



25 Gbit/s 无源光网络技术进展和实验研究

耿丹, 郭勇, 印永嘉, 马壮, 张伟良

(中兴通讯股份有限公司, 上海 201203)

摘要: 高清视频、虚拟现实等新业务的产生以及 PON 传输 5G 移动前传和回传信号的需求, 要求 PON 能支持单波超过 10 Gbit/s 速率的传输。当线路速率超出 10 Gbit/s 时, 色散和功率预算成为限制系统性能的主要因素。介绍了 25 Gbit/s PON 系统的研究进展和存在的问题, 并对采用基于零色散附近的 25 Gbit/s 速率的 EML、分别基于 25 Gbit/s 和 10 Gbit/s 速率的 APD 接收机进行了实验研究。实验结果表明, 采用 25 Gbit/s 速率的 APD, EML 的发射光功率设置为 +5 dBm, 在没有光放大器的情况下, 可以达到 10 Gbit/s 对称的吉比特无源光网络的 32 dBm 的 N2 级别的光功率预算。

关键词: 无源光网络; 25 Gbit/s; 光双二进制; 脉冲幅度调制; 电双二进制

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017039

Development and experiment research of 25 Gbit/s passive optical network

GENG Dan, GUO Yong, YIN Yongjia, MA Zhuang, ZHANG Weiliang

ZTE Corporation, Shanghai 201203, China

Abstract: With the new service development of high-definition video and virtual reality and the requirement of transporting the fifth generation mobile fronthaul/backhaul signals, passive optical network (PON) is required to transmit signals above 10 Gbit/s. When the line rate is above 10 Gbit/s, chromatic dispersion and power budget are the main constraint factor of system performance. Development and difficulty of 25 Gbit/s PON were introduced. 25 Gbit/s PON was studied in experiment using 25 Gbit/s EML laser with zero dispersion wavelength, 25 Gbit/s APD and 10 Gbit/s APD. Experiment results show that 32 dBm optical power budget (N2 level in 10 Gbit/s symmetric EPON) was achieved when EML transmit optical power is +5 dBm and 25 Gbit/s APD is used without optical amplifier.

Key words: passive optical network, 25 Gbit/s, optical duo-binary, pulse amplitude modulation, electronic duo-binary

1 引言

随着网络技术的发展, 可以利用网络传输大量的语音、数据、视频等业务, 因此对带宽的要求不断提高, 无源光网络 (passive optical network, PON) 就是在这种需求

下产生的, PON 系统的拓扑结构如图 1 所示^[1], PON 系统通常由局侧的光线路终端 (optical line terminal, OLT)、用户侧的光网络单元 (optical network unit, ONU) 和光分配网络 (optical distribution network, ODN) 组成, 通常采用点到多点的网络结构。ODN 由单模光纤和光分路器、光连接器

收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 上海市科技成果转化和产业化基金资助项目 (No.16511104100)

Foundation Item: Transformation and Industrialization of Scientific and Technological Achievements in Shanghai (No.16511104100)

等无源光器件组成,为 OLT 和 ONU 之间的物理连接提供光传输媒质。

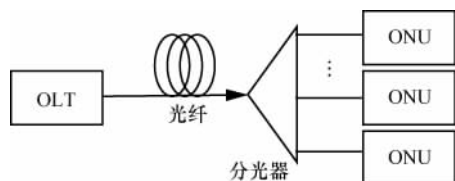


图 1 PON 系统的拓扑结构

目前,PON 的单波长传输速率为 1.25 Gbit/s、2.5 Gbit/s、10 Gbit/s。随着高清视频、虚拟现实、增强现实等新业务的产生以及希望通过 PON 传输 4G 和 5G 移动前传和回传信号,要求 PON 能支持单波更高速率的传输。在数据中心技术中,25 Gbit/s 速率的光器件和电器件的应用日益成熟,使得单波长 25 Gbit/s 的速率选择成为研究热点。在 2016 年 1 月,IEEE 立项研究 25 Gbit/s/50 Gbit/s/100 Gbit/s PON,其中 25 Gbit/s PON 是通过单波长 25 Gbit/s PON 实现,50 Gbit/s PON 通过两个单波长 25 Gbit/s 波分复用后实现,100 Gbit/s PON 通过 4 个单波长 25 Gbit/s 波分复用后实现。2016 年 9 月,ITU-T Q2 也立项超 10 Gbit/s 速率的 PON 技术白皮书,其中主要研究的单波长速率为 25 Gbit/s。

2 25 Gbit/s 传输的主要技术挑战和研究进展

当线路速率超出 10 Gbit/s 时,色散和功率预算等技术需要研究。当单波长速率达到 25 Gbit/s 时,如果光信号承载在 C 带波长(中波长带)或者 L 带波长(长波长带),由于 C 带和 L 带波长的色散效应,传统 PON 系统中的 NRZ

(non-return to zero, 不归零码)调制的 25 Gbit/s 速率的光信号在光纤中传输 20 km 后,信号在光纤中会产生信号间干扰,信号的光信噪比下降,信号质量劣化,导致接收方的误码率较大。因此需要考虑将 25 Gbit/s 的光信号承载在 S 带波长(短波长带),因为 S 带波长位于光纤的零色散位置附近,可以减少色散效应导致的光信号质量劣化的影响。另一种减少色散效应的方法是采用其他的调制方式,例如光双二进制(optical duo-binary, ODB)、PAM4(pulse amplitude modulation, 脉幅调制)、电双二进制(electronic duo-binary, EDB)。

2.1 光双二进制

光双二进制编码的实验设置如图 2 所示^[1],其中 AMP(amplifier)为放大器,MZM 为马赫曾德调制器,APD(avalanche photo-diode)为基于雪崩光电二极管的一种半导体光检测器。发送方将双二进制数据利用放大器放大后,通过 MZM 调制到激光器上在光纤中传输后,经过分光器后到达接收方的光检测器,然后转变成双二进制数据。采用光双二进制的调制方式可以克服高速率信号传输时光纤中的色散效应,但是光双二进制需要 MZM 将双二进制数据调制到激光器上,MZM 的引入增加了 PON 系统的插入损耗和系统成本。

2.2 电双二进制

电双二进制编码的实验设置如图 3 所示^[2],发送方将数据经过 FEC 编码和双二进制预编码,通过 AMP 放大后经过直接调制激光器(directly-modulated laser, DML)或者外腔调制激光器(externally modulated laser, EML)发送到光纤中,然后在接收方由光接收机 APD 接收,并进行光电

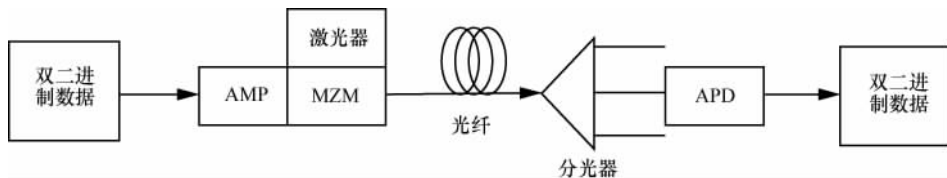


图 2 光双二进制编码实验设置

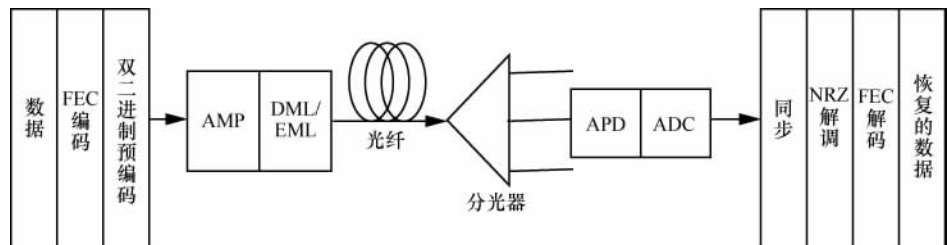


图 3 电双二进制编码实验设置



转换, 转换的信号经过模拟数字转换器(analog-digital conversion, ADC), 然后经过同步、NRZ 解调和 FEC 解码后得到恢复的数据。电双二进制可以采用 10 Gbit/s 速率的光发送机发送 25 Gbit/s 速率的光信号, 从而减少光器件的成本, 但是电双二进制的接收灵敏度性能较以往的 NRZ 的接收灵敏度性能劣化几个 dB。

2.3 NRZ 或者 PAM4

基于 PAM4 或者 NRZ 编码的实验设置如图 4 所示^[3], 数据经过 FEC 编码后, 再经过 NRZ 或者 PAM4 编码, 通过过采样后进行脉冲整形, 然后通过数字模拟转换器(digital-analog conversion, DAC)进行数模转换, 信号通过放大器放大后, 通过直调激光器或者外腔调制激光器发送到光纤中。光信号通过光纤和分光器后由 APD 接收, 再经过 ADC 进行模数转换, 转换后的信号经过重采样、时钟恢复、均衡和 FEC 解码后得到恢复的数据。相对于传统的 NRZ 编码, 增加了 DAC、ADC、均衡、过采样、重采样等技术, 这可以克服色散导致的信号劣化, 并且增加了带宽效率, 但是由于需要使用高速 DAC、ADC 和数字信号处理, 增加了系统的复杂性和成本, 并且需要考虑简化 DSP 的实施来降低功耗。

除了上述调制技术外, 还可以在接收方的接收机侧增加电色散补偿模块, 或者在光纤光路中增加色散补偿光纤等技术, 但是这些都会增加系统的损耗和成本。25 Gbit/s 速率的 PON 除了色散问题需要解决之外, 功率预算也是一个要克服的问题。当接收机接收光信号的线路速率从

10 Gbit/s 增加到 25 Gbit/s, 接收机的接收灵敏度劣化 4 dB, 25 Gbit/s 速率的 PON 如果需要和现有的 10 Gbit/s 速率的 PON 在相同的 ODN 共存时, 需要 25 Gbit/s 速率的 PON 和 10 Gbit/s 速率的 PON 具有相同的光功率预算, 这要求在 25 Gbit/s 速率的 PON 系统中, 提高光发射机的发射功率或者接收机的灵敏度, 可以通过在发送机后和接收机前增加放大器来提高光发射机的发射功率和接收机的灵敏度, 但是增加放大器会提升系统成本和功耗。

3 高功率预算的实验研究

为了解决 25 Gbit/s PON 系统的色散和功率预算问题, 采用基于零色散附近的 25 Gbit/s 速率的 EML、分别基于 25 Gbit/s 和 10 Gbit/s 速率的 APD 接收机进行了实验研究。基于 25 Gbit/s 的 APD 系统, 采用的 NRZ 编码和解码; 基于 10 Gbit/s 速率的 APD 接收机, 由于采用 10 Gbit/s 速率的 APD 接收 25 Gbit/s 的信号有带宽受限的问题, 所以在接收侧采用了光双二进制直接检测恢复 25 Gbit/s 速率的数据。

基于 25 Gbit/s 速率的 APD 实验设置如图 5 所示, 为减少色散效应, 实验中的 25 Gbit/s 的 EML 采用的波长为 1 309 nm 的激光器, 光信号的消光比为 8.1 dB。25 Gbit/s 的误码分析仪发出 25 Gbit/s 速率的 $2^{31}-1$ 的伪随机码, 经过 25 Gbit/s 的外腔调制激光器后转化为光信号在光纤中传输, 经过可调光衰减器后到达接收方的 APD 接收机, 光信号经过 APD 转化为电信号后经过跨阻放大

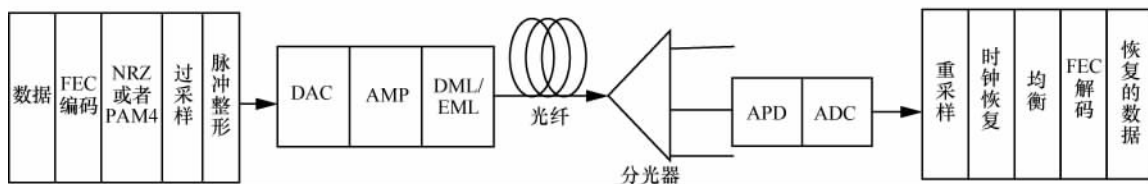


图 4 基于 PAM4 或者 NRZ 编码实验设置

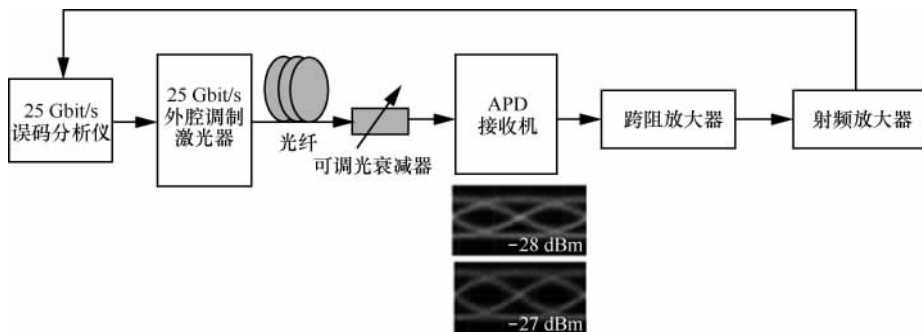


图 5 基于 25 Gbit/s 速率的 APD 实验设置

器和射频放大器后输入 25 Gbit/s 误码分析仪。实验分别测量了背靠背(0 km 光纤)和经过 20 km 光纤后接收光功率和误码率的关系,如图 6 所示。

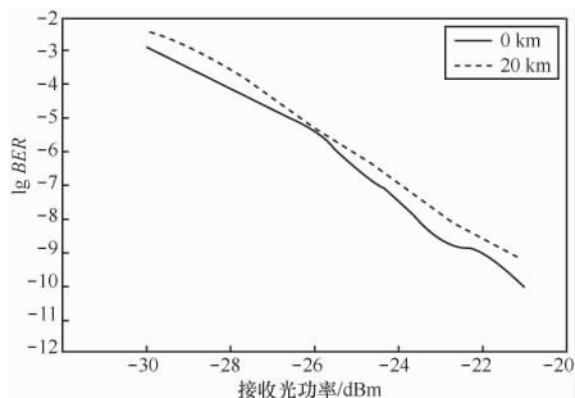


图 6 实验测量的接收光功率和误码率的关系曲线

在 10^{-3} 的误码率下,背靠背情况下 APD 的接收灵敏度为 -28 dBm,25 Gbit/s 的光信号经过 20 km 光纤的传输后,光纤色散效应导致信号的接收灵敏度下降 1 dB,如图 5 下方眼图。本实验中,将 EML 的发射光功率设置为 +5 dBm,经过 20 km 光纤后在 10^{-3} 的误码率下接收灵敏度为 -27 dBm,在没有光放大器的情况下,可以达到 10 Gbit/s 对称的吉比特无源光网络的 32 dBm 的 N2 级别的光功率预算,可以用在现有的 ODN 上替代 N2 级别光功率预算的 10 Gbit/s 速率的 PON 系统,或者和现在的 ODN 上 N2 级别光功率预算的 10 Gbit/s 速率的 PON 系统共存。

基于 10 Gbit/s 的 APD 的实验如图 7 所示,为减少色散效应,实验中的 25 Gbit/s 的 EML 采用的波长为 1 309 nm 的激光器,光信号的消光比为 8.1 dB。25 Gbit/s 的误码分析仪发出 25 Gbit/s 速率的 $2^{31}-1$ 的伪随机码,经过 25 Gbit/s 的 EML 后转化为光信号通过可调光衰减器后到达接收方的 10 Gbit/s 速率的光接收机 APD,光信号经过 APD 转化为电信号,电信号经过电双二进制检测器后到达 25 Gbit/s 误码分析仪。由于使用了 10 Gbit/s 速率的接收机接收 25 Gbit/s 速率的信号,导致了信号的不同比特之间的干扰,造成了接收到的信号为三电平信号,如图 7 下方眼图,实验采用了三电平信号检测器将接收到的信号恢复成 25 Gbit/s 速率的二进制信号。实验测量了背靠背情况下接收光功率和误码率的关系,如图 8 所示,在背靠背的测试情况下,在 10^{-3} 的误码率下,APD 的接收灵敏度为 -22 dBm。

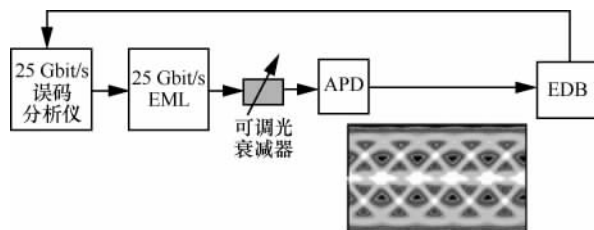


图 7 基于 10 Gbit/s 速率的 APD 实验

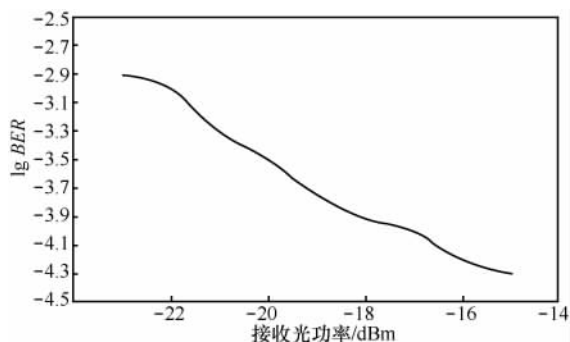


图 8 实验测量的接收光功率和误码率的关系曲线

4 结束语

为了解决 25 Gbit/s PON 系统的色散和功率预算问题,采用基于零色散附近的 25 Gbit/s 速率的 EML、分别基于 25 Gbit/s 和 10 Gbit/s 速率的 APD 接收机进行了实验研究。实验结果表明,采用 25 Gbit/s 速率的 APD, EML 的发射光功率设置为 +5 dBm,经过 20 km 光纤后在 10^{-3} 的误码率下可以获得 -27 dBm 的接收灵敏度,在没有光放大器的情况下,达到 10 Gbit/s 对称的吉比特无源光网络的 32 dBm 的 N2 级别的光功率预算;采用 10 Gbit/s 速率的 APD 和 EDB 检测技术, EML 的发射光功率设置为 +5 dBm,背靠背情况下在 10^{-3} 的误码率下可以获得 -22 dBm 的接收灵敏度,系统光功率预算为 27 dBm,下降 5 dB。实验证明, NRZ 编码下,采用 25 Gbit/s 速率的 APD 接收机,能达到 10 Gbit/s 对称的吉比特无源光网络的 32 dBm 的 N2 级别的光功率预算。

参考文献:

- [1] YE Z, LI S, CHENG N, et al. Demonstration of high-performance cost-effective 100-Gb/s TWDM-PON using 4x25-Gb/s optical duobinary channels with 16-GHz APD and receiver-side post-equalization[C]//European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27–October 1, 2015, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2015: 3-10.
- [2] HOUSMAN V, VEEN D, GNAUCK A, et al. APD-based duobinary direct detection receivers for 40 Gbit/s TDM-PON[C]//



The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC), March 24–26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: Th4H.1.

- [3] Technology review on transmitting 25 Gb/s over a single wavelength channel[EB/OL]. [2016–12–16]. <http://www.itu.int/md/T13-SG15-C-1944/en>.

[作者简介]



耿丹(1977–),女,博士,中兴通讯股份有限公司工程师、预研系统工程师,主要从事光纤通信的研究工作。



印永嘉(1978–),男,中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研系统工程师,主要从事通信技术的研究工作。



马壮(1970–),男,博士,中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研总监,主要从事通信技术的研究工作。



郭勇(1976–),男,博士,中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研系统工程师,主要从事通信技术的研究工作。



张伟良(1974–),男,博士,中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研系统工程师,主要从事通信技术的研究工作。