



短距光传输系统中基于 PAM4 调制的带限接收技术

刘群¹, 杜慧琴^{1,2}, 吴香林¹

(1. 四川现代职业学院, 四川 成都 640207;

2. 四川大学计算机学院, 四川 成都 610211)

摘要: 针对强度调制和直接检测 (IM-DD) 短距光传输系统中, 由于光器件带宽受限特性, 导致接收端检测到的 PAM4 信号存在较大符号间干扰 (inter symbol interference, ISI), 给出了一种基于判决反馈均衡器 (DFE) 级联超奈奎斯特速率 (FTN) 传输的带宽受限下的补偿方案, 并在不同的带宽受限场景下进行了仿真验证。仿真结果表明, 该带宽受限补偿方案能够有效地恢复接收到的 PAM4 信号, 在误码率低于 10^{-3} 时, 有 1 dB 左右的性能收益。

关键词: 强度调制和直接检测; 4 级脉冲幅度调制; 带限信道; 超奈奎斯特速率; 符号间干扰

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018091

A band-limited receiver technology based on PAM4 modulation for the short distance optical transmission system

LIU Qun¹, DU Huiqin^{1,2}, WU Xianglin¹

1. Electronic Information Technology Department of Sichuan Modern Vocational College, Chengdu 640207, China

2. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610211, China

Abstract: In intensity modulation and direct detection of the short distance optical transmission system, there is some serious ISI (inter symbol interference) for the detected PAM4 signal due to the band-limited performance for the optical devices. A band-limited compensation algorithm based on DFE (decision feedback equalizer) combined FTN (fast than Nyquist) transmission was proposed. Then the algorithm performance gain was simulated in different band-limited scenarios, and the simulation results show that this algorithm can be useful to demodulate PAM4 receiver signal. What is more, there is about 1 dB performance gain at the bit error rate (BER) of 10^{-3} for the serious conditions.

Key words: intensity modulation-direct detection, PAM4, band-limited channel, fast-than-Nyquist, ISI

1 引言

光纤通信具有传输容量大、传输速率快、损耗小等优点, 从光纤传输距离上看, 光传输可分

为长距传输和短距传输, 其中短距传输一般是采用强度调制和直接检测 (intensity modulation-direct detection, IM-DD) 系统。目前, IM-DD 系统中较成熟、低成本、可商用的光模块一般是

10 GHz 带宽,而传统的 NRZ(非二进制归零)调制技术由于需要 25 GHz 的带宽而不能满足需求。因此更高频谱效率的调制技术成为目前短距传输和数据中心领域研究的热点^[1,2]。

IM-DD 系统中调制技术研究的热点主要有富士通(Fujitsu)公司主推的基于多载波调制的 DMT(discrete multi-tone, 离散多音频)方案^[3],英菲克(Inphic)等公司主推的 PAM4 调制方案,其中 DMT 技术方案由于实现复杂度高且存在高 PAPR(峰值比)问题^[4-6],最终没成为 100 GE(IEEE 802.3.b)标准,而 PAM4 由于实现简单等优点成为 100 GE 的标准。

PAM4 调制在 IM-DD 系统中的应用仍有一些问题需解决:如何在带限系统中进行 PAM4 信号的解调、低复杂度的非线性均衡技术等^[7]。参考文献[8]基于 40 Gbit/s 的 PAM4 信号,采用带宽为 9.5 GHz 的光接收机,研究结果表明采用 FFE 和 DFE 级联方式可以补偿 ISI^[8],但其传输容量较低,带宽受限程度相对较小。参考文献[9]基于 56 Gbit/s 的 PAM4,在发送端进行预补偿,研究结果表明,预补偿技术能有效对抗带限效应带来的 ISI,但是 PAM4 信号产生是 SerDes(serializer-deserializer,

串行器和解串器)方式,因此发送端进行预补偿,实现复杂度会特别高。

本文给出一种基于“DFE + postfilter(白化滤波器) + FTN”的带限补偿技术,该方案能有效补偿带限效应带来的 ISI 问题。

2 IM-DD 系统调制技术

在 IM-DD 系统中,传输距离虽短,但对低成本诉求强烈,其中光模块的成本占比最大,寻求更高阶的调制格式是一个降成本的有效手段。传统的 NRZ 调制每个符号仅传输 1 bit,频谱效率 1 bit/(s·Hz),频谱利用率相对较低。理论上调制模式越高,频谱利用率越好,但其对应抗噪声能力也随之下降,图 1 给出 M-PAM 调制相对 NRZ 下的性能代价。从图 1 可以看出,PAM4、PAM8、PAM16 相对 NRZ 调制的性能代价分别为:4.78 dB、8.45 dB、11.76 dB。IM-DD 系统中调制模式的选择需综合考虑频谱利用率和抗噪声性能这两个方面。

在实际 IM-DD 高速光传输系统中,一般是采用带宽 10 GHz 左右光器件,信号传输容量为 50 Gbit/s,传统 NRZ 调制信号的有效带宽为 25 GHz,因此

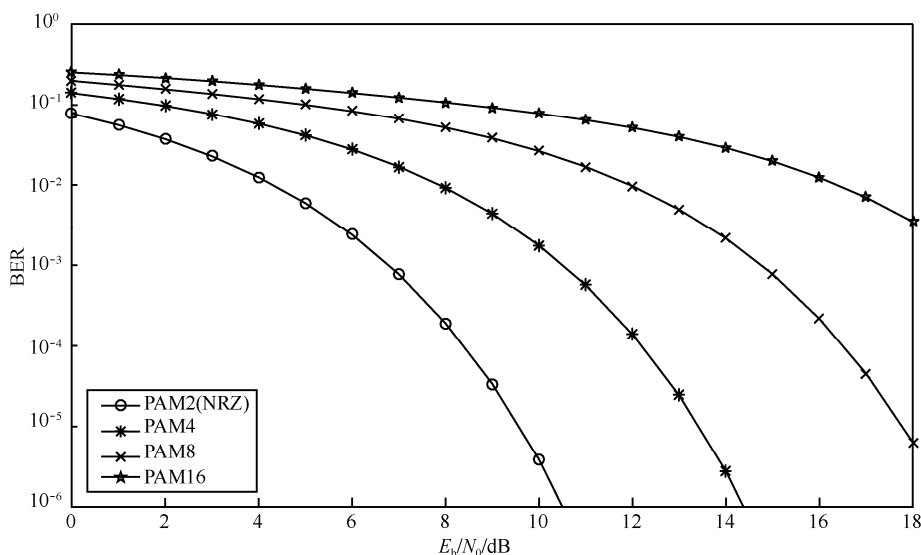


图1 M-PAM 与 NRZ 在 AWGN 信道下性能对比



NRZ 在 10 GHz 光器件下无法传输, 而 PAM4 调制对应频谱效率为 2 bit/(s·Hz), 每个符号能够传输 2 bit, 基带 PAM4 信号传输所需有效带宽为 12.5 GHz 左右, 且抗噪声性能和实现复杂度(均衡算法等)相对 PAM8 等高调模式更好, 因此是更优的方案。

3 IM-DD 系统中带限补偿技术

图 2 给出 MM-DD 系统中基于 FTN 技术的带限补偿算法原理。首先产生 PRBS 数据, 然后进行 PAM4 符号映射, 接着利用带限滤波器和加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)来模拟实际 IM-DD 系统中光器件带来的带限效应和热噪声。接收端处理: 先通过自适应均衡器滤除部分 ISI, 然后将均衡后数据先进行白

化滤波, 目的是对噪声谱进行白化, 接着送入 MLSE(最大似然估计序列)模块, 最后完成信号解映射, 并计算 BER(比特误码率)。

在带宽受限严重的情况下, 线性均衡器 FFE 会把信号和噪声一起放大, 而 DFE(判决反馈均衡器)只放大信号, 不放大噪声^[10], 因此 IM-DD 带限系统的均衡器采用 DFE 结构, 其原理如式(3)所示:

$$r_k = \sum_{i=-k_1}^{-1} w(i)y(n-k) + w(0)y(n) + \sum_{i=1}^{k_2} w(i)\hat{y}(n-k) \quad (3)$$

DFE 实现的原理结构如图 3 所示。

带限接收机算法原理如图 4 所示。

均衡后送入带限接收机的信号可以表示为:

$$\text{err}_k = (t_k + n_k) * h_n \quad (4)$$

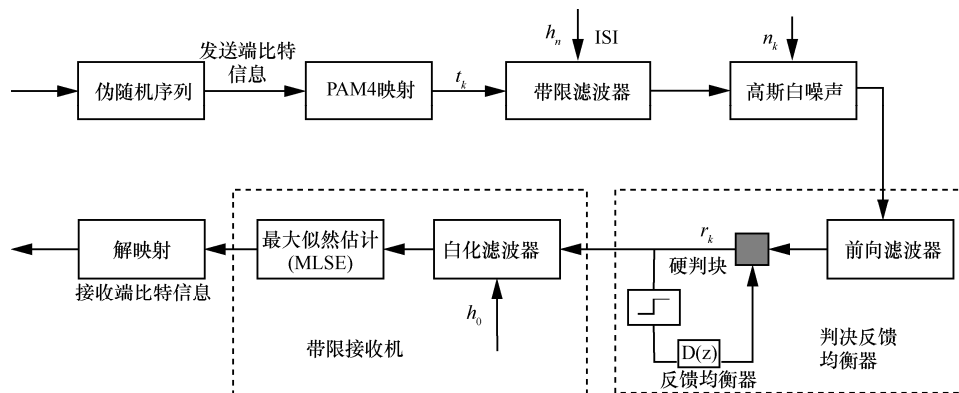


图 2 带限补偿技术在 IM-DD 系统中应用

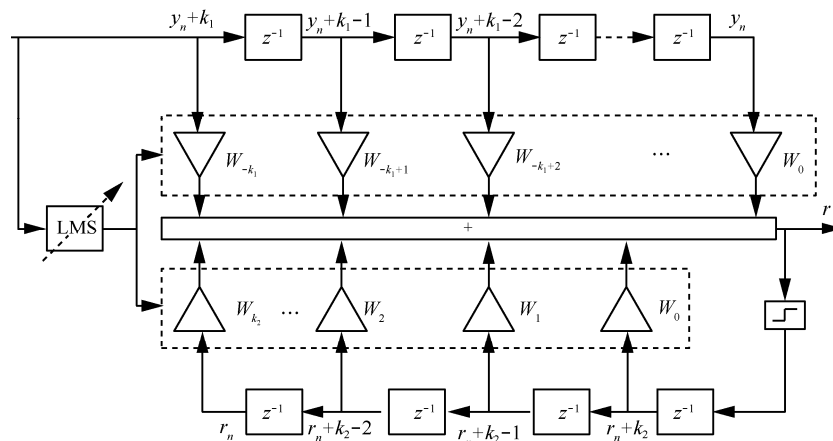


图 3 DFE 实现的原理结构

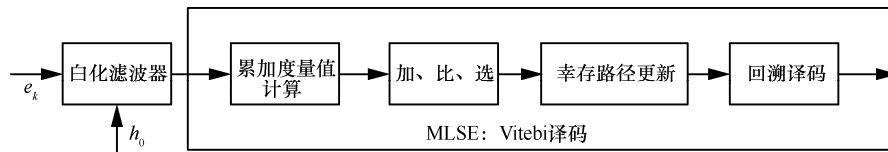


图 4 带限接收机算法原理

其中, t_k 为发送端信号, n_k 为高斯白噪声, h_n 为带限滤波器冲击响应, 则送入白化滤波器模块的误差函数可以表示为:

$$e_k = (t_k + n_k) * h_k - t_k = (t_{\text{ISI}} + n_k * h_k) \quad (5)$$

从式 (5) 可以看到 e_k 不仅包含“有色噪声”还有 ISI, 而后端 MLSE 算法和 FEC 译码一般是“白噪”下性能最优, 因此需要对有色噪声送入白化滤波器, 目的是滤除高频噪声, 使噪声谱分布尽量趋于“白噪”, 即有式 (6) 成立:

$$\text{err}_k * h_k = (t_{\text{ISI}} + n_k * h_k) * h = t_{\text{ISI}} * h_0 + n_0 \quad (6)$$

其中, h_0 是 2 抽头白化滤波器 [1 α], 传输响应如式 (7) 所示:

$$H_0 = 1 + \alpha \cdot z^{-1}, \alpha \in [0 \ 1] \quad (7)$$

白化滤波器系数的估计, 可以通过 Burg 算法得到。Burg 算法的主要思想是: 使前向预测均方误差和后向预测均方误差之和最小, 估计出反射系数; 由 m 阶 AR 模型的反射系数和 $m-1$ 阶 AR 模型的系数代入 Levinson 关系中, 可以得到 AR 模型的其他 $(p-1)$ 个参数, 具体原理见参考文献[11]。因为白化滤波器只有 2 个抽头, 而其中一个固定为 1, 因此一种简化方案是通过在 [0: 0: 1: 1] 范围内扫描, 使 BER 最小的值白化滤波器另一个抽头系数 α 。

MLSE 采用的是 Viterbi 译码算法^[12], 对 PAM4 信号来说, 2 抽头白化滤波器对应状态数仅有 4 个, 因此其译码复杂度相对较小。Viterbi 主要步骤如下。

(1) 累加度量值计算

从某一时刻 j 开始, 根据接收到的数据, 对

进入每个状态的所有分支, 分别计算其分支度量值(即最小欧氏距离 ΔD), 其中 Y_{dk} 为待译码符号, X_{dk} 为标准的 PAM4 (经过符号同样的白化滤波器处理)。计算过程见式 (8):

$$\Delta D(Y_{\text{dk}}, X_{\text{dk}}) = |Y_{\text{dk}} - X_{\text{dk}}|^2 \quad (8)$$

(2) 加比选

对每一状态, 将这些计算好的分支度量值和与这一状态的前一时刻的幸存路径度量值进行累加, 并比较所有路径的累加度量值 D , 选择出累加值 DM 最小的那条路径作为幸存路径, 并记下相应的路径转移信息。计算过程见式 (9) 和式 (10):

$$D(Y_{\text{dk}}, X_{\text{dk}}) = \sum_{k=1}^K |Y_{\text{dk}} - X_{\text{dk}}|^2 \quad (9)$$

$$\text{DM}(X_k) = \min_{X_{k-1}} \{ \text{DM}(X_{k-1}) + \Delta(X_{k-1}, X_k) \} \quad (10)$$

(3) 幸存路径更新

把对应转移路径信息存入幸存路径。

(4) $j=j+1$, 返回步骤 1 进行迭代, 同时判断是否达到译码窗长, 若是, 则进行回溯译码。

4 仿真分析

为分析不同带宽受限信道下, 本文提出算法的性能收益, 通过 MATLAB 自带的 FDA tools 工具箱, 得到不同滤波器 h_n , 模拟不同带限信道。

图 5 给出不同场景下, 信号经过带限信道后的频谱对比。从图 5 可以看出, 理想 AWGN 信道下的频谱为一条直线, 经过带宽受限信道下后, 信号频谱存在明显的衰减。在带宽受限较严重场景下, 高频衰减较明显, 3 dB 带宽约 12 GHz 左右, 而带宽受限特性会带来明显的 ISI。

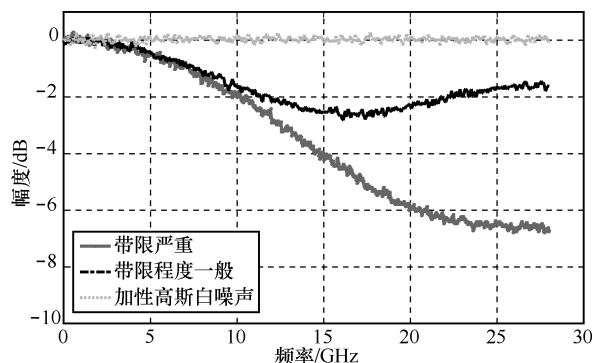


图5 不同带限信道下频谱对比

图6给出了不同带限信道下本文提出带限补偿算法收益。仿真条件：DFE前向抽头为11个，反馈抽头3个，迭代步长为 10^{-3} ，MLSE译码窗长为136，其中MLSE输入为128个符号，另外8个符号为overlap（交叠数据长度）。

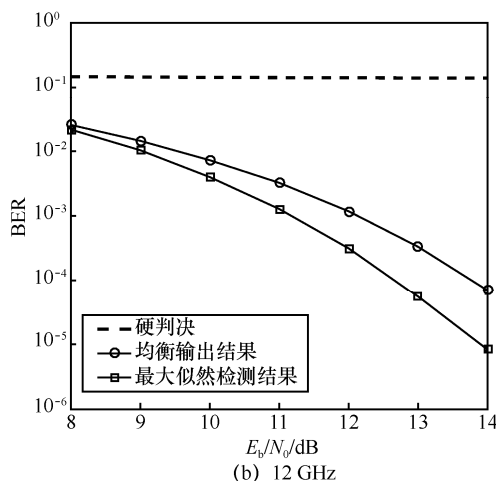
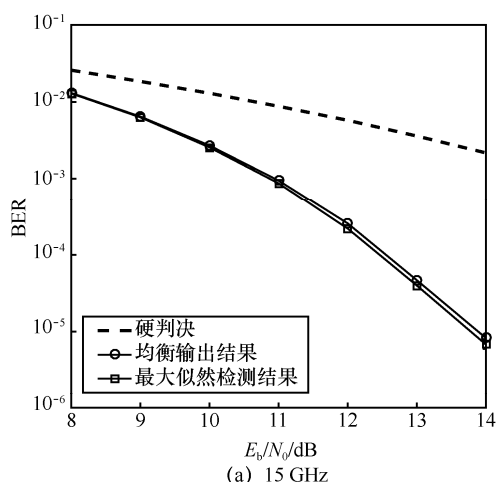


图6 不同带限信道下FTN算法收益

从图6可以看出，在带宽受限不严重的情况下（15 GHz以上带宽），直接采用判决反馈均衡器，即可完成对接收信号的解调，但随着带宽受限特性的加大（12 GHz左右），接收端检测到的PAM4信号存在较严重的ISI，如果采用判决反馈均衡方式则性能恶化明显，而本文提出算法约有1 dB左右的性能收益。

图7给出了经过带限补偿算法前后的噪声谱。从图7可以看出，白化滤波器可以有效地对噪声进行白化（非AWGN变成AWGN），而一般MLSE算法和FEC纠错码算法都是基于AWGN信道设计，若信道不是AWGN信道，则有性能劣化，因此这也是本文提出的带限窄带补偿算法存在较大性能收益的原因。

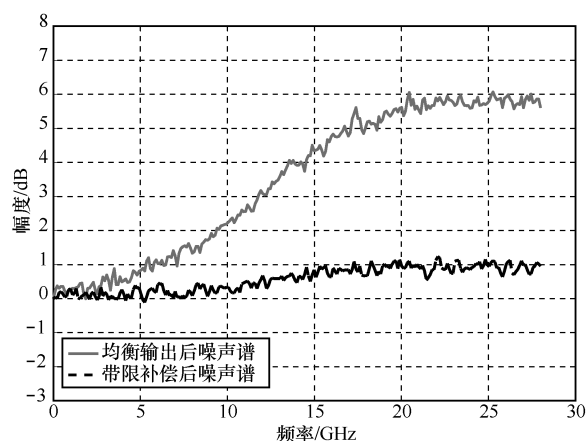


图7 带宽受限系统下带限补偿算法前后输出的噪声谱

5 结束语

在短距IM-DD光传输系统中，PAM4调制技术具有对器件带宽要求低、抗噪声能力强、实现简单等优势，但如何在带宽受限系统中进行PAM4信号的解调是一个难题。本文给出了新的带限补偿技术，并在不同的带宽受限场景下进行了仿真验证，仿真结果表明本文给出的带限补偿方案能在带宽受限较严重情况下对PAM4信号进行有效恢复，这对降低光器件带宽，进而降低整个IM-DD系统的成本具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 吴冰冰, 余冰雁, 伍剑, 等. 2017 年欧洲光通信会议述评[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 155-162.
WU B B, YU B Y, WU J, et al. A review of the European conference on optical communication in 2017 [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 155-162.
- [2] 谢崇进. 数据中心光通信技术[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 44-51.
XIE C J. Optical communication technologies for datacenters[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 44-51.
- [3] NISHIHARA M, TANAKA T, TAKAHARA T, et al. Experimental demonstration of 100 Gbit/s optical DMT transmission combined with mobile data signal[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Mar 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [4] YE C, HU X, ZHANG K. Demonstration and Analysis on PAM4/8, DBPAM2/4 and DMT Formatted TDM-PON with 25Gbit/s, 40 Gbit/s, 50 Gbit/s Capacity per Lane using Economical 10Gbit/s[C]//ECOC 2016, 42nd European Conference on Optical Communication, Sept 18-22, 2016, Düsseldorf, Germany. [S.l.:s.n.], 2016: 1-3.
- [5] LIN R, PANG X, OZOLINS O, et al. Performance evaluation of PAM and DMT for short-range optical transmission with high speed InGaAsP DFB-TWEAM[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Mar 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [6] ZHONG K, ZHOU X, GUI T, et al. Experimental study of PAM4, CAP16, and DMT for 100 Gbit/s short reach optical transmission systems[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1176-89.
- [7] KIKUCHI N, HIRAI R, FUKUI T. Non-linearity compensation of high-speed PAM4 signals from directly-modulated laser at high extinction ratio[C]//ECOC 2016, 42nd European Conference on Optical Communication, Sept 18-22, 2016, Düsseldorf, Germany. [S.l.: s.n.], 2016: 1-3.
- [8] LIU J J, WEI C C, TZU T C, et al. Bandwidth enhancement equalization enabling a 40 Gbit/s PAM4 transmission via a 9.5 GHz photoreceiver[C]//OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), Jul 3-7, 2016, Niigata, Japan. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [9] IM J, FREITAS D, ROLDAN A, et al. 6.3 A 40-to-56 Gbit/s PAM4 receiver with 10 tap direct decision-feedback equalization in 16nm FinFET[C]//Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Feb 5-9, 2017, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 114-115.
- [10] STERNAD M, AHLEN A. The structure and design of realizable decision feedback equalizers for IIR channels with colored noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 36(4): 848-858.
- [11] 罗丰, 段沛沛, 吴顺君. 基于 Burg 算法的短序列谱估计研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2005, 32(5): 724-728.
LUO F, DUAN P P, WU S J. Research on short sequence power spectrum estimates based on the Burg algorithm[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2005, 32(5): 724-728.
- [12] KOFIDIS E, KOPSINIS Y, THEODORIDIS S. On the least-squares performance of a novel efficient center estimation method for clustering-based MLSE equalization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(4): 1459-1471.

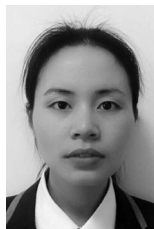
[作者简介]



刘群 (1986—), 女, 四川现代职业学院讲师, 主要研究方向为通信与信息系统。



杜慧琴 (1985—), 女, 四川大学计算机学院硕士生, 四川现代职业学院讲师、高级工程师, 主要研究方向为数据库技术。



吴香林 (1987—), 女, 四川现代职业学院工程师, 主要研究方向为移动通信技术。