

# 大容量无源光网络关键技术

李博<sup>1</sup>, 唐玉春<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 装备发展部军代局驻上海地区军代室, 上海 200437)

**摘要:** 针对人们对接入网带宽需求的不断增长趋势, 介绍了开展超 100 Gb/s 大容量光接入网研究的重要性。着重分析了实现大容量光接入网的 3 个关键技术, 包括高频谱效率的先进调制格式、大容量空分复用 (SDM) 和高灵敏度的相干 / 自相干探测技术, 分别介绍了这些技术在国内外的研究进展, 并指出了相应的技术难点。最后, 展望了未来超大容量光接入网的研究方向。

**关键词:** 无源光网络; 先进调制格式; 空分复用; 相干探测

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)10-0032-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.007

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Key technologies of large capacity passive optical network

LI Bo<sup>1</sup>, TANG Yuchun<sup>2</sup>

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Military Agency of the Ministry of Equipment Development stationed in Shanghai, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** In view of the increasing demand for bandwidth of access network, the importance of research on over 100 Gb/s large capacity optical access network is introduced. Three key technologies for large capacity optical access networks, including advanced format of high spectral efficiency, large capacity space division multiplexing (SDM) technology and high-sensitivity coherent/self-coherent detection are emphatically analyzed. The research progress of these technologies at home and abroad is introduced, and the corresponding technical difficulties are pointed out. Finally, the future research directions of ultra-large capacity optical access network are prospected.

**Key words:** passive optical network; advanced modulation format; space division multiplexing; coherent detection

### 0 引言

随着云计算、万物互联、高清/极清视频和虚拟现实等大数据量业务的兴起和普及, 接入网流量不断增长, 现有光纤通信系统面临巨大的扩容压力。被称为“最后一公里”的光接入网是距离用户最近的网络入口, 它的容量和带宽最终将成为影响用户上网体验的关键因素。在 4G、5G 无线技术及物联网业务的持续推动下, 下一代光接入网将朝着低成本、大容量、长距离、低时延和多业务的方向发展。无源光网络 (PON) 作

收稿日期: 2019-06-18。

**作者简介:** 李博 (1980-), 男, 湖北崇阳人, 本科, 工程师, 主要研究方向为光通信。主持完成某基础产品研发条件建设项目、某研制保障条件建设项目和某总体规划建设试点项目的立项论证工作, 获中电集团公司及所级奖项 14 项。



为宽带光接入的低成本解决方案, 最近十多年来得到广泛研究和大量部署。在移动前传和回传等大数据量业务的驱动下, 超 100 Gb/s PON 将在提供大容量、低时延数据传输方面发挥更加重要的作用。实现超 100 Gb/s PON 的关键是将现有通信技术和开创性技术有机地结合起来, 提高数据传输速率, 克服传输损伤, 实现长距离大容量光传输。文献[1]采用高频谱效率的先进调制格式、高灵敏度的相干探测及大容量的空分复用 (SDM) 技术结合成熟的波分复用技术和超强抗损伤能力的数字信号处理 (DSP) 技术, 可以极大提高长途光纤通信系统的传输容量。本文将综述这种超大容量 PON 的关键技术, 即高频谱效率的先进调制格式、大容量 SDM 和高灵敏度的相干/自相干探测技术。

### 1 高阶调制格式技术

现有的 PON 标准中采用的调制格式都是简单的

二进制振幅键控(OOK)格式,其频谱效率较低,当速率上升到 25 Gb/s 以上时,系统性能将明显受限于器件的带宽,而 C 波段的光纤色散又会进一步制约其传输距离,因此要实现超 100 Gb/s 速率 PON 传输需要采用频谱效率更高的先进调制格式。从学术界和产业界研究来看,适合中短距传输的高阶调制格式主要包括四进制脉冲幅度调制(PAM4)、直接探测-正交频分复用(DDO-OFDM)/离散多音调制(DMT)和无载波幅度相位(CAP)调制。2014 年,华为公司报道了在 10 Gb/s 商用的光发射组件(TOSA)和光接收组件(ROSA)上采用 PAM4 格式结合电域均衡算法实现了 4×25 Gb/s 的 30 km 下行传输<sup>[2]</sup>,为 100 Gb/s PON 商用化指明了方向。文献[3]采用低复杂度的稀疏 Volterra 均衡技术和色散补偿技术,可以进一步实现长达 80 km 的 100 Gb/s 长距接入。香港理工大学采用 25 Gb/s 电吸收调制激光器(EML)和雪崩光电二极管(APD)实现了单波 56 Gb/s PAM4 信号 O 波段传输 60 km<sup>[4]</sup>,通过接收端均衡算法优化,PAM4 的速率还可以进一步提升到单波 140 Gb/s<sup>[5]</sup>。还有研究者试图在 PON 中采用更高阶的 PAM8 格式<sup>[6]</sup>,但其对信噪比要求太高,难以扩展应用。CAP 调制技术是在 2 路 PAM 信号的基础上利用正交的滤波器组来实现正交幅度相位调制(QAM)信号传输,具有更高的频谱效率。文献[7]在商用垂直腔面发射激光器(VCSEL)上采用 CAP 调制格式,实现了频谱效率为 4 bit/s/Hz 的波分复用无源光网络(WDM-PON)传输。复旦大学的研究进一步表明,采用多波带 CAP 调制,还可以进一步提升用户数量,总下行容量超过 500 Gb/s<sup>[8]</sup>。

与单载波调制格式相比,多载波 OFDM 不仅具有较高的频谱效率,还能抗色散引起的码间干扰(ISI),同时还具有很好的灵活性,可以根据信道的频率响应灵活地选择调制编码方式和功率分配方式,非常适用于未来带宽按需分配的灵活光接入网络。文献[9]则详细分析和论证了 OFDM 技术用于下一代大容量光接入网中的优缺点、可行性和应用前景。美国 NEC 公司提出了基于 WDM 和 OFDM 技术的 T 比特大容量光接入网,实验验证了对称 1 Tb/s 的大容量光接入,通过 OFDM 子带复用,支持的用户数量高达 800 个,传输距离长达 90 km<sup>[10]</sup>。这为将来实现城域、接入网融的大容量长距离传输提供了参考方案。

对于这些调制格式的优劣问题,也有文献从理论或实验中比较了它们的性能和成本,包括速率、传输距离、算法/硬件复杂度、收发机带宽、接收机灵敏度和

系统成本等方面<sup>[11-13]</sup>。总体而言,不同调制格式的信号在接入网场景中性能上各有优劣,但 PAM4 和 OFDM 这 2 种调制格式在目前 100/400 Gb/s 应用需求下的研究最成熟。一般而言,不考虑复杂的均衡技术,高速单载波 PAM4 信号传输距离限制在 20 km 内,而基于多载波调制的 DDO-OFDM 可以提供更灵活的速率,支持更长距离的传输,同时作为一种多址接入技术,也能支持更多的用户数量。因此,对于长距离(>80 km)、超 100 Gb/s 的光接入网,OFDM 调制格式更具优势。不过,如何利用低成本的器件以较低的复杂度完成这些高速信号的调制与解调将是高阶调制格式在光接入网中得到推广和应用所需要考虑的重要问题。

## 2 新型复用技术

为了提高光纤通信系统的容量,人们试图从 5 个正交的物理维度来实现信号的调制或复用,包括光信号的偏振态、频率/波长、复振幅(幅度和相位)、时间和空间。通过多个维度的复用(如时分复用、波分复用和偏振复用)联合高阶 QAM,人们已经将单模光纤的传输容量提升到 101.7 Tb/s<sup>[14]</sup>,逼近香农理论非线性极限,单模光纤容量危机凸显。因此,人们开始探索 SDM 技术,利用多芯光纤(MCF)或少模光纤(FMF)甚至多芯少模相结合的新型光纤提供多个独立的物理信道来并行传输数据,在同一根光纤的不同芯层、不同模式中同时传输多路信号流,不仅可以通过接收端 DSP 算法或者特殊设计的光纤来消除不同空间信道间的串扰,同时还兼容传统密集波分复用技术和相干光探测,因而极大地增强了光传输系统的频谱效率,可将单根光纤的传输容量提升到 2.15 Pb/s<sup>[15]</sup>。SDM 技术的优势不仅可以增加光纤通信容量,还可以结合紧凑的 SDM 连接器件,如多芯光纤扇入/扇出耦合器和 FMF 模式复用/解复用器,在大规模光电集成的推动下,实现低成本、低功耗、大容量和高密度的光互连与光接入。因此,SDM 技术最近也逐渐从长距离相干光通信渗透到中短距离光接入网系统中。基于 MCF 和 FMF,人们开始探索新型超大容量光接入网的架构,并取得一系列研究成果。其中,在多芯光纤接入网方面,OFS 公司采用低串扰、低损耗的 7 芯光纤及拉锥法制备的多芯光纤连接器实现了基于 SDM 的吉比特无源光网络(GPON),采用 OOK 调制格式,传输速率为上/下行对称 2.5 Gb/s,最多可支持 7×64 个光网络单元(ONU)用户,传输距离为 11.3 km<sup>[16]</sup>。结合低串扰的 7 芯光纤和高阶调制格式,华中科技大学与长飞公司合作提出

并实验展示了基于波分-空分混合复用(WDM-SDM)的新型光接入网架构,同时在光接入网传输容量方面实现了一系列的突破:①首次实现了兼容移动回传业务的总下行速率为300 Gb/s的大容量多芯光纤光接入网;②通过将下行调制格式升级到16正交幅度调制-正交频分复用(16QAM-OFDM),进一步展示了这种接入网具有T比特的容量扩展潜力<sup>[17]</sup>;③基于局端光频梳的波长集中分发机制,实现了每用户1 Gb/s速率的双向对称接入<sup>[18]</sup>。上海交通大学与华中科技大学合作,将多芯光纤用于时分和波分复用无源光网络(TWDM-PON)扩容,采用10 Gb/s级别的低成本器件就实现了700/280 Gb/s非对称大容量光接入<sup>[19]</sup>,为下一代100 Gb/s EPON的进一步扩容提供了备选方案。

也有将FMF用于光接入网中的报道,提出基于模式复用的无源光网络(MDM-PON)的网络架构<sup>[20,21]</sup>,可以将PON容量提升2~3倍,但是FMF中的模间色散和串扰将成为MDM-PON走向实用的限制因素。相比于FMF,MCF具有更小芯间串扰和近似于普通单模光纤的传输性能,因而更具实用价值。但是,目前报道的基于SDM的光接入网主要采用了最简单的OOK格式,频谱效率不高,并未完全挖掘SDM技术的扩容潜力。因此,如何将新型SDM技术与成熟的WDM技术和低成本高阶调制格式有效地结合起来才是构建基于新型光纤的超大容量光接入网所面临的迫切难题。

### 3 高灵敏度探测技术

按照探测方式,接收机可分为3种:直接探测、相干探测和自相干探测。

◆直接探测遵循平方律检波原理,其输出光电流是光电场的平方,因此它只能探测信号的强度信息,并且通常灵敏度较低,还会受到色散等损伤的限制。

◆相干探测则通过本振光与信号光混频干涉并用平衡探测器来获取信号的振幅、相位及偏振态等完整的光场。它不仅具有较高的灵敏度和频谱效率,而且还可以通过数字均衡技术补偿信号传输损伤,增强传输性能。因而,相干探测一度被引入到光接入网研究中。日本三菱电气公司采用相干探测,实时展示了8波×100 Gb/s偏振复用正交相移键控双向接入能力,功率预算高达39 dB,传输距离可达80 km,这充分证明了相干探测在长距接入网中的应用潜力<sup>[22]</sup>。

◆自相干探测的原理与相干探测基本相同,唯一的区别在于其本振光不是来源于本地接收端,而是与信号源于同一激光器并随之一起传输,在接收端分离

后完成相干混频。由于本振光和信号光之间具有高度的相干特性,它们的频率和相位变化基本完全相同,因而在接收端混频后直接得到基带电信号,而且可以消除激光器的相位噪声。相比于传统的相干探测,自相干具有更低的成本和接收端复杂度,同时也大大放松了对激光器的线宽要求。因此,低成本和低复杂度的自相干探测更加适用于对成本敏感的大容量光接入网。现有的自相干探测方案主要有3种:①利用一个偏振态传输信号,另一个正交的偏振态传输本振光,在接收端偏振分离后再将本振光旋转并与信号光混频干涉<sup>[23]</sup>。这种方式不支持偏振复用信号的传输,会损失一半的频谱效率。②在接收端通过窄带光滤波器分离光载波作为本振光信号,然后与信号进行干涉,恢复信号。一般通过滤波提取出来的本振光的功率和光信噪比(OSNR)都比较低,这会制约这种方案的传输性能。③利用一个独立的空间信道(模式或纤芯)来传输本振光,信号则由其它空间信道传输,这种方案可以极大地利用SDM技术的优点,实现本振和信号的分离<sup>[24-26]</sup>。如北京大学研究组利用少模光纤中的一个高阶模式来传输本振光,基模用于传输信号,ONU端采用自相干探测,实现了4波×40 Gb/s基于正交频复用的偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK-OFDM)信号在55km少模光纤上的传输<sup>[24]</sup>。相比于基于FMF的模分复用自相干系统,基于MCF的自相干传输系统在空间信道隔离度、信道数量方面具有较大的优势,因而更具实用前景。最近,华中科技大学研究团队基于7芯光纤和自相干探测,利用超密光频梳完成PDM-QPSK调制,展示了总下行速率为2.88 Tb/s的超大容量光接入网<sup>[25]</sup>,通过采用基于偏振复用的16正交幅度调制-正交频分复用(PDM-16QAM-OFDM)的多载波调制格式,下行容量进一步提升到4.8 Tb/s,激光器的线宽可容许到10 MHz量级<sup>[26]</sup>,这证明了低成本分布式反馈激光器(DFB)应用于大容量相干系统的可行性。但是,在自相干探测接入网中,如何有效控制本振光的偏振态是其走向实用化的障碍之一。

### 4 结束语

大数据业务日新月异,接入网容量需求增长永不停歇,探索并研究支持下一代超100 Gb/s光接入网的关键技术至关重要。长远来看,结合低成本的调制技术(高阶调制码型)、大容量的传输媒介(SDM光纤)以及高灵敏度的探测技术(相干/自相干)是实现单ONU 100 Gb/s以上的Tb/s级别超大容量光接入网的必然



选择。随着光子集成技术、新型光纤技术以及高速应用集成电路(ASIC)芯片技术的发展和成熟,这些新的技术能更好地服务于建设低成本、大容量的光接入网。但是,要实现基于高阶调制格式和SDM技术的超密集超大容量长距离相干接入网,低成本波长稳定的可调谐激光器技术、低损耗和串扰的SDM器件的制备技术以及接入网波长分配和管理问题仍值得进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality [J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 345–348.
- [2] ZHANG H, FU S, MAN J, et al. 30 km downstream transmission using  $4 \times 25$  Gb/s 4-PAM modulation with commercial 10Gbps TOSA and ROSA for 100 Gb/sb/s-PON [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9–13, 2014, San Francisco, USA. San Francisco: IEEE, 2014: 1–3.
- [3] ZHOU S, GAO F, YANG Q, et al.  $4 \times 28$  Gb/s PAM4 Long-Reach PON Using Low Complexity Nonlinear Compensation [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 19–23, 2017, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2017: M3H. 4.
- [4] ZHONG K P, ZHOU X, WANG Y, et al. Amplifier-Less Transmission of 56 Gbit/s PAM4 over 60 km Using 25 Gbps EML and APD[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 19–23, 2017, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2017: Tu2D. 1.
- [5] ZHONG K, ZHOU X, GAO Y, et al. 140 Gb/s 20 km Transmission of PAM-4 Signal at  $1.3 \mu\text{m}$  for Short Reach Communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1757–1760.
- [6] YE C, HU X, ZHANG K. Demonstration and Analysis on PAM-4/8, DB-PAM-2/4 and DMT Formatted TDM-PON with 25 Gbps, 40 Gbps, 50 Gbps Capacity per Lane using Economical 10 Gbps [C]//European Conference on Optical Communication, September 18–22, 2016, Dusseldorf, Germany. Dusseldorf: IEEE, 2016: 1–3.
- [7] RODES R, WIECKOWSKI M, PHAM T T, et al. Carrierless amplitude phase modulation of VCSEL with 4 bit/s/Hz spectral efficiency for use in WDM-PON[J]. Optics express, 2011, 19(27): 26551–26556.
- [8] ZHANG J, YU J, LI F, et al.  $11 \times 5 \times 9.3$  Gb/s WDM-CAP-PON based on optical single-side band multi-level multi-band carrier-less amplitude and phase modulation with direct detection [J]. Optics express, 2013, 21(16): 18842–18848.
- [9] CVIJETIC N. OFDM for next-generation optical access networks [J]. Journal of lightwave technology, 2012, 30(4): 384–398.
- [10] CVIJETIC N, CVIJETIC M, HUANG M F, et al. Terabit optical access networks based on WDM-OFDMA-PON[J]. Journal of lightwave technology, 2012, 30(4): 493–503.
- [11] ZHONG K, ZHOU X, GUI T, et al. Experimental study of PAM-4, CAP-16, and DMT for 100 Gb/s short reach optical transmission systems [J]. Optics express, 2015, 23(2): 1176–1189.
- [12] XU X, ZHOU E, LIU G N, et al. Advanced modulation formats for 400 Gbps short-reach optical inter-connection [J]. Optics express, 2015, 23(1): 492–500.
- [13] TAKAHARA T, TANAKA T, NISHIHARA M, et al. Can discrete Multi-Tone reduce the cost for short reach systems?[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22–26, 2015, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2015: W4H. 5.
- [14] QIAN D, HUANG M-F, IP E, et al. 101.7 Tb/s ( $370 \times 294$  Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over  $3 \times 55$  km SSMF using pilot-based phase noise mitigation [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 6–10, 2011, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2011: PDPB5.
- [15] PUTTNAM B, LUIS R, KLAUS W, et al. 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb [C]//European Conference on Optical Communication, September 27–October 1, 2015, Valencia, Spain. Valencia: IEEE, 2015: 1–3.
- [16] ZHU B, TAUNAY T, YAN M, et al. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network [J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11117–11122.
- [17] FENG Z, LI B, 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): 1–9.
- [18] LI B, GAN L, FENG Z, et al. Experimental demonstration of symmetric WDM-SDM optical access network over multicore fiber[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5–10, 2016, San Jose, USA. San Jose: IEEE, 2016: 1–2.
- [19] JI H, YI L, XUE L, et al. 700G/280G SDM-TWDM-PON over 20km Seven-Core Fibre based on 10G-Class Optical Components [C]//Asia Communications and Photonics Conference, November 10–13, 2017, Guangzhou, China. Guangzhou: ACP, 2017: AF3A. 2.
- [20] HU H, ASIF R, YE F, et al. Bidirectional 120 Gbps SDM-WDM-PON with colourless ONU using 10 Gbps optical components without DSP [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 20–24, 2016, Anaheim, USA. Anaheim: IEEE, 2016: 1–3.
- [21] WEN H, XIA C, VELAZQUEZ-BENITEZ A M, et al. First Demonstration of Six-Mode PON Achieving a Record Gain of 4 dB in Upstream Transmission Loss Budget [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 1990–1996.
- [22] REN F, LI J, HU T, et al. Cascaded mode-division-multiplexing and time-division-multiplexing passive optical network based on low mode-crosstalk FMF and mode MUX/DEMUX[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1–9.
- [23] SUZUKI N, YOSHIMA S, MIURA H, et al. Demonstration of 100 Gb/s/λ -based Coherent WDM-PON System Using New AGC EDFA based Upstream Pre-Amplifier and Optically-Superimposed AMCC Function[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1415–1421.
- [24] REIS J D, SHAHPARI A, FERREIRA R, et al. Downstream and upstream Nyquist band optimization for heterodyne coherent PON[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9–13, 2014, San Francisco, USA. San Francisco: IEEE, 2014: 1–3.
- [25] XIONG C, TANG M, KE C, 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.
- [26] 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]. Optics Express, 2017, 25(6): 5951–5961.