

基于异步幅度抽样的高速光信号色散监测方法

茅帅帅, 诸波, 王永强, 刘国庆, 夏丽, 胡芳仁

(南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 针对目前异步幅度统计直方图(AAH)对色散监测范围小、灵敏度低的缺点, 提出一种基于异步幅度抽样(AAS)的色散监测方法, 定义无量纲色散监测参数 G , 将色散与其他损伤因子分离开。使用 OptiSystem9.0 软件搭建了 200 Gbps DP-16QAM 监测系统, 在不同信噪比和占空比下进行色散监测仿真实验, 探讨了信噪比和占空比对该方法的监测精度的影响, 并对色散监测误差进行了分析。仿真结果表明基于该参数的色散监测方法受噪声因子影响小、精确度高, 能实现在 0~600 ps/nm 全范围内对色散的有效监测, 为在更高阶调制信号的光纤通信系统中进行色散监测管理提供一定的参考。

关键词: 色散监测; 异步幅度抽样; 双偏振-16 进制正交幅相调制

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2307-05

Chromatic dispersion monitoring method of high-rate optical signal based on AAS

Mao Shuaishuai, Zhu Bo, Wang Yongqiang, Liu Guoqing, Xia Li, Hu Fangren

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Considering the narrow range and low sensitivity of recent chromatic dispersion (CD) monitoring by the asynchronous amplitude histogram (AAH) method, a novel CD monitoring technique based on asynchronous amplitude sampling(AAS) for higher order modulation formats was proposed. The parameter G , which can separate the CD from the other impairments effectively was defined. The monitoring system for 200 Gbps DP-16QAM was constructed by simulation software OptiSystem9.0. Under different optical signal-to-noise ratio and duty cycles, the dispersion monitoring was realized. The deviations caused by OSNR and varied duty cycles were investigated, and the inaccuracy was analyzed. Simulation results show that the method based on parameter G possesses the advantages of lower influence of noise and higher precision, which leads to effective monitoring of the dispersion within 0-600 ps/nm. And this method can provide a reference for the monitoring and management of dispersion in optical fiber communication system with higher order modulation signals.

Key words: chromatic dispersion monitoring; AAS; DP-16QAM

收稿日期: 2013-11-17; 修订日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61274121); 江苏省自然科学基金(BK2012829); 南京邮电大学人才项目(NY212007)

作者简介: 茅帅帅(1983-), 男, 硕士生, 主要从事光纤通信与光波技术方面的研究。Email: mao_ss@126.com

导师简介: 诸波(1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事高速大容量光纤通信与全光通信网方面的研究。

Email: zhub@njupt.edu.cn

0 引言

随着系统传输速率的进一步提高, 光纤色散^[1]、噪声等对光信号的损伤将更加严重(比如 40 G 系统对色散的容限是 10 G 系统的 1/16), 因此需要对光信号的性能进行有效的监测。

1998 年, 日本 NTT 网络创新实验室的 Ipei Shake 研究团队和德国洪堡大学的 N. Hanik 研究团队分别提出使用异步幅度统计直方图(AAH)方法对光网络性能的监测^[2-3]。参考文献[4]研究了色散(CD)和偏振模色散(PMD)对 10 Gbps RZ-DPSK 信号的影响, 使用 AAH 实现对 CD 和 PMD 的监测。参考文献[5]中 B. Kozicki 通过实验验证对 10 Gbps NRZ-DPSK 和 10 Gbps RZ-DPSK 信号和 20 Gbps RZ-DPSK 信号的光信噪比(OSNR)、CD、PMD 的监测。Thomas Shun Rong Shen 和 Faisal Nadeem Khan 等人基于 40/56 Gbps RZ-DQPSK 和 40 Gbps 的 RZ-DPSK 和 NRZ-16-QAM 系统, 使用人工神经网络 ANN 对数据处理, 实现 OSNR、CD、PMD 独立的监测, 实验监测范围为: OSNR, 10~30 dB、CD, -500~500 ps/nm、DGD, 0~30 ps^[6-7]。参考文献[8]分析了同步时钟技术来对监测色散。参考文献[9]中华中科技大学的张新亮等人利用 AAH 对 40 Gbps 的 NRZ-DPSK 系统的色散进行了研究, 提取一个峰值统计进行色散监测。然而由于 AAH 方法对采样点的处理比较复杂, 未能较好地分离, 导致基于 AAH 的监测方法监测范围小、受其他损伤因子影响较大。

笔者针对目前 AAH 监测方法的上述缺陷, 提出使用 AAS 方法对相干检测高速传输系统^[11]中的色散进行监测。该方法继承了 AAH 采用异步抽样与概率统计的特点, 不同之处在于没有通过绘制统计直方图获取采样样本的数字特征, 而是通过数学建模推导出采样样本的高阶数字特征与噪声功率、信号功率间的关系。定义函数因子 G , 使得 G 仅为色散的函数, 实现色散因子与噪声因子的分离, 从而实现色散在 0~600 ps/nm 全范围内高精度、高灵敏度的监测, 并用仿真证实了这一方法的有效性。

1 基于 AAS 的色散监测原理

假设光信号经过光纤系统后只受 ASE 噪声和

光纤色散的影响, 且文中传输系统采用偏振复用的 QAM 信号, 因此光信号存在于 x 偏振和 y 偏振上, 设

$$s(t) = s_x(t) + s_y(t) \quad (1)$$

$$s_x(t) = s_{x,R}(t) + js_{x,I}(t) \quad (2)$$

$$s_y(t) = s_{y,R}(t) + js_{y,I}(t) \quad (3)$$

噪声亦均匀分布在 x 偏振和 y 偏振上, 则

$$n_x(t) = n_{x,R}(t) + jn_{x,I}(t) \quad (4)$$

$$n_y(t) = n_{y,R}(t) + jn_{y,I}(t) \quad (5)$$

且有

$$E = E[n_{x,I}(t)] = E[n_{y,R}(t)] = E[n_{y,I}(t)] = \sigma^2 \quad (6)$$

因此光电检测器输出的光电流

$$i(t) = |s_x(t) + n_x(t)|^2 + |s_y(t) + n_y(t)|^2 = (s_{x,R}(t) + n_{x,R}(t))^2 + (s_{x,I}(t) + n_{x,I}(t))^2 + (s_{y,R}(t) + n_{y,R}(t))^2 + (s_{y,I}(t) + n_{y,I}(t))^2 \quad (7)$$

根据光电流 $i(t)$ 进行基于异步抽样的样本的特征统计。由于 $n_{x,R}(t)$ 、 $n_{x,I}(t)$ 、 $n_{y,R}(t)$ 、 $n_{y,I}(t)$ 服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布, 因此, 对于给定的符号序列 $\{\dots x_{k-1}, x_k, x_{k+1} \dots\}$, 在 t_0 时刻 $(-T/2 \leq t_0 \leq T/2)$, 上式中的 $s_{x,R}(t) + n_{x,R}(t)$ 、 $s_{x,I}(t) + n_{x,I}(t)$ 、 $s_{y,R}(t) + n_{y,R}(t)$ 、 $s_{y,I}(t) + n_{y,I}(t)$ 四项亦服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布, 这四项平方之后服从 χ^2 分布。

经过一系列推导及归一化处理, 得到光域的噪声功率为:

$$p_n = 4\sigma^2 \quad (8)$$

定义参数 $D_2(\beta_2L)$ 、 $D_4(\beta_2L)$ 、 $D_6(\beta_2L)$, 令

$$D_2(\beta_2L) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E \left[\left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k b(\tau - kT) \right|^2 \right] d\tau \quad (9)$$

$$D_4(\beta_2L) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E \left[\left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k b(\tau - kT) \right|^4 \right] d\tau \quad (10)$$

$$D_6(\beta_2L) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E \left[\left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k b(\tau - kT) \right|^6 \right] d\tau \quad (11)$$

由于 $b(t)$ 满足 $\int_{-T/2}^{T/2} |b(t)|^2 dt = 1$, 所以

$$D_2(\beta_2L) = 1 \quad (12)$$

于是有异步幅度抽样序列的抽样样本的一阶原点矩到三阶的原点矩为:

$$\mu_1 = P_n + P_0 \quad (13)$$

$$\mu_2 = 1.5P_n^2 + 3P_0P_n + P_0D_4(\beta_2L) \quad (14)$$

$$\mu_3 = 3P_n^3 + 9P_0P_n^2 + 6P_0^2P_nD_4(\beta_2L) + P_0^3D_6(\beta_2L) \quad (15)$$

式中: $D_4(\beta_2L)$ 和 $D_6(\beta_2L)$ 是关于色散的函数, 不包含

噪声因子,与噪声功率的取值无关,因此可以利用 D_4 、 D_6 实现对色散大范围内精确的监测。当光信噪比取值已知的情况下,可以根据 μ_1 和 OSNR 计算出 P_n 和 P_0 ,代入式中计算出 $D_4(\beta_2L)$ 和 $D_6(\beta_2L)$ 。

由于 $D_4(\beta_2L)$ 和 $D_6(\beta_2L)$ 是关于色散的函数,所以可以定义参数:

$$G(\beta_2L) = D_6(\beta_2L) / D_4(\beta_2L) \quad (16)$$

则 $G(\beta_2L)$ 也是仅关于色散的函数。利用样本数字特征值与信号、噪声功率的关系式,计算出色散参数因子 G ,且 G 具有不严格单调的特点。

2 基于 OptiSystem 的色散监测仿真系统设计

200 Gbps 的 DP-16QAM 光纤传输系统包括光发射机模块、光纤链路和光接收机模块三个部分,系统原理图如图 1 所示。

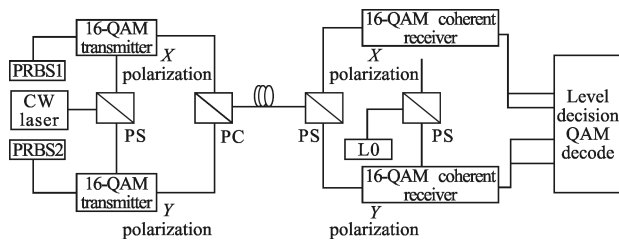


图 1 200 Gbps DP-16QAM 系统框图

Fig.1 Schematic of 200 Gbps DP-16QAM system

激光源(CW Laser)提供的光源(波长 $\lambda=1550$ nm, 线宽 $LW=0.1$ MHz, 功率 $Power=0$ dBm)经偏振分束器 PS 分成 X 和 Y 两个偏振的光束。两个 16-QAM 光发射机将伪随机信号发生器(PRBS1 和 PRBS2)产生的 100 Gbps 数字信号分别调制到 X 和 Y 偏振光载波上,经偏振合波器 PC 注入到光纤中;在接收机端,接收到的光信号经 PS 再分成 X 和 Y 偏振方向的两束光,送入 16-QAM 相干接收机,本地载波 LO 经 PS 分成 X 和 Y 偏振光束,分别送入两个相干接收机中,在相干接收机中接收光信号与本地光源经混频器、平衡接收机,得到解调的电信号,再经 AD 采样、QAM 解码等步骤,最终解调出正确的数字信号。

3 基于 AAS 的高速传输色散监测系统仿真

3.1 信号占空比对 G 曲线的影响

设置噪声功率为零,高斯滤波器带宽为 50 GHz,调节信号占空比分别为 1%、66%、50%、33%,计算得到的 G 函数曲线如图 2 所示。

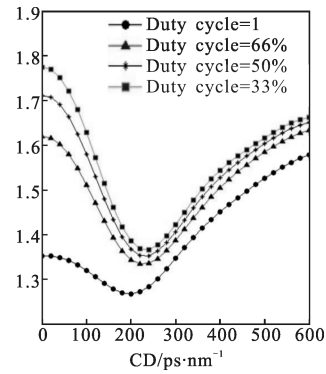


图 2 不同占空比下的 G 曲线

Fig.2 Curves of G under different duty cycles

图中用黑色圆点标注的是 NRZ 格式对应的 G 函数曲线,而占空比为 66%、50% 和 33% 的 G 函数曲线变化趋势与 NRZ 格式对应的 G 曲线变化趋势基本相同,但是 G 的极小值点向右平移了且递减区间段递减更为迅速。因此应该根据实际的 G 曲线选取适当的色散偏移量,而不应该固定使用 NRZ 格式对应的 240 ps/nm,否则就会导致在两端点附近有较大的误差。

3.2 色散监测标尺的选取

以噪声功率 $P_n=0$ mW 计算所得 D_4 、 D_6 作为色散测量的标准值,定义参量 $G_{CDR}=D_6/D_4$ 作为色散监测的标尺,在测量中根据计算的 G 值比照 G_{CDR} 即可估计出色散值, G_{CDR} 的函数曲线如图 3 所示。

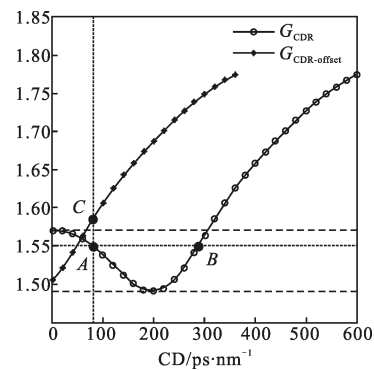


图 3 G_{CDR} 和 $G_{CDR-offset}$ 的函数曲线

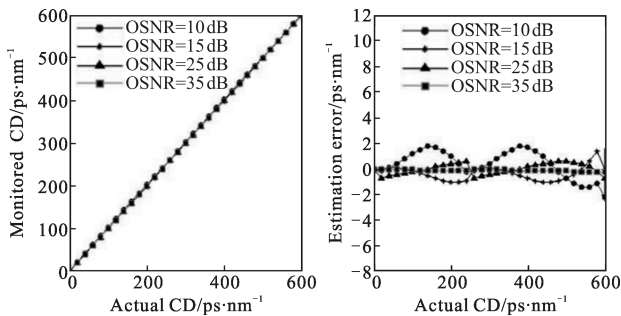
Fig.3 Function curves of G_{CDR} and $G_{CDR-offset}$

在图 3 中, G_{CDR} 在 0~200 ps/nm 范围内是单调递减的,在 200~600 ps/nm 的范围内是单调递增的,与色散并不是一一对应的函数关系,因此当对色散进行监测时计算得到的 G 将有可能对应于两个值。 G_{CDR} 在两虚线之间的部分表示一个 G 值对应于两个

色散值,假设实际色散值是 80 ps/nm,监测得到的 G 值为 1.550 3,在图 3 中粗虚线与 G_{CDR} 相交于 A、B 两点,因此当色散值大概在 0~310 ps/nm 范围内时无法确定监测色散值。为此作者在异步抽样之前设置了两个支路,其中一个支路引入了一段色散值为 240 ps/nm 的光纤,则 G 曲线相对于 G_{CDR} 向左平移了 240 ps/nm,其曲线如图 3 中星号标注的 $G_{\text{CDR-offset}}$ 。偏移量之所以使用 240 ps/nm 是因为当色散大于 200 ps/nm 时, G_{CDR} 曲线是单调递增曲线,但是在 200~240 ps/nm 之间的这段 G_{CDR} 曲线斜率较低会导致监测的灵敏度不高,而 240 ps/nm 后的曲线斜率较大。当实际监测色散为 80 ps/nm 时,可以通过 $G_{\text{CDR-offset}}$ 曲线的 C 点确定监测色散值而不需使用 G_{CDR} 曲线上 A 点来判断了。

3.3 基于 AAS 的色散监测

根据上一节关于图 3 的讨论,确定了作为色散监测的标尺 G_{CDR} 和 $G_{\text{CDR-offset}}$ 。当异步监测计算的 G 值小于 $G_{\text{CDR}}(0)$ 时,监测的实际色散 0~310 ps/nm 范围之内,再对引入了光纤色散 240 ps/nm 的支路进行异步抽样,计算出 G 值;利用 $G_{\text{CDR-offset}}$ 作为测量的标尺,计算出测量色散值;当异步监测计算的 G 值大于 $G_{\text{CDR}}(0)$ 时,利用 G_{CDR} 作为标尺,计算出测量色散值。利用 OptiSystem9.0 软件实现对 200 Gbps DP-16QAM 高速系统的色散监测,监测精确度为 0.1 ps/nm,仿真结果如图 4 所示。

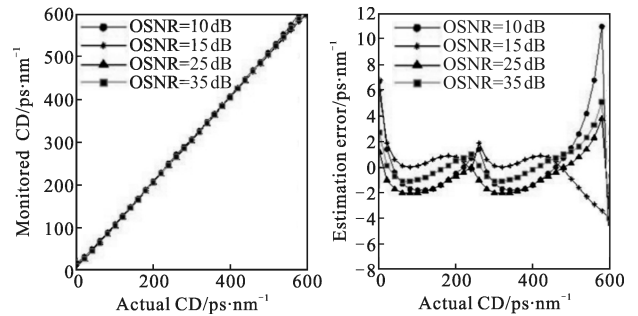


(a) 色散监测值 vs 实际色散值 (b) 色散估计误差 vs 实际色散值
(a) Monitored CD vs actual CD (b) Estimation error vs actual CD
图 4 占空比为 1 的 200 Gbps NRZ DP-16QAM 信号在不同光信噪比下的监测性能比较

Fig.4 Comparison of 200 Gbps NRZ DP-16QAM monitoring performance under different OSNR with duty cycle=1

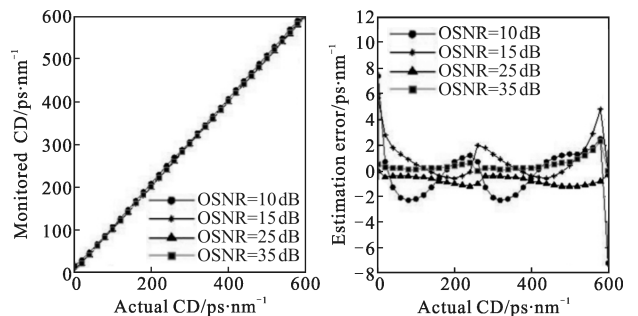
分析以上仿真结果,从图 4 可看出该监测方法

的误差较小,最大误差仅为 2 ps/nm。当 OSNR=10 dB 时,最大误差为 2 ps/nm;当 OSNR \geq 15 dB 时,最大误差减小到 1 ps/nm;当 OSNR=35 dB 时,在 0~600 ps/nm 色散范围内监测误差几乎为零,这是因为 AAS 方法对噪声、色散和 PMD 进行了有效的分离。而占空比分别为 66%、50%、33% 的 200 Gbps DP-16QAM 信号的色散监测值和色散估计误差仿真结果分别如图 5~图 7 所示,在色散 0 ps/nm 和 600 ps/nm 附近的测量误差较大,误差值均超过了 2 ps/nm,其余范围内的结果还是比较理想的,这是因为文中未考虑 PMD 对色散监测的影响,且文中基于 AAS 的色散监测理论只是从抽样样本的整体性特征来对色散进行近似的测量,并默认二阶色散占主导。



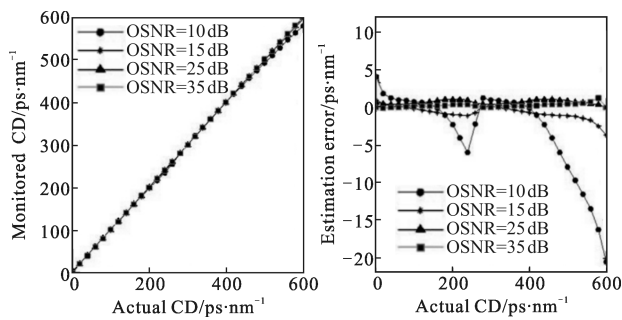
(a) 色散监测值 vs 实际色散值 (b) 色散估计误差 vs 实际色散值
(a) Monitored CD vs actual CD (b) Estimation error vs actual CD
图 5 占空比为 66% 的 200 Gbps DP-16QAM 信号在不同光信噪比下的监测性能比较

Fig.5 Comparison of 200 Gbps NRZ DP-16QAM monitoring performance under different OSNR with duty cycle=66%



(a) 色散监测值 vs 实际色散值 (b) 色散估计误差 vs 实际色散值
(a) Monitored CD vs actual CD (b) Estimation error vs actual CD
图 6 占空比为 50% 的 200 Gbps DP-16QAM 信号在不同光信噪比下的监测性能比较

Fig.6 Comparison of 200 Gbps NRZ DP-16QAM monitoring performance under different OSNR with duty cycle=50%



(a) 色散监测值 vs 实际色散值 (b) 色散估计误差 vs 实际色散值

(a) Monitored CD vs actual CD (b) Estimation error vs actual CD

图7 占空比为33%的200 Gbps DP-16QAM信号在不同光信噪比下的监测性能比较

Fig.7 Comparison of 200 Gbps NRZ DP-16QAM monitoring performance under different OSNR with duty cycle=33%

在实际应用中会受到PIN的各种噪声、器件老化、温湿度等的影响,公式(13)~(16)中的系数还需要根据经验或使用人工神经网络(ANN)等方法修正。

4 结论

文中提出了一种基于AAS的色散监测方法,仿真结果表明该方法具有良好的监测性能:受噪声影响小,色散灵敏度较高,能在0~600 ps/nm全范围内实现对色散的有效监测。该方法不需要同步提取时钟信号和高速采样单元,只需简单的光电探测器以及信号处理,实现成本低且可靠性高。利用该方法可以为在更高阶调制信号的光纤通信系统中进行色散监测管理提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Zhang Haibo, Xin Li. Ultrashort laser pulse distortion in fiber due to third-order dispersion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 742-745. (in Chinese)
张海波, 辛丽. 光纤三阶色散导致超短激光脉冲畸变的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 742-745.
- [2] Shake I. Optical signal quality monitoring method based on optical sampling[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(22): 2152-2154.
- [3] Hanik N, Gladisch A, Caspar C, et al. Application of amplitude histograms to monitor performance of optical channels[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(5): 403-404.
- [4] Li Zhihong, Li Guifang. Chromatic dispersion and polarization-mode dispersion monitoring for RZ-DPSK signals based on asynchronous amplitude-histogram evaluation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(7): 2859-2866.
- [5] Bartłomiej Kozicki, Ohara Takuya, Takara Hidehiko. Optical performance monitoring of phase-modulated signals using asynchronous amplitude histogram analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1353-1361.
- [6] Thomas Shun Rong Shen, Ke Meng, Alan Pak Tao Lau, et al. Optical performance monitoring using artificial neural network trained with asynchronous amplitude histograms[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(22): 1665-1667.
- [7] Faisal Nadeem Khan, Thomas Shun Rong Shen, Yudi Zhou, et al. Optical performance monitoring using artificial neural networks trained with empirical moments of asynchronously sampled signal amplitudes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 982-984.
- [8] Yang J, Yu C Y, Yang Y F, et al. PMD-insensitive CD monitoring based on RF clock power ratio measurement with optical notch filter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(21): 1576-1578.
- [9] Wu Zhao, Yu Yu, Zhang Xinliang. Chromatic dispersion monitoring for NRZ-DPSK system using asynchronous amplitude histogram evaluation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(4): 1212-1219.
- [10] Zhang Chao, Wang Lutang, Fang Nian, et al. Simple structure dual-channel PoLSK optical communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (4): 739-742. (in Chinese)
张超, 王陆唐, 方捻, 等. 结构简单的双信道偏振位移键控光通信系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 739-742.
- [11] Li Tie, Ke Xizheng, Chen Juan, et al. Polarization control in the coherent optical detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3069-3074. (in Chinese)
李铁, 柯熙政, 湛娟, 等. 相干光检测系统中的偏振控制[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3069-3074.