

PAM4 技术在光通信应用中的系统分析

System Analysis of PAM4 Technology in Optical Communication Applications

朱梅冬/ZHU Meidong
陆建鑫/LU Jianxin

(中兴光子技术有限公司, 江苏 南京
210012)
(ZTE Photonics Technology Co., Ltd.
Nanjing 210012, China)

随着大数据、云计算和物联网时代的到来, 流量需求的急剧增长, 光器件带宽提升越来越困难, 迫切需要采用复杂调制方式。目前在不归零码(NRZ)调制方式升级方案中, 4级脉幅调制(PAM4)是最被看好的高阶调制方式, 它将支持光互联向更高速率迈进。无线通信进入了5G时代, 相比4G时代, 承载网流量将有2~3个数量级的提升, 在未来5G承载高速光模块中将广泛地采用PAM4技术。

多年来, NRZ调制一直是非相干光通信的主要技术, 但随着速率的提升, 如200 G/400 G, NRZ调制在色散影响、光电转换带宽和成本上遇到了较大的困难。

25 G以上的波特率, 在中长距传输时, 色散的影响开始显著; 光电转换带宽在60 Gbit/s以上出现了技术瓶颈, 或许要采用新的材料及技术才能不断突破这个瓶颈; 在成本上, 在相同的比特速率的条件下, PAM4的波特率只有NRZ的一半, 大大降低了光器件的带宽要求, 从而可以降低光器件成本。

收稿日期: 2018-07-10
网络出版日期: 2018-08-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0033-005

摘要: 以太网发展已经进入了200 G/400 G新阶段, 4级脉幅调制(PAM4)作为高阶调制技术已经进入多个高速光模块的标准中。无线通信即将进入5G时代, 在5G承载网中PAM4调制方式将成为重要的技术方向。对PAM4技术在光通信应用中相关技术及指标做了详细分析, 并给出了PAM4系统仿真方案用以指导系统设计及器件规格定义。

关键词: PAM4; 线性; 误码率; 带宽; 判决电平

Abstract: Ethernet has entered into a new stage of 200 G/400 G development. As a high-order modulation technology, 4-level pulse amplitude modulation (PAM4) has been used in the standard of several high-speed optical modules. And PAM4 modulation will become an important technical direction in 5G bearer network. In this paper, the related technologies and specifications of PAM4 technology in the optical communication applications is analyzed in details, and the system simulation scheme of PAM4 is given to guide the system design and device specification definition.

Keywords: PAM4; linearity; bit error rate (BER); bandwidth; decision level

PAM4调制方式采用4个不同的信号电平来进行数据传输, 每个符号周期可以表示2 bit的逻辑信息(0, 1, 2, 3)。由于PAM4信号每个符号周期可以传输2 bit的信息, 因此要实现同样的信号传输能力, PAM4信号的符号速率只有NRZ信号的一半。实际上PAM4在电气和电子工程师协会(IEEE)中早已有相应的电接口标准, 但由于技术成熟度和成本的原因, 没有形成大规模应用。正在制定的200 G/400 G光电接口标准(IEEE 802.3bs)对PAM4信号的特性及参数进行了深入研究和定义。另外, 相对于光器件成本的增加, 电驱动芯片成本增加相对较小甚至可以忽略, 提升调制复杂度技术上可行, 而且更具经济性, PAM4调制技术成为必然的发展方向。如表1所示, 目前50 G以太网标准大部分则会考虑采用PAM4的

调制方式。

1 发送技术

1.1 速率转换

速率转换主要解决电接口与光接口之间的速率匹配问题。对单波而言, 一般速率转换有3种方式: 1路NRZ转1路PAM4, 波特率减半; 2路NRZ转1路PAM4, 波特率不变; 2路PAM4转1路PAM4, 波特率提升1倍。

对于2路转1路模式, 由于是2个输入, 如果输出采用简单叠加的方式, 由于延时不一样, 会造成波形变异, 时钟和数据恢复难度大, 判决误码率高。解决方案是: 先进行时钟同步, 再进行不同幅度差相叠加的方法, 在电域和光域上进行叠加都是可行的。对于1路转1路的信号, 没有同步的问题。

▼表1 高速光接口标准

光接口标准	距离/m	格式	波特率/G
400 G BASE-SR16	100	NRZ	26.6
400 G BASE-DR4	500	PAM4	53.1
400 G BASE-FR8	2 000	PAM4	26.6
400 G BASE-LR8	10 000	PAM4	26.6
200 G BASE-SR4	100	PAM4	26.6
200 G BASE-DR4	500	PAM4	26.6
200 G BASE-FR4	2 000	PAM4	26.6
200 G BASE-LR4	10 000	PAM4	26.6
100 G BASE-SR4	70/100	NRZ	10.3
100 G BASE-SR2	100	PAM4	26.6
100 G BASE-DR	500	PAM4	53.1
100 G BASE-SR4	70/100	NRZ	25.8
100 G SWDM	400	NRZ	25.8
100 G PSM4	500	NRZ	25.8
CWDM4/CLR4	2 000	NRZ	25.8
100 G BASE-LR4	10 000	NRZ	25.8
100 G BASE-ER4	40 000	NRZ	25.8
50 G BASE-SR	100	PAM4	26.6
50 G BASE-FR	2 000	PAM4	26.6
50 G BASE-LR	10 000	PAM4	26.6

CLR:中距粗波分复用 NRZ:不归零码 PSM4:并行单模4通道
CWDM:粗波分复用 PAM4:4级脉幅调制 SWDM:短波长波分复用

在实际应用中,可能还有4路NRZ转1路PAM4或4路PAM4转1路PAM4的速率变换模式,与2路转1路一样,需要时钟同步。

1.2 发送机线性要求

由于多电平调制,PAM4对器件的线性度有要求。当线性度差时,PAM4输出眼图的3个眼高度不一样,如图1所示,上面的眼高小,下面的眼高大,其误码率一般取决于最小的眼高。

在IEEE 802.3bs标准中定义了电平间隔错位度(RLM)^[1],来评估线性

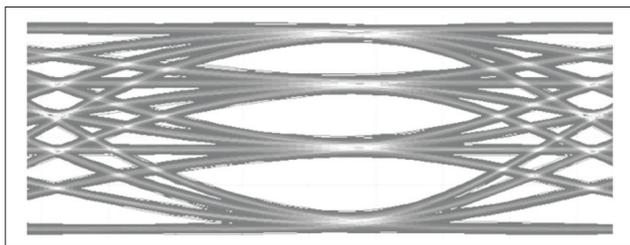
度指标,具体如式(1)。

$$\begin{aligned}
 L_{mid} &= (L_D + L_A) / 2 \\
 ES1 &= (L_B - L_{mid}) / (L_A - L_{mid}) \\
 ES2 &= (L_C - L_{mid}) / (L_D - L_{mid}) \\
 RLM &= \min(3 \times ES1, 3 \times ES2, \\
 & 2 - 3 \times ES1, 2 - 3 \times ES2) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, L_{mid} 为平均电平幅度,ES1为 L_A , L_B 电平相对 L_{mid} 的偏离程度,ES2为 L_C , L_D 电平相对 L_{mid} 的偏离程度。

RLM的物理意义是与理想电平相比时最大偏移度,IEEE 802.3bs中对电接口要求RLM值 ≥ 0.92 ^[1]。

电器件比较容易满足上述要



◀图1 非线性的眼图

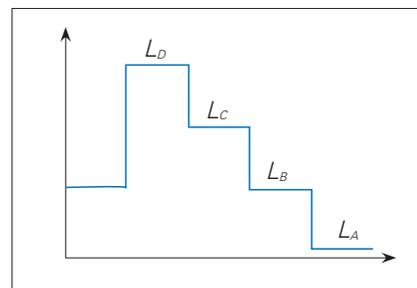
求。但对于光器件,可能有一定的挑战,特别是在DML高温场景下,激光器的P-I曲线工作区线性度可能比较差。这种情况下,通常要求电驱动芯片输出给光器件的PAM4信号幅度可调,通过这种方法来降低或消除光器件带来的非线性影响。具体的调整幅度因光器件差异来定,目标是补偿其非线性。

1.3 激光器相对强度噪声

相对强度噪声(RIN)在NRZ和PAM4中都是很关键的指标,它是激光器(LD)自身特性引起的,叠加在光信号上的噪声。不同的应用场景,该指标有所差异。

这里仅从与NRZ对比的方式给出PAM4系统中,说明相对强度噪声在PAM系统的重要性。假设光信号NRZ的光调制幅度(OMA)与PAM4的 OMA_{out} (外层光调制幅度)大小一样,PAM4由于有4个电平(如图2所示),其最小信号约为NRZ的1/3,如果噪声大小与NRZ一样的话,PAM4的信噪比要差5 dB左右。因此,PAM4系统应用中对相对强度噪声有更高的要求。

IEEE 802.3标准族中,如100 G/200 G/400 G标准,有RIN取值的相关定义。在NRZ系统中,如100 G BASE-LR4中RIN最大为-130 dB/Hz,而40 G BASE-FR中RIN最大可以达到-132 dB/Hz。虽然200 G/400 G的标准还未完全定稿,但是从草案中可以查到PAM4系统的相关定义,例如:400 BASE-LR8中的RIN最大为-140 dB/Hz,400 G-PSM4中RIN最大



▲图2 PAM4的4个电平

为-142 dB/Hz。

1.4 信号频域补偿和整形处理

由于信道是具有频率选择性衰落,特别是高频成分,那么则会引起码间干扰。为了抗信道衰落,可以在发送侧,采用信号的频域补偿技术,主要有预加重或去加重技术,目的是为了增强发送信号的高频分量。这种技术在 NRZ 系统中比较常见,在 PAM4 中也可以应用。

整形处理技术具有代表性的是奈奎斯特滤波^[1],其主要原理是通过奈奎斯特脉冲整形来降低发送信号频谱,而不会恶化码间干扰。

2 接收技术

2.1 接收机的线性要求

接收侧的模拟器件主要有光器件光电二极管(PD/APD)和跨阻放大器(TIA)芯片。一般情况下,PD/APD 具有较大的线性工作区。与 NRZ 的 TIA 不同,PAM4 系统中要求 TIA 工作在线性区。

信号饱和是信号超出光电器件正常工作范围,造成信号失真。在 NRZ 系统中,能承受一定程度的饱和。但在 PAM4 系统中,饱和时从眼图上看会直接挤压 3 个眼的最上面的一个;严重时,中间的眼也会严重变形,对信号质量影响很大,误码率也随之急剧恶化。因此,PAM4 系统对饱和状态容忍度比较差。

饱和解决方式可以通过选择合适的接收光功率工作区域,适当降低 TIA 增益或后级放大器(如自动增益控制)的增益来避免饱和。

2.2 多电平判决

电平判决是系统中一个重要技术。判决电平幅度的选取直接影响误码率,相比 NRZ 只需 1 个判决电平,PAM4 接收需要 3 个判决电平,实现更复杂。以下 2 种情况,判决幅度要实现自适应调整:输入的模拟信号

幅度变强或变弱;输入信号线性度变化,即眼图上 3 个眼高发生变化。

对于时域采样位置,在眼图不对称情况下其中心位置不是最佳采样点。造成眼图不对称的原因可能是系统中的滤波器,也有可能是 LD 的上升时间与下降时间不一致,造成 3 个眼在垂直方向上有偏移。考虑到眼图的不对称性,希望接收机采样位置可进行自适应调整。

2.3 均衡器

均衡器能减少码间干扰,起到补偿作用的滤波器,如:前向反馈均衡(FFE)、判决反馈均衡(DFE)、连续时间线性均衡(CTLE)、最大似然序列估计(MSLE)等,这些技术都可以应用于 PAM4 系统中。其中,MLSE 用最大似然准则从接收信号中估计出正确的序列,性能最好,但算法复杂度较高,延时较长。

3 系统考虑

3.1 光功率预算

功率预算主要考虑出光功率、光调制幅度(OMA)、光链路损耗、发射机和色散眼图闭合度(TDECQ)、多径干扰(MPI)和接收灵敏度等,PAM4 在功率预算计算上与 NRZ 类似。对于同样的接收信号幅度,由于 PAM4 发送 4 个电平,最小信号眼图眼高比 NRZ 的小 5 dB 左右。因此,相比于 NRZ 方式,PAM4 存在着 5 dB 左右的调制代价。

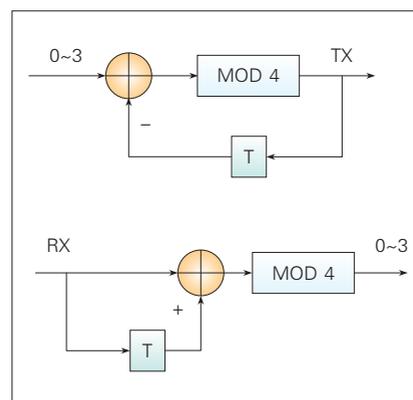
3.2 编码

与 NRZ 2 个电平不同的是:PAM4 有 4 个电平,分别用 0, 1, 2, 3 表示。在 IEEE802.3bs 标准中,有格雷编码和预编码,2 种码不是为了纠错,而是为了降低出错率。其在信道的编解码的流程为:发送侧按信号流依次为格雷编码、预编码^[4,5]、PAM4 信号输出,接收侧依次为 PAM4 信号输入、解预编码、格雷解码。

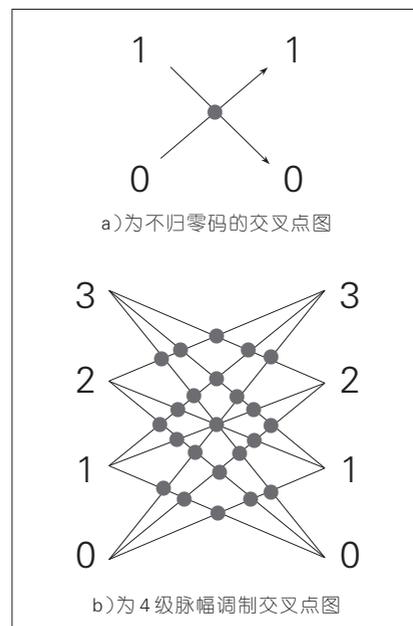
预编码及其解码如下(如图 3 所示):其中 T 为延时一个符号周期,MOD4 是除 4,取余数。它的好处是在突发误码和随机误码时,有 1.45 dB 的编码增益。

3.3 抖动

对 NRZ 信号来说,存在 0→1 和 1→0 2 种信号变换模式,只有 1 个交叉点,如图 4 a)所示。对于 PAM4 信号来说,一共有 12 种信号变换模式,交叉点多且离散,如图 4 b)所示。在接收端提取时钟时,时钟数据恢复(CDR)电路设计难度相对较大。另外,信号带宽直接影响了交叉点的离



▲图 3 预编码及其解码算法



▲图 4 2 种信号变换模式

散程度, PAM4交叉点离散程度影响信号抖动, 对CDR的设计提出了更高的要求。

3.4 测试码型

在测试眼图、消光比、光功率、误码率等指标时, 需要合适的测试码序列。NRZ的序列由二进制码组成, 即0/1; PAM4的序列是四进制码组成, 即0/1/2/3。这样一来, 原来用于NRZ系统测试的长度为 $2n-1$ 的伪随机序列码(PRBS n), 在PAM4中不适合直接使用。同时, 为保证0/1/2/3电平都同等被遍历到, 还要取其反码, 即 $3-x$, 最终改造后的码型称为PRBS n Q, “Q”的含义为四进制。

IEEE802.3bs标准中定义PRBS13Q、PRBS31Q和四进制短强度随机码(SSPRQ)码型^[6]。其中, PRBS31Q码太长, 测试时间长; PRBS13Q码短随机性不够强; SSPRQ码型码长适中, 容易锁定, 随机性强也适中, 实际测试中使用最多。

3.5 发射机和色散眼图闭合度

发射机和色散眼图闭合度(TDECQ)^[7]是测量光发射机的垂直眼图闭合度, 取代传统的发射机和色散代价(TDP), 用于PAM4系统光信号质量的评估测量, 详细的算法参考文献[3]。

需要说明的是: 测量时需考虑最恶劣的色散信道, 包含正色散和负色散。其算法的思想是在当前的信噪比下模拟加入高斯噪声, 评估能加多大的噪声, 使符号误码率(SER)接近 4.8×10^{-4} 。

4 系统仿真设计

光通信系统的仿真性能评估以误码率(BER)为依据, 影响BER的因素主要: 信号质量、噪声、干扰。

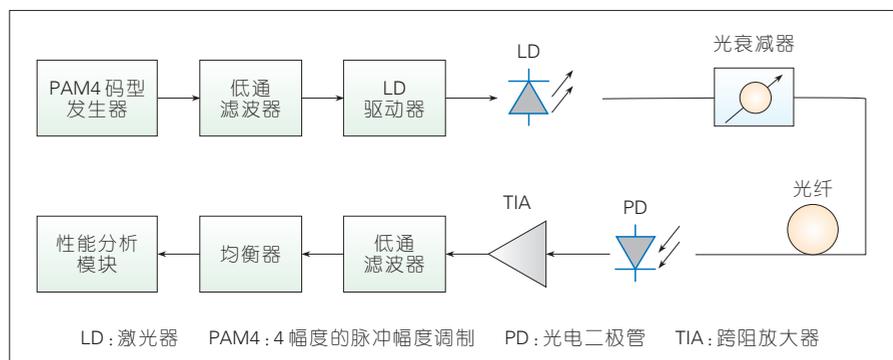
影响信号质量的因素主要包括带宽、线性度、抖动、消光比和OMA等。带宽小, 容易产生码间干扰, 可以通过频域补偿的方法缓解, 如: 预

加重和均衡技术; 考虑信号线性度时, 眼图中最小的一只眼决定了BER的性能; 信号抖动会造成判决位置的偏差, 从而影响BER性能; 消光比会影响功率预算, 进而影响灵敏度; 接收光信号的OMA, 即接收信号的调制强度, 当噪声不变时, 强度越大, BER越小。

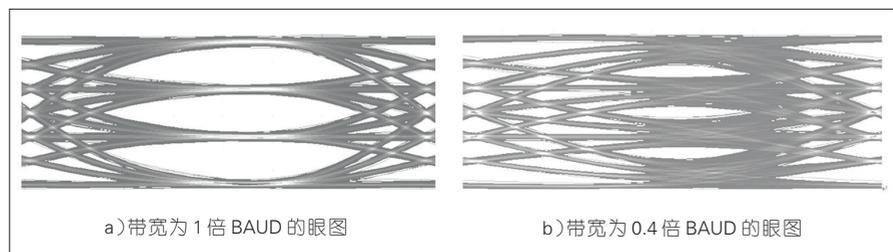
噪声主要包括光域噪声和电域噪声。在光域方面, 前文已有说明; 在电域方面, PD/APD的暗电流和噪声电流以及TIA的噪声基本上决定了接收机的灵敏度。

干扰主要包括多径干扰、色散、信道选择性衰落。多径干扰主要是由多个连接器来回反射后, 叠加到光信号上, 相当于噪声; 色散会使脉冲展宽, 带宽变小; 信道选择性衰落主要是较高频率选择衰落, 类似于低通滤波器。

收发系统的仿真框图如图5所示。与NRZ仿真系统相比, 其最大的不同点主要体现在发送侧的PAM4信号发生器和接收侧的性能分析模块(支持PAM4眼图分析)上, 其次是对驱动器和TIA有线性要求。



▲图5 光收发系统仿真框图



▲图6 不同带宽下的眼图

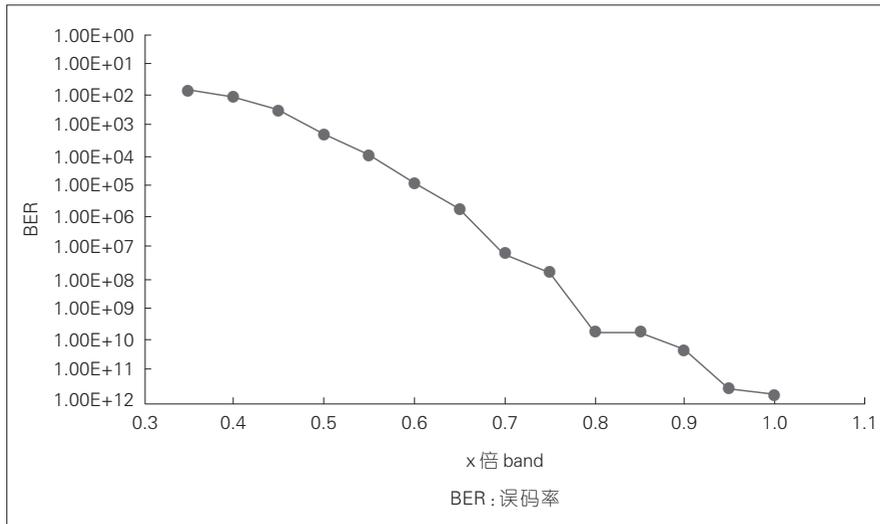
仿真可信性主要取决于链路器件仿真模型的准确度, 在实际仿真中需要结合测试来提升器件建模参数准确性。由于PAM4技术实际上没有大规模应用, 应用经验缺乏, 仿真可以指导系统设计及相关器件规格定义。以带宽仿真为例, 发送和接收的信号滤波器都选用二阶贝塞尔滤波器。带宽为1倍波特率(BAUD)时的眼图如图6a)所示, 眼图中的3个眼的眼皮很薄, BER很小。

图6b)为发送的滤波器带宽为0.4倍BAUD时的眼图, 眼图中眼皮很厚, 码间干扰较大, BER性能差。

图7的曲线图是在一定条件下的带宽与误码关系的曲线。从图7中可以看出: 当带宽逐渐地变大时, BER(log)值近似直线下降。

5 结束语

目前, 多个光模块标准采用了PAM4作为光调制方式; 但是相关产品没有进入规模部署, 特别是在电信应用场景中对光模块的可靠性及距离要求高。PAM4光通信系统设计需要全面考虑发送、接收及光路各



▲图7 带宽与BER关系的曲线图

种因素的影响,结合实际应用推进PAM4技术产业链成熟度,为5G承载网高速、可靠、规模部署做好准备。

参考文献

- [1] TX LINEARITY MEASUREMENT PROPOSAL [R/OL].(2016-01-16)[2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/16_01/hegde_3bs_03_0116.pdf
- [2] IEEE P802.3bs Baseline Summary: IEEE P802.3bs [S/OL]. (2015-07-15)[2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/baseline_3bs_0715.pdf

3bs_0715.pdf

- [3] 400GbE using Nyquist PAM4 for 2km and 10km PMD[R/OL]. (2014-09-14)[2018-08-06]. http://grouper.ieee.org/groups/802/3/bs/public/14_09/rao_3bs_01b_0914.pdf
- [4] FEC Performance with PAM4 Precoding[R/OL]. (2015-07-15)[2018-00-00]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/15_07/anslow_3bs_04_0715.pdf
- [5] BHOJA S, BLISS W, CHEN C, et al. Precoding Proposal for PAM4 Modulation[R/OL]. (2011-09-11)[2018-08-06]. http://ieee802.org/3/bj/public/sep11/parthasarathy_01_0911.pdf
- [6] ANSLOW P, CIENA. SSSPRQ Test Pattern[R/OL]. (2016-04-16) [2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/adhoc/smf/16_04_19/anslow_01_0416_smf.pdf

- [7] Draft Amendment to IEEE Std 802.3-2015: IEEE Std 802.3-2015 [S/OL]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/17_03/king_3bs_01_0317.pdf
- [8] Keysight Technologies. How to Overcome Test Challenges in 400G/PAM-4 Designs[R/OL]. (2017-02-15) [2018-08-06]. https://www.keysight.com/upload/cmcc_upload/All/PAM-4_January2017_Final.pdf

作者简介



朱梅冬,中兴光电子技术有限公司系统工程师;从事高速新型光电器件及系统的研究;曾参与光纤故障监测及光纤传感等重要项目;申请发明专利5项。



陆建鑫,中兴光电子技术有限公司规划总监;作为光通信领域资深专家,多年来致力于宽带网络设备和器件的研发、系统设计及规划工作;参与多项政府重大项目;在ITU-T和中国光纤网络标准化领域提交提案10余篇,申请中国专利30余项、国际专利10余项。