

PM-QPSK 相干光通信系统中基于高阶统计矩的光信噪比监测方法的修正

张磊¹ 张晓光¹ 席丽霞^{1*} 赵东鹤¹ 唐先锋¹ 张霞^{1,2}

(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 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000)

摘要 对于偏分复用的正交相移键控(PM-QPSK)相干接收系统,提出了一种修正的基于高阶统计矩的光信噪比(OSNR)监测方案,讨论了不同占空比调制格式的修正结果以及该修正结果对剩余色散(CD)和偏振模色散(PMD)的容忍度。搭建了112 Gb/s PM-QPSK系统仿真平台,对8 dB~26 dB范围内的光信噪比进行了测量,结果表明提出的修正方案对不同码型的监测误差均小于0.5 dB。并且当OSNR为14 dB时,在0.5 dB的监测误差范围内,对CD的容忍度约为2800 ps/nm,对一阶PMD的容忍度约为65 ps。因此,这种修正方案可用于PM-QPSK相干接收系统中带内实时OSNR监测,且计算复杂度小、不需要额外的监测设备。

关键词 光通信;光性能监测;光信噪比监测;高阶统计矩;偏振复用的正交相移键控

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0505004

Modified Optical-Signal-Noise-Ratio Monitoring Method Based on High Order Statistical Moment in PM-QPSK Coherent Optical System

Zhang Lei¹ Zhang Xiaoguang¹ Xi Lixia¹ Zhao Donghe¹ Tang Xianfeng¹ Zhang Xia^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² Key Laboratory of Optical Communications Science & Technology in Shandong Province, Liaocheng, Shandong 252000, China

Abstract For polarization multiplexed quadrature phase shift keying (PM-QPSK) coherent receiver system, a modified optical-signal-noise-ratio (OSNR) monitoring method based on high order statistical moment is presented. The calibration value of different modulation formats and the tolerance of residual chromatic dispersion (CD) and polarization mode dispersion (PMD) for the modified method are investigated. The proposed method is verified in numerical simulations in 112 Gb/s PM-QPSK coherent receiver system, and the OSNR measurement error is within 0.5 dB for all modulation formats with a wide range from 8 dB to 26 dB. The method also has a CD tolerance of 2800 ps/nm and a first-order PMD tolerance of 65 ps if the acceptable error is set to 0.5 dB when real OSNR is around 14 dB, and it is available in real time and in-band OSNR measurement of PM-QPSK coherent receiver system with lower computation complexity and without the requirement of extra monitoring device.

Key words optical communications; optical performance monitoring; optical-signal-noise-ratio monitoring; high order statistical moment; polarization multiplexed quadrature phase shift keying

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.4080

收稿日期: 2013-11-18; 收到修改稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM043)、上海交通大学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)

作者简介: 张磊(1989—),男,硕士研究生,主要从事高速光通信光性能监测方面的研究。

E-mail: zhanglei201109@126.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,博士,教授,主要从事高速光通信系统方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

1 引 言

光信噪比(OSNR)是光纤信道中非常重要的一个参数,它可以用来估计系统的误码率(BER)和信号质量,管理、配置和优化动态光网络等^[1]。传统的 OSNR 监测方法一般采用带外测量法^[2],然而随着密集波分复用(DWDM)系统和可重构光分插复用器(ROADM)的广泛应用^[3],该方法不再适用。为此人们提出了几种带内测量法,主要有偏振置零法^[4-5]和延迟干涉法^[6-7]。这两种方法属于光域测量 OSNR 的方案,均需要额外的监测设备和装置,而且多应用于 10 G 或 40 G 非相干接收系统。近几年来,随着宽带业务的迅速增长,100 G 及以上相干光通信传输系统成为研究的热点并逐渐开始商用^[8-9]。对于高速相干光通信系统,人们提出了在接收端采用高阶统计矩来监测 OSNR 的方案^[10-12],该方案只需要占用很少的数字信号处理器(DSP)资源而无需额外的监测设备,但是该方案对码型敏感,而且对相干接收端信道的线性损伤补偿要求很高。

针对 100 G 偏分复用的正交相移键控(PM-QPSK)相干接收系统,本文提出了基于高阶统计矩的 OSNR 监测的修正方案,对不同占空比调制格式

的 OSNR 监测做了修正,讨论了在接收端信道损伤不能完全补偿的情况^[13]下剩余色散(CD)、偏振模色散(PMD)对修正后的监测结果的影响,并从接收端信号星座图上给出了合理的解释。

2 基于高阶统计矩监测 OSNR 的原理

图 1 为 100 G 的 PM-QPSK 相干接收系统。在接收端,经过采样、CD 和 PMD 补偿及偏振解复用后,得到对应 x 偏振态和 y 偏振态两支路的电信号,对该信号进行处理可得到接收端的 OSNR。以 x 偏振态为例,忽略接收端的电噪声,经 CD 和 PMD 补偿后的电信号可表示为

$$I_x = r \{ \sqrt{P_s} \exp[-j\varphi_s(t)] + |n_x| \exp[-j\varphi_{n_x}(t)] \}, \quad (1)$$

式中 r 为与本振激光器功率有关的系数, P_s 表示信号功率, n_x 为 x 偏振的噪声分量, $\varphi_s(t)$ 和 $\varphi_{n_x}(t)$ 分别表示信号分量和噪声分量的相位,考虑到发射端和本振激光器的频偏以及相位噪声后,后者服从均匀分布。在 QPSK 系统中,信号模值为常数,噪声分量 n_x 为复高斯噪声,其均值为 0,方差设为 $2\sigma^2$,那么接收信号 I_x 的模值则服从莱斯分布。

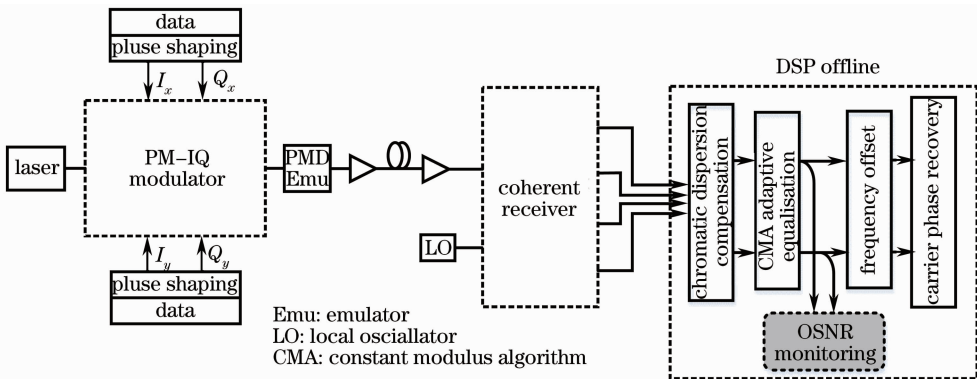


图 1 PM-QPSK 相干接收系统及 OSNR 监测方案框图

Fig. 1 PM-QPSK coherent receiver system and schematic diagram of OSNR monitoring

文献[10-11]中对接收信号的模值求二阶矩和四阶矩可得

$$\begin{cases} E(|I_x|^2) = P_s + 2\sigma^2 \\ E(|I_x|^4) = P_s^2 + 8P_s\sigma^2 + 8\sigma^4 \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可以得到信号功率和噪声功率,从而计算出电信噪比(SNR, R_{SN})为

$$R_{SN} = \frac{P_s}{2\sigma^2} =$$

$$\frac{\sqrt{2E(|I_x|^2)^2 - E(|I_x|^4)}}{E(|I_x|^2) - \sqrt{2E(|I_x|^2)^2 - E(|I_x|^4)}}, \quad (3)$$

式中,噪声功率 $2\sigma^2$ 的获得基于这样的假设:在所监测的信道中自发辐射(ASE)噪声频谱平坦,但在实际光纤链路中,经过多个波长选择开关(WSS)和掺铒光纤放大器(EDFA)后,信道内 ASE 噪声频谱可能不再平坦。在仿真系统中,通过接收端电域采用贝塞尔低通滤波器进行滤波,来接近真实的噪声频谱。

对于相干接收系统,接收端通常采用两倍符号速率采样,这样得到的 SNR 只代表采样时刻的 SNR,并不能代表接收端电域整体的 SNR,从而导

致 SNR 测量结果偏大。据此,对上述 OSNR 监测方案进行修正,所定义的修正项记为

$$dR = \frac{E(|x_{\text{samp}}|^2)}{E(|x_n|^2)}, \quad (4)$$

式中 $E(|x_{\text{samp}}|^2)$ 表示接收端电域采样时刻的功率, $E(|x_n|^2)$ 表示整个符号周期内的平均功率,可通过测量接收端信号功率得到。对于不同占空比的调制格式,即使在符号平均功率相同的情况下,采样时刻的功率也有所不同,因此有不同的修正值 dR , 这样真实 SNR 为

$$R_{\text{SN}}^{\text{T}} = R_{\text{SN}} - dR. \quad (5)$$

在光纤信道里,噪声主要来源于 EDFA 中的 ASE 噪声,若参考带宽选择 0.1 nm,则 OSNR 与 SNR 的关系可以表示为^[2]

$$R_{\text{OSN}} = 10\lg R_{\text{SN}}^{\text{T}} + 10\lg\left(\frac{B_n}{B_r}\right), \quad (6)$$

式中 B_r 为噪声参考带宽(12.5 GHz), B_n 为噪声的等效带宽。

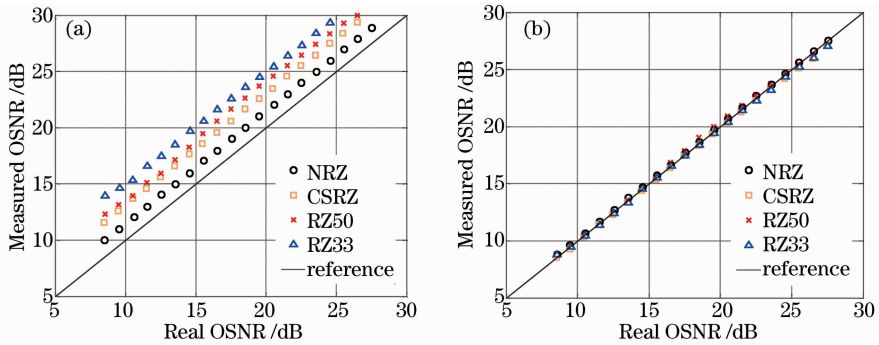


图 2 (a)修正前和(b)修正后不同调制格式真实 OSNR 和测量 OSNR 的关系。(a) 修正前;(b) 修正后

Fig. 2 Measured OSNR versus real OSNR (a) with and (b) without calibration for different modulation formats

表 1 不同调制格式下的修正值

Table 1 Calibration of different modulation formats

Modulation format	NRZ	CSRZ	RZ50	RZ33
OSNR calibration /dB	1.3	3.2	3.4	5.1

一般情况下,相干接收系统数字信号处理部分中 CD 和 PMD 补偿模块并不能将链路中的 CD 和 PMD 完全补偿掉,这将对后续的 OSNR 监测产生影响。下面将讨论修正后的监测方案对剩余 CD 和 PMD 的容忍度。

利用高阶统计矩监测 OSNR 实质上是在时域进行监测,从接收到信号的星座图上来看,只要星座图是环状,就可以利用高阶统计矩来监测 OSNR,环的直径表示信号功率的大小,环的粗细表示噪声功率的大小。然而,当有剩余 CD 和 PMD 存在时,环的粗细会发生变化,从而影响到 OSNR 的测量精度。图 3 和图 4 分别给出了不同剩余 CD 和差分群

3 仿真系统及仿真结果分析与讨论

首先搭建了 112 Gb/s PM-QPSK 背靠背仿真系统,发送端脉冲成型和接收端滤波均采用贝塞尔低通滤波器,发送端激光器和本振激光器线宽均设为 100 kHz,频偏设为 500 MHz,符号个数为 32767 ($2^{15} - 1$),通过给调制好的光信号加上不同幅度的高斯白噪声来模拟不同的 OSNR,真实 OSNR 则通过光谱分析(模拟光谱分析仪)来测量,接收端采样率为两倍符号采样率即 56 GS/s。

对不同调制格式下信号的 OSNR 进行监测,并与真实的 OSNR 进行对比,结果如图 2(a)所示。根据给出的修正项定义,结合数值仿真的结果,可得到非归零码(NRZ)、载波抑制归零码(CSRZ)、占空比 50%归零码(RZ50)、占空比 33%归零码(RZ33)不同格式对应的 OSNR 修正值,如表 1 所示,修正值随着占空比的减小而增大。修正后的 OSNR 监测结果如图 2(b)所示。

时延(DGD)情形下的输出信号的星座图。目前商用相干接收机对接收端 OSNR 的要求约为 13 dB~15 dB^[14],因此选取信号的 OSNR 为 14 dB 进行分析。需要注意的是,仿真中真实的 OSNR 是在加入剩余 CD 和 PMD 之前通过光谱分析获得的。

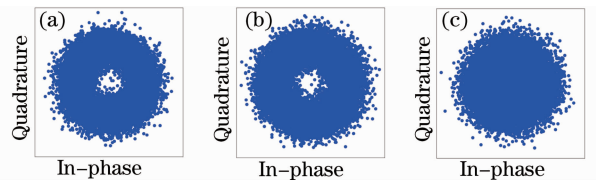


图 3 不同剩余 CD 下接收端信号星座图。(a) CD is 0; (b) CD is 1500 ps/nm; (c) CD is 10000 ps/nm

Fig. 3 Constellation diagrams with different residual CDs (a) CD is 0; (b) CD is 1500 ps/nm; (c) CD is 10000 ps/nm

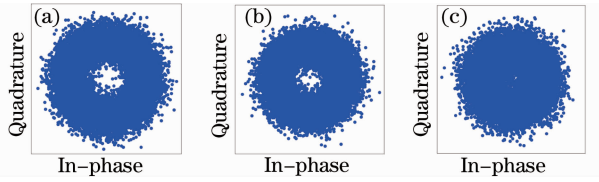


图 4 不同剩余一阶 PMD 下接收端信号星座图。(a) DGD is 0; (b) DGD is 40 ps; (c) DGD is 120 ps
Fig. 4 Constellation diagrams with different residual first order PMDs. (a) DGD is 0; (b) DGD is 40 ps; (c) DGD is 120 ps

由以上两图可以看出,如果剩余 CD 或 PMD 比较严重的话,星座图上将会呈现一团散点,从而无法

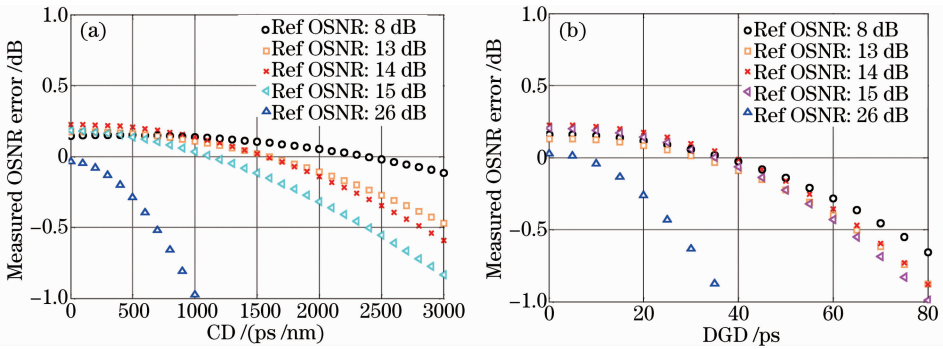


图 5 OSNR 监测误差随(a)剩余 CD 和(b)剩余 PMD 的变化
Fig. 5 Measured OSNR error versus (a) residual CD and (b) residual PMD

对于多进制相移键控(MPSK)调制系统,在接收端进行均衡之后载波相位恢复之前,信号星座图为环状,高阶统计矩法均可用于 OSNR 的监测(如本文所讨论的 PM-QPSK 系统)。对于多进制正交幅度调制(MQAM)系统,接收端星座图则表现为多个环状(如 16 QAM 为 3 个环),每个环都相当于一个独立的 PSK 调制,因此针对于 QPSK 系统的高阶统计矩法监测 OSNR 可以推广到未来超 100 G 的高阶 MQAM 调制系统。

4 结 论

提出一种 PM-QPSK 相干通信系统中修正的高阶统计矩法监测 OSNR,对不同调制码型提出不同的 OSNR 监测修正,仿真结果表明,提出的修正法在带内实时 OSNR 监测中取得比较好的结果,对接收端不完全补偿的线性损伤均有很高的容忍度,在 OSNR 为 14 dB 时,0.5 dB 的监测误差对 CD 的容忍度为 2800 ps/nm,对一阶 PMD 的容忍度为 65 ps。同时,这种方案不需要额外的监测设备且计算复杂度小。

分离出信号和噪声功率,也就无法采用高阶统计矩来测量 OSNR。图 5(a)和(b)分别给出了不同 CD 和 PMD 情形下采用修正后的高阶统计矩测量 OSNR 的误差。

可以看出,在相同的允许测量误差范围内,不同 OSNR 对剩余 CD 和 PMD 的容忍度是不同的,OSNR 值越高,对剩余 CD 和 PMD 的容忍度越小。为了方便,只对 NRZ 码型进行仿真分析,当参考 OSNR 为 14 dB 附近时,OSNR 的监测误差对剩余 CD 和 PMD 有很高的容忍度,由图 5(a)中可以看出,在 0.5 dB 的监测误差范围内,对 CD 的容忍度约为 2800 ps/nm,对一阶 PMD 的容忍约为 65 ps。

参 考 文 献

- 1 Calvin C K Chan. Optical Performance Monitoring Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks [M]. Waltham: Academic Press, 2010. 21-45.
- 2 International Telecommunication Union. Telecommunication Standardization Sector. Draft Revised Recommendation ITU-T G. 697(for Consent)[S]. China. Huawei Technologies Co., Ltd. 2011.
- 3 Chen Yue, Hua Nan, Zheng Xiaoping. Inner-port connectivity aware dynamic routing schemes in optical wavelength division multiplex networks [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40 (4): 0405005.
陈悦, 华楠, 郑小平. 波分复用光网络中考虑端口连通性限制的动态路由机制[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405005.
- 4 J H Lee, D K Jung, C H Kim, et al.. OSNR monitoring techniques using polarization-nulling method[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(1): 88-90.
- 5 J H Lee, H Y Choi, S K Shin, et al.. A review of the polarization-nulling technique for monitoring optical signal-to-noise ratio in dynamic WDM network[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(11): 4162-4171.
- 6 X Liu, Y H Kao, S Chandrasekhar, et al.. OSNR monitoring method for OOK and DPSK based on optical delay interferometer [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(15): 1172-1174.
- 7 Wenyu Peng, Lixia Xi, Xuan Weng, et al.. Novel in-band OSNR monitoring method based on polarization interference[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 080604.
- 8 Tang Chanjuan, Li Rongling, Shao Yufeng, et al.. 100 Gb/s

- QPSK payload with Manchester encoding for in-band SCM label swapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s106008.
- 汤婵娟, 李荣玲, 邵宇丰, 等. 100 Gb/s 曼彻斯特编码 QPSK 载荷带内副载波光标记交换 [J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s106008.
- 9 Di Xuejing, Tong Cheng, Zhang Xia, *et al.*. Adaptive step-size constant-modulus algorithm for high-speed optical coherent communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006004.
- 邸雪静, 童程, 张霞, 等. 高速相干光通信系统中的自适应步长恒模算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006004.
- 10 M S Faruk, K Kikuchi. Monitoring of optical signal-to-noise ratio using statistical moments of adaptive-equalizer output in coherent optical receivers [C]. *Optoelectronics and Communications Conference (OECC)*, 2011.
- 11 David J Ives, Benn C Thomsen, Robert Maher, *et al.*. Estimating OSNR of equalized QPSK signal[J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B661–B666.
- 12 Chen Zhu, An V Tran, Simin Chen, *et al.*. Statistical moments-based OSNR monitoring for coherent optical systems[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17711–17721.
- 13 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0105001.
- 张红霞, 任亚光, 叶雯婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0105001.
- 14 Eugen Lach, Wilfried. Modulation formats for 100 G and beyond [J]. *Opt Fiber Technol*, 2011, 17(5): 377–386.

栏目编辑: 王晓琰