

时分波分复用无源光网络关键技术

胡卫生, 义理林, 何浩, 李正璇, 李军, 毕美华

上海交通大学, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 下一代光接入网采用波长堆叠同时提升单波长速率的方式提升网络容量。分析了直接调制技术在下一代无源光网络第二阶段(NG-PON2)和下一代以太无源光网络(NG-EPON)中的应用前景, 讨论了啁啾管理技术和功率预算提升方案, 并进行了系统演示。探讨了全业务接入网共存的无源光网络中波长间串扰, 提出通过编码降低拉曼串扰的影响。

关键词 无源光网络; 直调直检; 啁啾管理; 受激拉曼散射

光纤接入主要采用无源光网络(PON)架构实现。随着超高清电视、虚拟现实等应用的迅速发展, 用户对网络带宽的需求不断提升。国际电信联盟电信标准组织(ITU-T)与全业务接入网组织(FSAN)于2011年开始制定下一代无源光网络第二阶段(NG-PON2)技术标准, 国际电气和电子工程师协会标准组(IEEE-SA)也于2014年开始了下一代以太无源光网络(NG-EPON)标准的制定工作。经过广泛研究与讨论, 综合考虑技术成熟度、后向兼容性及升级成本等因素, 基于波长堆叠技术的时分波分复用无源光网络(TWDM-PON)架构成为入选方案。

下一代无源光网络要求更长的接入距离和更高的接入速率, 从而对系统的功率预算和色散管理提出了更高的要求, 高速信号传输中涉及的高阶调制和解调技术也是亟待解决的重点和难点。同时, 接入网与用户和终端直接相关, 是整个光通信网络的“最后一公里”, 从而决定了接入网系统对成本十分敏感。因此, 在满足系统指标要求的前提下降低技术复杂性和系统成本, 尽量用低成本器件实现高性能, 成为下一代接入网研究的重要方向。

1 4×10 Gbit/s NG-PON2 系统

2011年5月, FSAN发布了NG-PON2需求白皮书。到目前为止, ITU-T对TWDM-PON标准体系的布局已基本完成, 形成了G.989系列标准。G.989.1规范了TWDM-PON总体要求, 支持40 Gbit/s下行带宽, 10 Gbit/s(可扩展到40 Gbit/s)上行带宽, 40 km差分距离, 最大1:256分光比, 上下行至少四个时分波分复用通道^[1]。2012年, G.989.2定义了TWDM-PON波长规划, 下行信道定义在L+波段(1596~1603 nm), 上行在C-波段^[2]。G.989.3描述的是帧协议。

直调激光器(DML)如分布式反馈激光器(DFB)、分布式布拉格反射激光器(DBR)等具有体积小、功耗低、输出功率高、成本低等优势, 用作接入系统发射机可以有效地降低成本。传统1.25~2.5 Gbit/s PON的上行信道均分配在O-波段(1260~1360 nm)。该波段光纤色散系数非常小, 加上上行信号速率在2.5 Gbit/s以下, 由光纤色散导致的脉冲展宽几乎可以忽略不计。但在NG-PON2中, 上行波长在C波段(1530~1565 nm), 该波段光纤色散系数约为17 ps/(nm·km)。DML啁啾系数高, 在高速直接调制过程中会伴随着很强的啁啾, 使信号光谱变宽, 从而使脉冲更容易受色散影响而展宽。常见的针对DML的色散管理方案有数字信号处理、色散补偿光纤、高阶调制、电色散补偿模块等。本文研究采用基于光谱整形的啁啾管理技术, 基于单个光滤波器件实现多路10 Gbit/s直调信号的啁啾管理, 验证DML应用于NG-PON2系统的可行性。

1.1 直调激光器的多通道啁啾管理

根据激光原理, 激光器的啁啾可以表示为

$$\Delta\nu(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ \frac{d}{dt} [\ln(P(t))] + \kappa P(t) \right\} \quad (1)$$

式中, α 为激光器线宽增强因子, κ 为绝热啁啾系数。

为了得到高功率输出, DML通常工作于高偏置电流状态, 此时式(1)中第2项绝热啁啾处于主导地位。以两电平调制为例, 绝热啁啾表现为: “1”比特相比“0”比特存在频率蓝移, 从而导致光谱展宽, 使得信号在传输过程中对光纤色散的容忍度降低。

光滤波可以实现对直调信号的啁啾抑制。其基本原理是将调制数据后的直调激光器的中心波长放置在光滤波的边沿处, 进而让蓝移的比特1通过, 衰减红移的比特0, 从而通

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-20

作者简介: 胡卫生, 教授, 研究方向为光纤通信, 电子邮箱: wshu@sjtu.edu.cn

引用格式: 胡卫生, 义理林, 何浩, 等. 时分波分复用无源光网络关键技术[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 69-75; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.007

过将DML中的频率调制转换为幅度调制,压缩光谱,增加输出光信号的消光比,延长传输距离。啁啾管理激光器(CML)即利用这个原理,将滤波器和激光器波长锁定,实现长距离传输^[3]。实验中观测到将滤波器放在光纤之后也可以得到类似的啁啾管理效果,因此滤波器的位置既可以在发射端也可以在接收端。由于TWDM-PON上下行存在多个波长,利用双通的周期性光滤波器即可实现对多通道的同时滤波。图1为在光线路终端(OLT)采用一个光延迟干涉仪对上下行共8

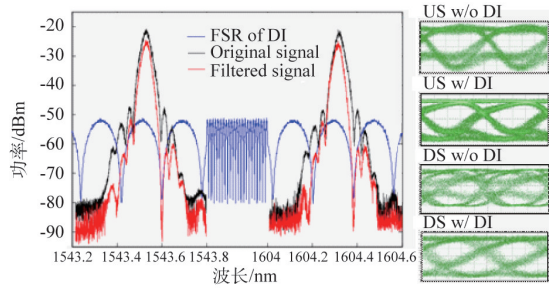


图1 基于单个延迟干涉仪(DI)同时进行上下行直调信号啁啾管理的光谱和眼图

Fig. 1 Measured optical spectra and eye diagrams of DI-based up and downstream multi-wavelength chirp management

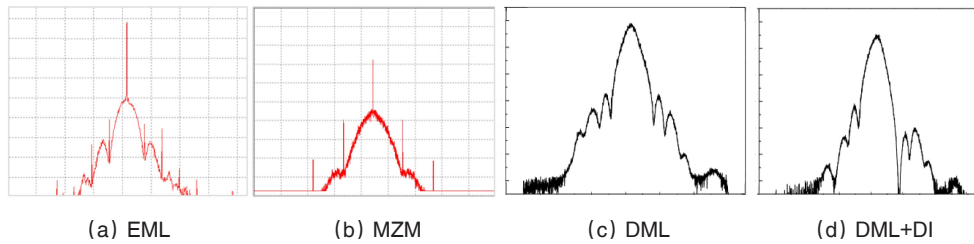


图2 几种不同激光器调制10 Gbit/s通断键控调制(OOK)信号的光谱

Fig. 2 Optical spectra of 10 Gbit/s signal modulated with EML, MZM, MZM and DML+DI, respectively

将MZM、EML和DML这3种调制方式得到的信号入纤功率从5 dBm调节到22 dBm,并测试了在不同入纤功率下信号经100 km传输后在误码率为 1×10^{-3} 时的灵敏度,测试结果如图3所示。当入纤功率超过一定的阈值之后,信号的接收灵

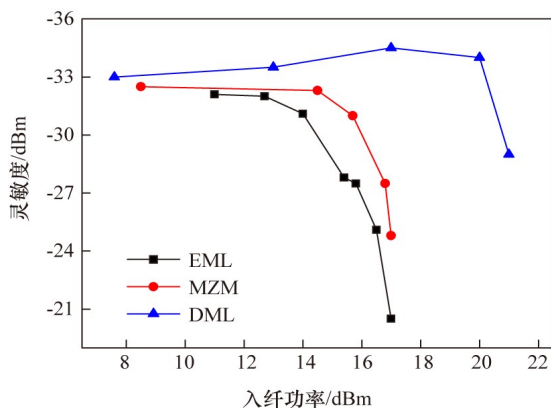


图3 不同调制方式的信号误码随入纤功率的变化
Fig. 3 Sensitivities under different launch power

个通道的直调信号进行啁啾管理的光谱及滤波后的眼图效果。其中下行信道在1604 nm附近,上行信号在1543 nm附近,滤波后的信号在0~100 km光纤传输范围内都可以得到清晰的眼图^[4-5]。

1.2 提高功率预算

系统功率预算是接入网的一个重要指标,决定了一个系统可以支持的传输距离和可支持的用户数量。无源光网络的功率预算由入纤功率和接收灵敏度2个因素决定。

提高上行方向的灵敏度可以通过OLT端放大或相干接收实现,而下行方向由于光网络单元(ONU)成本限制不能采用昂贵的接收设备,因此提高功率预算需要提升入纤功率。但当入纤功率较高时,信号会在光纤中发生非线性效应,使信号谱发生改变而导致信号变形,通常外调制信号的单波长入纤功率不能超过13 dBm。但相比外调制信号,DML啁啾会使载波频率随调制电流变化,使载波频率展宽,从而降低载波的峰值功率。图2为电吸收调制激光器(EML)、马赫-曾德调制器(MZM)、DML及滤波后的DML在10 Gbit/s通断键控(OOK)调制速率下的光谱。比较可见基于外调制得到的信号谱都有较强的载波分量,而直调信号的载波分量较低。因此,直调信号可以承受的入纤功率高于外调制信号。

灵敏度会急速下降。其中基于EML和MZM的外调制信号的阈值在14 dBm左右,而直调信号的阈值在20 dBm左右,由此可见直调信号在光纤中的非线性阈值更高,可以支持更高的入纤功率。综合考虑入纤功率和接收灵敏度,啁啾管理的直调信号可以得到54 dB的功率预算,超过了基于MZM和EML的外调制方式。各种调制方式得到的入纤功率、灵敏度和功率预算等统计结果如表1^[6-7]所示。

表1 不同调制方式的功率预算统计

Table 1 Summary of the power budgets by using different modulators

发射机	最高入纤功率 /dBm	灵敏度 /dBm	功率预算 /dB
EML	14	-31	45
MZM	16	-31	47
DML+DI	20	-34	54

1.3 40 Gbit/s TWDM-PON系统演示

基于上述多通道啁啾管理方案和DML高非线性阈值特性进行了长距离、高功率预算的接入系统演示,实验结构如图4所示。在上下行方向都用DML作为光源,并在OLT端使用一个DI进行上下行所有通道的光谱整形滤波。ONU和OLT端均采用直接检测方式,上下行方向均为4路波长复用,每个波长速率为10 Gbit/s。由于实验器材限制,实验中下行

光源在1605 nm左右,上行激光器工作在1543 nm左右。OLT端采用4个DML作为发射机,在25°C室温下的工作波长分别为1604.5、1605.3、1606.1和1606.9 nm。上行ONU中同样采用DML作为发射机,25°C时输出波长为1543 nm,输出波长可通过温度进行调谐,最大调节范围为3 nm,可以覆盖4个间隔为100 GHz的通道。图4(a)和(b)分别为下行和上行4路信号的光谱。

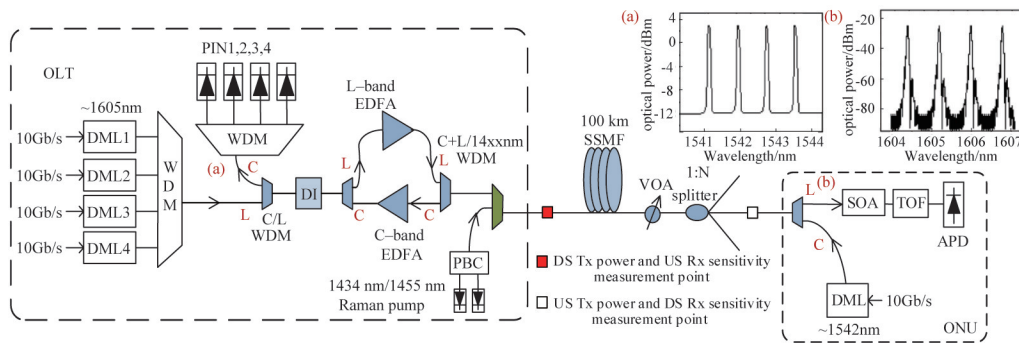


图4 100 km长距离光接入网系统结构

Fig. 4 Experimental setup of long reach PON

在OLT端,下行4个激光器的输出信号经波分复用(WDM)后首先进入DI进行滤波,DI的输出连接双向放大器。双向放大器由2个C/L波段耦合器、1个C波段掺铒光纤放大器(EDFA)和1个L波段EDFA构成。下行信号经EDFA放大后进入100 km单模光纤中传输。光纤之后由一个光衰减器模拟光分路器,用于控制进入ONU的信号功率并进行误码测试。信号进入ONU后首先被半导体光放大器(SOA)放大,然后经滤波器进行波长选择并滤除自发辐射噪声,最终进入带宽为10 GHz的雪崩光电二极管(APD)中进行探测。实验中使用的SOA在1605 nm波长处的增益为18 dB,噪声指数为7.5 dB。

上行方向,ONU端激光器输出的信号光先经C/L波段耦合器,被可调光衰减器衰减后进入光纤传输。在接收端首先经过拉曼放大器放大,然后进入C波段EDFA放大,并经DI反

向滤波后,进入WDM进行波波长解复用后进入带宽为10 GHz的光电二极管(PIN)进行探测。

单波长工作时下行直调信号的入纤功率可以达到20 dBm,但在4个波长共存的情况下,由于各个信道之间相互串扰,最高的单波长入纤功率下降到18 dBm。对上下行信号经100 km光纤传输后的误码测试结果如图5所示。下行方向,4个波长情况下,误码率(BER)为 3.8×10^{-3} 时接收灵敏度为-35 dBm;上行方向,使用混合拉曼/EDFA放大后的接收灵敏度为-46 dBm左右。考虑18 dBm和10 dBm的下行及上行入纤功率,该结构得到的下行功率预算为53 dB,上行功率预算为56 dB。总之,基于直调直检方案,实现了 4×10 Gbit/s TWDM-PON系统的100 km传输,并得到单波长56 dB、4路波长53 dB的系统功率预算^[8],达到与基于外调制、相干检测的长距离PON^[9-10]类似的性能。

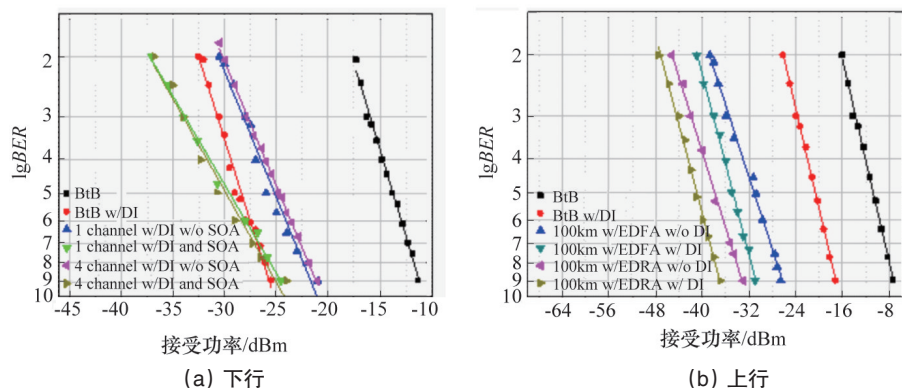


图5 信号传输100 km后的误码率测试

Fig. 5 BER curves of downstream and upstream signal in 100km transmission case

2 4×25 Gbit/s NG-EPON 实验

IEEE 容量升级通常为 10 倍于上一代标准,因此 NG-EPON 的下行容量为 100 Gbit/s,在上行方向提供 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 等 2 种规范。NG-EPON 也倾向于采用波长堆叠技术,如通过 4×25 Gbit/s 获得 100 Gbit/s 容量。由于单波长速率较高,相关研究集中在如何利用商用的 10 G 器件实现 25 Gbit/s 的调制解调,以及如何实现高速信号的色散补偿。除传统 OOK 调制格式外, Duobinary^[11-12]和 PAM-4^[13]等 2 种码型得到了较多支持。

这里介绍基于带宽为 10 GHz 的 DML 和接收机实现的 28 Gbit/s Duobinary、25 Gbit/s PAM-4 及 OOK 这 3 种调制格式的调制解调。基于光谱整形的色散管理方案,3 种码型均实现了在 40 km 光纤中的低灵敏度损伤传输。基于直调直检的 4×25 Gbit/s TWDM-PON 系统结构如图 6 所示,4 个 DML 发出的信号光经 1:4 的波分复用器复用后先进入啁啾管理器件进行色散管理,然后注入 EDFA 进行放大。在接收端,信号经可调滤波器选择波长后被 PIN 接收,并进行后续的解码处理。

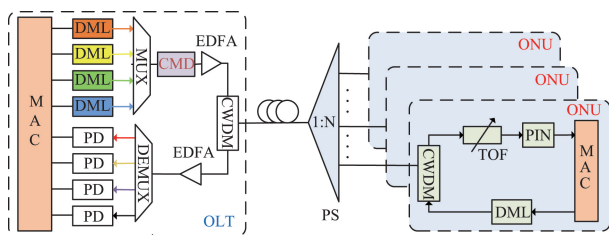


图 6 100 Gbit/s TWDM-PON 系统结构

Fig. 6 Network architecture of DML based 100Gbit/s TWDM-PON

2.1 双二进制格式

双二进制码可以将信号的带宽压缩为信号速率的 1/4,通常采用 1 bit 延迟相加或低通滤波的方式产生。当收发端采用的器件带宽仅为 10 GHz 时,所加载的 25 Gbit/s 的 OOK 信号在器件低通滤波的作用下将变成三电平的双二进制格式。为了避免误码,需要对原始信号进行编码来消除相邻比特间的相关性。

由于发射端采用了直调激光器,如不进行啁啾管理,在 28 Gbit/s 的调制速率下,信号无法进行长距离光纤传输。经 20、40 km 光纤传输后的眼图如图 7(c)和(e)所示。同样采用光滤波方案对 duobinary 信号进行光谱整形,得到结果如图 7(d)和(f)所示。由图 7 可见,经 DI 滤波后,duobinary 信号的啁啾被有效抑制,从而可以支持 0~40 km 间的光纤传输,证明光滤波方式不仅适用于 OOK 信号的啁啾管理,对多电平信号同样适用。

图 8 为对信号灵敏度的测试结果。基于光滤波的啁啾管理方案使直调信号在 40 km 光纤传输后灵敏度损伤仅为 1 dB。在功率预算方面,实验结果表明单波长情况下双二进制直调信号的最高入纤功率为 16 dBm,因此系统的功率预算为 31 dB^[14]。

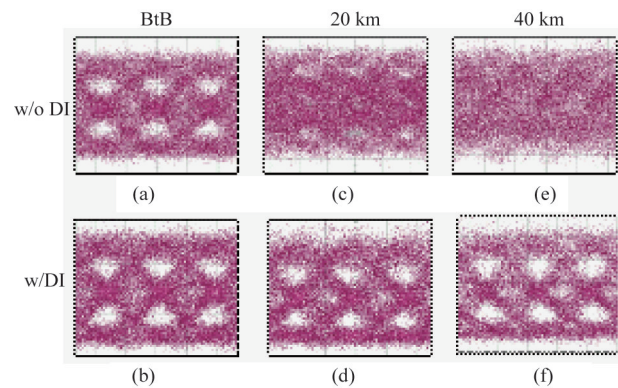


图 7 有无光谱整形滤波时信号光纤传输的眼图

Fig. 7 Eye diagrams of signal with and without DI in back to back (BtB), 20 and 40 km transmission cases

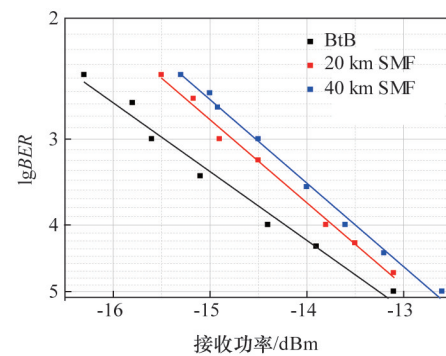


图 8 28 Gbit/s duobinary 信号误码率测试结果

Fig. 8 BER measurement of 28 Gbit/s duobinary signal

2.2 PAM-4 格式

PAM-4 信号通过 PPG 产生的两路速率为 12.5 Gbit/s 的脉冲叠加得到。将其中一路衰减 3 dB,并与另一路耦合,即可得到 4 电平脉冲原始电信号。考虑到直调激光器调制曲线的非线性因素,可以根据调制后的光眼图对 4 个电平的幅度进行调节,从而得到均匀分布的幅值。

对基于直调激光器和 DI 啁啾管理的 25 Gbit/s PAM-4 信号的性能进行测试,结果表明,基于 DI 滤波同样可以实现对 PAM-4 信号的啁啾管理,实现 40 km 的光纤传输。图 9 为

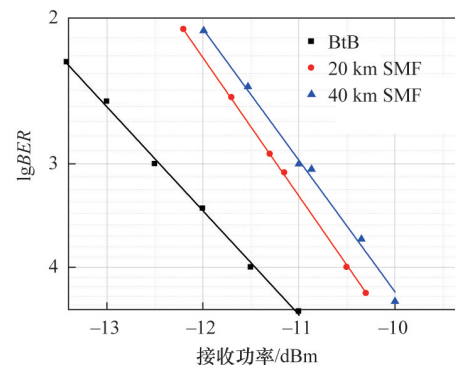


图 9 25 Gbit/s PAM-4 信号灵敏度测试结果

Fig. 9 Sensitivity measurement of 25 Gbit/s PAM-4 signal

PAM-4信号的灵敏度测试结果。经20和40 km 光纤传输后, 误码率为 1×10^{-3} 时的接收灵敏度分别为-11.3和-11 dBm, 单波长情况下可支持的最高入纤功率为15 dBm, 因此基于PAM-4调制码型的系统的功率预算为26 dB。

2.3 基于光均衡的OOK(NRZ-OEQ)格式

由于光收发器件的带宽限制, 需要结合频域均衡技术才能实现基于10 GHz 带宽器件进行25 Gbit/s OOK调制。将25 Gbit/s的信号调制到该DML上, 通过光滤波方式对信号的低频成分进行压制可以实现对高频成分的提升, 从而实现信号的频域均衡。而低频成分在光谱上体现为载波附近的频率成分, 因此滤波器的下降沿应对准载波附近的位置, 如图10光谱所示。经滤波后, 达到了频率均衡的效果, 实现了10 GHz 器件的25 Gbit/s OOK调制。

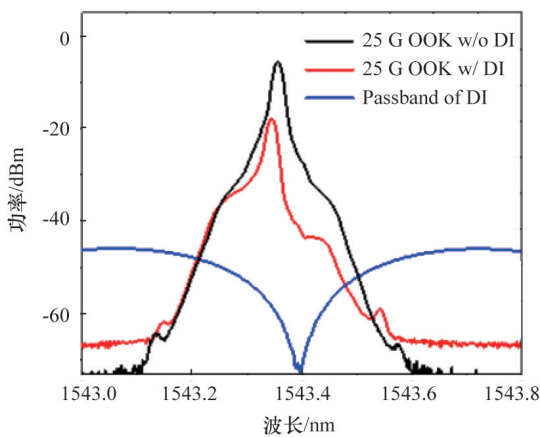


图10 DI均衡滤波前后的信号光谱
Fig. 10 Optical spectra of original and optically equalized 25 Gbit/s OOK signals

表2 Duobinary、PAM-4和OOK方案对比

Table 2 Comparison of Duobinary, PAM-4 and OOK formats

方案	速率/(Gbit·s ⁻¹)	距离/km	入纤功率/dBm	灵敏度/dBm	功率预算/dB	技术复杂度
OOK	25	40	18.5	-17.5	36	低
Duobinary	28	40	16	15	31	较高
PAM-4	25	40	15	-11	26	高

另一方面, 信号电平数越多, 接收端对信噪比的要求越高。因此OOK格式灵敏度最高, Duobinary次之, PAM-4最低。而在接收机复杂度方面, OOK解调技术最为简单、成熟, 而双二进制和PAM-4则需要多电平判决芯片或模数转换(ADC)采样判决。

相比Duobinary和PAM-4, NRZ-OEQ技术的主要劣势在于由于器件带宽的限制, 经过光均衡滤波后, 利用10 GHz的器件仅可以支持最高26 Gbit/s的调制速率。而基于同样的器件, Duobinary格式可以支持28 Gbit/s甚至更高的速率。100G PON系统要求单波长调制速率为25 Gbit/s, 因此NRZ-OEQ方案在速率方面能够满足要求。

误码测试结果如图11所示。背靠背情况下信号在误码率为 1×10^{-3} 时的灵敏度约为-19 dBm, 经20 km传输后灵敏度下降到-17.7 dBm左右, 40 km传输后灵敏度为-17.5 dBm左右。经40 km 光纤传输后, 25 Gbit/s信号的灵敏度损伤仅为1.5 dB, 进一步证实了基于光谱整形的色散管理方案对高速信号色散抑制的有效性。

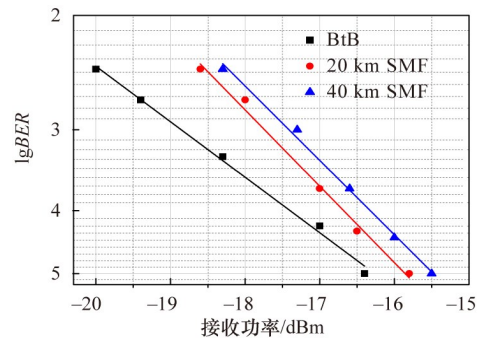


图11 误码率测试结果
Fig. 11 BER measurement

2.4 Duobinary、PAM-4和NRZ-OEQ码型性能对比

将对3种码型的特点进行比较。3种码型的实验结果都是在相同的测试条件下基于同样的器件得到的, 因此可以得到公平的对比结论, 如表2所示。

在入纤功率方面, 由于采用了直接调制方案, 3种码型均能够支持较高的入纤功率。其中, 2电平调制格式对非线性引起的信号畸变容忍度最高, 因此能够支持最高的入纤功率, 3电平的双二进制信号次之, PAM-4可支持的入纤功率最低。

综合考虑性能、成本、技术复杂度等因素, NRZ-OEQ方案更适合在100G PON系统中应用。

3 拉曼串扰及其抑制方案

3.1 拉曼串扰分析

NG-PON2要求和之前的PON1视频系统等完全兼容。ITU-T G.989.1定义了点对点的波分复用信道(PtP WDM)来传输基站中的数据^[1]。承载无线数据的上下行通道波长在C+L波段, RF视频在1550 nm波长, 因此NG-PON2与前传和RF视频信道之间存在拉曼串扰的影响^[15]。

受激拉曼效应对信号的影响有两个方面: 功率损耗和信

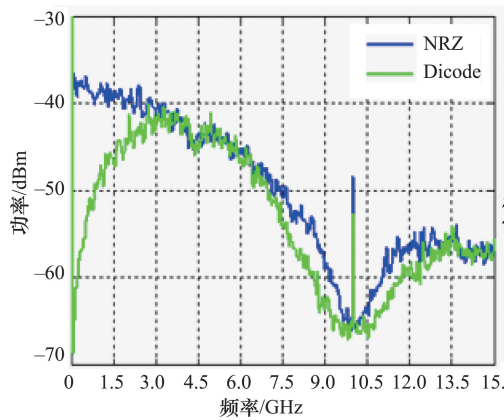
号失真。实验结果表明,受激拉曼效应引起的功率消耗随着 TWDM 波长入纤光功率的增加而增加, TWDM 单波长入纤光功率为 15 dBm 时, SRS 引起的功率消耗将会达到 1 dB。低频区的串扰噪声要比高频区更严重。而且当增大 TWDM-PON 的单波长入纤光功率时, TWDM 波长将会有更多的功率转移至前传和 RF 视频波长信道, 串扰噪声也会相应增大^[16]。

3.2 拉曼串扰抑制方案

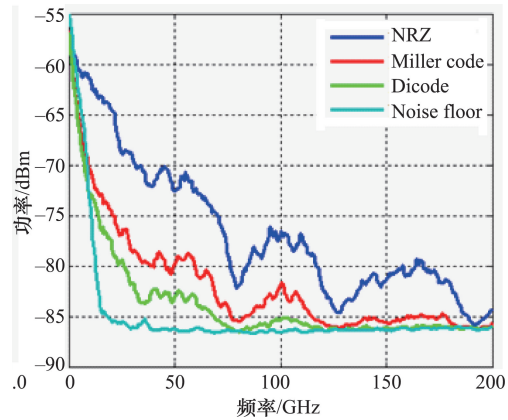
非线性拉曼串扰噪声的大小和信号的功率谱有直接的关系。通过降低数字调制信号功率谱相应频率上的功率就可以降低在同样频率处的拉曼串扰。因此通过延迟编码 (Miller-code)^[17]、滤波^[18]等方式改变调制信号低频区的频谱成分, 减小泵浦光和斯托克斯光之间的功率转移, 可以达到降低拉曼串扰噪声的目的。本文提出了一种新型的 Dicode 编码方法。Dicode 是一种部分响应的信号格式, 它通过控制相邻符号间串扰来改变信号频谱的分配。通过简单的 1 比特时

延和相减操作可以得到 Dicode 编码, 同时为了消除比特间的关联性产生的误码传播, 需要采用差分编码的技术。

图 12(a) 为 10 Gbit/s NRZ 信号和 Dicode 信号的频谱比较。从图中可以看出, 在 50 MHz 低频区域, Dicode 信号的功率比 NRZ 低 10 dB。本文中对提出的 Dicode 编码方式进行了非线性拉曼串扰噪声的测量, 并将测量结果同 NRZ、Miller code 信号格式下的拉曼串扰噪声进行了对比, 其对比的结果如图 12(b) 所示。测量中采用 4 个 TWDM-PON 下行波长, 每波长入纤光功率 13 dBm。RF 视频波长的入纤光功率 4.33 dBm。图中可见, 在 50~200 MHz 频率范围内, Dicode 码型下的非线性拉曼串扰噪声明显低于非归零码和延迟编码。特别是在 50 MHz 频率点上, 相比于非归零码而言, 延迟编码的非线性拉曼串扰功率比非归零码低了大约 8 dB, 而 Dicode 码的非线性拉曼串扰噪声比非归零码低了约 11 dB。



(a) Dicode 与 NRZ 信号频谱对比



(b) Dicode 编码和非归零码、延迟编码的拉曼串扰噪声对比

图 12 Dicode 与不同信号频谱及拉曼串扰噪声的对比

Fig. 12 Comparison of Spectra and nonlinear Raman crosstalk between Dicode signals and other signals

不同编码方式下, 对固定频率点 (50 MHz) 非线性拉曼串扰噪声随 TWDM-PON 下行入纤光功率的变化趋势进行测量, 结果如图 13 所示^[19]。由图 13 可见, 在 0~15 dBm 的入纤功

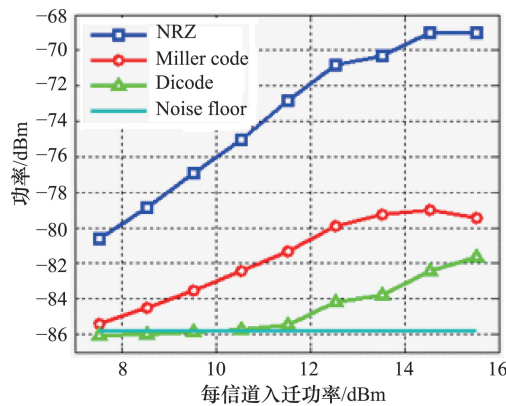


图 13 不同编码方式下 50 MHz 频率点上的非线性拉曼串扰
Fig. 13 Nonlinear Raman crosstalks at 50 MHz versus the launch power per TWDM-PON channel for NRZ, Miller code and Dicode modulation

率范围内, Dicode 的噪声抑制效果均优于 Miller code, 证实了该方案的有效性。

4 结论

通过理论分析和实验测量, 验证了直调直检技术在高速光接入系统中的优势。结合光谱整形的啁啾管理方案, 可以实现 25 Gbit/s 直调信号不低于 40 km 的光纤传输。得益于啁啾导致的光谱展宽特性, 直调信号表现出更高的非线性容忍度, 能够支持更高的入纤功率, 有助于提升系统的功率预算。此外, 随着接入系统中的波长数越来越多, 对各波段间不同波长的相互串扰进行研究, 为波长规划及功率分配提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Telecommunication Standardization Sector of ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements: ITU-T G.989.1[S/OL]. Geneva, Switzerland: ITU, 2013[2016-06-29]. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I>.

- [2] Telecommunication Standardization Sector of ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification: G.989.2[S/OL]. Geneva, Switzerland: ITU, 2014[2016-06-30]. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2/en>.
- [3] Mahgerefteh D, Matsui Y, Zheng X Y, et al. Chirp managed laser and applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1126-1139.
- [4] Yi Lilin, Li Zhengxuan, Hu Weisheng, et al. First demonstration of symmetric 40 Gb/s TWDM-PON with 100 km passive reach and 1024-split using direct modulation and direct detection[C]//Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP2013). Beijing, China: Optical Society of America, 2013: PDP AF2C.3.
- [5] Bi Meihua, Xiao Shilin, He Hao, et al. Simultaneous DPSK demodulation and chirp management using dechirper in symmetric 40 Gb/s capability TWDM-PON system [J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16528-16535.
- [6] Li Zhengxuan, Yi Lilin, Hu Weisheng. Comparison of downstream transmitters for high loss budget of long-reach 10G-PON[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibition. San Francisco, USA: Optical Society of America, 2014: Tu2C.4.
- [7] Bi Meihua, Xiao Shilin, Yi Lilin, et al. Power budget improvement low-cost symmetric 40 Gb/s DML-based TWDM-PON[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6925-6933.
- [8] Li Zhengxuan, Yi Lilin, Wei Wei, et al. Symmetric 40 Gb/s, 100 km passive reach TWDM-PON with 53-dB loss budget[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(21): 3389-3396.
- [9] Lavery D, Torrenco E, Savory S. Bidirectional 10 Gbit/s long-reach WDM-PON using digital coherent receivers[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California: Optical Society of America, 2011: OTuB4.
- [10] Qian D, Mateo E, Huang M F. A 105 km reach fully passive 10G-PON using a novel digital OLT[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication. Amsterdam, Netherlands: Optical Society of America, 2012: Tu.1.B.2.
- [11] Van Veen D T, Houtsma V E, Gnauck A H, et al. Demonstration of 40 Gb/s TDM-PON Over 42 km with 31 dB optical power budget using an APD-based receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 33(8): 1675-1680.
- [12] Ye Zhicheng, Li Shengping, Cheng Ning, 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 and Exhibition on Optical Communications. Valencia, Spain: IEEE, 2015: 1-3.
- [13] Wei J L, Eiselt N, Griesser H, et al. First demonstration of real-time end-to-end 40 Gb/s PAM-4 system using 10 G transmitter for next generation access applications[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communications. Valencia, Spain: IEEE, 2015: 32-33. DOI: 10.1109/ECOC.2015.7341692.
- [14] Li Zhengxuan, Yi Lilin, Wang Xiaodong, et al. 28 Gb/s duobinary signal transmission over 40 km based on 10 GHz DML and PIN for 100 Gb/s PON[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20249-20256.
- [15] CPRI. Common public radio interface(CPRI); interface specification version 7.0[S/OL]. (2015-10-09)[2016-06-30]. <http://www.cpri.info/downloads/>.
- [16] Li Jun, He Hao, Hu Weisheng. Theoretical and experimental analysis of interchannel crosstalk between TWDM and fronthaul wavelengths due to stimulated Raman scattering[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8809-8817.
- [17] Cheng N, Zhou M, Effenberger F J. 10 Gbit/s delay modulation using a directly modulated DFB laser for a TWDM PON with converged services[Invited][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(1): A87-A96.
- [18] Tanaka A, Cvijetic N, Wang T. Beyond 5 dB nonlinear Raman crosstalk reduction via PSD control of 10 Gb/s OOK in RF-video coexistence scenarios for next-generation PON[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, USA: Optical Society of America, 2014: M3I.3.
- [19] Li Jun, Bi Meihua, He Hao, et al. Suppression of SRS induced crosstalk in RF-video overlay TWDM-PON system using dicodecoding[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21192-21198.

Key technologies of time and wavelength division multiplexing passive optical network

HU Weisheng, YI Lilin, HE Hao, LI Zhengxuan, LI Jun, BI Meihua

State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract To meet the fast-growing bandwidth requirement of end users, a time and wavelength division multiplexing technique is proposed to extend the network capacity. Meanwhile, the data rate of each wavelength should also be increased. In this paper, the feasibility of using DML in TWDM-PON systems is investigated, with an emphasis on chirp management and power budget improving techniques. Besides, the Raman crosstalks between the new-added and the traditional channels are analyzed with a proposed crosstalk mitigation solution based on Dicode coding.

Keywords passive optical network; direct modulation and direct detection; chirp management; stimulated Raman scattering

(编辑 王志敏)