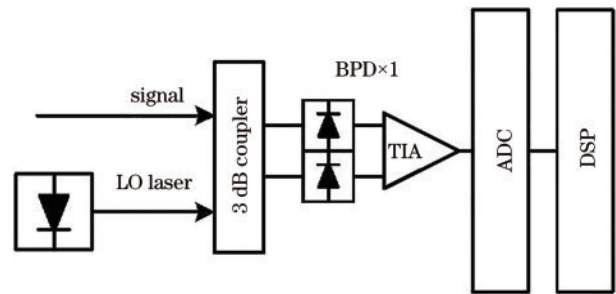


图 5 使用一个 BPD 的简化相干接收机结构图

Fig. 5 Structure diagram of simplified coherent receiver using a BPD

交,之后调制到相互正交的偏振态上,使得调制后的光信号时时正交。由于不同偏振态上搭载的信号是在不同的时间组上,因此可以使用单个 BPD 完成光电检测,恢复出不同偏振态上的信号。同样,由于不能直接进行 I/Q 分离,后续需要复杂的数字信号处理。除此之外,这种方案由于采用 PTBC 处理,信号添加了 50% 的冗余,可使达到的频谱效率减半。

除了上述用复杂的数字信号处理来减少相干接收机中硬件使用数量的思路外,研究人员还尝试用结构简单的光器件代替原有的复杂光器件,寻找能够替代传统结构的新方案。

2014 年,意大利圣安娜高等研究学院的 Ciaramella 教授<sup>[14]</sup>提出一种基于 3×3 耦合器的低成本偏振独立相干接收机方案,用 3×3 耦合器实现 120°混频,代替传统复杂的 90°混频器,如图 6 所示。该方案有两种形式:图 6(a)是将本地振荡光进行偏振分束后与信号光在 3×3 耦合器中完成混频;图 6(b)则是先将信号光进行偏振分束,混频之后再

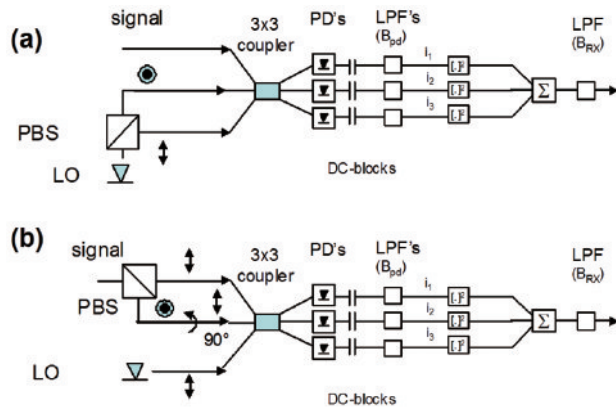


图 6 Ciaramella 提出的低成本偏振独立相干接收机<sup>[14]</sup>。

(a) 第一种形式; (b) 第二种形式

Fig. 6 Low cost polarization independent coherent receiver proposed by Ciaramella<sup>[14]</sup>. (a) Type 1; (b) type 2

通过光电探测器(PD)完成光电转换。两种形式都能得到信号光的中频形式,之后经过隔直流、低通滤波、乘方求和等处理后还原出原始信号。随后在光接入网的实验中,利用简化的相干接收机,完成了  $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  振幅键控信号的高灵敏度接收<sup>[15]</sup>,为 TDM-PON 向 UDWDM-PON 转化提供了一种平滑过渡选项。这种方案相较于传统的偏振独立相干接收机,节省了大量光电器件,可以大幅降低接收机成本,并且在模拟域就完成了信号处理,无须运用高速模数转化器和数字信号处理,进一步降低了系统成本和复杂度。但由于乘方处理会丢失信号的相位信息,这种接收机只能完成振幅调制信号的接收,对于  $M$ -PSK、 $M$ -QAM 等包含相位信息的高阶调制格式不适用,这就意味着该接收机存在着频谱效率不足的弊端。

为了解决相位信息丢失的问题,西班牙加泰罗尼亚理工大学 Tabares 等<sup>[16]</sup>放弃了在模拟域处理的方式,将经过光电转换的模拟电信号使用 ADC 转换成数字信号,保证信号中仍包含相位信息,最后利用数字信号处理完成信号的解析,实现了差分相移键控(DPSK)信号的接收。但这种偏振独立相干接收机不能同时进行两个偏振态的接收,若是接收偏振复用信号,需要使用两套相同设备分别接收<sup>[17]</sup>,如图 7 所示。图 7 中虽然使用了两套硬件设备,但相较于传统的偏振分集相干接收机而言,不仅混频器得到了简化,还少用了 2 个 PD 和 4 个 ADC,大幅降低了接收机的成本,但其中的 IQ 恢复模块需用特殊的差动放大器模拟电路来实现。除了用  $3 \times 3$  耦合器这种方式外,日本 KDDI 公司

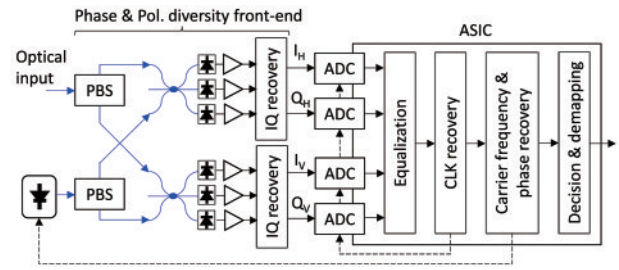


图 7 Tabares 等提出的偏振分集相干接收机<sup>[17]</sup>

Fig. 7 Polarization diversity coherent receiver proposed by Tabares et al<sup>[17]</sup>

Ishimura 等<sup>[18]</sup>还提出基于斯托克斯分析仪进行相干接收机简化的方案,该方案也节省了 2 个 PD 和 4 个 ADC,除此之外,在接收机的输入端仅使用单个 PBS 就实现了偏振态的分离。但弊端在于其尺寸较大,不便于集成。

上文介绍讨论了余建军团队、Savory 团队、Ciaramella、Tabares 团队和 Ishimura 团队的 5 种简化方案。其中硬件结构最为简化的是 Savory 团队的方案,仅使用单个 BPD 和单个 ADC 即可实现偏振复用相干接收,并且该方案无须使用 PBS,可以大幅提升接收机集成度,但这种简化是由高复杂性的 DSP 和引入 50% 冗余换取的;Ciaramella 方案在模拟域完成信号处理,避免了 ADC 和 DSP 的使用,降低了系统复杂度,但其只能对调幅信号进行解调,频谱效率受到限制;故 Savory 团队方案和 Ciaramella 方案更适用于低速场景。余建军团队方案、Tabares 团队方案和 Ishimura 团队方案虽然系统简化程度都不是很高,但却继承了传统相干接收的优势,故其更适用于高速应用场景。

目前相干接收机的简化,主要通过利用复杂的数字信号处理来换取相干接收机器件数目的减少,或者使用低成本结构简单的新型器件来代替传统相干接收机中的复杂器件。但从长远来看,用复杂数字信号处理换来的简化将会受到严重限制,主要原因为复杂的信号处理必将带来巨大的计算量,这对接收端的处理器性能要求较高。同时也需要用到高速、高精度的 ADC 和 DSP 芯片,这将导致接收机成本和功耗的增加,与简化相干接收机的初衷相矛盾。相反,随着光子技术的不断成熟,低成本的光器件不断被发明制造,在光域上实现接收机简化是一个极具研究价值的方向。

### 2.3 光子集成器件应用

光子集成器件的开发和应用可以有效地提升

系统性能,同时有着降低成本、减小收发机尺寸、降低器件功耗等优点,故应用光子集成器件可以大幅提高 UDWDM-PON 的商用价值。2014 年,法国巴黎 Erasme 等<sup>[19]</sup>通过在一片磷化铟(InP)衬底上同时生成电吸收调制器(EAM)和分布反馈激光器

(DFB),开发一种单片集成的双电吸收调制激光器(DEML),如图 8 所示。DEML 可以向两个方向上输出单模激光,并且 EAM 和 DFB 可以分别进行振幅调制(AM)和频率调制(FM),通过多次实验和仿真,证明其在光接入网中将有不错的应用前景。

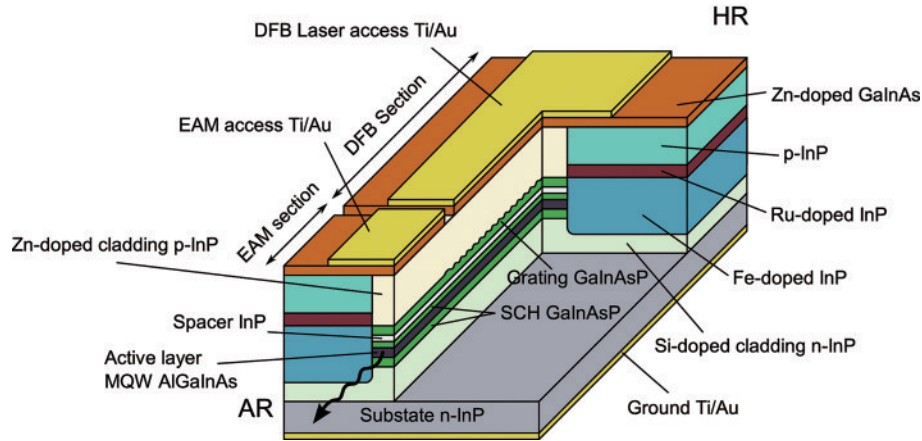


图 8 双电吸收调制器(DEML)模型<sup>[19]</sup>

Fig. 8 Model of dual electric absorption modulator(DEML)<sup>[19]</sup>

2015 年,西班牙加泰罗尼亚理工大学 Prat 团队<sup>[20]</sup>首次将 DEML 应用在 UDWDM-PON 系统中,如图 9 所示,将 DEML 中的 DFB 激光器用作下行传输的本振光源,使其作为相干接收机的一部分与下行信号进行混频,同时用 EAM 完成上行信号的调制和发射,使 ONU 的结构得到简化。实验完成了下行  $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  DPSK 信号的相干接收和上行  $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  NRZ 信号的发射,在 12.5 GHz 信道间

隔条件下,信号经过标准单模光纤中双向传输 50 km 后,下行链路和上行链路的接收灵敏度分别可达  $-32.4 \text{ dBm}$  和  $-38 \text{ dBm}$ 。随后该团队又尝试对上行信号进行单边带调制(SSB)来提升系统性能<sup>[21]</sup>,结果发现双向传输中上行链路的接收灵敏度可以提升到  $-41.6 \text{ dBm}$ ,性能的大幅提升是由于单边带调制只占用一半带宽,从而减小了双向传输中后向散射的干扰。

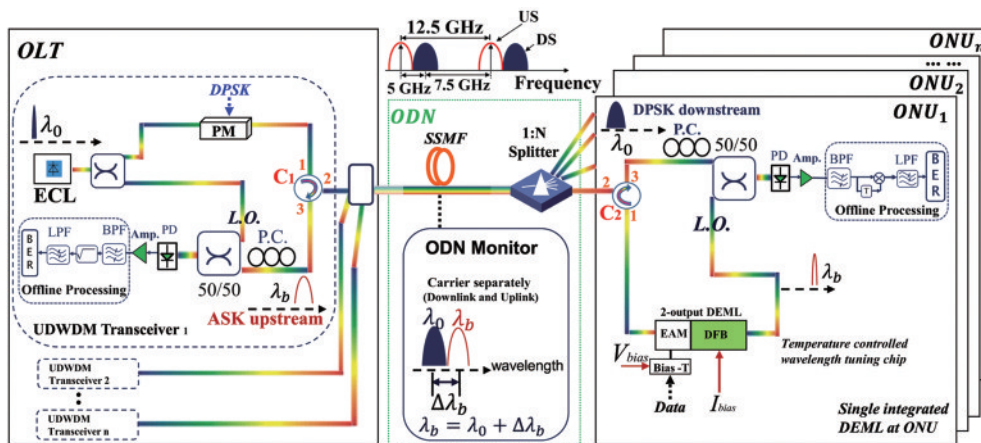


图 9 利用 DEML 完成 UDWDM-PON 双向传输<sup>[20]</sup>

Fig. 9 UDWDM-PON bidirection transmission completed by DEML<sup>[20]</sup>

与此同时,Prat 团队<sup>[22-23]</sup>研究了利用 DFB 直接调制 DBPSK 和 DQPSK 信号,避免使用外调制器,实现了 ONU 简化。但 DFB 进行相位调制的时候,会产生多余的强度调制(IM),这将对信号质量造成

很大影响。为补偿多余 IM 对性能的损失,他们提出利用 DEML 完成直接相位调制的时候,对多余的强度调制进行抑制,实现了系统性能的提升<sup>[24]</sup>。具体实现过程为:在用 DFB 进行直接相位调制的同

时,在 EAM 上调制相反的数据,使它们调制产生的强度刚好相反,以此来抵消 DFB 相位调制时剩余 IM 带来的不利影响。同时为了使他们的调制同步,使用移相器进行对准。采用这种方式实现的 ONU 简化,性能得到明显改善,接收灵敏度分别提高了 2.5 dB(2.5 Gbit·s<sup>-1</sup>)和 4 dB(5 Gbit·s<sup>-1</sup>)。

除此之外,利用 DEML 进行高阶调制的研究也在进行,将 DEML 中的 DFB 和 EAM 分别调制 DQPSK 信号和非归零的 ASK 信号,组合形成 8-APSK 的高阶调制信号<sup>[25]</sup>,在没有使用外调制器的情况下,实现了频谱效率的成倍提升,并且在传输速率为 7.5 Gbit·s<sup>-1</sup>时,接收灵敏度可以达到 -42.5 dBm,比传统的 8-DPSK 提升了 4 dB 以上。

除了 DEML 的应用外,其他光子集成器件也被不断开发引用,例如将 DFB 与半导体光放大器(SOA)集成在一起,使其在参与下行相干接收的同时,完成对上行信号的发射与放大<sup>[26]</sup>。从目前的发展来看,UDWDM-PON 中的光子集成应用才初具规模,随着光集成技术的发展和系统成本的进一步控制,应用光子集成器件是大势所趋。

### 2.4 数字信号处理优化

由于信号在光纤中传输会受到色散和非线性效应的影响,接收信号的振幅、相位和频率会发生一定程度的畸变,接收机不能直接检测出原始信号,故需要利用数字信号处理进行色散和非线性效应的补偿,以及对时钟、相位、频率等特征进行恢复。发射端的处理主要有信号编码、符号映射、预均衡<sup>[17]</sup>等。接收端处理主要是信号经过高速模数转换后进行的正交归一化、时钟恢复、自适应均衡、载波频偏估计、相位恢复、符号判决等<sup>[9]</sup>。但复杂的数字信号处理会增加计算难度,增大收发机功耗,其中自适应均衡和载波恢复占 DSP 总功耗的 66% 之多<sup>[27]</sup>。故数字信号处理的优化程度直接决定了信号传输的质量和系统成本。研究人员针对数字信号处理的优化也做了一些研究。

现场可编程门阵列(FPGA)可以通过程序控制内部的逻辑器件,与专用集成芯片(ASIC)相比,极大地提升了实时数字信号处理的可操作性,降低了信号处理的开发成本,故近年来基于 FPGA 的数字信号处理应用越来越广泛<sup>[28-32]</sup>。2018 年,西班牙加泰罗尼亚理工大学 Tabares 等<sup>[30]</sup>针对内差 PAK 接收机,提出了一种利用 FPGA 实现的简化版载波恢复算法。载波恢复算法由频率估计(FE)和相位恢

复(PR)两部分组成,如图 10 所示,FE 和 PR 都需用一个延时复共轭模块来实现差分相位的提取。传统的载波恢复算法中 FE 和 PR 是单独进行的,故传统算法中存在硬件重复使用的问题。简化版载波恢复算法将 FE 和 PR 的顺序调转,通过共享同一个延时复共轭模块,简化了硬件结构,优化了算法进程。这种算法与传统载波恢复相比,虽然其复杂度降低了 23%~25%,但却必须使用查找表(LUT)和  $M$  次幂运算,额外占用了 FPGA 的内存和时钟进程。为了进一步优化数字信号处理算法,该团队<sup>[32]</sup>又提出了一种无需 LUT 和  $M$  次幂运算的载波恢复算法,如图 11 所示,该算法利用简单的数学运算完成 FE 中的频偏补偿,避免了 LUT 和  $M$  次幂运算的使用,在原有基础上硬件需求降低 40%~42%,时钟进程减少 61%,功耗降低 85%。并且通过在 6.25 GHz 信道间隔的低成本 UDWDM-PON 系统

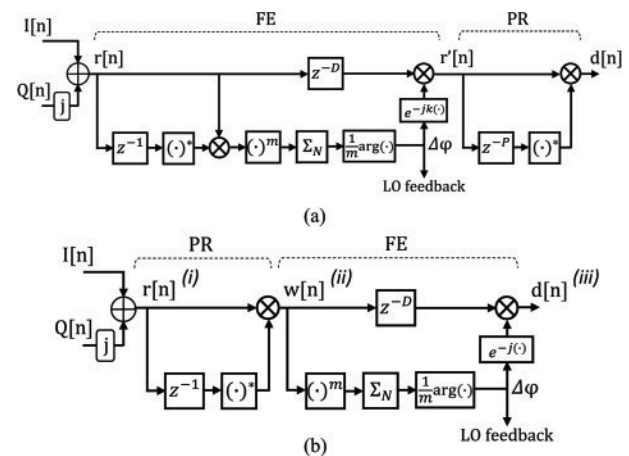


图 10 两种载波恢复算法<sup>[30]</sup>。(a)传统的载波恢复算法；(b)简化的载波恢复算法  
Fig. 10 Two kinds of carrier recovery algorithms<sup>[30]</sup>. (a) Traditional carrier recovery algorithm; (b) simplified carrier recovery algorithm

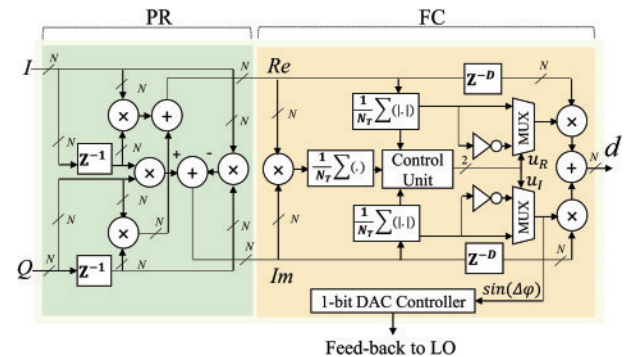


图 11 无需 LUT 的载波恢复算法<sup>[32]</sup>  
Fig. 11 LUT-free carrier recovery algorithm<sup>[32]</sup>

中的测试表明,此改进的载波恢复算法在 1 dB 灵敏度损失的情况下,可以容忍 700 kHz 的频率抖动,频率抖动容忍度是传统载波恢复算法的 14 倍。但以上两种改进的载波恢复算法都是基于 DPSK 内差相干接收机开发的,其兼容性和可移植性较弱。

未来的高速 UDWDM-PON 系统不可避免地会使用到数字信号处理<sup>[33]</sup>,利用操作性更强的现场可编程器件进行设计和调试,可以有效降低开发成本。除此之外,未来对于数字信号处理的优化,将主要从提升系统性能,降低运算复杂度、硬件需求和功率消耗等方面入手。

### 3 结束语

UDWDM-PON 凭借其在用户数量和传输容量方面的优势,被认为是下一代无源光网络的有力竞争者,但由于系统较为复杂,成本较高,限制了其在光接入网中的商业应用。研究人员通过简化相干接收机结构来降低系统复杂度,从目前的研究成果来看,利用复杂数字信号处理换取的相干接收机简化,会引入大量的计算,对 DSP 芯片的要求较高,导致发展受限;而利用低成本新型光器件来实现的相干接收机简化,将随着光器件的成熟度提高而快速发展。应用光子集成器件可以大幅降低 UDWDM-PON 系统的尺寸和功耗,但这方面的研究目前还处于初期尝试阶段,没能大规模展开。基于 FPGA 的数字信号处理具有很高的设计灵活性,这为通过优化数字信号处理来降低系统功耗提供了便利。除此之外,提高频谱效率可以进一步提升用户数量和传输容量,以达到密集接入和降低平摊成本的目的,但利用高阶调制格式会增加信号恢复的难度,利用频谱压缩算法将会受到 Nyquist 采样定理的限制,故引入新型复用方式或许是未来大幅提高频谱效率的关键。综上所述,UDWDM-PON 的未来主要研究方向是:在提升系统性能的同时,简化结构,降低成本,突破其在光接入网中应用的商业壁垒。

### 参 考 文 献

- [1] Muciaccia T, Gargano F, Passaro V. Passive optical access networks: state of the art and future evolution[J]. *Photonics*, 2014, 1(4): 323-346.
- [2] Phil M. What applications are driving higher capacity in access? [C] //2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [3] El-Nahal F, Hanik N. Technologies for future wavelength division multiplexing passive optical networks[J]. *IET Optoelectronics*, 2020, 14(2): 53-57.
- [4] Rohde H, Smolorz S, Gottwald E, et al. Next generation optical access: 1 Gbit/s for everyone [C] //2009 35th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 2009, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 2009: 1-3.
- [5] Li Y, Deng Z H, Hu R, et al. Low-cost coherent UDWDM-PON by hybrid DBPSK/ASK-2 modulation [J]. *Optics Communications*, 2016, 370: 222-225.
- [6] Zhu M, Liu J H, Hsueh Y T, et al. Terabit optical access networks using ultra-dense WDM and coherent technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8331: 83310G.
- [7] Dong Z, Chien H C, Yu J J, et al. Very-high-throughput coherent ultradense WDM-PON based on Nyquist-ISB modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 763-766.
- [8] Luo M, Li J, Zeng T, et al. Real-time coherent UDWDM-PON with dual-polarization transceivers in a field trial[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(2): A166-A173.
- [9] Ferreira R M, Shahpari A, Reis J D, et al. Coherent UDWDM-PON with dual-polarization transceivers in real-time [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 909-912.
- [10] Velásquez J C, Tabares J, Cano I N, et al. 1.25-2.5 Gb/s simple Nyquist transmitters for coherent UDWDM-PON with enhanced spectral efficiency [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2018, 37(4): 219-228.
- [11] Xiong C X, Tang M, Ke C J, et al. Experimental demonstration of ultra-dense WDM-PON with seven-core MCF-enabled self-homodyne coherent detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-7.
- [12] Zhang J W, Dong Z, Yu J J, et al. Simplified coherent receiver with heterodyne detection of eight-channel 50 Gb/s PDM-QPSK WDM signal after 1040 km SMF-28 transmission [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4050-4052.
- [13] Erkılınç M S, Lavery D, Shi K, et al. Polarization-insensitive single-balanced photodiode coherent receiver for long-reach WDM-PONs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 2034-2041.
- [14] Ciaramella E. Polarization-independent receivers for



- low-cost coherent OOK systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(6): 548-551.
- [15] Artiglia M, Corsini R, Presi M, et al. Coherent systems for low-cost 10 Gb/s optical access networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(15): 3338-3344.
- [16] Tabares J, Polo V, Prat J. Polarization-independent heterodyne DPSK receiver based on  $3 \times 3$  coupler for cost-effective udWDM-PON[C] // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [17] Tabares J A, Ghasemi S, Velásquez J C, et al. Coherent ultra-dense WDM-PON enabled by complexity-reduced digital transceivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1305-1313.
- [18] Ishimura S, Nishimura K, Nakano Y, et al. Polarization-diversity Stokes-analyzer-based coherent receiver[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 9071-9078.
- [19] Erasme D, Anfray T, Chaibi M E, et al. The dual-electroabsorption modulated laser, a flexible solution for amplified and dispersion uncompensated networks over standard fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(21): 4068-4078.
- [20] Chu G Y, Cano I N, Kazmierski C, et al. First demonstration of monolithically integrated dual output DEML for full-duplex UDWDM-PON ONU [C] // 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [21] Chu G Y, Cano I N, Polo V, et al. Monolithically integrated dual-output DEML for full duplex DPSK-ASK and DPSK-SSB ONU in ultra-dense channel spaced access network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 2042-2048.
- [22] Cano I N, Lerin A, Polo V, et al. Direct phase modulation DFBS for cost-effective ONU transmitter in udWDM PONs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(10): 973-975.
- [23] Cano I N, Lerin A, Prat J. DQPSK directly phase modulated DFB for flexible coherent UDWDM-PONs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 35-38.
- [24] Chu G Y, Cano I, Polo V, et al. Application on minimizing residual AM in DPSK UDWDM-PON ONU by integrated dual-EML [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1-7.
- [25] Camilo Velásquez J, Tabares J, Prat J. Differential 8-APSK monolithically integrated dual-EML transmitter for flexible coherent PONs [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2760-2763.
- [26] Chu G Y, Maho A, Cano I, et al. First demonstration and field trial on multi-user UDWDM-PON full duplex PSK-PSK with single monolithic integrated dual-output-DFB-SOA based ONUs [J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4696-4699.
- [27] Neto L A, Maes J, Larsson-Edefors P, et al. Considerations on the use of digital signal processing in future optical access networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(3): 598-607.
- [28] Ferreira R M, Reis J D, Amado S B, et al. Performance and complexity of digital clock recovery for nyquist UDWDM-PON in real time [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(21): 2230-2233.
- [29] Ferreira R M, Reis J D, Rossi S M, et al. Coherent nyquist UDWDM-PON with digital signal processing in real time [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 826-833.
- [30] Tabares J, Ghasemi S, Polo V, et al. Simplified carrier recovery for intradyne optical PSK receivers in udWDM-PON [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(14): 2941-2947.
- [31] Luo M, Wu D Y, Li W Z, et al. 100 Gb/s ( $4 \times 25$  Gb/s) real-time coherent UDWDM-PON with a large power budget [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(2): A204-A213.
- [32] Ghasemi S, Tabares J, Polo V, et al. LUT-free carrier recovery for intradyne optical DPSK receivers in udWDM-PON [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1608-1613.
- [33] Teixeira A, Lavery D, Ciaramella E, et al. DSP enabled optical detection techniques for PON [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(3): 684-695.