

文章编号: 0258-7025(2006)12-1643-05

可调马赫-曾德尔干涉仪型 差分相移键控解调器

齐鸣, 张新亮, 黄德修

(华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)和光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 研制了一种基于光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的可调差分相移键控(DPSK)解调器,其具有插入损耗低、隔离度高、稳定性强和相位连续可调的优点。从理论上对差分相移键控信号解调的工作原理进行了详细分析。温度控制系统对光纤臂进行温度控制,温控范围为20℃,精度可达0.1℃。实验中实现了40 Gb/s差分相移键控信号的解调,解调信号消光比为14.5 dB,温度控制实现了输出结果的长时间稳定,并可在相长干涉和相消干涉之间转换。

关键词 光通信;差分相移键控解调器;马赫-曾德尔干涉仪;温度控制

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Tunable Differential Phase-Shift Keying Demodulator Using the Mach-Zehnder Interferometer

QI Ming, ZHANG Xin-liang, HUANG De-xiu

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics & Institute of Optoelectronics Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Tunable differential phase-shift keying (DPSK) demodulator based on fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) is investigated, which has advantages of low insertion loss, high isolation, good stability, and tunable phase. Operation principle for DPSK demodulation is analyzed. Temperature of the fiber arm is set by the temperature control system, in which the tuning range is 20 °C and the resolution is 0.1 °C. In the experiment, 40 Gb/s DPSK signal was demodulated successfully, and the extinction of the demodulated signal is 14.5 dB. With the help of temperature control, the experimental results have a long-time stability and can be switched between constructive interference and destructive one.

Key words optical communication; differential phase-shift keying demodulator; Mach-Zehnder interferometer; temperature control

1 引言

差分相移键控(DPSK)格式是目前高速光纤通信系统传输格式中研究的一个热点。相对于传统的开关键控(OOK)格式,差分相移键控的优势是:在平衡探测下,接收机的灵敏度提高了3 dB,并且在密集波分复用(DWDM)系统中,差分相移键控信号对于噪声和非线性效应具有更高的容忍度^[1~6]。但

是,差分相移键控信号必须将相位信息解调成振幅信息才能接收。相对于OOK信号简单的光电二极管(PIN)接收端,差分相移键控信号的接收端必须要增加一个解调器,所以差分相移键控解调器的设计是整个系统中最关键的环节之一。目前文献中报道的差分相移键控解调方案主要有基于差分相干解调^[7]、差分相位-振幅转换^[8]、差分相位-偏振转

收稿日期:2006-04-07;收到修改稿日期:2006-06-14

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0715)资助项目。

作者简介:齐鸣(1982—),男,湖北武汉人,华中科技大学光电子科学与工程学院硕士研究生,主要从事高速光通信系统的研究。E-mail:nanaqm@gmail.com

导师简介:张新亮(1971—),男,湖北人,华中科技大学光电子科学与工程学院和武汉光电国家实验室教授,博士生导师,目前研究方向为下一代光网络中光信号处理技术及关键光电子器件。E-mail:xlzhang@mail.hust.edu.cn

换^[9]、保偏光纤环^[10]等原理的方案。马赫-曾德尔干涉仪(MZI)以其插入损耗小、具有梳状滤波特性等优点,在光纤通信系统中有着重要的应用价值,比如光分插复用器(OADM)、波长交错器(Interleaver)、光双稳器件(ODB)等^[11~15]。文中研制了基于马赫-曾德尔延时干涉仪结构的可调全光纤型差分相移键控解调器,对解调器的工作原理进行了理论分析和数值模拟,对光纤臂的温度控制技术进行了设计和讨论,实现了40 Gb/s的差分相移键控信号解调,解调出的相移键控法(NRZ)信号相对于原始的差分相移键控信号没有出现信号质量恶化现象。

2 基本原理及数值模拟

马赫-曾德尔干涉仪结构如图1所示。差分相移键控信号从端口0进入马赫-曾德尔干涉仪,经3 dB耦合器1后被均分成两路分别从端口1,2输出,然后经过不同长度的光纤臂传输到端口3,4时,两路差分相移键控信号产生一个比特的延时差,最后在3 dB耦合器2内进行相邻比特之间的干涉,从端口5,6分别输出两路干涉后的信号。如果两个相邻比特的相位没有区别,则输出结果就是逻辑“1”,否则就是逻辑“0”,将差分相移键控携带的相位信息解调成振幅信息,这就是马赫-曾德尔干涉仪型差分相移键控解调器的工作原理。

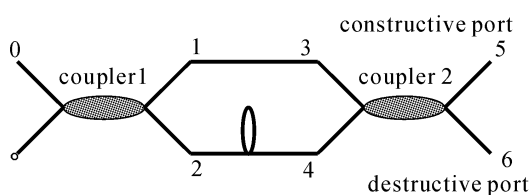


图1 马赫-曾德尔延时干涉仪的结构

Fig. 1 Configuration of MZI

文中自行设计的马赫-曾德尔干涉仪,是将两个3 dB耦合器通过熔接光纤的办法级联起来。干涉仪需要产生一个比特时延,故臂长差 ΔL 和信号速率 R 的关系为

$$\Delta L = \frac{C}{n_{\text{eff}} \cdot R}, \quad (1)$$

考虑有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, $R = 40 \text{ Gb/s}$, 则 $\Delta L = 5.17 \text{ mm}$ 。干涉仪臂长差的控制是个难点,利用游标卡尺测量光纤长度,通过反复修改和制作,控制的精度可达0.1 mm,0.01 mm量级的长度差可以利用较大范围的温度控制来实现。

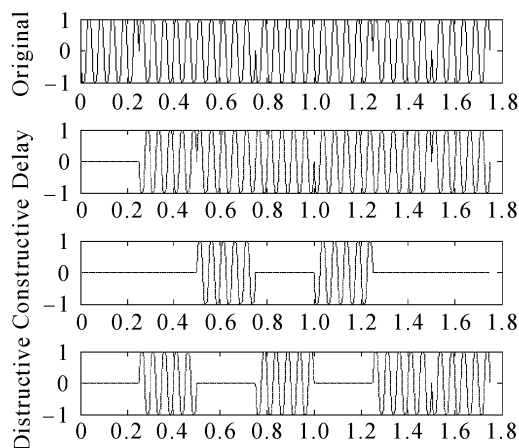


图2 差分相移键控解调的数值模拟

Fig. 2 Simulation of DPSK demodulation

差分相移键控解调的数值模拟如图2所示。将原始信号延时一个比特得到延时信号,然后进行相邻比特的干涉。当相邻比特没有相位改变的时候,在“相长端”即端口5(constructive port)得到最大功率;当有 π 相位改变的时候,在“相消端”即端口6(destructive port)得到最大功率。为便于观察,图中一个码元只包含光载波的五个周期。

3 温度控制

差分相移键控信号解调的一个关键技术就是光纤干涉仪的温度控制。因为光纤是个电光介质,环境温度的变化会引起其折射率的变化,而折射率的变化又引起光信号相位的改变,造成干涉仪输出的不稳定。另外光纤还具有热胀冷缩的特性,故相位的变化 $\delta\phi$ 为折射率变化 δn 和长度变化 δL 的结果的叠加,即其关系为

$$\delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\delta n \Delta L + n\delta L), \quad (2)$$

转化为随温度的变化率则为

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{dn}{dt} \Delta L + \frac{nd(\Delta L)}{dt} \right], \quad (3)$$

对于石英光纤, $\frac{d(\Delta L)}{\Delta L dt} \approx 5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\frac{dn}{dt} \approx 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 设波长 $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$, 代入(3)式得

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = 0.72 \text{ } \pi^\circ\text{C}^{-1}, \quad (4)$$

由此可见,当该光纤干涉仪的温度变化 $1.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,经过干涉仪的两路光信号的相位差会变化 π ,这样相消干涉变成相长干涉,相长干涉变成相消干涉。为了防止相位的变化,必须采取对干涉仪进行温度控制,因为温度控制不仅能保证干涉输出的稳定,而且

通过调节温度来改变信号相位,还可以得到任何相位状态下的输出结果。

温度控制的具体工作过程如图 3 所示。首先通过热敏电阻对干涉仪的温度进行探测,然后温控电路通过比较热敏电阻反馈的探测电压和设定电压,对半导体制冷器的工作电流进行调节,最后半导体制冷器通过导热片对干涉仪两臂同时进行制冷或加热。导热片面积小,加热快且均匀,因此可以实现光纤干涉仪的热均衡。

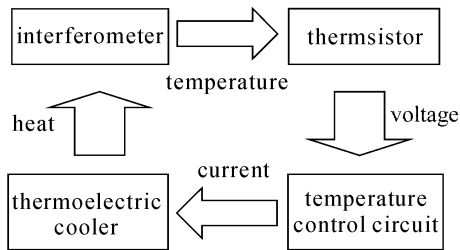


图 3 温度控制的工作流程图

Fig. 3 Flow diagram of temperature control

在制作好温度控制系统之后,对不同温度下光纤马赫-曾德尔干涉仪的输出特性进行了测试,测试结果如图 4 所示。采用掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射光(ASE)作为宽带光源,经过光纤马赫-曾德尔干涉仪后得到的干涉光谱如图 4 所示。通过半导体制冷器(TEC)对干涉仪的两臂进行温度调节,可以观察到干涉谱的条纹随着光纤温度的升高有向右移的倾向。温度每升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,干涉谱就向右移半个周期,波峰变成波谷,即对应两臂的相位差改变了 π ,这与前面的理论分析结果基本相符。干涉仪温度在 $15\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间均匀可调,温控精度可达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,连续工作 24 h 内温度误差小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

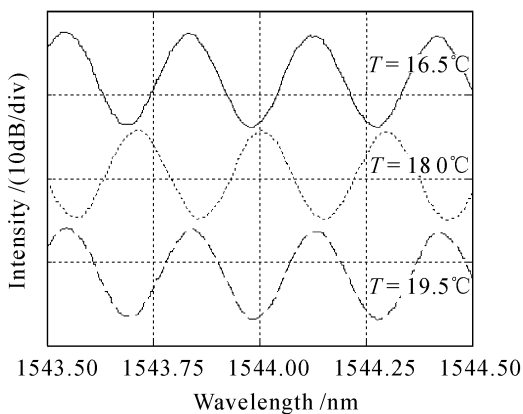


图 4 不同温度下的干涉谱(实验结果)

Fig. 4 Interference spectra of the interferometer at different temperature (experimental data)

4 实验及结果分析

实验装置如图 5 所示。整个差分相移键控通信系统由 1550 nm 光源(CW Laser)、电码型产生器(BPG 44E)、调制器(差分相移键控 5003)、光放大器(EDFA)、可调衰减器(tunable attenuator)、差分相移键控解调器(DPSK demodulator)以及通信分析仪(CSA8000B)组成。

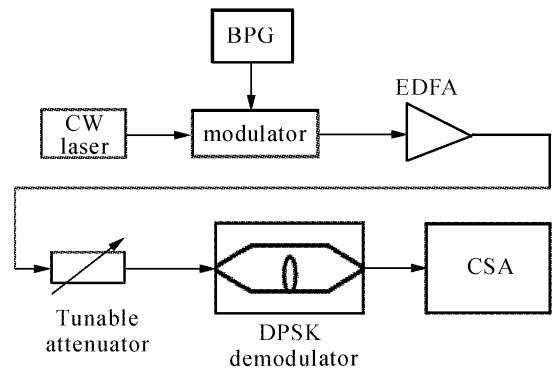


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experiment setup for DPSK demodulation

BPG: bit pattern generator; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; CSA: communications system analyzer

实验过程中调整调制器的偏置点,可得到相移键控法-差分相移键控码型。产生的 40 Gb/s (不带前向纠错码), $2^{23}-1$ 相移键控法-差分相移键控码型如图 6 所示。尽管差分相移键控格式中 0 和 1 在幅度上没有差别,但由于加载的数据信号在 0 和 1 之间跳变时要经过调制器特性曲线的最低点,因而会出现图中的正弦波形。

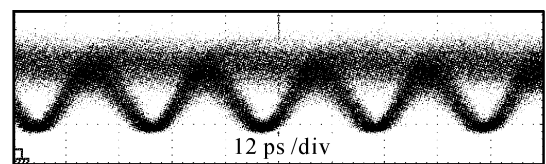


图 6 差分相移键控信号眼图

Fig. 6 Eye diagram of DPSK

经过光纤马赫-曾德尔干涉仪解调后得到的相移键控法信号眼图如图 7 所示。相移键控法信号消光比较高,达到 14.5 dB ,解调后眼图质量相对于原始的相移键控法-差分相移键控信号并没有多大程度的劣化。由于光调制器产生信号的相位抖动引起振幅抖动,导致原始的相移键控法-差分相移键控信号眼图不太理想,因而输出的相移键控法信号眼图上部连 1 信号的振幅抖动也比较大。

为了进一步验证解调过程的实现,进行了自定

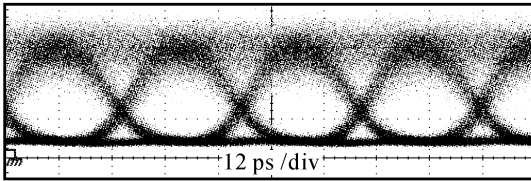


图 7 差分相移键控信号经过干涉仪解调后的眼图
Fig. 7 Eye diagram of the demodulated DPSK signal
obtained using MZI

义码型的实验。设定未经差分编码的原始相移键控法-差分相移键控码型为 11101100, 延时信号对应为 01110110。如果正确解调的话, 在相长干涉端产生的码流为 01100101, 在相消干涉端产生的码流为 10011010。

相长干涉端的实验结果如图 8 所示。上部的波形为差分相移键控原始信号, 下部的波形为相长干涉的输出信号, 可见解调器将差分相移键控携带的相位信息转化成了振幅信息, 并且解调后的码型和理论相符。输出信号消光比为 8.8 dB。图中差分相移键控原始波形中数据信号在 0 和 1 之间跳变的时候, 会出现一个下降沿和上升沿。这种特性也使差分相移键控信号相位从 0 到 π 的跳变不是瞬时的, 跳变的过程引起不完全的相位干涉, 导致输出信号中连 0 之间并未完全相消干涉, 出现了一个小尖峰。另外原始波形中数据 0 和 1 的峰值功率不一致是由于偏置电压稍微偏离了传输曲线的最低点而造成的。

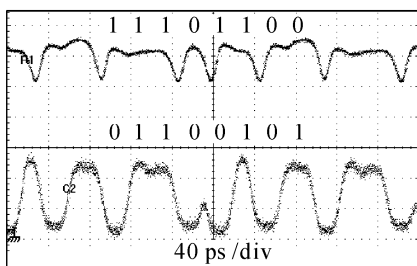


图 8 差分相移键控原始波形和解调后的
波形(相长干涉端)

Fig. 8 Original DPSK signal and demodulated
DPSK signal (constructive port)

同时, 相消干涉端的实验结果如图 9 所示。输出信号消光比为 10.8 dB。其中数据信号 1 的峰值不一致是由于原始波形峰值不一致造成的, 但是连 0 的信号比较平坦, 没有出现小尖峰。另外, 通过半导体制冷器来改变光纤干涉仪的温度, 当温度升高了 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 后, 发现相长端和相消端的输出结果刚好对

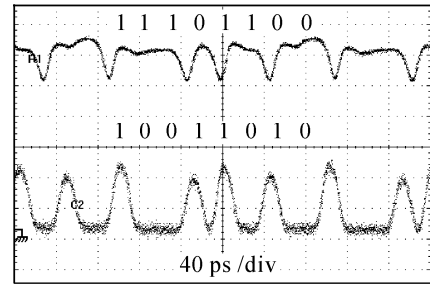


图 9 差分相移键控原始波形和解调后的
波形(相消干涉端)

Fig. 9 Original DPSK signal and demodulated
DPSK signal (destructive port)

调, 这说明干涉信号的相位差改变了 π 。

比较图 8 和 9, 相消端的干涉结果比相长端的好, 这个现象是由于相长端消光比衰减而造成的: 相消端的消光比由马赫-曾德尔干涉仪的自身静态特性决定, 而相长端则是由差分相移键控相位跳变的动态特性决定的。因此, 任何差分相移键控相位跳变的衰减(比如从 π 降低到 0.9π), 或者特定码型的相位调制(比如数据信号为连 1 或者连 0), 都会严重影响相长端的输出性能。

文中差分相移键控解调器工作在特定的温度条件下, 为了使差分相移键控通信系统长期稳定工作, 可对干涉仪的工作点进行反馈控制。如果对相长端和相消端的输出信号同时探测, 并采用平衡接收的方法, 该解调器有望使接收机的灵敏度再提高 3 dB。

5 结 论

介绍了马赫-曾德尔干涉仪解调差分相移键控信号的工作原理, 分析了光纤干涉仪的温度特性, 研制出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪的可调差分相移键控解调器, 实验中实现了 40 Gb/s 差分相移键控信号的解调, 解调信号消光比可达 14.5 dB。该解调器最大特点在于具有精确的温度控制系统, 利用对光纤臂的温度控制, 实现信号相位的长时间稳定并精确可调。实验结果证明该解调器在高速光通信系统中具有较高的使用价值。

参 考 文 献

- 1 Tekeshi Hoshida, Olga Vassilieva, Kaori Yamada *et al.*. Optimal 40 Gb/s modulation formats for spectrally efficient long-haul DWDM systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, 20(12):1989~1995
- 2 Takashi Mizuochi, Kazuyuki Ishida, Tatsuya Kobayashi *et al.*. A comparative study of DPSK and OOK WDM transmission over transoceanic distances and their performance degradations

- due to nonlinear phase noise [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9):1933~1943
- 3 Chris Xu, Xiang Liu, Linn F. Mollenauer *et al.*. Comparison of return-to-zero differential phase-shift keying and on-off keying in long-haul dispersion managed transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4):617~619
 - 4 A. H. Gnauck, S. Chandrasekhar, J. Leuthold *et al.*. Demonstration of 42.7-Gb/s DPSK receiver with 45 photons/bit sensitivity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1):99~101
 - 5 Jochen Leibrich, Christoph Wree, Werner Rosenkranz. CF-RZ-DPSK for suppression of XPM on dispersion-managed long-haul optical WDM transmission on standard single-mode fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2):155~157
 - 6 Xu Xiaogeng, Zhang Xinliang, Liu Deming *et al.*. Experimental study on transmission performance of NRZ, RZ and CS-RZ formats in 40 Gb/s optical fiber communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1371~1376
徐晓庚,张新亮,刘德明等. 40 Gb/s 光纤通信系统中不同码型传输特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1371~1376
 - 7 E. A. Swanson, J. C. Livas, R. S. Bondurant. High sensitivity optically preamplified direct detection DPSK receiver with active delay-line stabilization [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2):263~265
 - 8 Yoshinari Awaji, Toshiaki Kuri, Wataru Chujo *et al.*. Direct detection of OC-192 DPSK signal using polarization-controlled differential-phase-to-intensity conversion (DPIC) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7):1007~1009
 - 9 E. Ciaramella, G. Contestabile, A. D'Errico. A novel scheme to detect optical DPSK signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9):2138~2140
 - 10 C. W. Chow, H. K. Tsang. Polarization-independent DPSK demodulation using a birefringent fiber loop [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6):1313~1315
 - 11 Xiao Yueyu, He Sailing. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):346~350
肖悦娱,何赛灵. 一种级联马赫-曾德尔滤波器设计的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):346~350
 - 12 Huang Yonglin, Li Jie, Tong Zhengrong *et al.*. High extinction ratio comb filters based on dual-pass Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12):1429~1432
黄勇林,李 杰,童峥嵘等. 高消光比双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12):1429~1432
 - 13 Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Research of optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):423~426
黄勇林,董兴法,李 杰等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):423~426
 - 14 Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Transmission characteristics of interleaver based on Mach-Zehnder interferometer with optical all pass filter inserted [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):575~580
孟义朝,黄肇明,王陆唐. 马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5):575~580
 - 15 Guahui Lu, Hongan Ye, Junqing Li *et al.*. Optical bistability in tunable fiber laser using fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):18~20

4 kW 高功率全固态连续波激光器

全固态激光器集半导体激光器和固体激光器优势于一体,具有高效、高功率、高光束质量、高可靠性、小体积和长寿命等优点,近年来已成为激光领域的重要发展方向,高功率全固态激光器在科研、工业加工和国防等领域有十分重要的用途。中国科学院半导体研究所集成技术中心自主研制了半导体激光器抽运的高功率激光头,采用 Nd:YAG 双棒串接的方法,获得了超过 4 kW 的高功率连续波 1064 nm 激光输出,光-光转换效率超过 50%。实验同时在输出功率为 3 kW 时做了功率稳定性实验,功率不稳定性优于 $\pm 0.3\%$,如图 1 所示。

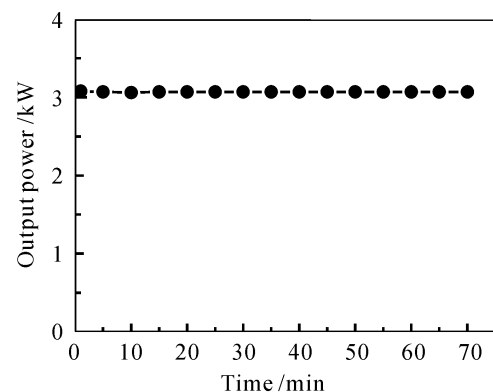


图 1 输出功率为 3 kW 时激光稳定性的测试

Fig. 1 Stability testing at the output power level of 3 kW

中国科学院半导体研究所,北京 100083
林学春,张 玲,马骁宇,李晋闽
收稿日期:2006-11-03
收到修改稿日期:2006-11-13