

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240146.

光通信系统与网络技术

鹿辉,刘逢清,赵翔宇. 基于阵列波导光栅的灵活多TWDM-PON系统设计[J]. 光通信研究, 2026(1): 240146.

Lu H, Liu F Q, Zhao X Y. Design of Flexible Multi-TWDM-PON System based on Arrayed Waveguide Grating[J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240146.

基于阵列波导光栅的灵活多 TWDM-PON 系统设计

鹿辉,刘逢清,赵翔宇

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院,南京 210023)

摘要:【目的】为了解决目前时分波光网络存在的负载不均衡、资源效率低、流量地域和时域分布周期性涨落导致的“潮汐效应”等问题,文章提出了基于阵列波导光栅(AWG)的灵活多时分波分复用(TWDM)-无源光网络(PON)系统方案。【方法】该系统结合固定与可调波长激光器,利用 AWG 的路由特性,根据网络负载实时调整各 PON 的分配带宽,在实现波长资源灵活分配的同时保持了光分配网络的无源性。【结果】系统实现了波长共享和资源的高效分配,能满足不同用户对带宽的多样化需求。仿真结果表明,在单波长传输速率为 10 Gbit/s 时,下行传输功率预算超过 34 dB,并且最大传输距离为 30 km 时系统分支比可达 1:512。【结论】文章所提设计方案不仅能有效提升资源利用率、优化网络传输性能,还兼顾了系统部署经济性与可靠性,可适配 4K/8K 超高清视频和云计算等多样化高速业务需求,为下一代光接入网络应对流量分布不均问题提供了可行技术路径,具备良好的实际应用价值。

关键词:时分波分无源光网络;阵列波导光栅;波长共享;波长路由

中图分类号: TN915.6 **文献标志码:** A

Design of Flexible Multi-TWDM-PON System based on Arrayed Waveguide Grating

LU Hui, LIU Fengqing, ZHAO Xiangyu

(College of Electronic and Optical Engineering & College School of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: 【Objective】To address the issues of load imbalance, low resource efficiency, the “tidal effect” of periodic fluctuations in traffic geography and time domain distribution in current time-wavelength division networks, this paper proposes a flexible Multi-Time Wavelength Division Multiplexing (TWDM)-Passive Optical Network (PON) scheme based on Arrayed Waveguide Grating (AWG). 【Methods】This system combines fixed and tunable wavelength lasers, leveraging the routing characteristics of AWG to dynamically adjust the allocated bandwidth for each PON based on real-time network load, enabling flexible wavelength resource allocation while maintaining the passivity of the optical distribution network. 【Results】The system achieves wavelength sharing and efficient resource allocation, catering to diverse bandwidth demands of different users. Simulation results show that with a single wavelength transmission rate of 10 Gbit/s, the downlink transmission power budget exceeds 34 dB, and the system split ratio can reach 1:512 at a maximum transmission distance of 30 km. It is indicated that the design scheme proposed in this paper can not only effectively improve resource utilization and optimize network transmission performance, but also take into account the economy and reliability of system deployment. 【Conclusion】It can adapt to the diverse high-speed service requirements such as 4K/8K ultra-high-definition video and cloud computing, which provides a feasible technical path for the next-generation optical access network to address the problem of uneven traffic distribution with good practical application value.

Key words: TWDM-PON; AWG; wavelength sharing; wavelength routing

0 引言

在 4K/8K 超高清视频流、云计算和远程工作等大量信息技术服务的推动下,全球网络数据流量持续呈现急剧增长的趋势。在此背景下,网络架构的创新变得至关重要。现有的无源光网络(Passive Optical Network, PON)技术包括波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)-PON^[1]、光码

分多址(Optical Code Division Multiple Access, OCDMA)-PON^[2]、正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)-PON^[3]以及时分波分复用(Time Wavelength Division Multiplexing, TWDM)-PON^[4]。其中, TWDM-PON 架构凭借其高带宽和高效率的特点,被全业务接入网论坛(Full Service Access Network, FSAN)选择为下一代 PON 第 2 阶段(Next-Generation Passive

收稿日期:2024-07-10; 修回日期:2024-08-12; 纸质出版日期:2026-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62004105)

作者简介:鹿辉(1998-),女,山东济南人。硕士,主要研究方向为无源光网络。

通信作者:刘逢清,副教授。E-mail:liufq@njupt.edu.cn

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

Optical Network Phase 2, NG-PON2)的主要解决方案^[5-6]。然而,即便 TWDM-PON 架构在带宽扩展上展现出巨大潜力,其仍面临诸多挑战。特别是在潮汐效应的影响下,网络流量的周期性变化对系统架构的灵活性提出了更高要求。因此,设计灵活的系统结构对于 PON 中的波长共享起着至关重要的作用。

为了经济有效地部署灵活的 TWDM-PON,本文提出了一种基于阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)的灵活多 TWDM-PON 方案,以有效提升波长资源的灵活分配能力。该结构在光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)处采用固定波长激光器与可调激光器结合的方式进行下行信号发射,在光配线网(Optical Distribution Network, ODN)处部署 AWG 在多个 PON 中进行波长路由,从而实现波长资源的灵活调度,并保持 ODN 的无源特性。

1 灵活的多 TWDM-PON 系统结构

本文提出了一种结合固定和可调波长激光器优势的灵活多 TWDM-PON 架构,通过固定波长激光器满足低负载网络场景下的流量需求,利用可调波长激光器在网络高峰时实时响应动态变化的流量需求。该架构利用 AWG 的多频谱响应(Multi-Frequency Spectrum Response, Multi-FSR)特性,实现波长资源在不同 PON 之间的共享和灵

活调度。

1.1 系统总体结构

图 1 所示为基于 AWG 的灵活多 TWDM-PON 系统架构,包括 OLT、ODN 和光网络单元(Optical Network Unit, ONU)。在传统的 TWDM-PON 结构中,每个 PON 通常分配 4 个波长,组合起来共需 16 个波长。本架构在局端配置 8 个可调谐波长激光器和 8 个固定波长激光器,每个激光器均集成于对应的光收发模块中($TR_{x_1} \sim TR_{x_{16}}$),每个光收发模块同时具备光信号发射与接收功能,发射速率为 10 Gbit/s 的单波长信号。这些激光器发出的光信号经过 WDM 技术,组合成 4 个波长发射模块 $M_1 \sim M_4$,每个模块包含两个固定波长和两个可调谐波长激光器。 $M_1 \sim M_4$ 分别发射波长 $\{\lambda_1^T, \lambda_2^T, \lambda_3^F, \lambda_4^F\}$ 、 $\{\lambda_5^F, \lambda_6^T, \lambda_7^T, \lambda_8^F\}$ 、 $\{\lambda_9^F, \lambda_{10}^F, \lambda_{11}^T, \lambda_{12}^T\}$ 和 $\{\lambda_{13}^T, \lambda_{14}^F, \lambda_{15}^F, \lambda_{16}^T\}$ (上标 T 为可调激光器发射的可调波长;F 为固定激光器发射的固定波长;下标为激光器编号)。在 OLT 的收发模块中,固定波长激光器用于满足各 ODN 的基础流量需求,而可调谐波长激光器则根据各网络的实际流量需求动态调整,灵活分配给各 ODN,以适应流量的实时变化^[7]。本结构具有一种优化策略,即通过将原本负载较小的波长上的数据传输流量集中到一个或少数几个波长上,从而实现波长的有效利用,并节省出部分波长资源,为网络提供额外的保护能力。

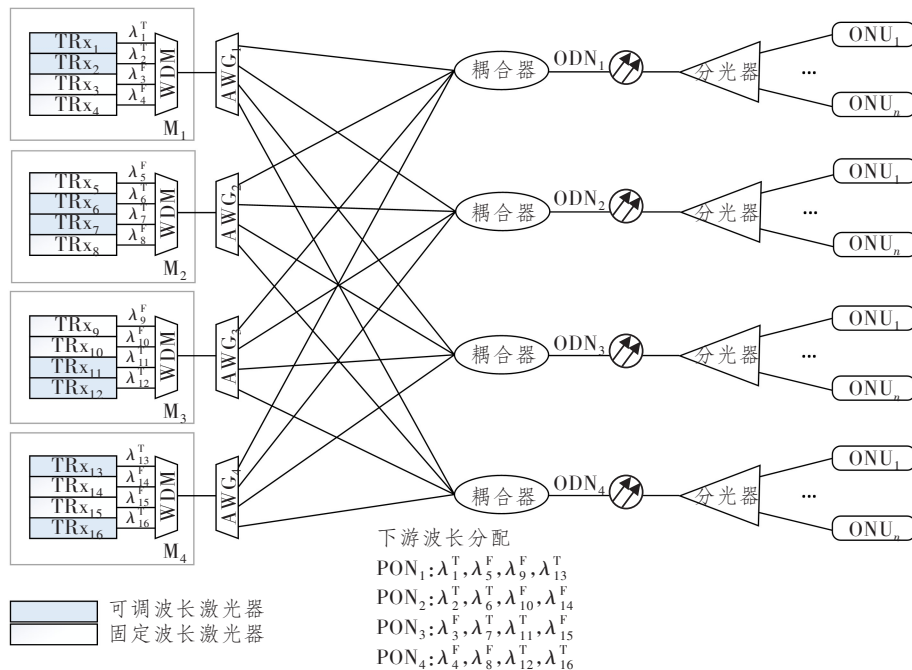


图 1 灵活多 TWDM-PON 系统结构图

Figure 1 Flexible Multi-TWDM-PON system structure

在下行方向上,各模块中的下行波长信号先经 WDM 合波,再通过 AWG 路由至对应的 PON,每个 AWG 的 4 个输出端口分别连接至不同耦合器的输入端,以实现不同 PON 间波长的共享。不同 AWG 同一序号输出端的波长信号经耦合器合波后,一起传输至各 ONU。由于有多个波长信道到达每个 ONU,每个 ONU 通过采用可调谐光学滤波器来选择需要的波长信号,并通过基于雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)^[8]的接收机进行接收。在上行方向,各 ONU 的上行波长在分光器处合波传输,合波信号通过 AWG 路由至上行接收端。由于 AWG 是无源器件,其上下行路由结构相同。每个波长信号在 OLT 端被各自的接收机接收并进行处理。

1.2 AWG 特性与波长路由

① AWG 的周期性

自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)定义为相邻两个光谱峰之间的波长跨度或频率间隔。对于一个 $N \times N$ 的 AWG, N 为 AWG 端口数,其传输特性以 FSR 为周期重复^[9]。FSR 可表示为

$$FSR = \frac{(m-1)c}{2nD}, \quad (1)$$

式中: m 为 AWG 的工作衍射阶次,表示相邻波导之间的光程差等于 m 个中心波长,是决定周期性的重要物理量; n 为波导折射率; D 为阵列波导长度; c 为自由空间光速。

② AWG 的波长输出

由于 AWG 具有周期性,所以根据信号波长和输入端口号,每个端口中的波长被路由到特定的输出端口。输入端口 i 与其输出端口 j 的关系表达式如下:

$$j = 1 + \left(i - 1 + \left\lfloor \frac{f-1}{C} \right\rfloor \right) \bmod N \quad (2)$$

$$i, j \in [1, N] \text{ and } f \in [1, \infty),$$

式中: f 为光信号对应的光载波频率,与波长 λ 满足 $f = c/\lambda$ 的关系,因此可用于描述端口间的等频率间隔性质; C 为波长间隔; N 用于表征输入/输出通道的数量,而非器件的物理尺寸。

图 2 所示为 4×4 型 AWG 的路由特性。当输

入的连续波长数量为 12 时,这些波长将分布在 3 个 FSR 中^[10], $\{\lambda_1^1, \lambda_2^1, \lambda_3^1, \lambda_4^1\}$ 位于 FSR₁ 中, $\{\lambda_5^1, \lambda_6^1, \lambda_7^1, \lambda_8^1\}$ 位于 FSR₂ 中,而 $\{\lambda_9^1, \lambda_{10}^1, \lambda_{11}^1, \lambda_{12}^1\}$ 位于 FSR₃ 中。

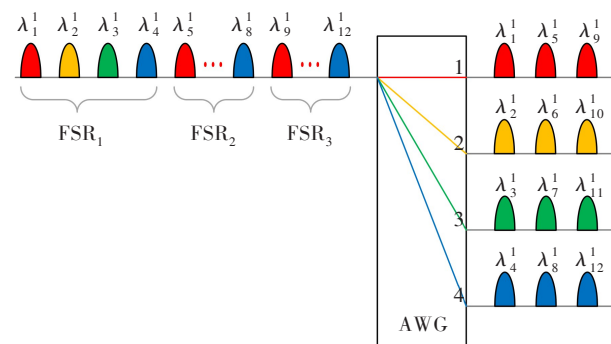


图 2 使用 3 个 FSR 的 AWG 波长路由图

Figure 2 Wavelength routing regulation of AWGR with 3 FSRs

最初,4 个波长 $\{\lambda_1^T, \lambda_5^F, \lambda_9^T, \lambda_{13}^F\}$ 服务于 PON₁,另外 4 个波长 $\{\lambda_2^T, \lambda_6^T, \lambda_{10}^F, \lambda_{14}^F\}$ 服务于 PON₂, PON₃ 和 PON₄ 分别使用 $\{\lambda_3^F, \lambda_7^T, \lambda_{11}^T, \lambda_{15}^F\}$ 和 $\{\lambda_4^F, \lambda_8^F, \lambda_{12}^T, \lambda_{16}^T\}$ (如图 1 所示)。如果 PON₁ 的负载突然增加,现有的 4 个波长无法满足需求,可以通过调谐激光器^[11]重新分配波长:即将适合 PON₁ 的波长从 AWG 的端口 1 输出,并将原本服务于 PON₂、PON₃ 和 PON₄ 的部分波长重新调整至 PON₁。这样既可以有效利用其他网络中的空闲波长,又能解决 PON₁ 流量增加的问题,且不影响其他网络的正常运行。

下游波长分配示意图如图 3 所示,在 M₁ 模块中,TR_{x2} 原本用于 λ_2^T ,现调谐至 AWG₁ 的第 2 个 FSR 的第 1 个波长 λ_1^{T+} ,因此, M₁ 模块发射 $\{\lambda_1^T, \lambda_1^{T+}, \lambda_3^F, \lambda_4^F\}$ 。M₂ 模块中,TR_{x6} 和 TR_{x7} 调谐至 AWG₂ 的第 2 个和第 3 个 FSR 的第 1 个波长 λ_5^{T+} 和 λ_5^{T++} ,发射 $\{\lambda_5^F, \lambda_5^{T+}, \lambda_5^{T++}, \lambda_8^F\}$ 。以此类推, M₃ 和 M₄ 模块发射 $\{\lambda_9^F, \lambda_{10}^F, \lambda_9^{T+}, \lambda_9^{T++}\}$ 和 $\{\lambda_{13}^T, \lambda_{14}^F, \lambda_{15}^F, \lambda_{13}^{T+}\}$ 。PON₁ 使用 10 个波长,包括 $\{\lambda_1^T, \lambda_1^{T+}, \lambda_5^F, \lambda_5^{T+}, \lambda_5^{T++}, \lambda_9^F, \lambda_9^{T+}, \lambda_9^{T++}, \lambda_{13}^T, \lambda_{13}^{T+}\}$,最高速率达到 100 Gbit/s。与此同时, PON₂、PON₃ 和 PON₄ 的速率保持在 20 Gbit/s,分别使用 $\{\lambda_{10}^F, \lambda_{14}^F\}$ 、 $\{\lambda_3^F, \lambda_{15}^F\}$ 和 $\{\lambda_4^F, \lambda_8^F\}$ 。因此,每个 PON 的下行传输速率能够在 20~100 Gbit/s 范围内,以 10 Gbit/s 的步长灵活配置。

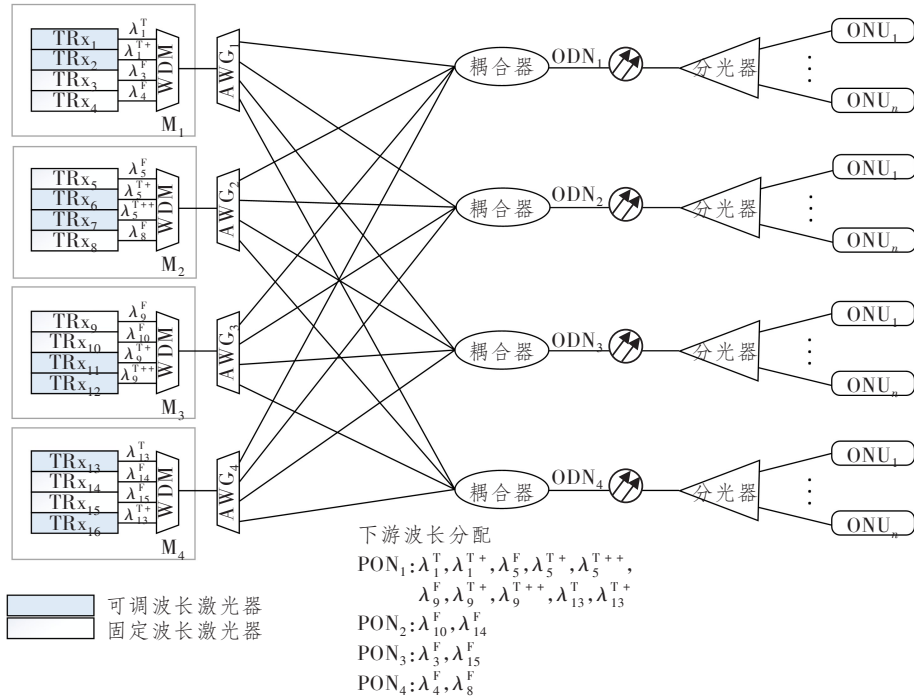


图3 灵活的下游波长分配

Figure 3 Flexible downstream wavelength allocation

2 仿真结果分析

本文使用 OptiSystem 仿真平台搭建了灵活多 TWDM-PON 系统,并使用眼图分析仪和光谱仪验证了系统的可行性,包括观测下行信号接收端的眼图和误码率(Bit Error Rate, BER)等参数。系统设计时,设置了整体比特率为 10 Gbit/s、序列长度为 1 024 bit、每 bit 样本数为 32、总样本数为 32 768。在仿真中,各主要器件的参数设置如下:

- 激光器发射功率为 0 dBm。
- 光纤的衰减为 0.2 dB/km,色散为 $16.75 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。
- WDM 器的插入损耗为 2 dB。
- AWG 插入损耗为 3 dB,频率间隔为 0.8 nm。
- 可调滤波器的带宽为 30 GHz,插入损耗为 2 dB。

2.1 系统配置与结果

图 4 所示为本文设计的系统仿真验证架构图。在验证过程中,本文选定了 L 波段作为下行波长的

规划范围,并配合使用马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)来实现外部调制^[12]。在仿真过程中 AWG 被用于分配波长,采用 WDM 器来替代耦合器,以实现多个波长的合并。合并后的信号随后通过 20 km 长的单模光纤传输至各个分路器。这些分路器按照 1:128 的分配比例,将信号分发到各个 ONU;在信号的接收端,由于下行信号采用了不同的波长通道,利用光可调滤波器来选取需要接收的特定波长信号,最后再由 APD 探测放大后进行接收。对于上行信号,与下行传输相同,同样采用 MZM 外部调制,上行波长设定在 C 波段内。为了模拟上行时分多址,我们使用了两个动态 Y 选择器构建的时间延迟模块^[13]。

下行信号发射端 $M_1 \sim M_4$ 中,分别设置了起始波长:1 570.0、1 579.6、1 589.2 和 1 598.8 nm(对应 TRx_1 、 TRx_5 、 TRx_9 和 TRx_{13})。每个模块内的其他波长则在上述基础上以 0.8 nm 的间隔依次递增,各 AWG 的 FSR 波长分配情况如表 1 所示。

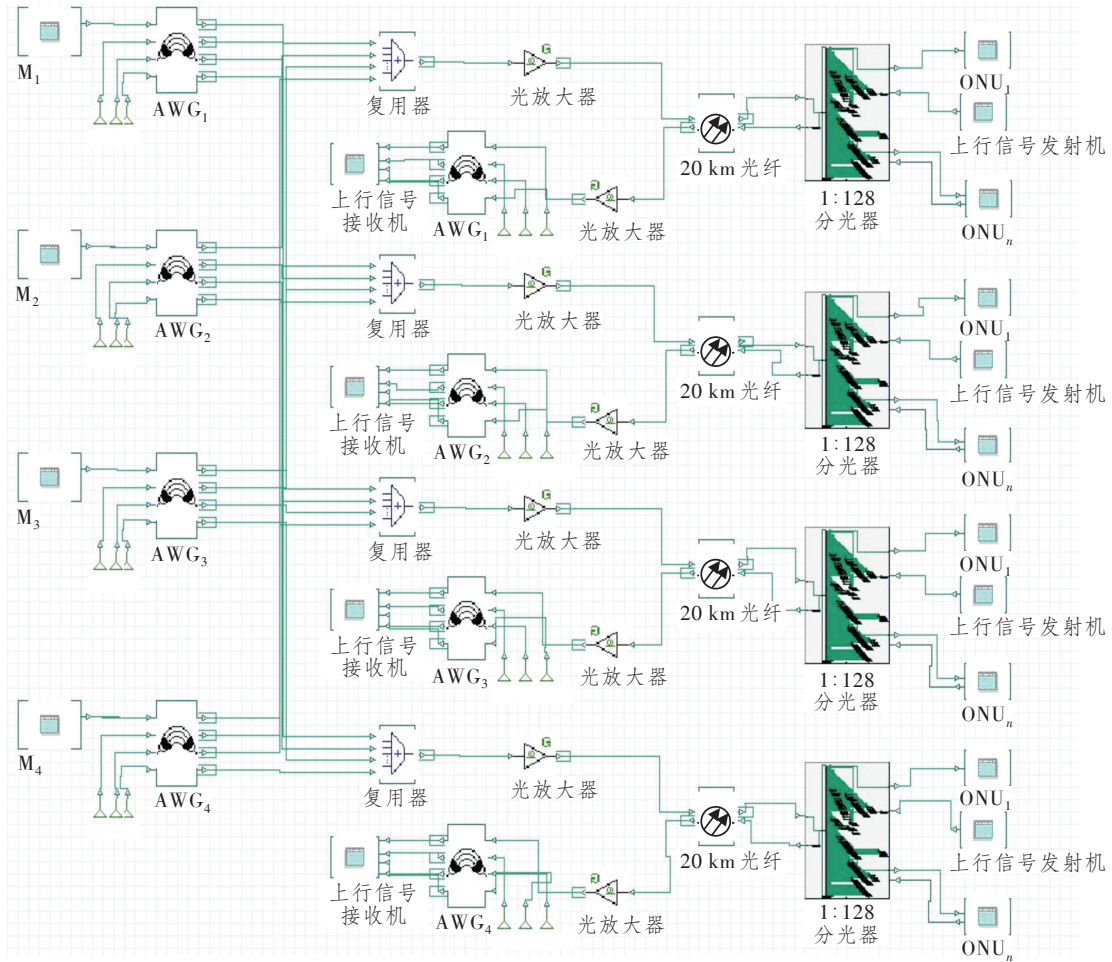


图 4 系统仿真架构图

Figure 4 The simulation diagram

表 1 AWG 的 FSR 波长分配表

Table1 FSR wavelength allocation table of AWG

	FSR ₁				FSR ₂				FSR ₃			
	λ_1^1/nm	λ_2^1/nm	λ_3^1/nm	λ_4^1/nm	λ_5^1/nm	λ_6^1/nm	λ_7^1/nm	λ_8^1/nm	λ_9^1/nm	λ_{10}^1/nm	λ_{11}^1/nm	λ_{12}^1/nm
AWG ₁	1570.0	1570.8	1571.6	1572.4	1573.2	1574.0	1574.8	1575.6	1576.4	1577.2	1578.0	1578.8
AWG ₂	1579.6	1580.4	1581.2	1582.0	1582.8	1583.6	1584.4	1585.2	1586.0	1586.8	1587.6	1588.4
AWG ₃	1589.2	1590.0	1590.8	1591.6	1592.4	1593.2	1594.0	1594.8	1595.6	1596.4	1597.2	1598.0
AWG ₄	1598.8	1599.6	1600.4	1601.2	1602.0	1602.8	1603.6	1604.4	1605.2	1606.0	1606.8	1607.6

在上述波长路由章节中,当 PON₁ 负载突增时,系统通过灵活调整波长路由,重新分配资源以应对需求变化。在 M₁ 模块中,4 个波长 {1570.0、1573.2、1571.6、1572.4}nm,1570.0 和 1573.2 nm 虽位于不同 FSR 但具有相同频谱位置,因此分配给 PON₁,而 1571.6 和 1572.4 nm 分别分配给 PON₃ 和 PON₄。M₂ 模块中的 4 个波长 {1579.6、1582.8、1586.0、1582.0}nm,其中,前 3 个波长因位于不同 FSR 的相同频谱位置而分配给 PON₁,而 1582.0 nm 则分配给 PON₄。其他模块遵循类似原则,通过调整可调激光器输出波长,在不同 PON 间

动态分配带宽容量。最终,PON₁ 获得 10 个下行波长 {1570.0、1573.2、1579.6、1582.8、1586.0、1589.2、1592.4、1595.6、1598.8、1602.0} nm, PON₂、PON₃ 和 PON₄ 分别获得两个波长,波长集合为 {1590.0、1599.6} nm、{1571.6、1600.4} nm 和 {1572.4、1582.0} nm。

实验结果如图 5 和图 6 所示。PON₁ 的光谱图包含 10 个不同下行波长,使其信息传输速率最高可达 100 Gbit/s。ONU₁ 下行信号接收端的眼图清晰,BER 低至 10⁻⁵⁴,在 20 km 传输距离下支持超过 1:128 的用户分光比。与传统 TWDM-PON 系统

(通常提供 40~80 Gbit/s 下行速率)相比,本系统速率可达 20~100 Gbit/s;同时是 NG-PON2 标准^[14]最低要求(40 Gbit/s 聚合容量)的 3 倍。

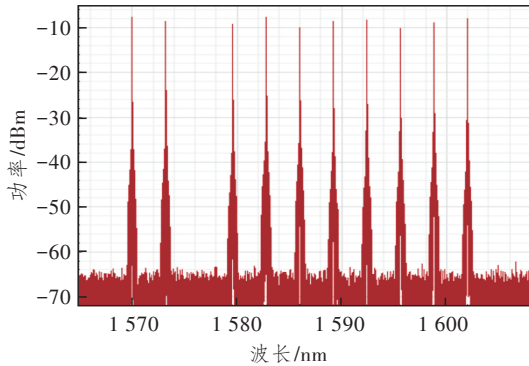


图 5 ODN₁ 中下行波长的光谱图

Figure 5 Spectrum of downstream wavelengths in ODN₁

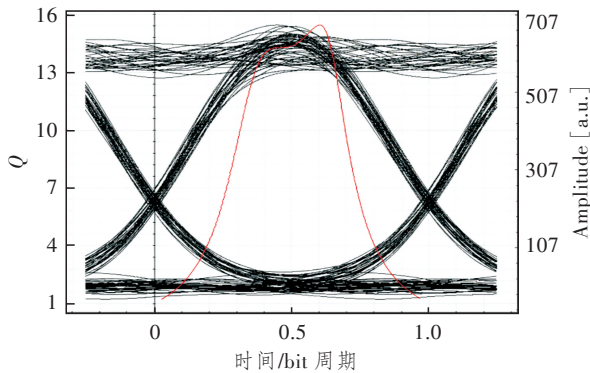


图 6 下行波长接收端眼图

Figure 6 Eye diagram of the downstream signals at the receiving end

2.2 灵敏度分析与扩展性

图 7 所示为下行信号的 BER 数据,这些数据来自对 4 个不同发射模块中的下行波长(分别为 1 570.0、1 580.4、1 590.8 和 1 601.2 nm)进行多组不同的仿真实验。为了确保数据的一致性,所需功率的测量均在 APD 的输入端(即 WDM 场景下的光学滤波器后端)完成。由图可知,以前向纠错^[15]标准(1×10^{-3})作为参考,下行信号的灵敏度大约为 -29 dBm。若下行通道的发射端激光器设定的发射功率均为 5 dBm,则计算得出整个下行传输系统的功率预算约为 34 dB。类似地,当测量上行信号接收机的灵敏度时,PON₁中多个 ONU 的上行发射波长均被设定为 1 530 nm,他们通过时分多址技术在不同的时间片内传输信息。同样以前向纠错的 BER 标准为基准,图 8 中显示上行信号的灵敏度为 -30 dBm。若上行通道的发射端激光器发射功率均为 5 dBm,则整个上行传输系统的功率预算经计算约为 35 dB。在接收灵敏度方面,与时分复用

(Time Division Multiplexing, TDM)-PON^[16]相比(通常在 -26~-28 dBm 之间),灵活多 TWDM-PON 架构可以支持更长的传输距离或更高的分光比,从而增加了网络的覆盖范围和可靠性。

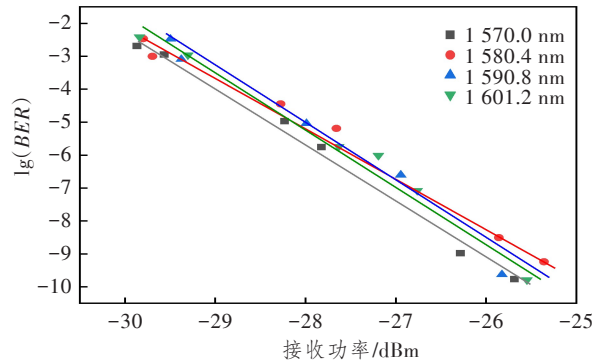


图 7 下行信号 BER

Figure 7 BER of downstream signal

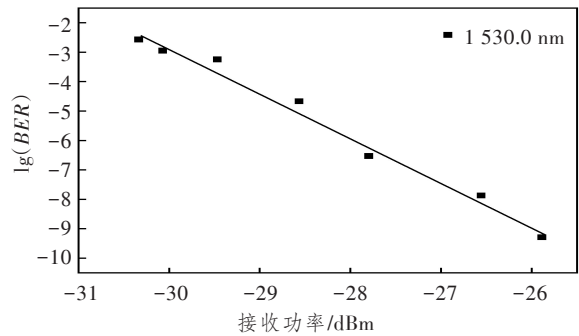


图 8 上行信号 BER

Figure 8 BER of upstream signal

图 9 所示为本系统在不同传输距离和用户分光比条件下对 1 570 nm 波长信号 BER 测量情况。如图所示,当信号分光比为 1:128,且传输距离为 20 km 时,下行信号的 BER 保持在较低的水平(10^{-5}),证明此系统还具备进一步扩展的潜力。由图可知,在维持信息传输可靠性的前提下,确保 BER 保持在可接受范围内,本系统不仅能够将最大传输距离扩展至 30 km,且系统分光比可达 1:512。

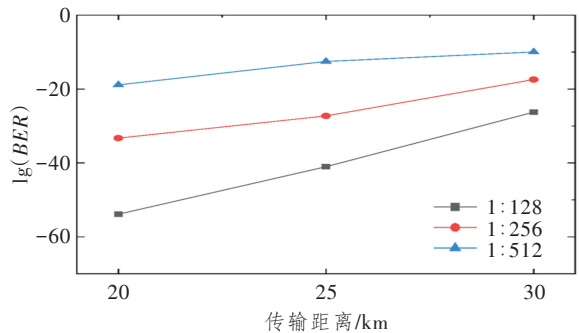


图 9 不同分光比和传输距离下的下行信号 BER
Figure 9 The BER of downlink signal under different splitting ratios and transmission distances

2.3 不同发射功率下的 BER

在 TWDM-PON 系统中,过低的发射功率可能会导致 BER 过高,从而严重影响通信质量;而另一方面,过高的发射功率则可能增加系统的运行成本和能耗。因此,需选择合适的发射功率来平衡系统性能和成本。在系统可行性验证过程中,设置发射功率为 0 dBm 时,下行信号的 BER 保持在较低水平,表明系统的发射功率有进一步扩展的空间。因此,在原有实验基础上进一步减小发射功率,继续测量 1 570 nm 波长信号的 BER。图 10 所示为不同发射功率下 1 570 nm 光信号的 BER 变化趋势。由图可知,发射功率从 -12 提升至 0 dBm 时,BER 显著下降,这说明发射功率降低时 BER 会相应上升。根据前向纠错标准,下行信号发射时,其功率下限可设定为 -12 dBm。

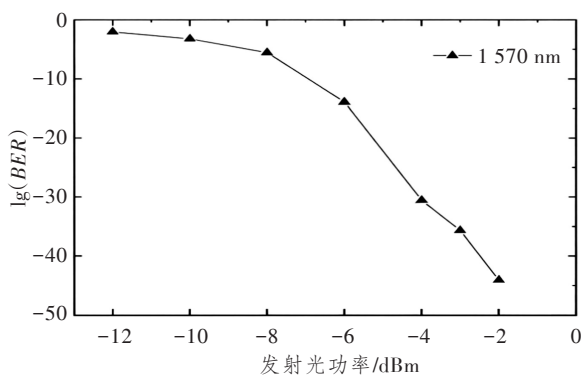


图 10 不同发射功率下的接收 BER

Figure 10 The BER under different transmitting powers

3 结束语

针对网络中存在的区域间和时间段内流量分布不平衡的现象,即所谓的“潮汐效应”,波长资源无法在大规模范围内灵活调配等问题,本文提出了一种灵活多 TWDM-PON 架构,该架构结合了固定波长激光器的经济优势和可调波长激光器的灵活性,通过采用固定波长激光器来满足低负载网络场景下的流量需求,而在网络流量高峰时段,则利用可调波长激光器来实时响应并满足动态变化的流量需求。该架构通过引入 AWG 无源器件,支持不同 PON 间的波长共享,从而进一步提高了网络资源的利用率。

通过系统传输实验表明,在单波长传输速率为 10 Gbit/s 时,下行传输功率预算超过 34 dB。在灵活配置的情况下,下行信息传输速率最大可以达到 100 Gbit/s,同时接收端监测到的眼图 BER 低至 10^{-54} 数量级。在系统扩展方面,该架构在 30 km 的

传输距离下,依然能够支持 1:512 的用户分光比。

参考文献:

- [1] Effenberger F J, Zhang D. WDM-PON for 5G Wireless Fronthaul [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(2): 94–99.
- [2] Kumari M, Sharma N, Chauhan R, et al. Analysis of 6×40 Gbps Symmetric Next Generation OCDMA-PON with Modified ZCC Code[C]//2024 International Conference on Distributed Computing and Optimization Techniques (ICDCOT). Bengaluru, India: IEEE, 2024: 10516174.
- [3] Chow C W, Yeh C H, Wang C H, et al. Studies of OFDM Signal for Broadband Optical Access Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6): 800–807.
- [4] Lu Y, Cao L, Wu S, et al. A Novel Smooth Evolution to TWDM PON based on Wavelength Complement Coding [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103053.
- [5] Zhang D, Liu D, Wu X, et al. Progress of ITU-T Higher Speed Passive Optical Network (50G-PON) Standardization[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(10): D99–D108.
- [6] Yeh C H, Chow C W, Yang M H, et al. A Flexible and Reliable 40-Gb/s OFDM Downstream TWDM-PON Architecture [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 7905709.
- [7] 刘源. 波长固定和可调激光器组合的TWDM-PON系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Liu Y. Architecture and Performance of Fixed and Tunable Transmitter Combined TWDM-PON[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [8] Kharraz O, Forsyth D. Performance Comparisons between PIN and APD Photodetectors for Use in Optical Communication Systems [J]. Optik, 2013, 124(13): 1493–1498.
- [9] 原荣. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
Yuan R. Fourth Edition of Optical Fiber Communications [M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [10] Humpeler M, Serecunova S, Seyringer D. AWG-Channel-Spacing: a New Software Tool to Calculate Accurate Channel Spacing of an AWG Optical Multiplexer/Demultiplexer [C]//2022 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom). Graz, Austria: IEEE, 2022: 9880652.

- [11] Cheng N, Gao J, Xu C, et al. Flexible TWDM PON System with Pluggable Optical Transceiver Modules[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 2078–2091.
- [12] 周骥, 郭栋, 张俊文. 超100 Gbit/s PON: 灵活速率和相干架构[J]. *光通信研究*, 2024(1): 230143.
Zhou J, Guo D, Zhang J W. Exceeding 100 Gbit/s PON: Flexible Rate and Coherent Architecture [J]. *Study on Optical Communications*, 2024(1): 230143.
- [13] 赵翔宇, 刘逢清. 基于光开关阵列的灵活 TWDM-PON系统研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(2): 188–195.
Zhao X Y, Liu F Q. Research on Flexible TWDM-PON System based on Optical Switch Array[J]. *Laser Technology*, 2024, 48(2): 188–195.
- [14] ITU-T G. 989-2013, Digital Systems and Networks-40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (NG-PON2): General Requirements G. 989.1[S].
- [15] Borkowski R, Straub M, Ou Y, et al. World's First Field Trial of 100 Gbit/s Flexible PON (FLCS-PON) [C]// 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). Brussels, Belgium: IEEE, 2021: 9333413.
- [16] Abdalla M E, Idrus S M, Mohammad A B. Hybrid TDM-WDM 10G-PON for High Scalability Next Generation PON[C]//2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2013: 6566595.