

文章编号: 0253-2239(2010)s100211

基于向量投影法的偏振检偏模块校准的新方法

邸青玥^{1,2} 张文博² 翁 轩¹ 张晓光¹

(¹北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

²北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘要 针对光纤通信中检偏模块的校准问题,给出了一种基于向量投影算法的校准矩阵的快速标定方法,并对其标定原理进行了分析。连续(CW)激光器发出的光依次经过可调光衰减器、偏振分析仪和检偏模块光头,光电流进入线性放大电路与高速模数转换器(ADC),最终由数字信号处理器(DSP)采集并输出 4 路数字电压,并由偏振分析仪输出相应的斯托克斯矢量。给出的算法基于这些数据计算出检偏模块的校准矩阵。实验表明,与现行常用的迭代法相比,向量投影算法具有较高的计算效率,并且得到的校准矩阵也具有较高的精度和很好的稳定性,检偏模块测得的偏振度(DOP)的误差保持在 3% 以内。

关键词 光纤通信;偏振检测;校准矩阵;向量投影算法

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100211

A New Approach of Calibrating the Polarimeter Module Based on Vector Projection Algorithm

Di Qingyue^{1,2} Zhang Wenbo² Weng Xuan¹ Zhang Xiaoguang¹

(¹Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
²School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract To solve the problem of calibrating the polarimeter module, a new approach based on vector projection algorithm was proposed, and the principle of calibration was analyzed. The continuous-wave (CW) light passed through the tunable optical attenuator, polarization analyzer, photon detectors of polarimeter module, then the photocurrent was fed into the preamplifier circuit and high-speed analog to digital converter (ADC) in turn. Finally, the digital voltage signals were acquired by the digital signal processor (DSP) and sent to the computer. At the same time, the polarization analyzer exported corresponding Stokes parameters. The calibration matrix could be calculated by the vector projection algorithm based on the given data. The experimental result shows that, in comparison with the common iterative algorithm, the vector projection algorithm has even higher computational efficiency and accuracy. The measured error of the degree of polarization (DOP) is less than 3 percent.

Key words optical fiber communication; test of polarization; calibration matrix; vector projection algorithm

OCIS codes 060.4510; 060.2330; 060.2420

1 引 言

在骨干网速率不断升级的过程中,人们对光纤传输系统中的偏振管理的需求日益提高。在光纤中

光信号偏振管理系统如偏分复用系统、偏振模色散(PMD)自适应补偿系统和偏振稳定系统等等,都需要实时精确检测光纤中的偏振态^[1~6]。尤其在偏振

收稿日期: 2010-07-01; **收到修改稿日期**: 2010-08-22

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z224)和北京市共建项目(XK100130637)资助课题。

作者简介: 邸青玥(1986—),女,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统中新型调制格式等方面的研究。

E-mail: diqingyue@gmail.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信和光电子学等方面的研究。

E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

模色散光自适应补偿器^[7]、偏振稳定器中^[8,9],偏振检测模块将提供链路中的偏振态(SOP)与偏振度(DOP)的瞬态值,作为链路中PMD与SOP的反馈信号。因此无论是在实验室还是在工程应用中,快速、精确的偏振态检测都至关重要。

偏振检测模块包括检偏光头与检偏电路[包括线性放大、高速模数(AD)转换和检测标定]^[10],其中检测标定矩阵的形成牵涉到多维空间非线性优化的多解问题,具有相当大的难度。现有的方法主要是迭代法,但是这种方法具有初始值不易选取,算法通常不是全局收敛,并且迭代收敛速度较慢,迭代精度不足等缺点。本文提出一种基于向量投影算法的检偏模块校准矩阵的快速标定方法,克服了原有标

定方法的不足,经过实验验证,有效提高了计算效率,并且得到的校准矩阵也具有较高的精度和很好的稳定性。

2 偏振检偏模块的校准理论

2.1 偏振检偏模块的构造与校准的作用

检偏模块用来检测输入光信号的偏振态,图1给出了检偏模块的构造。检偏模块光头内部的4个光探测器根据输入光信号的偏振态输出4路微小电流,这4路电流信号被送入之后的线性放大电路进行放大并转化为4路电压信号,再经高速AD转换为数字信号,最后由电脑或数字信号处理器(DSP)采集并计算得到表示光信号偏振态的斯托克斯矢量 S 。

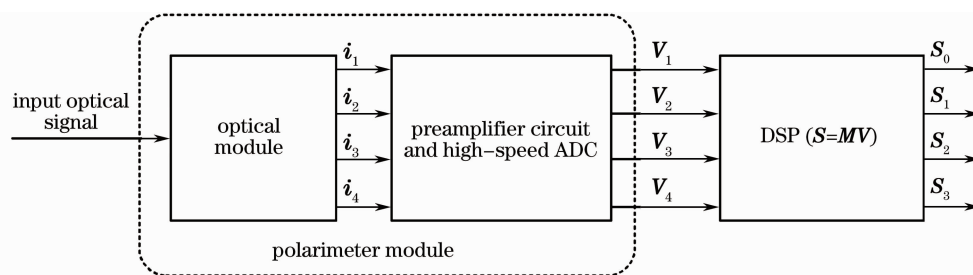


图1 偏振检偏模块结构示意图

Fig. 1 Sketch of the polarimeter module

由于检偏模块内部4个光探测器的响应度不可能完全一致,放大电路的增益系数也不可能精确相等,因此需要一个校准矩阵 M 来完成从电压矢量 V 到斯托克斯矢量的转化 $S=MV$ 。为了使检偏模块适用于一个高速动态反馈系统,对一款商用检偏器的放大电路部分重新设计,提高了检偏模块的响应速率和反馈信号精度,这样原有的校准矩阵不再适用,需要对检偏模块进行重新标定。

2.2 校准矩阵的快速标定原理

当光信号进入检偏模块后,输出4路数字电压 $(V_1, V_2, V_3, V_4)^T$,将这4路数字电压乘以一个 4×4 的标定矩阵 M ,即可转换为4个斯托克斯参量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,即

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = MV = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

检偏模块的标定工作就是要找到一个满足精度要求的标定矩阵 M 。

提出一种基于向量投影算法的方法来得到标定矩阵 M 的各个矩阵元。图2为向量投影法的示

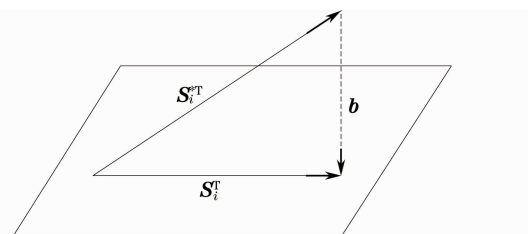


图2 向量投影法示意图

Fig. 2 Sketch of the vector projection algorithm

意图。

记每一组实验测得的数字电压为 V_i ,假设由偏振检偏仪得到一组对应的斯托克斯矢量为 S_i^* (看作真实值),则由(1)式有

$$S_i = MV_i, \quad (2)$$

若令向量 $b_i = S_i^T - S_i^{*T}$ 表示计算值与真实值的误差,则根据投影定理,若 S_i^* 是 S_i 的最佳近似,应有

$$\langle b_i, S_i^{*T} \rangle = 0, \quad (3)$$

即

$$(S_i^T - S_i^{*T})^T \cdot S_i^{*T} = 0, \quad (4)$$

若将实验测得的 n 组数字电压表示为矩阵形式, $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$,由(2)式计算所得的 n 组斯托克斯矢量表示为 $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]$,由偏振检偏仪输出对应的 n 组斯托克斯参量(看作真实值)表示为

$\mathbf{S}^* = [\mathbf{S}_1^*, \mathbf{S}_2^*, \dots, \mathbf{S}_n^*]$, n 组残差向量表示为 $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_n]^T$, 则有 $\mathbf{B} = \mathbf{S}^T - \mathbf{S}^{*T}$, 故(4)式可改写为

$$\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S}^T = 0, \quad (5)$$

将 $\mathbf{B} = \mathbf{S}^T - \mathbf{S}^{*T}$ 及 $\mathbf{S} = \mathbf{M}\mathbf{V}$ 代入(5)式有

$$(\mathbf{M}\mathbf{V}\mathbf{V}^T - \mathbf{S}^* \mathbf{V}^T) \cdot \mathbf{M}^T = 0, \quad (6)$$

对非零矩阵的 \mathbf{M} 而言, 若 $(\mathbf{M}\mathbf{V}\mathbf{V}^T - \mathbf{S}^* \mathbf{V}^T)$ 是零矩阵, 则(6)式显然成立。此时

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}^* \mathbf{V}^T (\mathbf{V}\mathbf{V}^T)^{-1}. \quad (7)$$

在实验中, 只需将 DSP 输出的 n 组电压值组合 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n]$ 和偏振检偏仪输出的与 \mathbf{V} 对应的 n 组斯托克斯参量 $\mathbf{S}^* = [\mathbf{S}_1^*, \mathbf{S}_2^*, \dots, \mathbf{S}_n^*]$ 代入(7)式, 就可以迅速求得满足精度要求的校准矩阵 \mathbf{M} 。

3 校准实验与标定结果的检验

3.1 矩阵标定的实验

检偏模块矩阵标定的实验结构如图 3 所示。CW 激光器发出的光经过可调光衰减器, 进入偏振分析仪。设定偏振分析仪使输出的光为 n 组给定的、在庞加莱球上大致均匀分布的偏振态, 从偏振分析仪输出的光最终进入检偏模块光头。此处衰减器的作用是调节最终进入检偏模块光头的光功率, 使其限制在一定范围内, 使得 4 路电流经转换和放大后落在 ADC 的线性区。4 路电流经过线性放大电路与高速 ADC 转换成 4 路数字电压, 并由 DSP 采

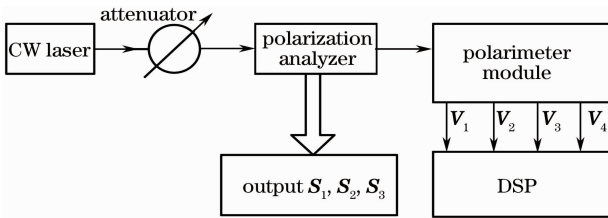


图 3 检偏模块矩阵标定的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of calibrating the matrix of the polarimeter module

集并输出, 记为 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n]$, 此处 \mathbf{V} 的 4 行对应 4 个电压, 每一列对应一组偏振态。同时偏振分析仪同步输出采样时刻的偏振态。将偏振分析仪的输出记为 $\mathbf{S}^* = [\mathbf{S}_1^*, \mathbf{S}_2^*, \dots, \mathbf{S}_n^*]$, 其中 \mathbf{S} 的 4 行分别对应 $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$, 每一列对应一组偏振态。将 \mathbf{V} 和 \mathbf{S}^* 代入(7)式, 即可求得校准矩阵 \mathbf{M} 。

3.2 标定结果的检验

为了检验正交投影法获得的校准矩阵的性能, 采用如图 4 所示的实验。将(1)式编程写入 DSP, m_{ij} 取为通过实验求得的校准矩阵 \mathbf{M} 。由 CW 激光器发出的光经过可调光衰减器, 进入扰偏器 (HP11896A)。扰偏器工作在 8 档扰偏模式, 平均扰偏速率为 80 rad/s。在扰偏器的作用下, 偏振态快速变化的光信号被送入检偏模块, 输出 4 路数字电压, 经过 DSP 采集并通过矩阵 \mathbf{M} 转换成斯托克斯参量输出。利用斯托克斯参量 ($\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$) 可以计算光信号的偏振度

$$f_{\text{DOP}} = \frac{\sqrt{\mathbf{S}_1^2 + \mathbf{S}_2^2 + \mathbf{S}_3^2}}{\mathbf{S}_0}, \quad (8)$$

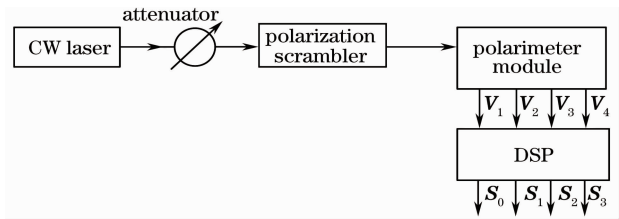


图 4 检验校准矩阵的实验装置

Fig. 4 Experimental setup of verifying the calibration matrix

对于完全偏振光有 $f_{\text{DOP}} = 1$, 对于部分偏振光有 $f_{\text{DOP}} < 1$ 。由于实验输入的光信号是完全偏振光, 并且没有人为在链路中引入噪声, 所以经过快速扰偏 (平均扰偏速率为 80 rad/s) 后输出的光信号仍然可看作完全偏振光, 故 f_{DOP} 依然为 1。检验结果如图 5(a)、(b) 所示。

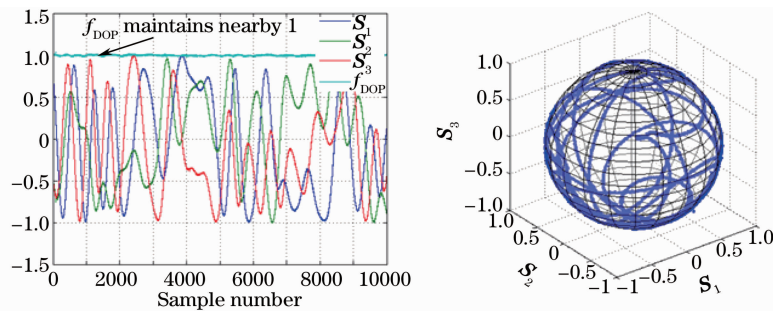


图 5 (a) 实验测得的 f_{SOP} 与 f_{DOP} , (b) 偏振态在庞加莱球上的分布

Fig. 5 (a) Experimental measured f_{SOP} and f_{DOP} , (b) distribution of f_{SOP} in Poincaré sphere

图 5(a)为 10000 组 f_{SOP} 和 f_{DOP} 的采样结果, 图 5(b)为 f_{SOP} 在庞加莱球上的分布。由图可见, 在扰偏过程中 10000 组采样点的 f_{DOP} 都保持在 1 附近, 无毛刺式波动, 误差不超过 3%; \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 和 \mathbf{S}_3 遍历了 $(-1, 1)$ 的范围, 除少数几个点外, 偏振态均分布在邦加球的球面上。说明实验求得的校准矩阵具有足够的精度。

4 结 论

给出了一种新的计算检偏模块校准矩阵的方法。相比迭代法, 本文的算法能够快速得到满足精度要求的校准矩阵。实验结果表明, 在测定若干组 (通常为 50 组) 偏振态与检偏模块输出电压后, 应用向量投影法能够快速得到检偏模块校准矩阵, 所得矩阵具有较高的精度, 偏振度的检测误差在 3% 以内。

参 考 文 献

- 1 M. Yagi, S. Satomi, S. Ryu. Field trial of 160-Gbit/s, polarization-division multiplexed RZ-DQPSK transmission system using automatic polarization control[C]. OFC/NFOEC, 2008, OThT7
- 2 T. Pfau, C. Wordehoff, R. Peveling *et al.*. Ultra-fast adaptive digital polarization control in a realtime coherent polarization-multiplexed QPSK receiver[C]. OFC/NFOEC 2008, OTuM3
- 3 H. Wernz, S. Bayer, B. E. Olsson *et al.*. 112 Gb/s PolMux RZ-DQPSK with fast polarization tracking based on interference control[C]. OFC/NFOEC 2009, OTuN4
- 4 Chongjin Xie, Sethumadhavan Chandrasekhar, Xiang Liu *et al.*. Automatic optical PMD compensator for 40-Gb/s DBPSK and DQPSK with fast changing SOP and PSP[C]. ECOC, 2008, We. 3. E. 5
- 5 F. Heismann. Analysis of a rest-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4): 690~699
- 6 R. Noé, B. Koch, V. Mirvoda *et al.*. 8-krad/s 3. 8-grad broadband endless optical polarization tracking using LiNbO[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **21**(17): 1220~1222
- 7 Weng Xuan, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia *et al.*. Experimental research of adaptive PMD compensator for 20 Gb/s DQPSK system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 175~179
翁 轩, 张晓光, 席丽霞 等. 20 Gb/s 差分四相移键控系统偏振模色散自适应补偿实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 175~179
- 8 X. Zhang, G. Fang, X. Zhao *et al.*. A novel endless polarization stabilizer with the additional function of stable SOP transformation in optical fiber communications [C]. OFC/NFOEC, 2009, JWA23
- 9 Zhang Xiaoguang, Fang Guangqing, Zhao Xinyuan *et al.*. Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 888~891
张晓光, 方光青, 赵鑫媛 等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 888~891
- 10 Weng Xuan, Zhao Xinyuan, Yuan Xueguang *et al.*. An experiment of polarization measurement using DSP-based control system[C]. ACP, 2009, TuQ4