

引用本文: 钟昆, 李丹, 王宝江, 等. 基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 55–58.

基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法

钟 昆, 李 丹*, 王宝江, 董加强

(西昌学院 信息技术学院, 四川 西昌 615000)

摘要: 在相干光纤通信系统中, 恒模算法(CMA)是一种最为常见的抑制偏振模色散(PMD)的算法。为了进一步降低接收机数字信号处理(DSP)后的误比特率(BER), 提出了一种基于提升光纤通信系统传输速率的 CMA 改进措施。采用将靠近星座图坐标轴的若干个散点推向邻近区间的方法进行优化, 计算并比较了传统 CMA 和改进 CMA 的 BER, 设计了相关仿真实验。仿真分析结果表明: 改进 CMA 使补偿的传输速率提升 3.46%(BER=0); 若对 BER 的要求为 2×10^{-4} , 则传输速率还可再提升 1.33%。

关键词: 光纤通信; 偏振模色散; 偏振复用; 正交相移键控; 恒模算法

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0055-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Constant modulus algorithm based on improving boundary rate of optical fiber communication system

ZHONG Kun, LI Dan*, WANG Baojiang, DONG Jiaqiang

(School of Information Technology, Xichang University, Xichang Sichuan 615000, China)

Abstract: In coherent optical fiber communication system, constant modulus algorithm (CMA) is one of the most common algorithm to suppress polarization mode dispersion(PMD). In order to further reduce the bit error rate(BER) after digital signal processing (DSP) of the receiver, a CMA improvement measure based on improving the transmission rate of optical fiber communication system is proposed. The BER of the traditional CMA and the improved CMA are calculated and compared, and the relevant simulation experiments are designed. The simulation results show that the improved CMA improve the compensated transmission rate by 3.46% (BER=0). If the BER requirement is 2×10^{-4} , the transmission rate can be further improve by 1.33%.

Key words: optical fiber communication, polarization film dispersion, polarization multiplexing, quadrature phase shift keying, constant modulus algorithm

0 引言

100G 及以上的超高速光纤通信系统通常同时采用相干、相位调制和偏振复用(PM)3 种技术来实现^[1-2]。在发射端, 一般使用相干性良好的激光器作为通信传输载波, 通过正交相移键控(QPSK)^[3]相位调制来提高频带利用率, 并采用 PM 达到提升通信速率的目的^[4]。

收稿日期: 2021-09-09。

基金项目: 西昌学院新进博士科研启动项目(YBZ202107)资助。

作者简介: 钟昆(1986—), 男, 博士, 讲师, 现就职于西昌学院信息技术学院, 主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究工作。曾从事的研究包括基于受激布里渊散射的慢光、基于布里渊散射的共焦光谱测试以及超高速相干光通信等。

* **通信作者:** 李丹(1991—), 女, 硕士, 主要研究方向为机器学习、深度学习和生物医学工程。



在接收端, 一般使用本地震荡的激光器实现相干检测技术, 并采用数字信号处理(DSP)技术实现光信号相位信息、偏振态信息的提取。其中, 由于 QPSK 信号具有恒模特性, 且偏振模色散(PMD)会引起光纤传输信道的不断变化^[5-7], 因此通常采用具有恒模盲均衡性质的恒模算法(CMA)对系统进行 PMD 补偿和偏振解复用。

在传统 CMA 中, 当信号速率边界(传输速率)提升到一定程度时, 接收端的星座图散点会显著增加, 影响了算法的收敛速度、误差矢量幅度(EVM)和误比特率(BER)等性能评价指标^[8-12]。若干散点落在星座图的边界甚至“越界”, 将导致 BER 性能的下降。为此, 本文研究星座图边界散点的规律, 提出一种改进 CMA, 并对 BER 性能的改进程度进行分析。

钟昆,李丹,王宝江,等:基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法

1 传统 CMA 原理

CMA 具有基于传输光信号包络为常数的特点,不需要其它任何先验知识,计算复杂度低、易于实现,是一种盲均衡自适应滤波器算法;CMA 可自适应跟踪由 PMD 引起的光纤传输信道变化,且无需任何训练序列来纠正因多径效应导致的码间干扰^[17-19]。

CMA 的代价函数通常写为

$$J(w(n)) = E[(|y(n)|^2 - R_p)^2] \quad (1)$$

其中, $R_p = E[|x(n)|^4] / [E|x(n)|^2]^2$ 或 1, 为参考常量。 $x(n)$ 、 $w(n)$ 和 $y(n)$ 分别为实施 CMA 滤波功能的输入矢量信号、蝶形滤波均衡器的抽头向量以及输出矢量信号。CMA 通过随机梯度下降法(SGD)自适应更新抽头向量 $w(n)$, 使得修正矢量与代价函数 $J(w(n))$ 的梯度矢量方向相反, 如图 1 所示。其中, 1 表示 X 偏振态, 2 表示 Y 偏振态, w_{11} 、 w_{12} 、 w_{21} 、 w_{22} 分别表示滤波均衡器的 4 个抽头向量, Δw_{ij} 的值为 $w(n+1) - w(n)$ 。蝶形滤波均衡器的抽头向量 $w(n)$ 的更新迭代公式为

$$w(n+1) = w(n) - \mu x(n) e(n) \quad (2)$$

其中, μ 为 CMA 步长系数, $e(n)$ 为估计误差矢量信号, 其表达式为

$$e(n) = y^*(n) [|y(n)|^2 - 1] \quad (3)$$

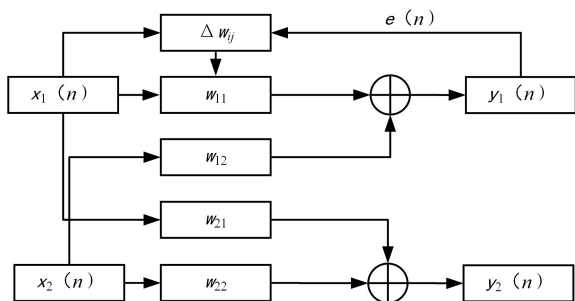


图 1 PM 解调 CMA 蝶形滤波器意图

2 仿真系统

为了验证 CMA 性能, 本文搭建了 PM-QPSK 相干光纤通信系统^[13-16]如图 2 所示。在发射机中, 激光器输出的光载波波长为 1550 nm, 其频偏和线宽在合理区间范围内任意可调。将非归零码(NRZ)作为 PM-QPSK 调制器的调制信号, 调制信号为 29 GS/s 左右符号率可调的微波信号。首先, 微波信号分别进入偏振分束器和延迟单元, 模拟频率为 116 Gb/s 左右的可调调制信号; 同时, 激光器发出的光经过偏振控制器 1(PC1) 使之成为线偏振光。然后, 通过调节 PM-QPSK 调制器的相关参数, 使输入激光调制 4 路微波信号, 形成单束的 PM-QPSK 光信号, 最终进入光纤通信信道进行

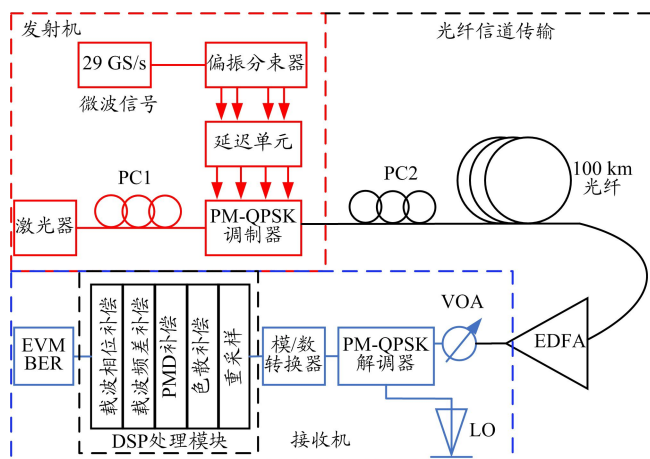


图 2 超高速 PM-QPSK 相干光纤通信系统

信号传输。

光纤信道传输部分主要由 1 段 100 km 的单模光纤、掺铒光纤放大器(EDFA)和 PC2 组成。

在接收机中, 接收到的 PM 信号首先进入可调衰减器(VOA)对功率进行优化调节。通过调节 PM-QPSK 解调器的相关参数, 使得输出端形成偏振态正交的信号光。将信号光与本地振荡器(LO)输出光一并送入 PM-QPSK 解调器进行相干解调, 可得到相应的原始模拟信号。将模拟信号通过模/数转换器转换为数字信号后, 进入 DSP 处理模块进行后期处理。DSP 处理模块包括重采样、色散补偿、PMD 补偿、载波频差补偿和载波相位补偿等功能。其中, 偏振模色散 PMD 补偿一般采用 CMA 来实现。最终, 通过 EVM/BER 来对 CMA 的补偿效果进行评价。

3 改进 CMA 性能仿真

由于光纤中若干个 PMD 传输矩阵在空间和时间上不断变化, 使得补偿后的星座点随着传输速率的增加, 其相位顺时针或逆时针旋转角度变得极小, 而这个旋转角度刚好造成边界的点向邻近的区间扩散。点越靠近边界, 它的实部或虚部值就越小, 也更容易因 PMD 相位原因造成误码。因此, 本文采用改进 CMA 将这几个点推回到邻近的正确区间。

改进 CMA 的步骤如下: 首先, 获取靠近边界的误比特散点 (通常只有若干个), 其实部或虚部小于 k_x 、 k_y , k_x 、 k_y 分别表示 X 偏振态、Y 偏振态归一化后的散点边界值。然后, 若点的实部更靠近轴线, 则将点的实部设为相反数, 虚部不变; 虚部按相同方式处理。最后, 通过计算 BER 验证算法的改进程度。

传统 CMA 的传输速率、误比特散点的变化情况如表 1 所示。可以看出, 当传输速率为 28.8 GS/s 时, 接

表 1 传统 CMA 的传输速率、误比特散点变化情况

传输速率/(GS·s ⁻¹)	X 偏振态误比特散点	Y 偏振态误比特散点
28.8	—	—
28.9	—	11(0.0030 + 0.3477i)
29.0	—	11(0.0106 + 0.3442i)
29.1	—	11(0.0182 + 0.3405i)
29.2	—	11(0.0257 + 0.3367i)
29.3	—	11(0.0333 + 0.3328i)
29.4	—	11(0.0407 + 0.3287i)
29.5	—	11(0.0482 + 0.3245i)
29.6	—	2(-0.0012 - 0.7413i) 11(0.0556 + 0.3202i)
29.7	—	2(-0.0057 - 0.7482i) 11(0.0630 + 0.3158i)
29.8	—	2(-0.0101 - 0.7551i) 11(0.0704 + 0.3112i)
29.9	—	2(-0.0146 - 0.7621i) 11(0.0777 + 0.3065i)
30.0	11(0.0053 - 0.0760i)	2(-0.0191 - 0.7692i) 11(0.0850 + 0.3017i)
30.1	11(0.0158 - 0.0689i)	2(-0.0236 - 0.7763i) 11(0.0922 + 0.2968i)
30.2	11(0.0263 - 0.0619i)	2(-0.0281 - 0.7835i) 11(0.0995 + 0.2917i)
30.3	11(0.0367 - 0.0550i)	2(-0.0326 - 0.7907i) 11(0.1067 + 0.2865i)
30.4	11(0.0471 - 0.0482i)	2(-0.0371 - 0.7980i) 11(0.1138 + 0.2812i)

收信号的误比特散点数均为 0 ($BER=0$); 当传输速率提升到 28.9 GS/s 时, 接收信号的 X 偏振态误比特散点数为 0, 但是 Y 偏振态出现 1 个误比特散点(此时的 BER 为 $1/2^{12}=0.02\%$)。分析对此误比特散点发现它靠近虚轴, 离虚轴仅有 0.0030 个归一化单位量, 且由于 PMD 效应造成的散点旋转现象, 使其从第二象限发散到了第一象限并靠近虚轴。因此, 本文采用改进 CMA 将离虚轴小于 0.0031 的点 $11(0.0030+0.3477i)$ 的实部设为相反数, 使得这个散点变为 $(-0.0030+0.3477i)$, 其它所有点不变, 从而将此误比特散点推回到正确的第二象限。

改进 CMA 的传输速率、误比特散点和边界范围变化情况如表 2 所示。可以看出, 当传输速率在 28.9 GS/s 时, 依然可以保持接收信号的误比特散点均为 0。当传输速率提升到 29.9 GS/s 时, Y 偏振态出现

钟昆, 李丹, 王宝江, 等: 基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法

的 1 个或 2 个误比特散点皆可采用改进 CMA 补偿到 0 个。由此可见, 改进 CMA 将传输速率提升了 1 GS/s (3.46%)。

通过对比表 1 和表 2 可知, 当传输速率提升到 30 GS/s 时, 采用传统 CMA 一共出现了 3 个误比特散点; 而采用改进 CMA 后只出现了 1 个误比特散点(离星座图的坐标轴较远无法得到补偿)。当传输速率提升到 30.4 GS/s 时, 改进 CMA 依然可以将 3 个误比特散点补偿到 1 个。此时, 改进 CMA 成功地将传输速率又提升了 0.4 GS/s (1.33%)。当传输速率提升到 30.5 GS/s 及以上时, 散点发散过大且 PMD 劣化加剧, 无法进一步提升改进 CMA 的性能。

表 2 改进 CMA 的传输速率、误比特散点和边界范围变化情况

传输速率 /(GS·s ⁻¹)	X 偏振态 误比特散点	k_x	Y 偏振态 误比特散点	k_y
28.9	—	—	—	0.0031
29.0	—	—	—	0.0107
29.1	—	—	—	0.0183
29.2	—	—	—	0.0258
29.3	—	—	—	0.0334
29.4	—	—	—	0.0408
29.5	—	—	—	0.0483
29.6	—	—	—	0.0557
29.7	—	—	—	0.0631
29.8	—	—	—	0.0705
29.9	—	—	—	0.0778
30.0	—	0.0054	11(0.0850 + 0.3017i)	0.0192
30.1	—	0.0159	11(0.0922 + 0.2968i)	0.0237
30.2	—	0.0264	11(0.0995 + 0.2917i)	0.0282
30.3	—	0.0368	11(0.1067 + 0.2865i)	0.0327
30.4	—	0.0472	11(0.1138 + 0.2812i)	0.0372

4 结束语

本文在传统 CMA 的基础上提出了一种 CMA 的改进措施。首先在星座图上的坐标轴附近划定一个边界, 然后将边界范围内的散点按照设置相反数的方法推向邻近的星座图区间。仿真结果表明: 基于传输速率提升的改进 CMA 能有效地将高速光纤通信系统的传输速率提升 3.46% ($BER=0$)。若对 BER 的要求为 2×10^{-4} , 传输速率还可再提升 1.33%。因此, 本文提出改进 CMA 能有效改善 BER 性能。后续的工作可继续研究动态变化的 μ 值提升算法的改进效率。

钟昆,李丹,王宝江,等:基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法

参考文献:

- [1] 李唐军,王目光,张建勇,等. 光纤通信原理[M]. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2015.
- [2] 陶金晶. 高速相干光通信系统中关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2014.
- [3] 易小刚. 数字相干 PM-QPSK 光传输系统中的非线性损伤与系统的性能估计[D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- [4] 易安林. 偏振复用光通信系统处理技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学,2013.
- [5] 缪厚勋. 光纤通信系统中的偏振模色散补偿 [D]. 北京: 清华大学,2004.
- [6] BIRK M, GERARD P, CURTO R, et al. Field trial of a real-time, single wavelength, coherent 100 Gbit/s PM-QPSK channel upgrade of an installed 1800km link[C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego: IEEE, 2010: PDFD1-1-PDFD1-3.
- [7] 李超,赵健,王伟,等. 4×100Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. 中国激光,2017,44(2):0206001-1-0206001-6.
- [8] ANDREAS L, NORIAKI K, CHEN Y, et al. A real-time CMA-based 10 Gb/s polarization demultiplexing coherent receiver implemented in an FPGA [C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego: IEEE, 2008: OTuO2-1 – OTuO2-3.
- [9] KANDEA N, LEVEN A. Coherent polarization-division-multiplexed QPSK receiver with fractionally spaced CMA for PMD compensation[J]. IEEE Photon. Tech. Lett., 2009, 21(4): 203–205.
- [10] FARUK M. Modified CMA based blind equalization and carrier-phase recovery in PDM-QPSK coherent optical receivers [C]//IEEE. Proceedings of 16th Int'l Conf. Computer and Information Technology. Khulna: IEEE, 2013: 469–472.
- [11] 钟昆,杨怀栋. 超高速相干光通信两步步长优化 CMA 算法[J]. 应用光学,2019,40(3):505–510.
- [12] 钟昆, 杨怀栋. 超高速 PM-QPSK 相干光通信系统恒模算法解调性能分析[J]. 光通信技术, 2019,43(4):1–7.
- [13] POOLE C, NAGEL J. Optical fiber telecommunications III [M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [14] KOGELNIK H, JOPSON R, NELSON L. Optical fiber telecommunications IV [M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- [15] 周炯槃,庞沁华,续大我,等. 通信原理(合订本)[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005.
- [16] 任铁铁. RoF 链路中马赫-曾德尔电光调制器偏置点控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [17] 张晓光. 高速光纤通信中的偏振控制技术 [J]. 北京邮电大学学报, 2011,34(1):1–10.
- [18] 易安林. 偏振复用光通信系统信号处理技术研究[D]. 重庆:西南交通大学,2013.
- [19] 李新. 相干检测中的 DSP 算法和仿真研究 [D]. 北京: 北京邮电大学,2012.