

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240003.

光通信系统与网络技术

刘新峰,沈琼霞,郑艳烈,等.光接入网调顶AMCC技术及应用[J].光通信研究,2025(2):240003.

Liu X F, Shen Q X, Zheng Y L, et al. The Research of Overmodulation AMCC for Optical Access Network[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240003.

光接入网调顶 AMCC 技术及应用

刘新峰¹,沈琼霞¹,郑艳烈¹,李明¹,李家辉^{1,2}

(1.烽火通信科技股份有限公司 宽带业务产出线,武汉 430205;2.华中师范大学 计算机学院,武汉 430079)

摘要:【目的】基于调顶技术的辅助管理和控制信道(AMCC)与承载数据业务无关,具有超低时延抖动的优点,契合接入网大带宽、低时延和智能化的发展趋势。文章旨在探讨光接入网中调顶AMCC技术的原理、实现方法和技术验证,深入分析了其在接入网中的新型应用,从而为其在接入网中的进一步研究开发和工程应用提供参考。【方法】文章通过文献综述和实验数据分析,对调顶AMCC的技术原理进行了系统性阐述。研究集中于探讨其在光接入网络中的低成本实现路径,包括直接调制激光器和分光探测器等技术。此外,还分析了调顶AMCC技术在不同接入光网络系统中的应用及其对网络性能的影响,并进一步阐述了相关技术在接入网系统中的多通道监测、反射和光功率推算以及时分复用(TDM)无源光网络(PON)静默窗口规避的应用方法。【结果】研究显示,调顶AMCC技术能在接入网中有效地提供有别于传统方法的支持多通道监测和管理的途径,特别是在第5代移动通信技术(5G)前传承载、光线路在线监测和低时延TDM PON系统中能够较好地应用。调顶AMCC技术能在支撑网络高速率传输的同时,实现对光层通道的感知和管理,尤其在处理TDM PON静默窗口问题上展现了显著的技术潜力。【结论】调顶AMCC技术在一定程度上实现了高速数据和低速信号在接入网中的低成本多维复用,在光接入网中具有广泛应用前景,其在满足对网络的大带宽和低时延通信进行智能化水平管理的同时,还可在光层实现一定程度的感知。文章所提技术的实施有助于提高网络的效率和稳定性,能够顺应第5代固定网络增强(F5G-A)和未来第6代固定网络(F6G)的发展。若能对文章所提技术在PON拓扑结构、更多的调制格式和更多应用场景等方面进行进一步的研究以优化其性能和适应性,将能够推动其大力发展。

关键词:调顶;辅助管理和控制信道;光接入网;静默窗口

中图分类号:TD655 **文献标志码:**A

The Research of Overmodulation AMCC for Optical Access Network

LIU Xinfeng¹, SHEN Qiongxia¹, ZHENG Yanlie¹, LI Ming¹, LI Jiahui^{1,2}

(1. Broadband and Service Application Business Unit, FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China; 2. School of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: 【Objective】The Auxiliary Management and Control Channel (AMCC) based on overmodulation technology is independent of the data service and has the advantage of ultra-low latency jitter, aligning with the development trend of access networks, which feature large bandwidth, low latency, and intelligence. This article aims to explore the principles, implementation methods, and technical verification of overmodulation AMCC technology in optical access networks, and provides an in-depth analysis of its novel applications in access networks. This serves as a reference for further research and development, as well as engineering applications of this technology in access networks. 【Methods】Through a literature review and analysis of experimental data, the article systematically elaborates on the technical principles of overmodulation AMCC. The research focuses on exploring low-cost implementation pathways for it in optical access networks, including technologies such as direct modulation lasers and split detectors. The paper also analyzes the application of overmodulation AMCC technology in different optical network systems and its impact on network performance. It further discusses the application methods of related technologies in access network systems for multi-channel monitoring, reflection, optical power estimation, and the avoidance of Time Division Multiplexing (TDM) Passive Optical Networks (PON) silent windows. 【Results】The study shows that overmodulation AMCC technology can effectively support multi-channel monitoring and management in access networks, distinguishing it from traditional methods. It is particularly applicable in The 5th Generation Mobile Communication Technology (5G) front-haul transmission, optical line reflection monitoring, and low-latency TDM PON systems. This technology supports high-speed network transmission while enabling the perception and management of optical layer channels, demonstrating significant technical potential in addressing TDM PON silent window issues. 【Conclusion】The overmodulation AMCC technology can achieve low-cost, multidimensional multiplexing of high-speed data and low-speed signals in access networks to a certain extent. It has broad application prospects in optical access networks, enhancing the intelligent management level of networks while fulfilling requirements for large bandwidth and low-latency communication. Additionally, it facilitates perception at the optical layer. Implementing this technology can improve network efficiency and stability, meeting the developmental needs of The 5th Generation Fixed Network-Advanced (F5G-A)

收稿日期:2024-03-30; 修回日期:2024-05-30; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:湖北省重点研发计划资助项目(2022BAD166)

作者简介:刘新峰(1973-),男,湖北武汉人。高级工程师,学士,主要研究方向为电子与通信。

通信作者:刘新峰,高级工程师。E-mail:liuxf@fiberhome.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

and The 6th Generation Fixed Network (F6G) in future. Further research on its application in PON structures, more modulation formats, and additional application scenarios could optimize its performance and adaptability, promoting its vigorous development.

Key words: overmodulation; AMCC; optical access network; quiet window

0 引言

近年来,光接入网业务呈现新的发展趋势。如沉浸式交互高清视频及虚拟增强现实类业务需要减少网络抖动和时延,以避免眩晕感。第五代移动通信技术(The 5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)的发展需要大带宽和低时延的接入网来进行中回传承载。同时,网络复杂度的上升对智能运维也提出了新的要求。因此,建设大容量、低时延、智能敏捷及感传算合一的智慧光接入网为大势所趋。

在下一代无源光网络(Next Generation Passive Optical Network 2, NG-PON2)中,国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)G. 989. 2标准下的点对点(Point-to-Point, PtP)波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)无源光网络(Passive Optical Network, PON)部分中对辅助管理和控制信道(Auxiliary Management and Control Channel, AMCC)进行了定义,AMCC用于传递波长分配信息以及操作管理维护数据^[1-4]。在PtP WDM PON中进行透明传输数据时,利用透明AMCC技术将低频调幅信号叠加到高速调制信号上可实现超低时延,将该方法称为调顶(Overmodulation)。调顶AMCC与承载数据业务无关,并且易于在光模块(Optical Module, OM)中实现。

关于调顶的应用业界研究较早。1993年,英国电信(British Telecom, BT)实验室和美国贝尔实验室等开始通过在光网络的站点监测调顶信号来实现在线波长路由跟踪等相关工作;在我国标准《可重构的光分插复用ROADM设备技术要求》中,提及的可重构光分插复用器(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer, ROADM)系统的纯光层波长踪迹解决方案也可通过调顶技术来实现^[5]。因此,对符合接入网低成本和灵活特点的调顶技术及其应用进行研究具有重大意义。

1 光调顶信号收发实现及验证

ITU-T G. 989将WDM PON的AMCC分为透明(Transparent)和转码(Transcoded)两种模式。

其中转码模式是通过系统的通道编码器来进行的,通常是在物理编码子层或者前向纠错(Forward Error Correction, FEC)码子层中设置转码器来实现。对于64B/66B线路编码,设置不同的校验块同步头来区分AMCC中的比特,在10 Gbit/s的WDM PON链路中,AMCC的速率大约为5 Mbit/s^[2]。转码方案因线路编码方式的不同需要使用不同的算法,同时会带来一定的时延和抖动,而且需要芯片进行高速逻辑处理,不同的线路编码需要开发不同的芯片,导致在实际应用中有一定的局限性。而在透明模式下,用户业务数据和AMCC的管理数据直接送到物理媒介相关层,业务接口能够灵活承载多样化的业务,包括各种接口类型、速率、线路编码和FEC方式等,由于没有改变业务数据的编码,不影响业务的时延和抖动,同时具备灵活和适应性强的特点。透明AMCC模式中有一种方案是独立于业务信道的波长进行监控,AMCC和业务数据是两套独立的光收发器^[6],会有额外的成本和功耗。另一种透明AMCC模式是基于调顶的AMCC,该模式能够通过检测到的有效载荷进行低通滤波来恢复低频信号,并将放大后的信号送入阈值检测器进行检测。

在ITU-T G. 989中的调顶透明AMCC模式定义的一种实现方法是数据成帧后的基带再调制(Baseband Overmodulation)方式,即在业务净荷信号之上叠加一个低比特率的AMCC信号,该低速信号对基带信号进行小振幅的幅度调制,调制系数 $M(\%)$ 的计算方法为^[1]

$$M = 100\% \times \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{average}}}, \quad (1)$$

式中, P_{\max} 、 P_{\min} 和 P_{average} 分别为基带再调制封装后信号功率的最大值、最小值和平均值。当标准建议的基带再调制AMCC线路速率为115 kbit/s时,采用方波,调制系数为10%。通过对被检测信号进行低通滤波、放大和阈值检测,就可以完成基带再调制方式的AMCC信号恢复。

另一种实现透明AMCC模式的方法是射频(Radio Frequency, RF)导频(Pilot Tone)调制。这种方法在物理透传层依然采用低比特率和低调制系数的调制信号,但增加了较低频率的载波。由于载波导频的存在,较易在电域滤除由光功率随机不稳

定而对信号造成的扰动。载波调制的 AMCC 信号也可以在光/电转换前的电域与业务净荷数据合并,再进行光/电转换。此处定义的调制系数 $M(\%)$ 为

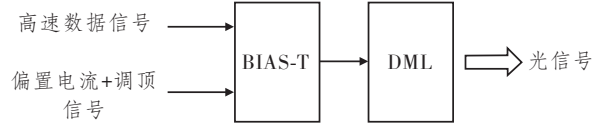
$$M = 100\% \times \frac{V_{pp,AMCC}}{V_{pp,payload}}, \quad (2)$$

式中, $V_{pp,AMCC}$ 和 $V_{pp,payload}$ 分别为 AMCC 信号和净荷数据信号在电域的电压峰峰值。标准建议的导频调制 AMCC 线路速率为 128 kbit/s, 调制系数为 10%, 并采用 500 kHz 低频率的 RF 导频方式。AMCC 信号的检测可以通过滤波、下变频和符号判决等步骤完成, 而不同的通道导频信号则可以通过设计不同的滤波和变频参数来区分。透明 AMCC 模式的各种实现方式都采用带外传输和业务透传, 不影响载荷带宽的承载能力, 但需要牺牲一部分较小的光功率来进行低速数据传输, 以抵消对高速数据信号误码的影响。

对于接入网对调顶 AMCC 的低成本要求, 比较好的实现路径是充分利用现有接入网的器件和芯片, 尽量少增加或者只增加低成本、简单的元器件来实现其功能, 下面是按照这个思路实现的几种调顶 AMCC 收发技术。

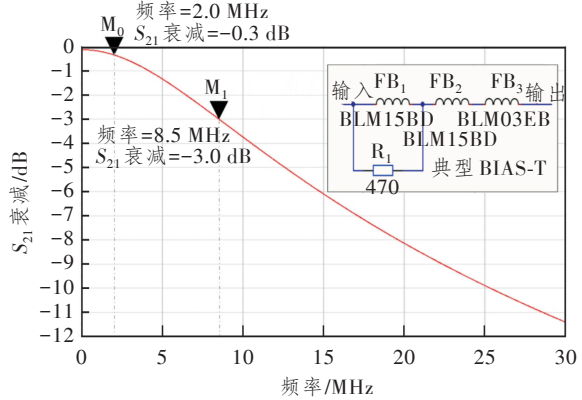
如图 1(a) 所示, 对于直接调制激光器(Direct Modulation Laser, DML)的光发送组件, 高速数据信号对应的调制电流与半导体激光器稳定工作所需的偏置电流通过偏置器(Bias-Tee, BIAS-T)电路汇合在一起。BIAS-T 通常主要由高频磁珠、电感和电容等无源器件组成, 其在将高速数据调制电流和偏置电流合并在一起的同时, 相关的高通低阻滤波器和低通高阻滤波器又可以避免相互干扰。由于低通高阻滤波通道具有一定的低频带宽, 所以将调顶信号和偏置电流一起加入 BIAS-T 电路, 便可实现 DML 的光调顶信号。图 1(b) 所示为使用磁珠 BLM15BD、BLM03EB 以及电阻组成的典型 BIAS 电路进行仿真后的响应曲线, 由图可知, -3 dB 带宽大于 8.50 MHz, 2 MHz 处的衰减仅为 -0.3 dB, 足以进行相当速率的 AMCC 通信。当然, 具体的实施还需根据不同 OM 内部电路的细节进行调整。

光接收组件如图 2 所示。光信号在被光电探测器(Photoelectric Detector, PD)接收后, 会经由跨阻放大器(Trans-Impedance Amplifier, TIA)处理。一般现代通信用的 TIA 内部接收信号强度指示器(Received Signal Strength Indicator, RSSI)和高速放大电路由于有自动增



(a) DML 实现调顶信号发送

(a) The scheme of transmitting DML overmodulation signal



注: M_0 为调顶信号通过 BIAS 电路的衰减为 -0.3 dB 时的频率 2 MHz; M_1 为调顶信号通过 BIAS 电路的衰减为 -3 dB 时的频率为 8.5 MHz; $FB_1 \sim FB_3$ 和 R_1 为典型直流偏置电路元件位号; BLM15BD、BLM03EB 和 470 为典型元件。

(b) BIAS 电路仿真响应曲线

(b) The simulated response curve of BIAS circuit

图 1 DML 调顶信号发送

Figure 1 The scheme of transmitting DML overmodulation signal

益控制(Automatic Gain Control, AGC)等相关电路, 能够很大程度过滤掉低速信号; 而 RSSI 电路设计的目的是为了进行光功率指示, 其输出电流特性与光信号的光功率存在对应关系, 同时为了能较快地指示光功率的变化, RSSI 的电平也能较快地进行变化, 从而对低速信号进行响应。TIA 有输出 RSSI 管脚, 因此可以从该 TIA 中恢复调顶信号^[7]。

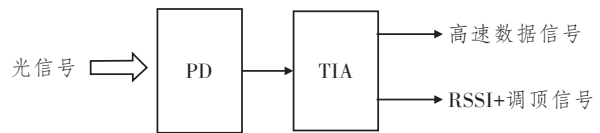


图 2 通过 RSSI 实现调顶信号接收

Figure 2 The scheme of overmodulation signal detection via RSSI

随着接入网的线路速率越来越高, 除 DML 外, 电吸收调制激光器(Electroabsorption Modulated Laser, EML)等外调方式的技术也开始在 PON 中使用。图 3 所示为外调制器的发送光组件, 可以利用调制器、半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)与半导体激光器的驱动电路分离的特点, 通过光源光功率控制+调顶或放大器+调顶的方法来实现。

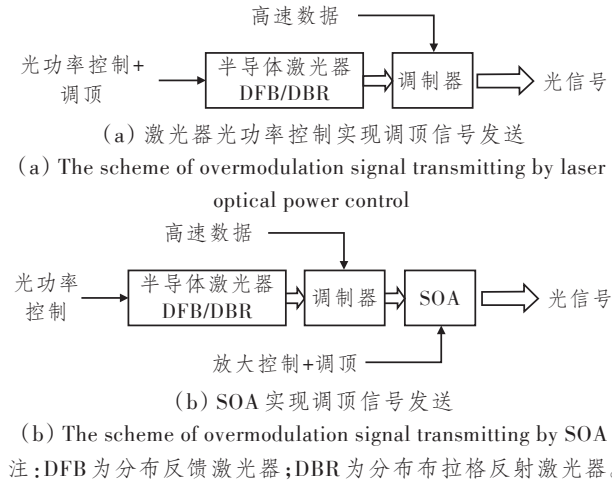


图3 外调制器实现调顶信号发送

Figure 3 The scheme of transmitting overmodulation signal via external modulator

以上主要是通过 OM 内部来实现调顶。除此之外,还可以通过掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)或可调光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)来生成调顶信号^[8]。通过分光探测器(Tap PhotoDetector, Tap PD)来进行调顶信号的接收。

为了分析调顶 AMCC 技术对接入光网络系统中高速数据网络性能的影响,近年来也逐渐开展了一些研究。

文献[9]研究了 25 Gbit/s 非归零(Non-Return-to-Zero, NRZ)码下的调顶 AMCC,其实验装置框图如图 4 所示,实验中采用的是马赫曾德调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM),型号为 Ix-blue MXAN-LN series,这种调制器内部有单独的

直流电极,其与高速 RF 电极之间是电气隔离的,外部的高速 RF 接口与电压直流偏置(BIAS)接口也是分离的^[10],两者之间在电路中几乎没有直接影响。25 Gbit/s 的 NRZ PON 信号由任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)(Keysight M8195A)产生,实验中也可以由高速误码仪来产生,25 Gbit/s 的 NRZ 通过电放大器(Electronic Amplifier, EA)来对 MZM 强度调制器 RF 接口进行驱动。实验中的调制器工作点直流偏压控制信号和 AMCC 信号都由信号发生器 DG922 来产生,这种仪表在高阻负载 50 MHz 以下时可以提供 20 V 的驱动能力^[11],将附加了直流的 AMCC 信号接到 MZM 的 BIAS 接口上,由于 MZM 的 BIAS 和高速数据之间在发送时电域相互没有影响,文献采用的 AMCC 信号速率较高,为 10 或 20 Mbit/s。实验时从调制器输出大约 5 dBm 光功率,其后的光信号通过 10 km 的单模光纤进行传输,VOA 用于控制接收光功率(Receive Optical Power, ROP)。通过接收光电二极管和 EA 处理后,该检测信号被发送到采样率为 80 GSa/s 的实时示波器,示波器接收到的信号波形包含 25 Gbit/s 的 NRZ PON 信号和 10 Mbit/s 的 AMCC 信号,采样后的信号被分为两路,其中一路用于 PON 误码率(Bit Error Ratio, BER)的计算,另一路发送至 AMCC 的干扰消除(IE Interference Elimination)处理,该模块将 AMCC 信号从高速 PON 信号中分离出来。干扰消除处理旨在提高 AMCC 信号质量,包括执行低通滤波信号的提取和进行干扰信号的统计复用补偿。

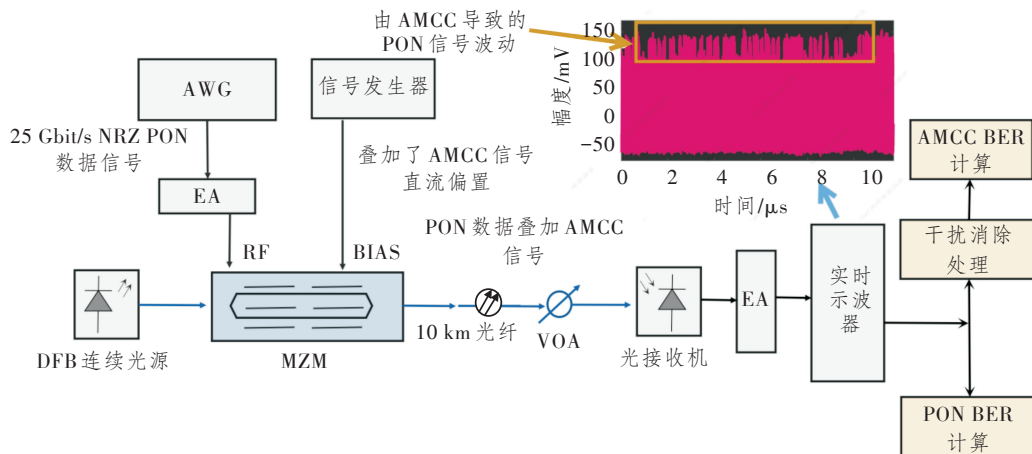


图4 25 Gbit/s NRZ PON 与调顶试验^[9]

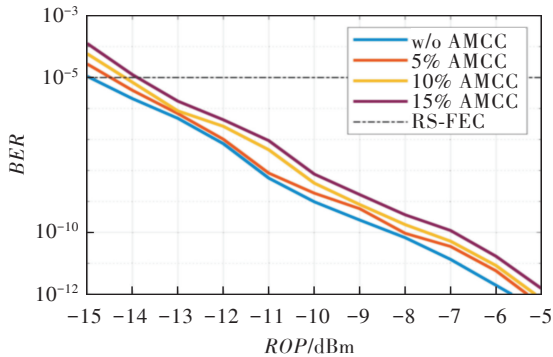
Figure 4 25 Gbit/s NRZ PON and overmodulation test^[9]

文献[9]还分析了在该实验条件下调顶 AMCC 对 PON 性能的影响,结果表明影响是有限的。如

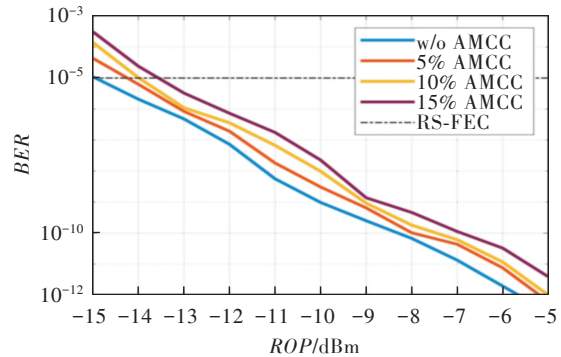
图 5(a)和图 5(b)所示,在 BER 为 1E-5~1E-12 的情况下叠加 AMCC 时,5% 和 10%AMCC 相对 w/o

AMCC(无调顶信号),接收端产生的光功率代价基本不超过 1 dB;15%AMCC 产生的光功率代价会稍大于 1 dB;文献[12]采用的是 10 Gbit/s 线路速率,图 5(c)所示为导频频率为 500 kHz、附加不同调制深度的调顶 AMCC 时的 BER 对应关系,图 5(d)所示为不同导频频率、不同调制深度在 1E-3 BER 下的对应关系,由图可知,25% 调制深度下的光功率代价基本<1 dB。对比文献[9]和文献[12]的结果可知,线路速率和是否带有导频与其他实验参数对最终结

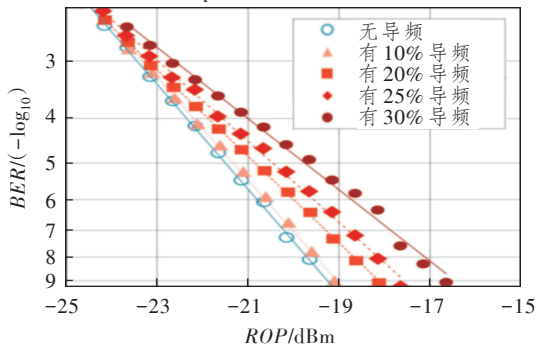
果有一定的影响,但是,若通过控制调制深度和调顶及其导频频率,可以很容易地将调顶产生的附加光功率代价控制在 1 dB 甚至更低的范围内。另外,在文献[13]中,采用与图 4 类似的试验环境,业务信号为 50 Gbit/s 4 电平脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation 4,PAM4)的 PON 信号,AMCC 信号为 10 Mbit/s,调制深度分别为 2%、5% 和 10%,检测到的 PON 信号光功率代价也基本<1 dB,如图 5(e)所示。



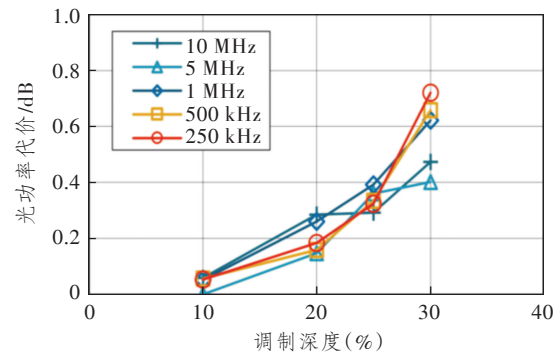
注:RS-FEC 为里德-所罗门前向纠错。
(a) 10 Mbit/s 调顶 AMCC 对 PON 性能的影响^[9]
(a) Effect of 10 Mbit/s overmodulation AMCC to PON performance^[9]



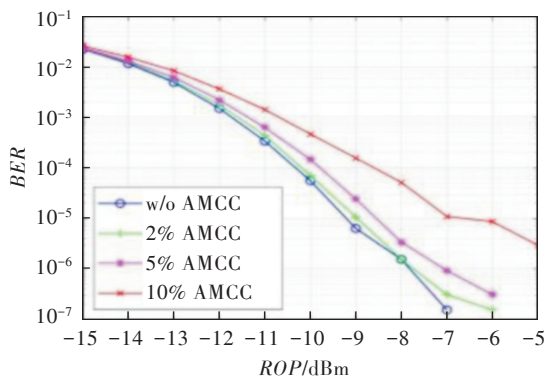
(b) 20 Mbit/s 调顶 AMCC 对 PON 性能的影响^[9]
(b) Effect of 20 Mbit/s overmodulation AMCC to PON performance^[9]



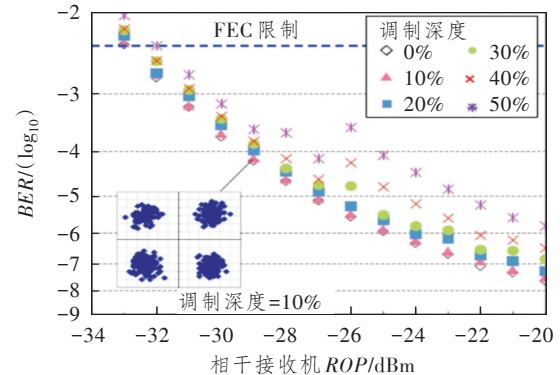
(c) BER-调制深度曲线^[12]
(c) BER curve vs modulation depth^[12]



(d) 光功率代价-调制深度曲线^[12]
(d) Optical power penalty curve vs modulation depth^[12]



(e) 不同调制深度下 BER-ROP 曲线^[13]
(e) BER curve vs ROP with different modulation depth^[13]

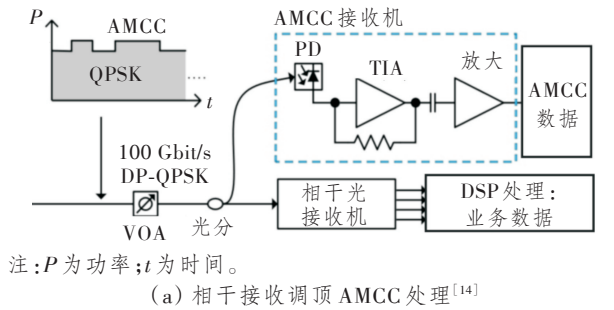


(f) 不同调制深度相干 ROP-BER 曲线^[14]
(f) BER curve vs ROP of coherent receiver with different modulation depth^[14]

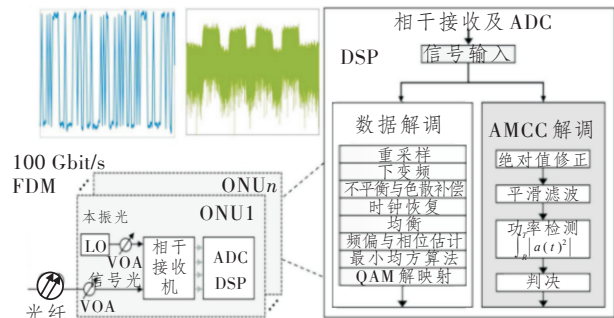
图 5 AMCC 调制深度与接收灵敏度^[9,12-14]

Figure 5 AMCC modulation depth and receive sensitivity^[9,12-14]

PON 相干接收机的调顶 AMCC 也有相关的研究。图 6(a)所示为包含 AMCC 信号的 100 Gbit/s 双偏振正交相移键控 (Dual Polarization Quadrature Phase Keying, DP-QPSK) 调制接收实验装置,调顶 AMCC 信号的接收是通过光功率分配来进行的,实验结果是,设置 AMCC 信号的调制深度在 5%~40% 时,对 100 Gbit/s DP-QPSK 信号传输不会产生过度的代价^[14],相关数据如图 5(f)所示。由于数字相干接收使用了模/数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 和数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP),所以直接在同一个 DSP 内进行高速业务信号处理和低速 AMCC 信号处理也是一个很好的方法。图 6(b)中,100 Gbit/s 带 AMCC 的频分多路复用 (Frequency Division Multiplexing, FDM) 光信号在相干接收机中与本振光 (Local Oscillator, LO) 混频,通过 ADC 转换后进入 DSP 处理,DSP 内部的数据解调算法和 AMCC 算法同时运行,最后把两种信号都解调出来^[15]。



注: P 为功率; t 为时间。
(a) 相干接收调顶 AMCC 处理^[14]
(a) Overmodulation AMCC processing of coherent reception^[14]



注: ONU 为光网络单元; QAM 为正交振幅调制。
(b) 数字相干接收 AMCC 信号处理^[15]
(b) AMCC signal processing of digital coherent reception^[15]

图 6 PON 相干接收机的调顶 AMCC 处理^[14-15]
Figure 6 AMCC modulation processing for coherent receiver^[14-15]

2 光调顶技术在接入网中的新型应用

2.1 WDM 情况下不同通道 AMCC 调顶信号的识别

目前 5G 的前承载单通道速率一般是 25 Gbit/s,

一个宏基站有上下行共 6 个通道,为了节约成本,这 6 个通道共用一根光纤,不同通道采用不同的波长,如果是 5G 移动基站 160 MHz 场景,则每个有源天线单元 (Active Antenna Unit, AAU) 需要出 2 个 25 GE 接口,则需要 12 个通道。为了便于管控,对这些通道提出了管理要求,在原有的无源 WDM 基础上,通过增加调顶信号机制,实现了半有源 WDM,该方案不涉及高速电层处理,对 OM 硬件改造较小,实现成本较低^[16-17]。如图 7 所示,这个半有源 WDM 通信系统位于无线设备的 AAU 和分布式单元 (Distributed Unit, DU) 之间,该系统主要包括 AAU 侧彩光模块、AAU 侧无源合分波器、DU 侧有源 WDM 设备和 DU OM。AAU 侧和 DU 侧合分波器间通过一条光纤链路连接。有源 WDM 设备监控 DU 侧 OM 和中心单元 (Central Unit, CU) 侧 OM 之间的通道就需要用到 Tap PD,一种方案是在有源 WDM 设备中将 Tap PD 接到 WDM 的波分分支端,这样可以实现对每个端口的监控,监控 6 个或更多通道,需要 6 个或更多的 Tap PD。

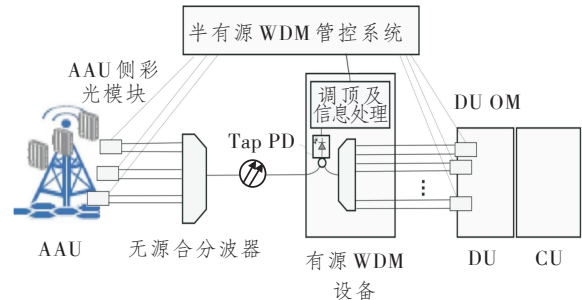


图 7 半有源 WDM 架构^[16-17]

Figure 7 Semi-active WDM architecture^[16-17]

为了减少有源 WDM 设备的复杂度,可以采用一个 Tap PD 来监控多路 OM 信息。在中等波分复用 (Medium Wavelength Division Multiplexing, MWDM) 中,操作管理维护 (Operation, Administration and Maintenance, OAM) 子层的主要功能是将数字信息调制到光层信号中,并从光层信号中解调出数字信号,其中调制机制包括调幅机制和多载频调幅机制。在多载频调幅机制中,彩光模块分别发送速率为 25 Gbit/s、波长范围为 1 267.5~1 374.5 nm 的高速光信号,对于不同波长分别叠加调制频率为 50~270 kHz 的带内光层调顶 OAM 信息,且相邻波长叠加调顶信息的调制频率间隔为 20 kHz,载频频率精度为 ± 2 kHz 的正弦波。多载频调幅机制的调顶深度 P 相关标准建议为 1.4%~2.0%,OAM 处理的调顶代价应为 ≤ 0.5 dB,参考图 5(d)的结果,

这个 0.5 dB 调顶代价的余量应该还比较足。同时还规定了在 OM ROP 小于 OM 高速信号接收灵敏度 5 dB 时,有源 WDM 设备和 OM 调顶调制的 OAM 帧能正确接收,也就是说,由于故障导致 ROP 存在一定不足,而使对应波长通道高速数据不能进行接收时,低速的调顶信号还可以进行收发,即还可以进行系统管控。通过有源 WDM 设备检测单元中的分支 PD 对复用后的光信号直接进行光/电转换,生成包含 12 个频率的电信号,通过硬件电路或数字算法的方式,就可以提取调制频率分别为 50~270 kHz 的 12 个低速带内 OAM 调顶信息,并进行解调^[16]。

除 MWDM 外,25 Gbit/s 细波分复用(LAN Wavelength Division Multiplexing, LWDM)也采取了一种类似的方式^[18]。25 Gbit/s LWDM OM 传递 OAM 管控信息的调顶信号,其调顶方案亦可采用多载波调幅方案,载波起始频率亦为 50 kHz,载波间隔为 40 kHz,载频精度不超过 10%,即±4 kHz,数据信号使用平衡编码。对于多载波调幅方案,编码后的调制速率为 1 024 bit/s。

除多载波方式外,文献^[19]中采用时分的方式来处理多路信号。其主要思路是:在系统管理信息实时性要求不高的情况下,通过算法设计错开各 OM 的发送时间,以尽量减少不同模块在发送数据时的碰撞。若碰撞发生,可以通过数据校验等方式进行丢弃。这种方式成本较低,且更易实现。

2.2 用调顶信号来进行通道的光功率推算

在图 8 所示系统中^[20-21],不同通道信号汇聚后通过 1 个 Tap PD 传输,如前所述,该 Tap PD 可通过多载波调幅或分时方式来区分不同通道, Tap PD

由于监测的是所有通道不同波长的光,所以其监测的是混在一起的总功率。由式(1)可知,每个调顶发送时的调制系数 M 是固定的,调顶调制功率中的 $P_{\max} - P_{\min}$ 可以通过 Tap PD 测得,因此,在有源设备接口处对应通道的在线平均光功率 P_{average} 为

$$P_{\text{average}} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{M} \quad (3)$$

通过 2.1 节中类似的方法,使用 1 个 Tap PD 和调顶技术,可以获得多个波长通道的在线光功率。若每个波长的载频不一样,同时每个载频对应的功率参数也不一样,相关参数就和这一点对应波长通道成对应关系,即

$$P_{\text{average}(chx)} = \frac{P_{\max(chx)} - P_{\min(chx)}}{M_{(chx)}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{average}(chx)}$ 为通道 chx 的在线平均光功率; $P_{\max(chx)}$ 为通道 chx 载频对应的最大光功率; $P_{\min(chx)}$ 为通道 chx 载频对应的最小光功率; $M_{(chx)}$ 为通道 chx 的调制系数。通道 chx 调顶调制功率中的 $P_{\max(chx)} - P_{\min(chx)}$ 可以通过 Tap PD 经滤波后计算得到。

除此之外,还可以利用调顶技术来监测系统不同通道的反射光功率^[20-21]。如图 8 所示,采用环形器方案的 5G 承载方案可以减少一半所需波长的数量,如分布单元 DU₁ 的 OM₄ 发出的波长 λ_4 被无线远端单元 RU₁ 的 OM₁ 收到,而远端单元 RU₄ 的 OM₄ 发出的波长 λ_4 则被无线 DU₄ 的 OM₁ 收到,两者可使用相同的波长 λ_4 。然而,环形器带来的新问题是,在一定工程故障时系统光纤中存在较大的反射,这将影响正常的通信,因此,采用调顶信号来进行反射信号的在线监测就很有意义。

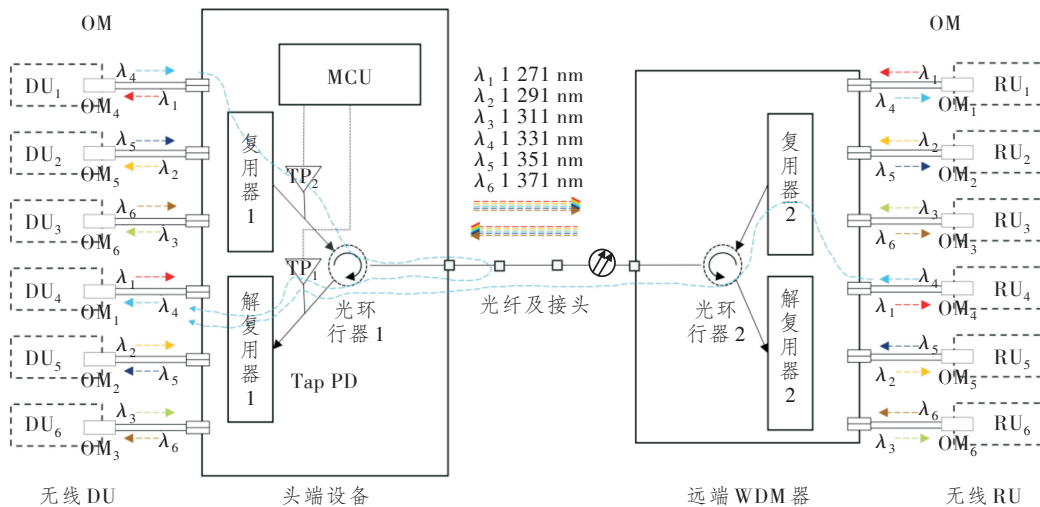


图 8 环形器半有源 WDM 架构^[20-21]

Figure 8 Semi-active WDM architecture using circulator^[20-21]

也就是说,在环行器多通道系统的每个波长信道中,当光纤的业务光信号上出现反射故障点时,会产生一小部分的反射光信号,并反射回同侧设备,由于同侧的发送和接收会有1个波长相同,这样就会有OM同时接收来自另一侧业务的光信号和本侧由于反射产生的反射信号,当反射信号大于一定范围时,正常业务就会产生误码。虽然反射光信号与另一侧业务光信号具有相同的波长,但来源不同。由于加载调顶管理调制信号的时间或通道不同,对应的载频就会不同,同时调顶信号内部具有不同的编码ID,系统就可依靠这个特点来区分另一侧业务光信号和反射光信号。同理,由式(3)和式(4)也可推算出反射光信号的光功率大小。当反射光功率大于一定门限时,微处理器(Microcontroller Unit, MCU)就会产生告警。在图8中,无线DU₁的OM₄发出的波长 λ_4 通过复用器1后,其发出的调顶AMCC信号被分光探测器TP₂收到,MCU处理出的是DU₁/OM₄信息,包括DU₁/OM₄发送调顶AMCC的载波频率、编码ID和在TP₂点处的推算光功率等。而无线远端单元RU₄的OM₄发出的波长 λ_4 经过复用器2、光环行器2、光纤及其接头和光环行器1后、途经TP₁然后经过解复用器1到达DU₄/OM₁,同理,在TP₁处MCU处理的是RU₄/OM₄信息,包括RU₄/OM₄发送调顶AMCC的载波频率、编码ID和在TP₁点处的推算光功率等。当光纤接头松动或其他原因导致反射时,DU₁/OM₄发出的光经过环行器1、光纤和反射点(如光纤接头)后,其反射光再经过光纤、光环行器1、TP₁和解复用器1,到达DU₄/OM₁模块,这样就与RU₄/OM₄发出的光混合到一起,当反射光大到一定程度时,就会影响数据传输。同时反射光的强度在TP₁可以处理的情况下,在TP₁处就可以检测出DU₁/OM₄发送调顶AMCC的载波频率、编码ID和在TP₁点处的推算光功率,从而判断出反射事件的发生,包括与载波频率或编码ID所对应的OM及波长和对应反射光功率的大小等信息。而且,通过计算同一AMCC消息在TP₂和TP₁出现的时间差,就可以得到发生反射事件点到头端设备间的距离,便于进行工程维护。

如上所述,通过对接入网通信系统的合理设计,可以用低成本调顶AMCC技术来实现光纤线路的在线感知,助力网络的智能运维。

2.3 调顶AMCC进行PON静默窗口规避

TDM PON系统中,当有新的ONU被添加到

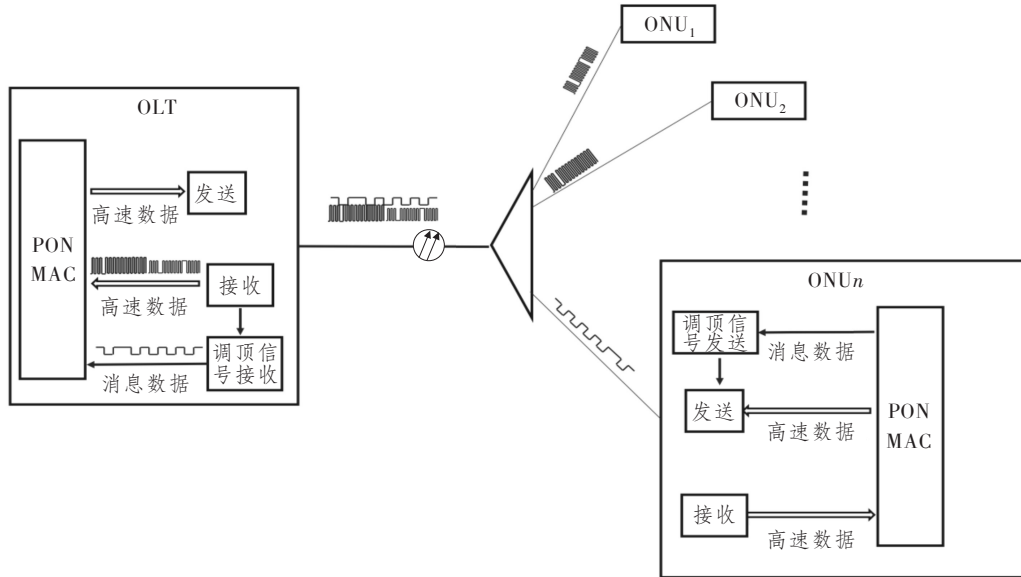
网络中时,为了能够被光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)发现和管理,需经过激活和测距过程。如果不进行特殊处理,激活和测距过程有一定几率会与上行正常数据传输产生冲突与碰撞。为了避免碰撞,传统的处理方法是OLT将暂停所有对ONU的带宽分配,在这一段时间内,ONU将要发送的数据进行内部缓存,不发送,而把这段时间留给新加入的ONU进行激活和测距,经过此段时间后再发送缓存中的数据,此过程被称为静默窗口。根据ITU-T G. 984分析,静默窗口通常会导致网络传输产生超过250 μ s的时延和抖动。

为了降低网络时延和抖动,ITU G. 9804.2草案中^[22]提出了一个专用的激活波长以消除静默窗口。在此方案下,OLT通过添加新的上行波长或利用上一代PON的上行波长来执行激活和测距过程,以避免上行流量中的静默窗口。额外的波长方案也可应用于未来的50 Gbit/s PON中。

另一个创新的想法是在TDM PON中采用基带调顶AMCC和光功率叠加等技术来实现高速数据传输和控制信息的同时传输,在执行激活和测距时,高速数据传输和低速测距等控制过程可以同时进行,不需要因为静默窗口而停止高速数据传输。这种方法避免了使用额外的光收发器来占用波长资源,从而实现了低成本和低功耗。该技术在千兆无源光网络(Gigabit-Capable PON, GPON)、10 Gbit/s无源光网络(XG(S)-PON)和未来的50 Gbit/s PON等中都可以使用。

调顶AMCC进行PON静默窗口规避的原理如图9所示,OLT的接收端集成调顶接收功能,而ONU的发送端则集成了调顶发送功能。ONU与OLT间的激活与测距信息数据不再通过静默窗口或特定波长处理,而是将这些低速信息数据功率叠加至ONU正在发送的高速数据上,利用其光功率变化来传递信息。由于ONU的发送采用相同的波长段,高速数据和低速调顶信息数据将在OLT上同时被接收,并通过其后续的特定处理,如电域低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF)进行分离^[23]。

为了验证一路ONU在单独发送调顶信号时对于在线ONU高速数据的影响,搭建了以下测试验证环境。如图10所示,误码仪型号为安立MP1900A,产生25 Gbit/s NRZ的高速电信号驱动OM测试板1上的OM₁,眼图仪/高速采样示波器为安立MP2110A,实时示波器为100 MHz左右带宽的普通示波器。OM₁为O波段25 Gbit/s通用



注:MAC为媒体访问控制。

图 9 调顶 AMCC 进行 PON 静默窗口规避的原理^[23]

Figure 9 Principle of PON silent window avoidance by overmodulation AMCC^[23]

DFB DML, 没有加持调顶, 在误码仪的驱动下输出纯净的 25 Gbit/s NRZ 高速光信号, OM₂ 的硬件为 O 波段 25 Gbit/s 调顶 DFB DML, 采用了特殊的 OM 内部自研程序固件, 这个固件临时关闭了高速调制功能, 能够定时发送低速 AMCC 信号, 另外, 还通过 OM₂ 后面连接的 VOA₂ 及光功率计来调整 OM₂ 发出的调顶光信号与 OM₁ 发生的高速光信号

的光功率比例。OM₁ 发出的高速光信号和 OM₂ 发出的调顶光信号通过光分路器后, 混合到了一起, 到达调顶处理测试板。自研的调顶处理测试板内部包括 Tap PD 和调顶模拟信号处理电路, 电路中包含放大和 LPF, 处理后的信号在实时示波器上就可以进行显示。混合在一起的高速和调顶光信号到达采样示波器, 从而进行高速眼图分析。

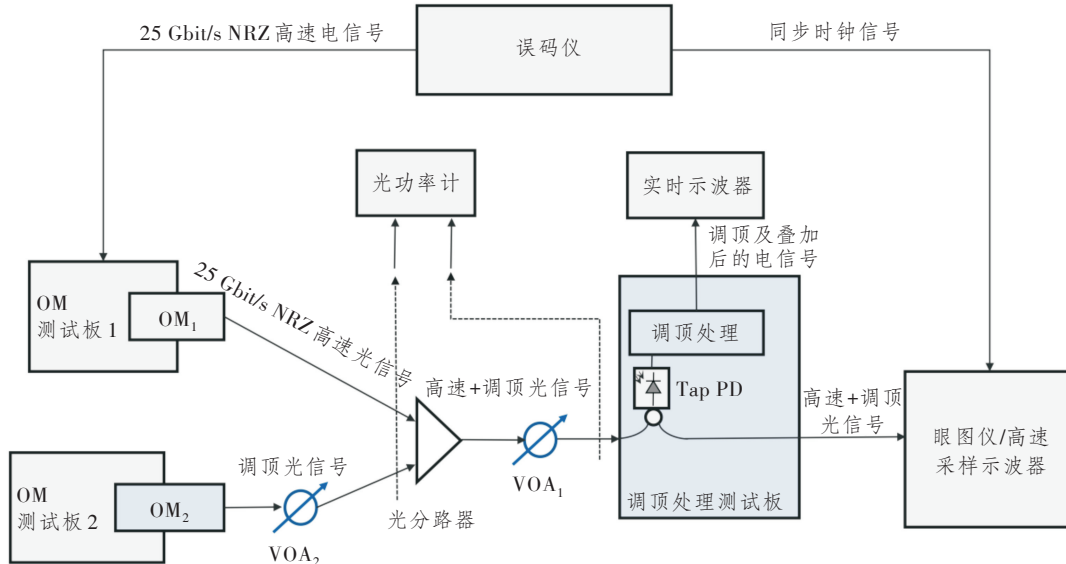


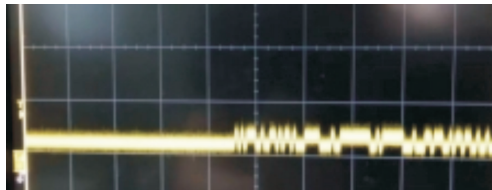
图 10 调顶 AMCC 高速数据相互影响验证实验

Figure 10 Experimental setup for testing crosstalk of overmodulation AMCC and data signal

图 11(a)所示为断开 OM₁、单独测试 OM₂, 即在没有其他 ONU 发送的情况下, 单独测试一个 ONU 发送调顶信息并且同时不发送高速数据时, 信号在 OLT 接收端经过 LPF 处理后, 在实时示波

器上观察所得到的波形。图 11(b)所示为断开 OM₂、单独测试 OM₁, 即 ONU 发送 25 Gbit/s NRZ 信号并且没有调顶信号时, 经过 LPF 处理后在实时示波器上观察到的信号波形, 由于 25 Gbit/s 的高速信

号经过 LPF 处理后信号波形近似为一条直线,与其接收平均光功率指标对应。为避免对数据通信造成干扰,调顶信号的光功率相对被设定的较低。图 11(c)所示为 OM_2 和 OM_1 同时发送时的情况,即在一个 ONU 发送 25 Gbit/s NRZ 信号的同时,另一个 ONU 只发送调顶信号,再经过 LPF 处理后的波形,从而可以观察到两个光功率的叠加效果^[23]。



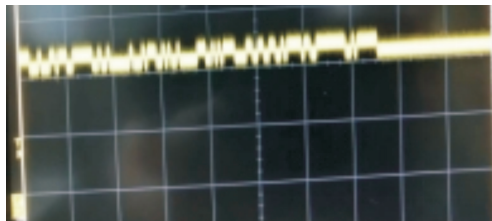
(a) 调顶

(a) Overmodulation



(b) 25 Gbit/s 信号

(b) 25 Gbit/s signal

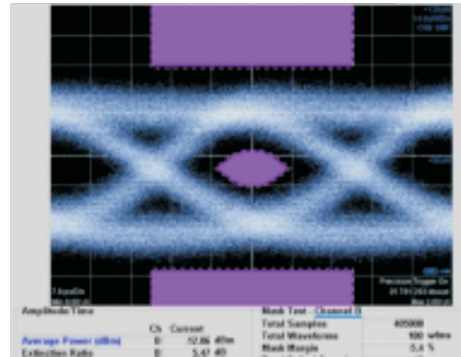


(c) 两者光功率叠加

(c) Superposition of two

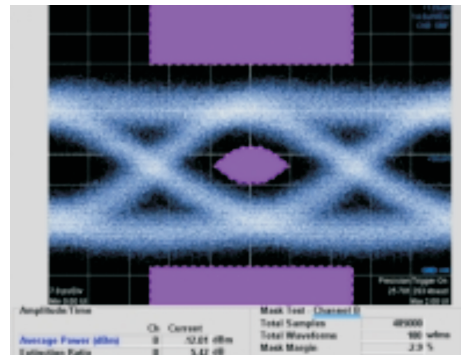
图 11 LPF 后的信号^[23]Figure 11 Signal after LPF^[23]

图 12 所示为 ONU 发送 25 Gbit/s NRZ 信号与调顶信号叠加后的测试眼图。图 12(a)所示为只有 25 Gbit/s NRZ 信号,没有叠加调顶信号时测试的眼图,其消光比(Extinction Ratio, ER)为 5.47 dB,此时需要断开 OM_2 ,单独测试 OM_1 。然后同时开启两个 OM,调节 VOA_2 ,即调整 OM_1 和 OM_2 的光功率比例,进行测试。图 12(b)所示为 25 Gbit/s NRZ 信号叠加 -20 dB 调顶信号的测试眼图,其 ER 为 5.42 dB。图 12(c)所示为 25 Gbit/s NRZ 信号叠加 -10 dB 调顶信号的测试眼图,其 ER 为 4.79 dB。通过以上测试指标可以看出,叠加调顶信号对 25 Gbit/s NRZ 高速信号有一定的影响,但影响仍在可控范围内。此外,还可以通过在高速率数据通道使用高通滤波器(High-Pass Filter, HPF)等方法,进一步降低叠加调顶信号对高速率数据的影响^[23]。



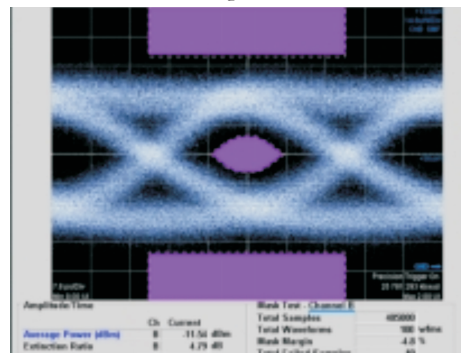
(a) 25 Gbit/s NRZ 信号

(a) 25 Gbit/s NRZ signal



(b) 25 Gbit/s NRZ 信号叠加 -20 dB 调顶信号

(b) 25 Gbit/s NRZ signal superpose -20 dB overmodulation signal



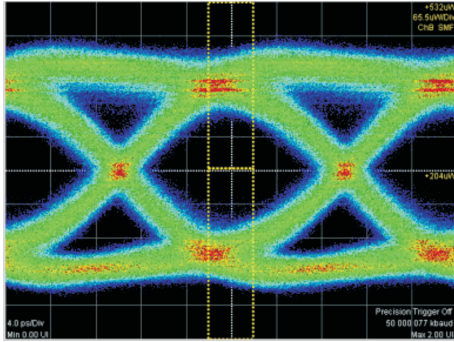
(c) 25 Gbit/s NRZ 信号叠加 -10 dB 调顶信号

(c) 25 Gbit/s NRZ signal superpose -10 dB overmodulation signal

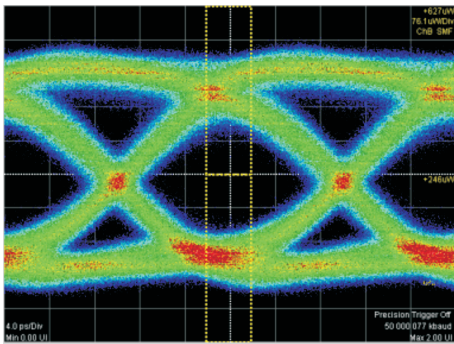
图 12 25 Gbit/s NRZ 信号叠加调顶信号后的眼图^[23]Figure 12 Eye diagram of the 25 Gbit/s NRZ signal superimposed on the overmodulation signal^[23]

50 Gbit/s PON 的 ITU 标准制定已经基本就绪,国内主要设备商和电信运营商已经开始了设备的研制、测试及试点。标准中 ONU 的上行速率有 3 个等级,具体为 12.441 6、24.883 2 和 49.766 4 Gbit/s。为此对更高的 50 Gbit/s 速率进行了验证测试,将图 10 中的 OM 测试板 1 和 OM_1 用内置 1 310 nm 波长光源和驱动的 MZM 替换,误码仪发出 50 Gbit/s NRZ 信号,调顶 ONU 发等效

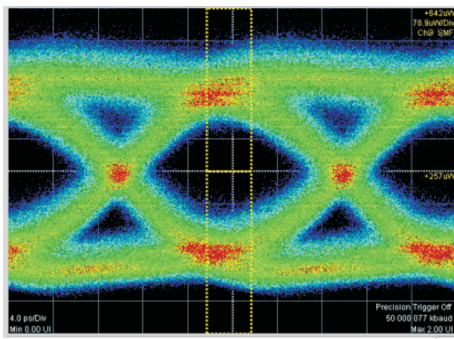
100 kbit/s 开关键控 (On-Off Keying, OOK) 调制 AMCC, 测出的叠加调顶信号对高速率数据的影响如图 13 所示, 其中无 AMCC 叠加的眼图 ER 为 9.58 dB, 叠加 -20 dB 的 ER 为 8.80 dB; 叠加 -10 dB 的 ER 为 8.38 dB。AMCC 对眼图的影响也在 1.2 dB 以内。



(a) 50 Gbit/s 信号
(a) 50 Gbit/s signal



(b) 50 Gbit/s 信号叠加 -20 dB 调顶信号
(b) 50 Gbit/s signal superpose -20 dB overmodulation signal

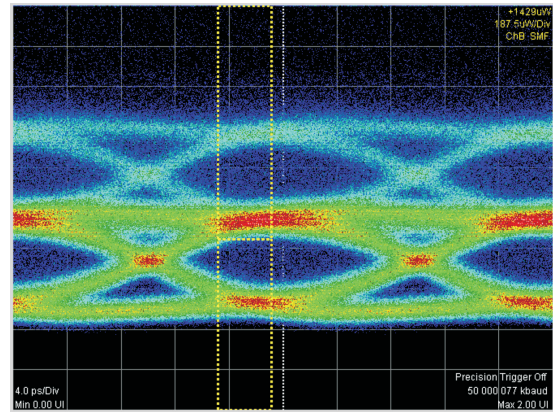


(c) 50 Gbit/s 信号叠加 -10 dB 调顶信号
(c) 50 Gbit/s signal superpose -10 dB overmodulation signal

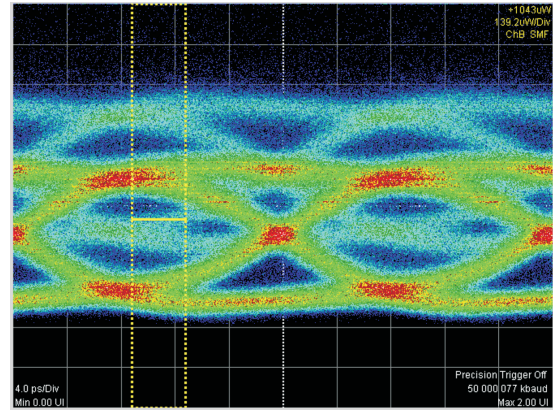
图 13 50 Gbit/s 信号叠加调顶信号后的眼图
Figure 13 Eye diagram of the 50 Gbit/s signal superimposed on the overmodulation signal

为了进一步探究一路 ONU 发送调顶 AMCC 信号对正在进行业务通信的 ONU 眼图影响的机理, 先将调顶信号光功率设置为与通信 ONU 光功率相等 (0 dB) 进行测试, 然后将调顶信号光功率设置为通信 ONU 光功率的 1/2 (-3 dB), 结果如图 14

所示。可以很清楚地看到, 50 Gbit/s 的眼图被调顶 AMCC 信号的 OOK 光功率顶开成为基本相同的两个部分, 而两个部分依然比较完整。出现这种情况的原因是 50 Gbit/s 的数据信号速率和调顶 AMCC 信号的速率差别很大, 当 AMCC 信号是高电平“1”时, 与 50 Gbit/s 的数据信号相加, 高速数据的眼图整体就提高了, 而当 AMCC 信号是低电平“0”时, 信号相加时高速数据的眼图整体发生变化, 由于 AMCC 数据不停地出现高低电平, 所以仪表就能看到 50 Gbit/s NRZ 信号的“两个”眼图。在两个眼图之间, 由于 AMCC 信号的上升、下降沿和激光器噪声影响, 导致出现了较多的噪声点。



(a) 50 Gbit/s 信号叠加 0 dB 调顶信号
(a) 50 Gbit/s signal superpose 0 dB overmodulation signal



(b) 50 Gbit/s 信号叠加 -3 dB 调顶信号
(b) 50 Gbit/s signal superpose -3 dB overmodulation signal

图 14 50 Gbit/s 信号叠加大调顶信号后的眼图
Figure 14 Eye diagram of the 50 Gbit/s signal superimposed on the large overmodulation signal

通过以上实验, 验证了一路 ONU 在发送调顶信号时, 对正在通信的其他 ONU 高速数据存在串扰, 此时如果合理设置调顶信号的调制深度等参数, 可以使正在通信的其他 ONU 高速数据信号 ER 在可承受范围之内, 利用调顶 AMCC 来进行 TDM PON 静默窗口规避是很有潜力的。

3 结束语

由本文研究可知,有多种技术方案可用来灵活实现接入网低成本的调顶 AMCC。通过适当的处理措施,如控制调顶调制深度和导频载波等,能够显著降低调顶信号对 50、25 和 10 Gbit/s 等高速通信数据的影响。本文所提技术在接入网方面具有广泛的应用前景,如前所述 WDM 情况下不同通道 AMCC 调顶信号的识别、通道的在线光功率及反射光功率推算与感知,特别是在 TDM PON 避免使用静默窗口功能的情况下,采用透明 AMCC 信道是实现低延迟和低抖动的一个良好选择。当然,由于 TDM PON 拓扑结构的特殊性,OLT 收到不同 ONU 的光功率相差较大从而增加了调顶 AMCC 在实际应用中的复杂性,更高速 PON 以及复杂调制模式下的调顶 AMCC 如何实现等相关问题还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] ITU-T G. 989.2-2016, 40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks 2(NG-PON2): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification[S].
- [2] ITU-T G. 989.3-2015, 40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (NG-PON2): Transmission Convergence Layer Specification[S].
- [3] 张佳玮,苏琛,纪越峰.工业PON中确定性网络传输技术研究(特邀)[J].光通信研究,2024(1):230168.
Zhang J W, Su C, Ji Y F. Research on Deterministic Network Transmission Technology in Industrial PON[J]. Study on Optical Communications, 2024(1): 230168.
- [4] 殷明珠,王玮,潘竞顺,等.下一代相干PON关键技术研究进展与展望(特邀)[J].光通信研究,2024(1): 230162.
Yin M Z, Wang W, Pan J S, et al. Research Progress and Prospect of Key Techniques for Next-Generation Coherent PON[J]. Study on Optical Communications, 2024(1):230162.
- [5] 华锋,武成宾.调顶信号对城域波分复用系统的影响[J].邮电设计技术,2015(11):24-27.
Hua F, Wu C B. The Influence of Pilot Tone to WDM System[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2015(11): 24-27.
- [6] 王志军,刘新峰.WDM PON系统的辅助管理控制装置及方法:中国,CN108259118B[P].2019-12-17.
Wang Z J, Liu X F. A Method and a Device for Auxiliary Management and Control Channel of WDM PON System: China, CN108259118B[P]. 2019-12-17.
- [7] 刘新峰,张勇,王志军.一种管理信息的处理方法、光模块、ONU及其应用系统:中国,CN111262631B[P].2021-04-06.
Liu X F, Zhang Y, Wang Z J. A Management Information Processing Method, an Optical Module, an ONU (Optical Network Unit) and an Application System Thereof: China, CN111262631B[P]. 2021-04-06.
- [8] 刘新峰,刘建桥,王志军.WDM PON系统中实现光调顶信号的方法及装置:中国,CN110190904B[P].2021-03-16.
Liu X F, Liu J Q, Wang Z J. A Method and a Device for Realizing Light Modulation of a Top Signal in a WDM PON System: China, CN110190904B [P]. 2021-03-16.
- [9] Guo H, Yang C, Gao Y, et al. AMCC Nonlinear Baseband Superimposition and Extraction Aided by Proposed Interference Cancellation for WDM-PON Used in 5G Mobile Fronthaul[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 31602-31613.
- [10] Exail. MXAN-LN series 1 550 nm Band Analog Intensity Modulators[DB/OL]. (2016-02-01)[2024-03-30]. https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/02/MXAN-LN_SERIES.pdf.
- [11] RIGOL. DG900Pro系列函数/任意波形发生器[DB/OL]. (2024-03-01)[2024-03-30]. https://www.rigol.com/Images/DG900Pro_DataSheet_CN_tcm4-6257.pdf.
RIGOL. DG900Pro Series Function/Arbitrary Waveform Generator[DB/OL]. (2024-03-01)[2024-03-30]. https://www.rigol.com/Images/DG900Pro_DataSheet_CN_tcm4-6257.pdf.
- [12] Honda K, Kobayashi T, Nishihara S, et al. Low-frequency Pilot Tone Management for WDM-PON Toward Future Mobile Fronthaul Employing 64B/66B Line Coding[C]//42nd European Conference on Optical Communication. Dusseldorf, Germany: VDE, 2016: 7767790.
- [13] Guo H, Yang C, Qin X, et al. Up to 20 Mb/s Auxiliary Management and Control Channel Signal Transmission in 50 Gb/s PON System[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC). Washington, US: Optica Publishing Group, 2021: 9489803.
- [14] 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.
- [15] Wang J, Shen W, Chen J, et al. Demonstration of Auxiliary Management and Control Channel Signal Transmission for FDM Coherent Passive Optical Network[C]//2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Shanghai, China: IEEE, 2023: 10209775.
- [16] YD/T 4019.4-2022, 25 Gb/s波分复用(WDM)光收发合一模块 第4部分:MWDM[S].
YD/T 4019.4-2022, 25 Gb/s Wavelength Division Multiplexing (WDM) Optical Transceiver Module Part 4: MWDM[S].
- [17] 王东, 李晗, 张德朝, 等. 面向5G前传的open-WDM新型技术架构[J]. 电信科学, 2020, 36(10): 102-108.
Wang D, Li H, Zhang D C, et al. Novel Open-WDM Technical Architecture for 5G Fronthaul Network [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(10): 102-108.
- [18] YD/T 4019.2-2022, 25 Gb/s波分复用(WDM)光收发合一模块 第2部分:LWDM[S].
YD/T 4019.4-2022, 25 Gb/s Wavelength Division Multiplexing (WDM) Optical Transceiver Module Part 2: LWDM[S].
- [19] 刘新峰, 方哲. 一种单PD监控多路不同上行波长的方法及装置:中国, CN112911424B[P]. 2022-04-29.
Liu X F, Fang Z. A Method and a Device for Monitoring Multiple Paths of Different Uplink Wavelengths by a Single PD: China, CN112911424B[P]. 2022-04-29.
- [20] Zhang D, Du Z, Cheng M, et al. Demonstration and Trial of a New CWDM and Circulator Integrated Semi-active System for 5G Fronthaul[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, US: IEEE, 2022: 9748649.
- [21] Zhang D, Du Z, Cheng M, et al. Innovation and Demonstration of a New CWDM and Circulator Integrated Semi-active System for 5G Fronthaul [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(4): 1223-1229.
- [22] ITU-T G. 9804.2-2021, Higher Speed Passive Optical Networks-Common Transmission Convergence Layer Specification[S].
- [23] ITU-T SG15/Q2, C167-2013, Discussion on Quiet Window Elimination by Overmodulation AMCC in G. sup. PONlatency[S].