

文章编号 1672-6634(2023)03-0001-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022050016

基于带宽受限的 100 GPON 先进调制格式比较

周擎奕¹, 张 教^{1,2}, 蔡沅成^{1,2}, 朱 敏^{1,2}

(1.东南大学 移动通信国家重点实验室,江苏 南京 210096; 2.紫金山实验室,江苏 南京 211111)

摘 要 随着云业务、视频业务和移动互联业务的快速发展,5G 光接入网对于传输容量的需求日益迫切。接入网段日益增长的带宽需求不仅要求更高的传输速度,还需要保持较低的系统成本。但是成熟的商用低成本光电器件的带宽通常是有限的,当传输速率很高时,带宽明显小于信号的波特率。考虑到低成本光学器件的有限带宽,采用具有高频谱效率的先进调制格式,如 PAM, CAP 以及 DMT 是很有潜力的选择。主要针对光接入网器件带宽受限的问题,在带宽受限的 100 G 无源光网络中,仿真对比了三种先进调制格式的性能,分析了三种调制格式传输 20 km SSMF 后的接收灵敏度和功率预算,还讨论了他们的热噪声性能和抗色散性能。

关键词 带宽受限;强度调制直接检测;脉冲幅度调制;无载波幅度相位调制;离散多音调制

中图分类号 TN914

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Comparisons of Advanced Modulation Formats for 100 GPON with Low-Bandwidth Optics

ZHOU Qingyi¹, ZHANG Jiao^{1,2}, CAI Yuancheng, ZHU Min^{1,2}

(1.National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2.Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

Abstract With rapid development of cloud services, video services, and mobile interconnection services, there occurs an urgent requirement of transmission capacity in 5G optical access network. The increasing bandwidth demand in access network segment requires not only higher transmission speed but also lower costs. However, the bandwidth of a mature commercial low-cost optoelectronic device is generally limited, and it is significantly smaller than the baud-rate of the signal at high data rate. Considering the limited bandwidth of low-cost optics, advanced modulation formats such as multi-level pulse amplitude modulation, carrier-less amplitude and phase modulation and discrete multi-tone modulation are the most potential choice. In this thesis, a comprehensive comparison of advanced modulation formats with high spectral efficiency is carried out in 100 G passive optical network based on bandwidth-limited optics at O-band. The receiver sensitivity and power budget of three formats are simulated after 20 km SSMF transmission. The performance of thermal noise and chromatic dispersion are discussed.

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(62101126, 62101121)资助

通讯作者: 朱敏,男,汉族,博士,副教授,博士生导师,研究方向:光网络和光通信, E-mail: minzhu@seu.edu.cn.

Key words limited bandwidth; intensity modulation direct detection; pulse amplitude modulation; carrierless amplitude and phase modulation; discrete multi-tone modulation

1 引言

随着云业务、高清视频业务和 5G 无线传输的快速发展,光传输网络、城域网和接入网对超高数据速率光传输的需求越来越大。短距离光数据链路正经历着越来越严重的带宽限制,使其在应对不断增长的数据传输容量需求方面具有很大的挑战性。IEEE 802.3ca 工作组已经确定了 25、50、100 GEPON 标准,其中 50 G 和 100 GEPON 分别可以通过 25 Gb/s/ λ 线速率的双波长信道复用和四波长信道复用来实现^[1]。多通道传输技术似乎是一个有效的短期解决方案。然而,由于其复杂的光学封装,从长远来看,它并不是一个可行的解决方案。目前在接入网中,10 G 带宽的光电器件是最成熟成本最低的,对于 50 Gb/s 的无源光网络(PON)系统,使用现有的带宽受限的光学器件,以此来减少部署成本是最有优势的选择^[2]。因此,接入网中收发器的带宽通常是有限的,明显要小于信号的波特率。考虑到低成本光学器件的有限带宽,人们研究了具有频谱效率的先进调制格式和先进的数字信号处理,以降低信号的波特率。

但是复杂的数字信号处理(DSP)技术需要高速的数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC),大大增加系统的复杂度和成本。这对于成本敏感的用户侧的光网络单元来说并不划算。因此,对于基于强度调制和直接检测的高速短距离系统来说,先进的调制方案如脉冲幅度调制(PAM)^[3],无载波幅度相位调制(CAP)^[4,5]以及离散多音调制(DMT)^[6-8]是最有潜力的选择,因为它的 DSP 结构更简单,复杂度更低。研究^[9-11]比较了 PAM, CAP 和 DMT 在 50 Gb/s 城域网和高带宽的接入网中的性能。文献^[12]在带宽受限器件的对称 50 GPON 系统中实验研究了 PAM, CAP 和 DMT 的性能,对于上下行链路分别给了结果。研究^[13-15]比较了 PAM-4, CAP 和 DMT 在 100 Gb/s 光通信系统中的性能,但是这些研究的器件带宽没有受到限制。目前还没有在带宽受限的 100 G 系统中对先进调制格式性能的对比研究。

在本文中,详细调查研究 PAM-4, CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 三种先进的调制格式在带宽受限的 100 Gb/s 短距离传输系统中的性能。首先介绍三种调制格式调制解调的 DSP 流程,接着给出了 100 GPON 的仿真系统装置及其各项参数,然后全面评估了每种调制格式在接收光功率、色散和热噪声方面的性能。仿真过程中,没有在发射机端使用数字预失真技术,也没有在接收机端使用非线性均衡技术,尽可能做到低复杂度低成本。

2 三种调制格式的 100 Gb/s 信号的 DSP 流程

PAM-4, CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 三种调制方式在生成过程中都需要映射、采样,恢复过程中都需要均衡、解映射等技术。CAP 调制还需要额外的 IQ 分离和匹配滤波技术,DMT 调制则需要 FFT/IFFT 技术。这些技术均由 MATLAB 程序实现。在本节中,展示了在 100 GPON 传输系统中使用三种调制格式的具体实现过程。由于三种调制各自的特性,采用的均衡算法也是不一样的。

图 1 给出了 PAM-4 信号发射端的离线 DSP 流程。在发射端,随机产生的比特数据流首先被映射成长度为 2^N (在仿真中 $N=17$) 的 PAM-4 实数信号。在 MATLAB 仿真系统中,为了与实验平台设备相匹配, DAC 采样率设置为 92 GSa/s,对数据进行两倍上采样。由于信号波特率可设置为 (DAC 采样率/ 2^N) 的任意整数倍,同时考虑到 7% 开销的 HD-FEC (3.8×10^{-3}),我们将 PAM-4, CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 信号波特率分别设置为 57.5 GBaud, 28.75 GBaud 和 28.75 GBaud,以达到 100 Gb/s 以上的净传输速率。当信号波特率为 57.5 GBaud 时,就得到了比特速率为 115 Gb/s 的 PAM-4 信号。为了使三种调制格式的带宽接近,脉冲整形滤波器的滚降系数设置为 0.3,信号带宽因此被压缩到 $57.5 \times (1+0.3)/2 = 37.375$ GHz。最后对信号进行重采样以匹配 DAC 的采样率,归一化后数据被加载到 VPI 仿真软件中产生 PAM-4 信号。图 2 给出了 PAM-4 信号接收端的离线 DSP 流程。在接收端,采集到的数据首先对它进行归一化,然后进行两倍重采样,同步之后对信号进行时钟恢复算法处理,来消除数据中的时钟偏移和抖动。接着利用 23 抽头数的

级联多模算法(CMMA)和参数为(54,9)总共99抽头数的二阶Volterra算法对数据进行均衡处理,在最终判决前采用99抽头数的判决引导的最小均方误差算法(DD-LMS),进一步补偿信道损伤。最后对恢复出来的PAM-4信号数据进行解映射处理,将解出的数据流和原始数据比较,计算出最终数据的误码率性能。



图1 三种调制格式的发送端DSP流程



图2 三种调制格式的接收端DSP流程

CAP-16QAM信号发射端的离线DSP流程如图1所示。在发射端,随机产生的比特数据流首先被映射成长度同样为 2^{17} 的16QAM复数信号。DAC的采样率为92 GSa/s,对数据进行四倍过采样,而不是二倍采样。这样,可以进一步优化系统性能。

信号经过IQ分离生成两路实数信号,形成希尔伯特对,分别被送入两个相互正交的平方根升余弦滚降滤波器进行成形滤波,它们的滚降因子经过优化,设为0.01。CAP-16QAM信号的波特率被设为28.75 GBaud,得到的比特速率仍为115 Gb/s,并且滤波器的中心频率设置为 $28.75 \times 2 \times 0.55 = 31.625$ GHz。成形滤波后,对信号进行重采样以匹配DAC的采样率,归一化后数据被加载到VPI仿真软件中产生CAP-16QAM信号。CAP-16QAM信号接收端的离线DSP流程如图2所示。在接收端,采集到的数据首先对它进行归一化,然后进行四倍重采样,同步之后对信号进行时钟恢复算法处理,来消除数据中的时钟偏移和抖动。接着将信号送入两个与发射端对应的匹配滤波器,分离得到同相和正交的两路信号。接着利用99抽头数的LMS算法对数据进行均衡处理,以及99抽头的带有训练序列的DD-LMS算法相位恢复原始数据。最后对恢复出来的16QAM信号数据进行解映射处理,将解出的数据流和原始数据比较,计算出最终数据的误码率性能。

DMT-16QAM信号发射端的离线DSP流程如图1所示。在发射端,首先将长度为(48000-1)的随机比特序列映射为16QAM复数信号。接着通过在频域补零实现1.6倍上采样,并实现串行数据到并行数据的转换。然后用1280点IFFT将16QAM信号调制到DMT子载波上,将频域并行数据转换为时域数据。仿真系统中的DAC的采样率为92 GSa/s。使用800个子载波来传输有效数据,使用Hermitian对称性经过IFFT获得实数信号。为了得到比特速率为115 Gb/s的DMT-16QAM信号,设计的信号频谱带宽为 $800/1280 \times 92/2 = 28.75$ GHz。另外增加了32点循环前缀(CP)来消除码间干扰(ISI),并将串行数据转换为并行数据,归一化后数据被加载到VPI仿真软件中生成DMT-16QAM信号。DMT-16QAM信号接收端的离线DSP流程如图2所示。在接收端,采集到的数据首先对它进行归一化和重采样,然后进行帧同步以消除数据中的时钟偏移和抖动。接着对DMT信号进行处理,处理过程包括:串并转换、移除循环前缀、FFT变换、信道估计和均衡、并串转换,其中使用训练序列对信道进行均衡补偿。最后对恢复出来的16QAM信号数据进行解映射处理,将解出的数据流和原始数据比较,计算出最终数据的误码率性能。三种调制均没有在发射端使用数字预均衡和查找表等预失真方法,也没有在接收端使用非线性均衡算法,简化了收发端的DSP,从而降低系统计算复杂度和功率损耗。

3 100 GPON 系统仿真平台及参数

仿真过程主要依托于MATLAB和VPI平台。MATLAB用于发射端和接收端的数字信号处理DSP,即发射端产生三种可以导入VPI中的信号,以及接收端对从VPI中导出的数据进行各种离线DSP处理。PAM-4,CAP-16QAM和DMT-16QAM三种调制格式均采用相同的系统仿真参数。图3所示是在VPI平台上搭建的基于O波段的带宽受限器件的传输系统的仿真系统,考虑到7%开销的HD-FEC(3.8×10^{-3}),系统仿真的传输速率设定为115 Gb/s。在发射端,信号通过MATLAB离线DSP产生,把数据导入到仿真

系统中。发射机由一个高速 DAC, 一个低通滤波器和一个马赫曾德尔(MZM)激光调制器组成。一个 8 位 92 GSa/s DAC 将导入的信号数据转换为电驱动信号, 然后经由一个四阶贝塞尔低通滤波器滤波(LPF), 模拟发射机的带宽限制。该低通滤波器具有 20 GHz 的 3 dB 模拟带宽。滤波器输出的电信号由一个 MZM 调制器直接调制为光信号, 该 MZM 调制器具有 5 V 的半波电压、30 dB 的消光比和 6 dB 插入损耗。对于三种调制信号, MZM 调制器都偏置在正交点, 以获得线性电光转换。激光器工作的中心波长在 1 310 nm 处, 发射功率为 11.76 dBm。在这里光链路使用的是标准单模光纤(SSMF), 它在 1 310 nm 处的平均损耗为 0.34 dB/km。接收机由一个光电探测器(PD)和一个 ADC 构成。传输 20 km 的单模光纤后, 光信号经过可调谐光衰减器连接到 PD 进行直接检测, 转换为电信号。光衰减器(VOA)在这里被用来调节接收光功率, 以进行灵敏度测量。为了模拟接收机的带宽限制, 在 PD 后放置了一个具有 20 GHz 的 3 dB 模拟带宽的 LPF。最后, 由 92 GSa/s ADC 模拟示波器采集输出的数据并保存, 将其导入 MATLAB 用于进一步的离线 DSP。

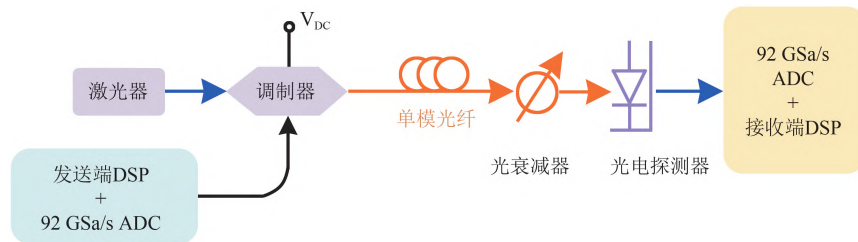


图3 基于带宽受限器件的 115 GPON 传输系统的仿真装置

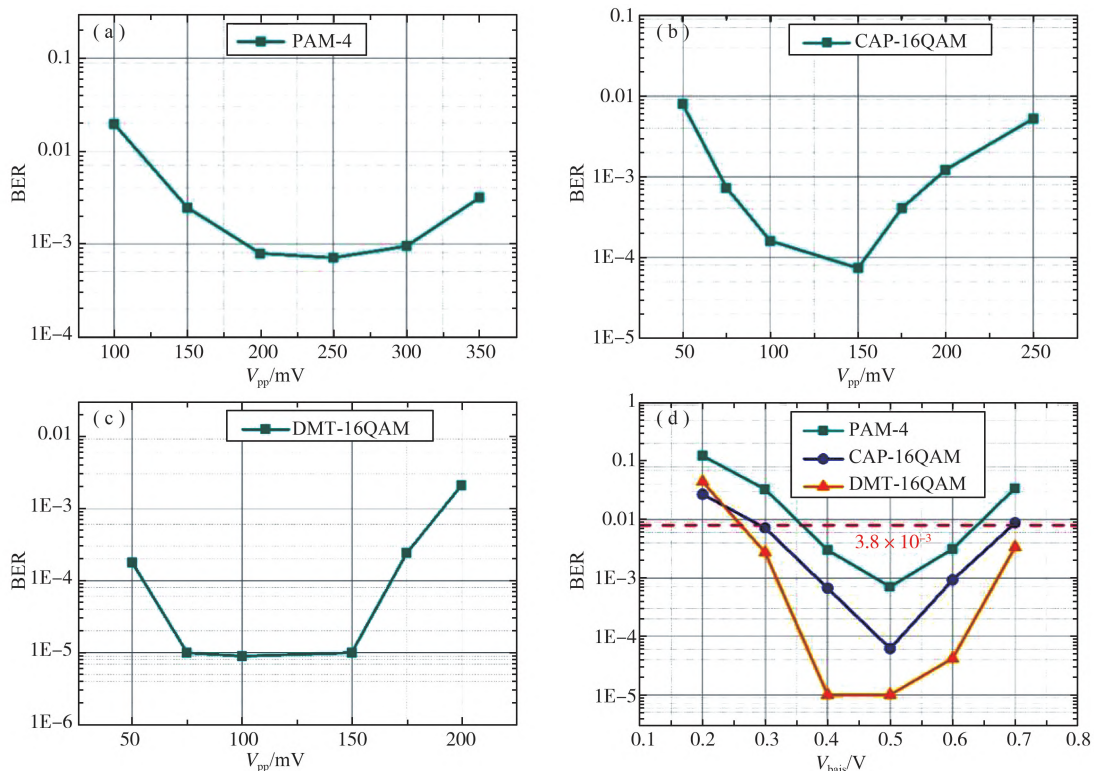


图4 三种调制格式在 115 G 传输系统下误码率与激光器驱动电压 V_{pp} 的关系(a) PAM-4;(b) CAP-16QAM;(c) DMT-16QAM;(d) 误码率与激光器偏置电压 V_{bais} 的关系

图 4(a)~(c) 为三种调制格式 BER 随 MZM 激光器的驱动电压 V_{pp} 变化的关系图。三种调制格式的误码率皆随着 V_{pp} 的变化有一段性能比较好的范围, 但是最佳 V_{pp} 值不同。从图中可以看出, PAM-4 信号的最优 V_{pp} 约为 250 mV, CAP-16QAM 信号的最优 V_{pp} 约为 150 mV, DMT-16QAM 信号的最优 V_{pp} 约为 100 mV。接着测量误码率性能与偏置电压 V_{bais} 的关系, 如图 4(d) 所示, 这时的 V_{pp} 已处于最佳值。测量结果表明, 在所选电压下, 三种调制均存在一个最佳偏置电压区域, 在电压值为 0.5 V 的时候, 信号误码率最低, 可以实现系统最佳性能。

4 仿真结果与分析

基于上述参数,对115 Gb/s传输系统中PAM,CAP和DMT的性能做了研究比较。为了使三种调制格式的复杂度和带宽相近,选择四电平的PAM,CAP和DMT均使用16QAM来调制。在本节中,针对三种调制格式的峰值平均功率比(PAPR)、接收光功率、光纤色散和接收机热噪声进行了研究。

在强度调制直接检测方案中,信号的幅度比较容易超过器件的线性工作区域,带来非线性损伤,从而影响系统性能。图5对几种调制格式的PAPR进行了比较。为了方便比较,定义一个互补累计分布函数(CCDFF),该变量表示码元的峰均比超过特定阈值的概率分布。对于多载波调制信号,由于DMT-16QAM调制采用傅里叶逆变换将信号变换到时域,因而该时域信号是由多个经过调制的子载波信号叠加得到的,因此会随机出现峰值很高的输出幅度,产生较高的PAPR。而在单载波系统中,不存在这一问题,因此PAM-4和CAP-16QAM有着较低的PAPR,是非常有潜力的调制方式。

然后在不同接收机带宽的情况下,研究了PAM-4信号在115 Gb/s系统中的性能。图6(a)是PAM-4在带宽为30 GHz的115 Gb/s传输系统中背靠背(BtB)和传输20 km后误码率与接收光功率的关系,两者并没有太明显的差距。传输20 km的PAM-4信号在HD-FEC(3.8×10^{-3})和SD-FEC(1×10^{-2})门限值时的接收光功率分别为-17.95 dBm和-18.76 dBm,考虑到MZM调制器的发射功率为11.76 dBm,可以得出PAM-4信号在硬判决门限(HD-FEC)和软判决门限(SD-FEC)的链路功率预算分别为29.71 dB和30.52 dB。从图中很明显可以看出,当接收光功率达到-14 dBm后,即使再怎么增加接收光功率,PAM-4的误码率性能也无法改善,这是因为PD只有30 GHz的带宽,但PAM-4信号的带宽达到了37.375 GHz,严重超过了器件带宽,带宽的限制严重影响了信号的性能,导致PAM-4信号存在误码平台。

图6(b)是PAM-4在带宽为20 GHz的115 Gb/s传输系统中BtB和传输20 km后误码率与接收光功率的关系,传输20 km后号在HD-FEC门限值时的接收光功率为-17.01 dBm,拥有28.77 dB链路功率预算值。与30 GHz带宽传输相比,存在0.9 dB的功率损失。

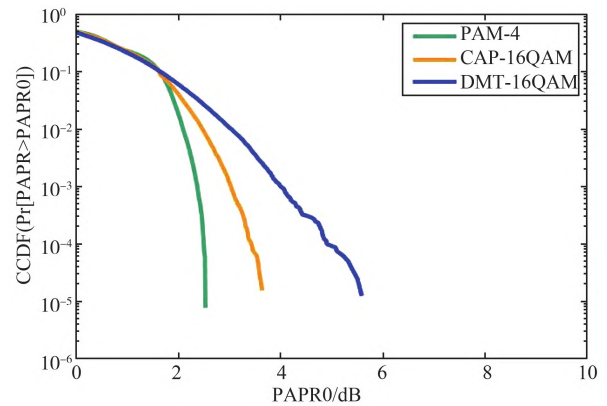


图5 三种调制格式的PAPR

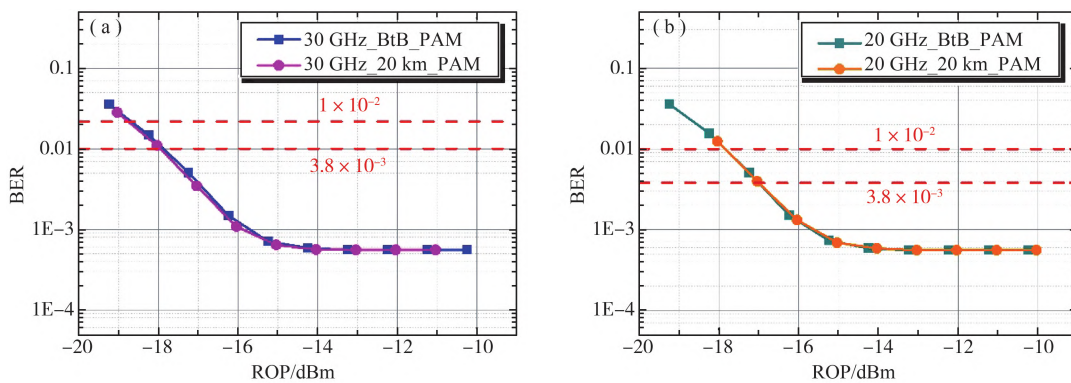


图6 PAM-4在115 GPON误码率与接收光功率的关系(a) 30 GHz;(b) 20 GHz

接着分别在不同带宽的系统中,对CAP-16QAM进行了仿真。图7(a)是CAP-16QAM信号在30 GHz的115 Gb/s传输系统中BtB和传输20 km后误码率与接收光功率的关系,在接收光功率较低时,两者并没有太明显的差距,当接收光功率比较高时,BtB系统性能略优于20 km传输。从图中可以观察到,传输20 km的CAP-16QAM信号在HD-FEC和SD-FEC门限的接收光功率分别为-13.65 dBm和-14.60 dBm,考虑到MZM调制器的发射功率为11.76 dBm,可以算出信号在HD-FEC和SD-FEC门限的链路功率预算分别为25.41 dB和26.36 dB。图7(b)是带宽为20 GHz传输系统中BtB和传输20 km后误码率与接收光功

率的关系,传输性能明显变差。传输 20 km SSMF 后在 HD-FEC 门限的接收光功率为 -11.74 dBm,因此得到 23.52 dB 功率预算。相较于 30 GHz 带宽的系统,存在 1.9 dB 功率损失,可见带宽限制对 CAP-16QAM 调制的影响。

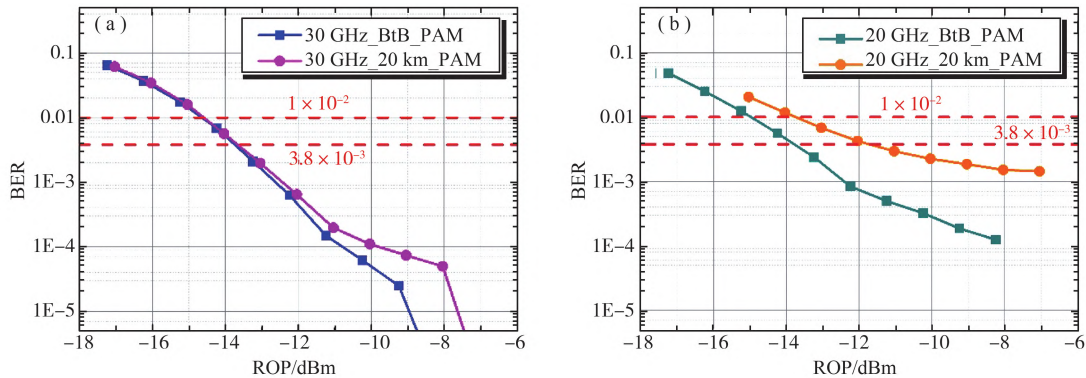


图 7 CAP-16QAM 在 115 GPON 误码率与接收光功率的关系(a) 30 GHz;(b) 20 GHz

图 8 分别展示了 DMT-16QAM 信号在 30 GHz 带宽的传输系统和 20 GHz 传输系统中 BtB 和传输 20 km 后误码率与接收光功率的关系。DMT 的优点之一就是它可以适应每个子载波的比特和功率分配,以最大化比特率和优化系统性能。从图 8(a)中可以观察到,在 30 GHz 带宽系统中传输 20 km 的 DMT-16QAM 信号在 HD-FEC 和 SD-FEC 门限的接收光功率分别为 -13.59 dBm 和 -14.49 dBm,考虑到 MZM 调制器的发射功率为 11.76 dBm,可以得到,信号在 HD-FEC 和 SD-FEC 门限的链路功率预算分别为 25.35 dB 和 26.25 dB。图 8(b)是信号在带宽为 20 GHz 的系统中 BtB 和传输 20 km 后误码率与接收光功率的关系,传输 20 km 后号在 HD-FEC 门限值时的接收光功率为 -13.94 dBm,拥有 25.7 dB 链路功率预算值。与 30 GHz 带宽传输相比,在 HD-FEC 阈值处反而有约 0.35 dB 的功率提升,但是在接收功率较大的地方,还是可以看出性能明显变差的。

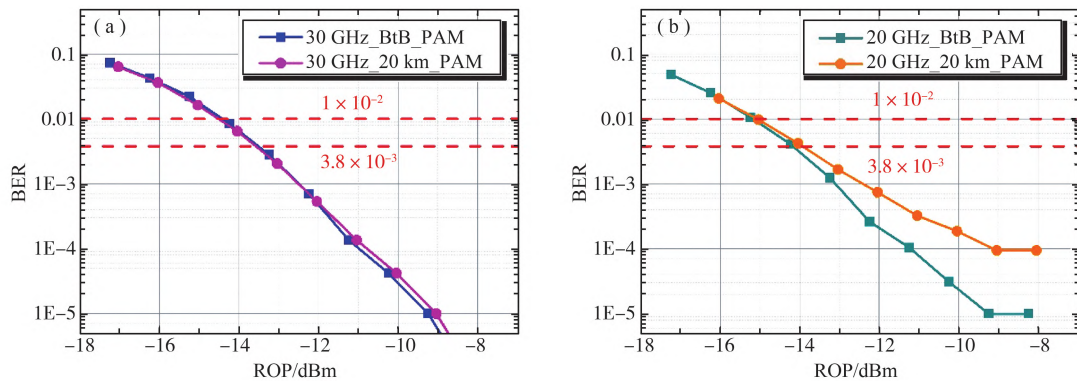


图 8 DMT-16QAM 在 115 GPON 误码率与接收光功率的关系(a) 30 GHz;(b) 20 GHz

热噪声和暗电流噪声都是光接收机中存在的噪声源,对接收机灵敏度性能有很大的影响。即使接收机接收到的是恒定功率的光信号,噪声的变化也会导致接收灵敏度的变化。在低比特率时,暗电流噪声很重要,速率很高的时候,暗电流噪声对整个噪声的作用不大,可忽略不计,因此在仿真中将其设为 0。在这里研究了光接收机灵敏度随热噪声的关系,结果如图 9 所示。在发射机功率为 30 mW 的条件下,以传输系统在 PD 热噪声为 $10 \text{ pA/Hz}^{1/2}$ 当作标准,通过随热噪声增加接收机付出的功率代价来衡量三种调制格式对热噪声的容忍性。随着热噪声值的增加,接收机的灵敏度出现明显下降。相较于 PD 热噪声为 $10 \text{ pA/Hz}^{1/2}$ 的情况,当热噪声达到 $25 \text{ pA/Hz}^{1/2}$ 时,PAM-4 和 DMT-16QAM 调制都付出了 3.9 dB 的功率代价,而 CAP-16QAM 付出了高达 4.9 dB 的代价。可以看出,PAM-4 和 DMT-16QAM 调制对热噪声的容忍度类似,要明显高于 CAP-16QAM 调制,CAP-16QAM 是在 115 Gb/s 传输系统中抗热噪声性能最差的调制格式。

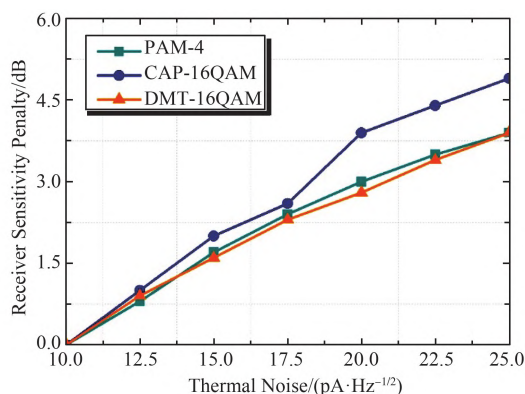


图9 三种调制格式接收机灵敏度与热噪声的关系

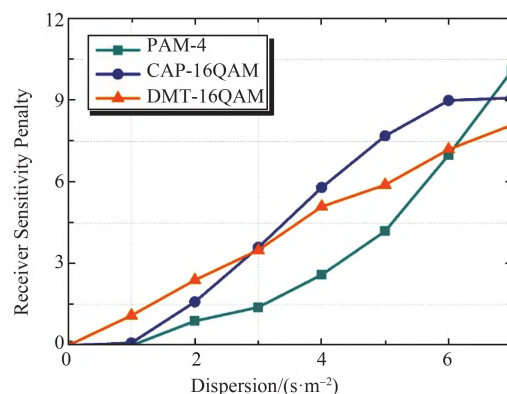


图10 三种调制格式接收机灵敏度与色散系数的关系

仿真系统中调制器的中心波长被设在了 1 310 nm,色散几乎为 0。为了研究 PAM-4,CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 在 O 波段其他波长的色散容忍,仿真了三种调制格式的光接收机灵敏度随热噪声的关系,如图 10 所示。在发射机功率为 $30\text{e-}3\text{ W}$,PD 热噪声为 $10\text{ pA/Hz}^{1/2}$ 的条件下,以 0 色散系数作为评判标准,通过随色散系数增加接收机付出的功率代价来衡量三种调制格式对热噪声的容忍性。传统的 IM/DD 系统很难抵抗色散带来的选择性衰落损伤,系统性能将随着色散系数的增加而严重恶化。从图中可以看出,随着色散系数的增加,接收机的灵敏度出现了明显下降。当色散系数较小时,PAM-4 抵抗色散的能力是最好的,CAP-16QAM 次之,DMT-16QAM 是最差的。当色散系数不断增大时,CAP-16QAM 和 PAM-4 都有一段急剧恶化的过程,只有 DMT-16QAM 调制的损耗一直处于线性增长。当色散系数增加到 7 s/m^2 时,PAM-4,CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 调制付出了的功率代价分别为 10.1 dBm,9.1 dBm 和 8.1 dBm。总体来说,不管什么调制在色散系数增大时,都会有不同程度的恶化,影响系统传输性能。如果要在 C 波段传输的话,就需要采取相应的色散补偿措施。

最后总结了 HD-FEC 门限下三种调制格式使用带宽受限器件传输 20 km SSMF 后的接收机灵敏度和功率预算,如表 1 所示。PAM-4,CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 的接收光功率分别为 -17.95 dBm , -13.65 dBm 和 -13.89 dBm 。考虑到激光器 11.76 dB 的发射功率,因此三者在此 3.8×10^{-3} 的误码率阈值下,链路功率预算分别为 29.71 dB,25.41 dB 和 25.35 dB。在 100 Gb/s 仿真系统中,三种调制的功率预算较为接近,均可以在 HD-FEC 阈值达到 25 dB 以上,其中 PAM-4 拥有最大的功率预算值。

表1 三种调制格式在 HD-FEC 门限的接收机灵敏度和功率预算

调制格式	发射功率/dBm	接收光功率@ 3.8×10^{-3} /dBm	功率预算@ 3.8×10^{-3} /dB
PAM-4	11.76	-17.95	29.71
CAP-16QAM		-13.65	25.41
DMT-16QAM		-13.59	25.35

表 2 给出了 SD-FEC 门限下三种调制格式使用带宽受限器件传输 20 km SSMF 后的接收机灵敏度和功率预算,PAM-4,CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 的接收光功率分别为 -18.76 dBm , -14.60 dBm 和 -14.49 dBm 。考虑到激光器 11.76 dB 的发射功率,因此三者在此 3.8×10^{-3} 的误码率阈值下,链路功率预算分别为 30.52 dB,26.36 dB 和 26.25 dB。在系统中,三种调制均可以在 SD-DEC 阈值达到 26 dB 以上的功率预算,其中 PAM-4 拥有最大的功率预算值。

表2 三种调制格式在 SD-FEC 门限的接收机灵敏度和功率预算

调制格式	发射功率/dBm	接收光功率@ 1×10^{-2} /dBm	功率预算@ 1×10^{-2} /dB
PAM-4	11.76	-18.76	30.52
CAP-16QAM		-14.60	26.36
DMT-16QAM		-14.49	26.25

表3总结了在 HD-FEC 门限下三种调制格式使用两种带宽受限器件传输 20km SSMF 后的功率预算损耗, PAM-4 和 CAP-16QAM 在 30 GHz 系统中的功率预算分别为 29.71 dB 和 25.41 dB, 在 20 GHz 系统中的功率预算分别为 28.77 dB 和 23.52 dB, 分别付出了 0.94 dB 和 1.89 dB 的功率代价。DMT-16QAM 在 30 GHz 系统中的功率预算为 25.35 dB, 在 20 GHz 系统中的功率预算为 25.7 dB, 功率预算反而有所提升。可见 CAP-16QAM 受器件带宽限制的影响最大。

表3 三种调制格式在不同带宽器件下的功率预算

调制格式	功率预算/@30GHz dB	功率预算/@20GHz dB	功率代价/dB
PAM-4	29.71	28.77	0.94
CAP-16QAM	25.41	23.52	1.89
DMT-16QAM	25.35	25.70	-0.35

5 结论

本文在带宽受限的 100 Gb/s 强度调制直接检测系统中, 对 PAM-4, CAP-16QAM 和 DMT-16QAM 三种调制格式进行了详细的仿真对比。结果显示, 使用 30 GHz 带宽的接收机, 三种调制格式在 HD-DEC 门限值均可以达到 25 dB 以上的功率预算, 其中 PAM-4 调制拥有最大的功率预算值, DMT-16 QAM 格式的功率预算最小, CAP-16QAM 处在中间, 因此在没有限制条件时, PAM-4 信号是三种调制中性能最好的。改用 20 GHz 带宽的接收机, 功率预算波动最大的是 CAP-16QAM, 可见其对器件带宽限制最敏感, 因此在器件带宽限制较大时用 DMT 调制较好。另外, CAP-16QAM 的抗热噪声性能最差, 在温度不稳定热噪声较大时, PAM 和 DMT 具有更好的性能。色散对三种调制都有很大的影响。因此这三种调制格式在基于带宽限制器件的短距离低成本接入网中都有着很好的前景。

参 考 文 献

- [1] CURTIS K, IEEE 50 Gb/s EPON(50G-EPON) [C].// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC), Anaheim, CA, 2020.
- [2] ZHANG K, ZHUGE Q B, XIN H Y, et al. Demonstration of 50 Gb/s/ λ Symmetric PAM4 TDM-PON with 10G-class optics and DSP-free ONUs in the O-band[C].// Optical Fiber Communication Conference(OFC), San Diego, CA, USA, 2018.
- [3] YE C H, ZHANG D X, HUANG X A, et al. Demonstration of 50 Gbps IM/DD PAM4 PON over 10 GHz class optics using neural network based nonlinear equalization[C].// 2017 European Conference on Optical Communication(ECOC), Gothenburg, Sweden, 2017.
- [4] 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.
- [5] ZHONG K, ZHOU X, HUO J H, et al. Digital signal processing for short-reach optical communications: A review of current technologies and future trends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 377-400.
- [6] XIE C J, DONG P, RANDEL S, et al. Single-VCSEL 100-Gb/s short-reach system using discrete multi-tone modulation and direct detection[C].// Optical Fiber Communication Conference(OFC), Los Angeles, CA, USA, 2015.
- [7] LI F, LI X Y, YU J J, et al. Optimization of training sequence for DFT-spread DMT signal in optical access network with direct detection utilizing DML[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22962-22967.
- [8] YAN W Z, TANAKA T, LIU B, et al. 100 Gb/s optical IM-DD transmission with 10 G-class devices enabled by 65 G Samples/s CMOS DAC core[C].// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC), Anaheim, CA, 2013.
- [9] ZHANG J W, WEY J S, YU J J, et al. Symmetrical 50-Gb/s/ λ PAM-4 TDM-PON in O-band with DSP and semiconductor optical amplifier supporting PR-30 link loss budget[C].// Optical Fiber Communication Conference(OFC), San Diego, CA, USA, 2018.

(下转第 15 页)

- [22] NEMAT-ABAD H M, ZAREIAN-JAHROMI E, BASIRI R. Design and equivalent circuit model extraction of a third-order band-pass frequency selective surface filter for terahertz applications[J]. Engineering Science and Technology International Journal, 2019, 22(3): 862-868.
- [23] CHEN H. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7165-7172.
- [24] DUAN G, SCHALC J, ZHAO X, et al. Identifying the perfect absorption of metamaterial absorbers[J]. Physical review B, 2018, 97(3): 035128.
- [25] LV T, CHEN X, DONG G, et al. Dual-band dichroic asymmetric transmission of linearly polarized waves in terahertz chiral metamaterial [J]. Nanophotonics, 2020, 9(10): 3235-3242.
- [26] FU T, LIU, AN Y, et al. Narrow-band asymmetric transmission based on the dark mode of Fano resonance on symmetric trimeric meta-surfaces[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 30141-30149.
- [27] TAO X, QI L, HU H, et al. Terahertz dual-band asymmetric transmission for a single cross-polarized linear wave[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 21044-21055.
- [28] SHEN X, YANG Y, ZHANG Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 154102.
- [29] FAN S, SUH W, JOANNOPOULOS J D, Temporal coupled-mode theory for the fano resonance in optical resonators[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(3): 569-572.
- [30] GUO H, LIN J, QIU M, et al. Flat optical transparent window: mechanism and realization based on metasurfaces[J]. Journal of Physics. D: Applied Physics, 2018, 51(7): 074001.
- [31] HUANG W, LIN J, QIU M, et al. A complete phase diagram for dark-bright coupled plasmonic systems: applicability of Fano's formula [J]. Nanophotonics, 2020, 9(10): 3251-3262.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 8 页)

- [10] ZHANG K, ZHUGE Q B, XIN H Y, et al. Design and analysis of high-speed optical access networks in the O-band with DSP-free ONUs and low-bandwidth optics[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27873-27884.
- [11] LI C C, CHEN J, LI Z X, et al. Demonstration of symmetrical 50-Gb/s TDM-PON in O-band supporting over 33-dB link budget with OLT-side amplification[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18343-18350.
- [12] ZHANG J, ZHU M, WANG K H, et al. The best modulation format for symmetrical single-wavelength 50-Gb/s PON at O-band: PAM, CAP or DMT? [C]. // Optical Fiber Communication Conference(OFC), San Francisco, CA, USA, 2021.
- [13] ZHONG K P, 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.
- [14] SHI J Y, ZHANG J W, ZHOU Y J, et al. Transmission performance comparison for 100 Gb/s PAM-4, CAP-16, and DFT-S OFDM with direct detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(23): 5127-5133.
- [15] SHI J Y, ZHANG J W, CHI N, et al. Comparison of 100G PAM-8, CAP-64 and DFT-S OFDM with a bandwidth-limited direct-detection receiver[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32254-32262.

(责任编辑:赵海军)