

光纤通信相干接收系统中基于峰均功率比的色度色散的动态监测与补偿研究

张 玮¹ 席丽霞^{1*} 赵东鹤¹ 张肇敏¹ 白顺昌² 唐先锋¹ 张晓光¹

(¹ 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
² 北京航空航天大学高等工程学院, 北京 100191)

摘要 在相干接收系统中,采用峰值平均功率比(PAPR)作为反馈信号来动态监测与补偿色度色散(CD),该方法对码型、偏振模色散及偏振相关损耗不敏感。由于链路中 CD 积累最少的时候 PAPR 最小,则可以用 PAPR 作为相干接收算法中频域补偿 CD 的反馈信号。对相干接收中通过模数转换器的信号进行 CD 补偿,使用直接搜索和两级搜索两种算法搜索 PAPR 最小值,并根据此时滤波器的抽头系数监测链路中 CD 值。两种算法监测 CD 与补偿的平均误差分别为 312 ps/nm 和 226 ps/nm,与直接搜索算法相比,两级搜索算法耗时短,复杂度低,灵敏度更高。

关键词 光通信;色度色散;峰值平均功率比;两级搜索算法

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105009

Chromatic Dispersion Dynamic Monitoring and Compensation Based in Peak to Average Power Ratio for Coherent Optical Communication Receiving System

Zhang Wei¹ Xi Lixia¹ Zhao Donghe¹ Zhang Zhaomin¹ Bai Shunchang²
Tang Xianfeng¹ Zhang Xiaoguang¹

(¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
² School of Advanced Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Chromatic dispersion (CD) dynamic monitoring and compensation technique by using peak to average power ratio (PAPR) to as a feedback is used in coherent communication system, and this method is insensitive for pattern, polarization mode dispersion and polarization dependent loss. Because the smallest PAPR typically corresponds to the CD that results in the best performance, PAPR is used as feedback signal. We search PAPR minimum through direct search and two step search algorithms in frequency compensation. CD compensation value is the accumulated value in the link. The average errors of two methods to monitor CD are 312 ps/nm and 226 ps/nm. Therefore two search algorithm has lower complexity, and higher sensitivity.

Key words optical communications; chromatic dispersion; peak to average power ratio; two search algorithm

OCIS codes 060.2330; 060.2360; 060.1660

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2013GZKF031310)、深圳市科技研发资金基础研究计划(JC201105191003A)

作者简介: 张 玮(1988—),女,硕士研究生,主要从事光性能监测方面的研究。E-mail: zhangweifeifei123@163.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统中的偏振管理方面的研究。

E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

进入 21 世纪,随着高速数字信号处理技术的发展,相干检测技术已经成为高速光通信领域的重要技术^[1],这主要是由于它具有不容忽视的优点:1) 扩大光纤的数据传输容量;2) 支持多种调制格式;3) 接收机的灵敏度高;4) 电域补偿效率高且成本低等^[2]。在这种情况下,光性能监测的研究环境也转到相干检测系统中。在高速光通信中,色度色散(CD)是导致信号畸变的重要因素之一,因此色度色散监测和补偿的不准确会导致其他检测算法如时钟恢复、动态均衡和载波恢复的错误。所以,CD 的准确监测和补偿对于相干光接收系统是至关重要的^[3]。

目前,在相干接收系统中提出了很多方法来监测 CD,比如:通过获得接收信号的频谱测量来监测 CD^[4]、利用直方图监测技术^[5]以及通过信号的自相关函数与 CD 的关系进行监测^[6-8]等。峰值平均功率比(PAPR)一般用于光正交频分复用(OFDM)系统中,作为一种非线性效应对信号影响的评价指标,并通过降低 PAPR 来降低非线性损伤^[9-10]。近来,发现在相干系统中使用 PAPR 来监测 CD 是非常方

便的,不需要事先进行时钟恢复、载波频率和相位的恢复,只需要利用接收端模数转换后的信号进行监测。

本文采用 PAPR 作为反馈信号动态监测与补偿 CD,由于最小 PAPR 对应链路中 CD 最小的情况^[3],可以用来作为相干接收算法中频域补偿 CD 的反馈信号。对相干接收中通过模数转换器的信号进行 CD 补偿,使用直接搜索和两级搜索^[11]两种算法搜索 PAPR 最小值,并根据此时滤波器的抽头系数监测链路中 CD 值。

2 动态监测及补偿色度色散的实施方法

PAPR 是峰值功率与平均功率的比,定义为

$$R_{\text{PAPR}} = \frac{\max\{|p(t)|^2\}}{E\{|p(t)|^2\}}, \quad (1)$$

式中 p 为接收信号功率,信号经过数模转换器后,由于 CD 影响,射频谱叠加,导致信号最大功率值[(1)式分子部分]增大,如图 1 所示,又由于信号平均功率[(1)式分母部分]值基本不变,则随着 CD 增大,信号 PAPR 增大。

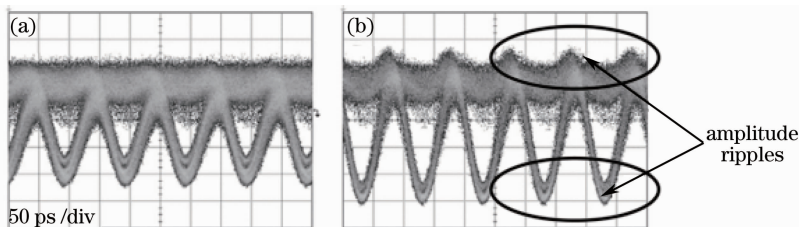


图 1 (a) 0 和(b) 350 ps/nm 色散的眼图变化

Fig. 1 Eye diagrams with dispersion of (a) 0 and (b) 350 ps/nm

如表 1 所示,信号最大功率随 CD 增大而增大,在 CD 为 2000 ps/nm 附近时,最大功率值趋于稳定。

表 1 信号最大功率跟随 CD 的变化关系

Table 1 Maximum signal power with the variation of CD

| CD / (ps/nm) | 10 | 100 | 200 | 1000 | 2000 | 3000 |
|---------------------|------|------|------|-------|-------|------|
| Maximum power value | 3.78 | 4.05 | 5.21 | 10.76 | 10.23 | 9.77 |

在 28 Gbaud 双偏振四相位调制系统(PDM-QPSK)信号中,对不同码型[非归零码(NRZ)、归零码(RZ33, RZ50)、载波抑制归零码(CSRZ)]的系统,PAPR 随着 CD 的改变而变化,如图 2 所示,CD 增大时 PAPR 增大,待 CD 增大到一定程度,PAPR 趋于稳定。PAPR 最小值对应链路中 CD 最小的时刻,不同的码型的系统均符合这种情况,即通过 PAPR 监测 CD 的方法可对码型不敏感。

在链路中存在偏振模色散(PMD)及偏振相关

损耗(PDL)时,由于 PMD 及 PDL 的加入只增大了 CD 最小时刻的 PAPR 的值,而没有改变 PAPR 随 CD 的变化趋势,结果显示仍然在 CD 最小的时刻对应 PAPR 的最小值,则 PMD 及 PDL 的加入不影响利用 PAPR 作为反馈信号监测 CD 的结果。

由图 3 所示,深蓝色位置表示 PAPR 值最低的位置,在不同差分群时延(DGD)的情况下,虽然 PAPR 的最小值不同,但出现位置均在最小的 CD 处,证实了 PMD 不会对这种监测方法产生影响。

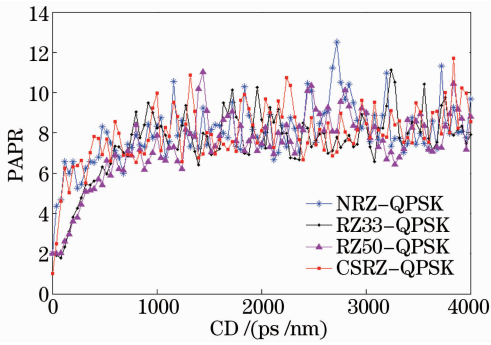


图 2 不同码型时 PAPR 随 CD 的变化

Fig. 2 Dependence of PAPR on different pulse shapes on CD

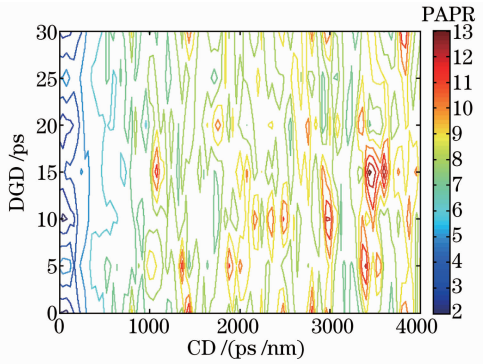


图 3 在不同 CD 不同 DGD 情况下，PAPR 随之变化的等高线

Fig. 3 Contour of PAPR in the situations of different DGD and CD

由图 4 所示，将 CD 为 0~500 ps/nm 时放大后比较，明显看出在链路中加入 30 ps 的 PMD 及 3 dB 的 PDL 只增加了 CD 最小时对应的 PAPR 值，由 CD 为 0~4000 ps/nm 整体图看出，PAPR 仍然随 CD 的增大而增大，之后趋于稳定。则加入 PMD 及 PDL 后 PAPR 最小值增大，但出现位置不变，所以通过 PAPR 来监测 CD 的方法对 PMD 及 PDL 不敏感。

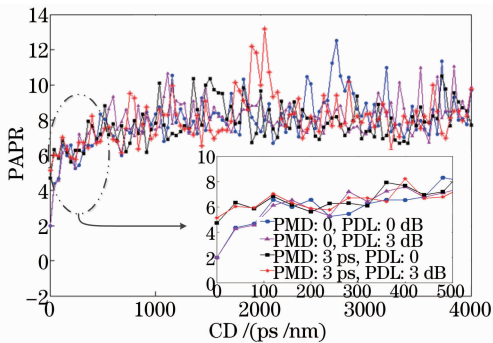


图 4 加入 PMD 及 PDL 时 PAPR 随 CD 的变化

Fig. 4 Dependence of PAPR on CD with and without PMD and PDL

3 两种搜索算法仿真验证

如图 5 所示，在 28 Gb/s PDM-QPSK 相干系统中，当色散较大时，频域色散补偿的结构将更为简单，且效率更高，考虑到实际传输过程，接收到较大色散的情况，将通过模数转换器后的信号进行频域的补偿，色散的频域响应可表示为

$$H_c(\omega) = \exp\left(-j \frac{D\lambda^2 z}{4\pi c} \omega^2\right), \quad (2)$$

式中 D 是色散系数， λ 是波长， z 是传输距离， c 是光速。

那么设计一个频域响应为： $H_{eq}(\omega) = \frac{1}{H_c(\omega)}$

的线性滤波器即可补偿色散，即

$$H_{eq}(\omega) = \exp\left(j \frac{D\lambda^2 z}{4\pi c} \omega^2\right). \quad (3)$$

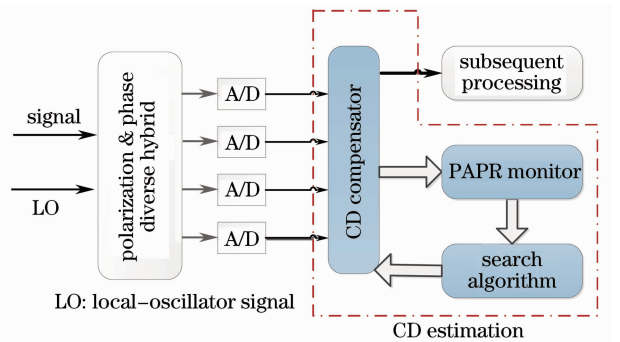


图 5 在相干接收机中通过 PAPR 监测 CD 框图

Fig. 5 Diagram of a coherent receiver with CD estimation based on PAPR

在补偿过程中，使用直接搜索与两级搜索两种算法来搜索 PAPR 的最小值从而找到对应的 CD 值，即为链路中积聚的色散。直接搜索算法由于其简单直观性，在实际生产中的许多非线性优化问题上普遍适用，但是由于搜索步长一定造成其收敛速度慢，若扩大步长将降低搜索精度，即定步长制约了收敛速度和精度。两级搜索算法，是数值分析中的一种经典方法。它首先以一定的步长对搜索空间进行第一轮搜索，确定其搜索范围，在第二级搜索中减小步长进行下一轮搜索，如此往复直到找到最优解。在利用两级搜索算法搜索 PAPR 最小值时，首先以一定步长遍历搜索区间，找到一次搜索最优值，确定二次搜索区间，将步长减半进行二次搜索，找到该区间内最小 PAPR 值，搜索结束。使用两级搜索代替直接搜索会加速对大搜索空间问题的求解速度，提高收敛精度。

4 仿真结果及分析

如图 6 所示,利用直接搜索算法及两级搜索算法对 PAPR 进行最小值搜索,从而监测出链路中 CD 值的结果,红线表示链路中真实的 CD 值,结果显示两种算法均能得到比较精确的 CD 监测值。如图 7,两者比较而言,直接搜索算法与两级搜索算法 CD 监测的平均误差分别为 312 ps/nm 和 226 ps/nm,在计算灵敏度上,两级搜索算法更优,且监测误差在合理范围之内,信道均衡过程中可完全将剩余色散补偿。

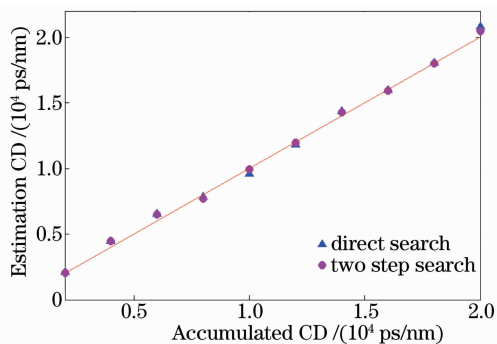


图 6 直接搜索算法与两级搜索算法监测结果对比

Fig. 6 Contrast direct search algorithm and two step search algorithms monitoring results

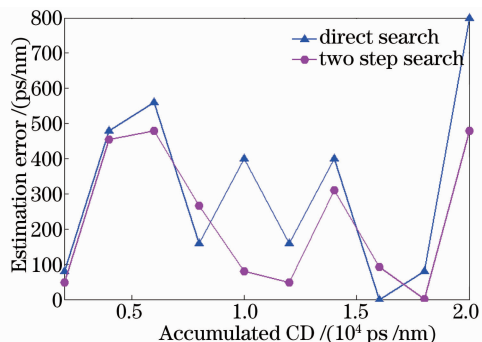


图 7 直接搜索算法与两级搜索算法监测误差对比

Fig. 7 Contrast direct search algorithm and two step search algorithms monitoring error

图 8 为两种算法的耗时,仿真使用 Intel(R) core(TM)2Quad 处理器,通过 matlabR2011 计算,每个色散值上计算 20 次取平均值作为算法耗时,则在所有色散取值上两种算法平均耗时为 0.95 s 和 0.66 s,表明两级搜索算法运算速率及计算复杂度均比直接搜索算法好。

5 结 论

提出了一种利用 PAPR 作为反馈信号在相干接收系统中监测及补偿 CD 的方法,这种方法对码

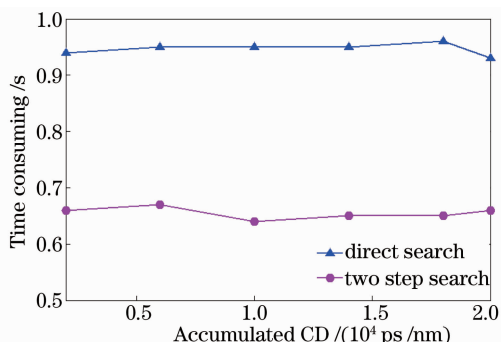


图 8 两种算法耗时比较

Fig. 8 Comparison of two algorithms consuming

型、PMD 及 PDL 不敏感,通过使用直接搜索和两级搜索算法,来搜索 PAPR 最小值从而找到对应的 CD 值,即为链路中积聚的色散。仿真结果显示两种算法监测色散值平均误差分别为 312 ps/nm 和 226 ps/nm,耗时分别为 0.95 s 和 0.66 s,运算速率上前者优于后者。

参 考 文 献

- Iwashita K, Takachio N. Chromatic dispersion compensation in coherent optical communications[J]. J Lightwave Technol, 1990, 8(3): 367-375.
- Tang Xianfeng. Researches on Equalization Techniques in High-Speed Optical Fiber Communication System[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011. 唐先锋. 高速光纤通信中的几种均衡技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- Xie C. Chromatic dispersion estimation for single-carrier coherent optical communications[J]. Photon Technol Lett, 2013, 25(10): 992-995.
- Liu N, Zhong W D, Wen Y J, et al.. New transmitter configuration for subcarrier multiplexed DPSK systems and its applications to CD monitoring[J]. Opt Express, 2007, 15(3): 839-944.
- Weinert C M, Schmidt C, Weber H G, et al.. Application of asynchronous amplitude histograms for performance monitoring of RZ signals[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2001. WDD41.
- Hauske F N, Zhang Z, Li C, et al.. Precise, robust and least complexity CD estimation [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2011, JWA032.
- Do C C, et al.. Chromatic dispersion estimation in 40 Gb/s coherent polarization-multiplexed single carrier system using complementary golay sequences [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012, OW4G1.
- Sui Q, Lau A P T, Lu C, et al.. Fast and robust chromatic dispersion estimation using auto-correlation of signal power waveform for DSP based-coherent systems [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012, OW4G. 3.
- Han S H, Lee J H, et al.. PAPR reduction of OFDM signals using a reduced complexity PTS technique[J]. Signal Processing Letters, 2004, 11(11): 887-890.
- Forozesh K, Jansen S L, Randel S, et al.. The influence of the dispersion map in coherent optical OFDM transmission systems [C]. LEOS Summer Topical Meetings, 2008. 135-136.
- Qiu Yi, Liu Zheng, Liu Qin, et al.. Search based on variable step length golden optimized autofocus algorithm[J]. Modern Radar, 2012, 34(4): 48-52.
- 邱毅, 刘 峥, 刘 钦. 基于变步长搜索黄金分割优化的自聚焦算法[J]. 现代雷达, 2012, 34(4): 48-52.

栏目编辑:王晓晔