

偏振态一致的时分复用系统及其测试方法研究

张卓宁 李建中 王 竞 彭其先 陶世兴*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 设计了基于法拉第旋转镜和三端口环形器偏振态一致的级联时分复用系统,其输出所有光脉冲偏振态一致,极大的提高了时分复用系统的偏振态稳定性,并对时分复用过程中时间和幅度调节误差对复用精度的影响进行了频谱分析,说明其功率密度只在基频率整数倍频点变化,进而采用频谱分析仪对时分复用过程中的时间、幅度误差进行实时检测和动态调节,对5级32倍时分复用检测。结果表明,该时分复用系统的有效位数达到了6.15 bit。

关键词 测量; 时分复用; 偏振态一致; 频谱分析; 实时检测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0207001

Research of the Optical Time-Division Multiplexing with the Same Polarization and Test Method

Zhang Zhuoning Li Jianzhong Wang Jing Peng Qixian Tao Shixing

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract An optical time-division multiplexing (OTDM) technique based on the Faraday rotator and three port circulator is designed. The polarizations of the optical pulse exported from the OTDM system are all the same, which have greatly increased the polarize stability. The effect of the adjusted errors on the intensity and time are analyzed with frequency spectrum. The results indicate that the power density varies only on the frequencies which are multiples of the basic frequency. A spectral analyzer is used to achieve a real-time measurement on the errors of intensity and time. The effective-number-of-bits of the five degree OTDM is 6.15 bit.

Key words measurement; optical time-division multiplexing; the same polarization; frequency analysis; real-time measurement

OCIS codes 060.4230; 070.4790; 320.7100

1 引 言

光时分复用技术(OTDM)基于其使用单一光源、对光源波长稳定性要求低、光纤非线性影响小、色散补偿及信号再生相对简单等优点,被认为是下一代采用全光交换和全光路由的全光网络的技术基础。同时光时分复用技术也广泛应用于光模数转换^[1]、雷达技术^[2]、传感技术^[3]、激光干涉测速技术^[4-5]、光纤陀螺^[6]、光网络^[7-9]等。目前光时分复用主要限制因素之一就是偏振相关效应以及没有观察超高速光脉冲的示波器、信号分析仪等设备^[10]。现在解决光时分复用偏振敏感方法主要是基于制作保偏器件^[11]以及各种偏振模色散补偿方案,如基于光信号单一输入偏振态的偏振度反馈法^[12-13],对其测试则主要采用实时采样示波器。目前国内已有利用普通单模光纤或

收稿日期: 2015-07-20; 收到修改稿日期: 2015-08-27

基金项目: 中国工程物理研究院 X09 专项(991100)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2015B0401079)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2015B0401080)

作者简介: 张卓宁(1989—),男,硕士研究生,主要从事瞬态信号处理技术方面的研究。E-mail: dzn-123@163.com

导师简介: 彭其先(1970—),男,研究员,硕士生导师,主要从事瞬态光电诊断技术方面的研究。

E-mail: qixianpeng109@163.com

*通信联系人。E-mail: taoshixing109@163.com

镀膜透镜组合实现 16×10 Gb/s 光时分复用系统的报道^[14-15],具有较高的时延精度和稳定性。

针对现有光时分复用系统偏振不稳定以及测试方法测量精度低的问题,本文设计了一种基于三端口环形器和法拉第旋转镜的自保偏多级级联光时分复用系统,每一级采用精密光功率衰减和精密光纤延迟线对复用光脉冲进行功率和时间调节,且复用产生的所有光脉冲偏振态一致。对光时分复用过程进行了频谱分析,发现功率密度谱中所有功率密度变化均发生在基频率点整数倍位置,且时间误差和幅度误差都反映为整数倍基频点位置处的功率密度变化,进而可以采用频谱分析仪对光时分复用过程进行实时检测并控制时分复用系统时间,幅度。结果表明,基于频谱分析仪极低的基底噪声,设计的 5 级 32 倍光时分复用系统的有效数位达到了 6.15 bit。

2 基本原理

设计的偏振态一致 5 级时分复用结构如图 1,从输入端输入的光脉冲经过 1×2 光纤耦合器之后分为两路,一路经过可调衰减器调节功率经法拉第旋转镜反射,另一路经过光纤延迟线改变光程后经法拉第旋转镜反射,两束光再次经 1×2 耦合器合束之后从三端口环形器第三端口输出。设输入脉冲周期为 N ,则光纤延迟线延迟 $N/2$,同时调整可调衰减器,使复用之后的两脉冲幅度相等,以此类推。之后时分复用每一级依次延迟 $N/(2^2), N/(2^3), N/(2^4), N/(2^5), \dots$,如图 2 所示。

该系统的优点是系统的偏振敏感性得到了极大改善。光脉冲经过光纤往返及法拉第旋转镜反射之后,琼斯矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} a & -b \\ b^* & a^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & -b^* \\ b & a^* \end{pmatrix} = d \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 a, b 代表光纤的双折射特性,“*”表示共轭, $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ 为法拉第旋转镜的传输矩阵, $d = aa^* + bb^*$ 。由(1)式可知,三端口环形器输出的光脉冲具有与入射光脉冲相同的偏振态,因此整个时分复用产生光脉冲都具有相同的偏振态,稳定性极高。

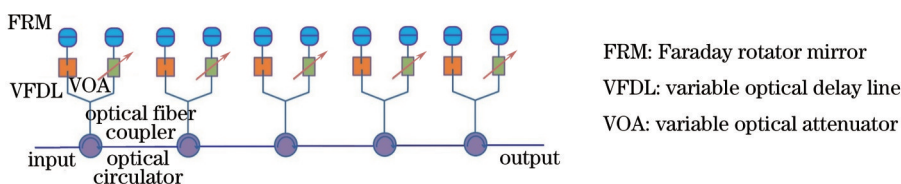


图 1 偏振态一致 5 级光时分复用结构图

Fig.1 Configuration of 5 step OTDM system with the same polarization

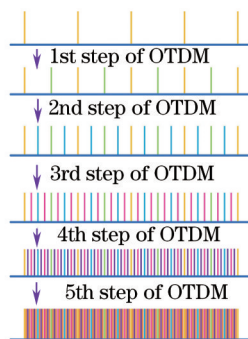


图 2 5 级光时分复用脉冲复用过程示意图

Fig.2 Sketch map of 5 step OTDM

实际调节过程中会存在幅度调节误差和时间调节误差,令脉冲序列为 $x(n)$,其傅里叶变换为 $X(k)$,则 $x(n)$ 和 $X(k)$ 是 N 点离散傅里叶变换(DFT)对,经过时分复用后,复用产生的光脉冲序列为 $b \cdot x(n-l)$,其中 b 为复用之后产生光脉冲幅度, l 为复用产生光脉冲实际延迟时间,有

$$b = 1 + \Delta_1, \quad (2)$$

$$l = N/2 + \Delta_2, \quad (3)$$

式中 Δ_1, Δ_2 代表误差量。经过时分复用之后的光脉冲序列为

$$c(n) = x(n) + b \cdot x(n-l). \quad (4)$$

根据频谱变换的线性和圆周时域移位特性,其对应 DFT 为

$$C(k) = X(k) \cdot [1 + b \cdot \exp(-j2\pi kl/N)], \quad (5)$$

其功率密度谱为

$$|C(k)|^2 = |X(k)|^2 \cdot [1 + b^2 + 2b \cos(2\pi kl/N)], \quad (6)$$

将 $b = 1 + \Delta_1, l = N/2 + \Delta_2$ 代入(6)式,有

$$|C(k)|^2 = |X(k)|^2 \cdot [2 + 2\Delta_1 + \Delta_1^2 + 2(1 + \Delta_1)(-1)^k \cos(2\pi k\Delta_2/N)], \quad (7)$$

分为如下四种情况进行讨论:

1) 当 $\Delta_1 = 0, \Delta_2 \neq 0$, 即没有幅度误差而只有时间误差时, (7)式为

$$|C(k)| = \begin{cases} 2|X(k)| \cdot |\sin(\pi k\Delta_2/N)|, & (k \in \text{odd}) \\ 2|X(k)| \cdot |\cos(\pi k\Delta_2/N)|, & (k \in \text{even}) \end{cases}, \quad (8)$$

在功率密度谱中表现为奇频点功率密度降低,偶频点功率密度增加,且各频点位置不变。

2) 当 $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$, 即延迟时间正好为半个周期且复用产生的光脉冲与初始光脉冲幅度相等时,奇频点功率密度降为0,偶频点功率密度提高1倍,频谱中各频率点间隔正好增加1倍。

3) 当 $\Delta_1 \neq 0, \Delta_2 = 0$, 即复用产生的光脉冲正好延迟半个周期但其幅度相对于初始光脉冲有一定误差时, (7)式为

$$|C(k)| = \begin{cases} |X(k)| \cdot |\Delta_1|, & (k \in \text{odd}) \\ |X(k)| \cdot |2 + \Delta_1|, & (k \in \text{even}) \end{cases}, \quad (9)$$

由(9)式可知,延迟时间正好为半周期情况下,奇频点,偶频点功率密度直接与幅度误差相关,奇频点功率密度降低,偶频点功率密度增加,若复用产生的光脉冲相对于初始光脉冲没有幅度误差,则频谱变化情况

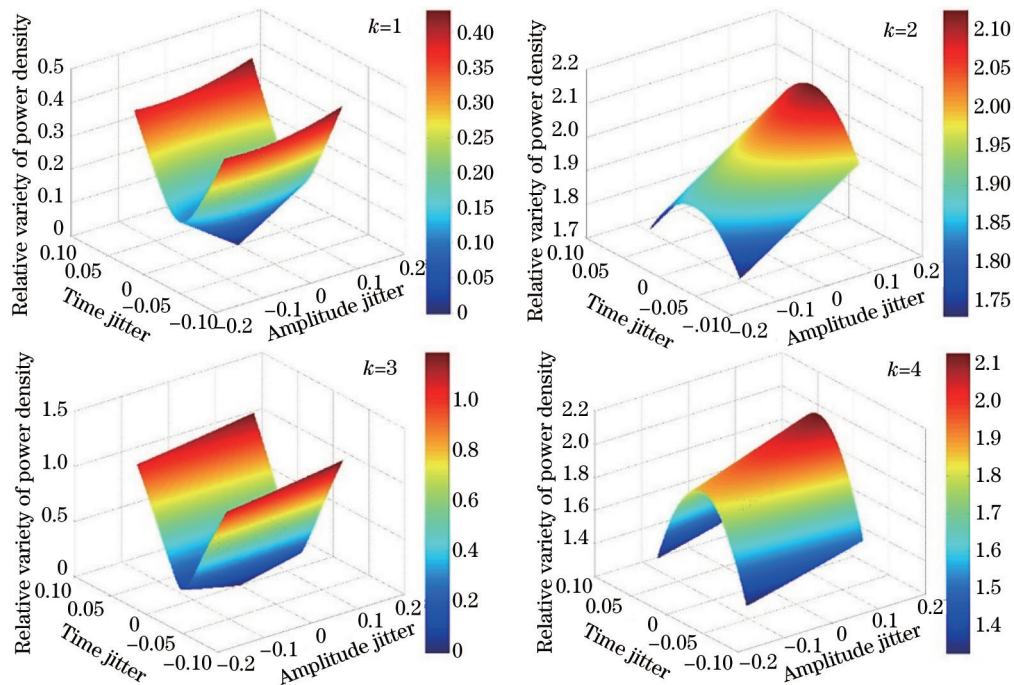


图3 经过时分复用之后,各基频点功率密度与延迟时间误差,幅度误差关系

Fig.3 Relationships between power density variety of fundamental frequency and delay time error, amplitude error after OTDM

与第二种情况相同。同时表明时分复用过程中频率点的增减只会发生在基频点的整数倍位置。

4) 一般情况,即 $\Delta_1 \neq 0$, $\Delta_2 \neq 0$ 时,对 $k=1,2,3,4$ 次基波的功率密度变化进行了模拟计算,如图 3 所示。

X 轴表示复用产生的光脉冲与原光脉冲幅度误差比值,即 Δ_1 。Y 轴表示复用产生的光脉冲延迟时间相对于半周期误差比值,即 $\Delta_2/(N/2)$ 。Z 轴表示光脉冲复用之后基频点功率密度与没有复用时基波功率密度比值。由图 3 可知,对于奇次基频点,功率密度随着误差增加而增大,对于偶次基频点,功率密度随着误差增大而减小,在整个过程中不会产生新的频率点。

3 实验结果

基于上述偏振一致性论证和频谱分析,测量过程中采用偏振分析仪和频谱分析仪对时分复用过程进行实时检测,激光器重复频率为 250 MHz,频谱分析仪带宽为 13.6 GHz,受限于频谱分析仪带宽,测量了 5 级 32 倍时分复用。图 4 为各级时分复用偏振态在庞加莱球上的表示,图 5 为各级时分复用对应的功率谱密度。

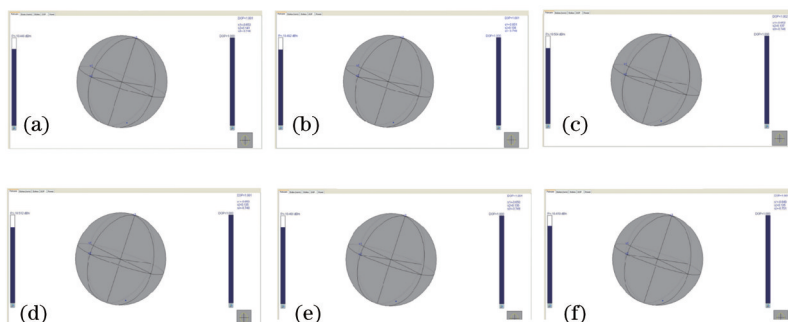


图 4 250 MHz 到 8 GHz 时分复用各级偏振态在庞加莱球上的表示

Fig.4 State of polarization of the multiplexing processes on Poincaré sphere from 250 MHz to 8 GHz

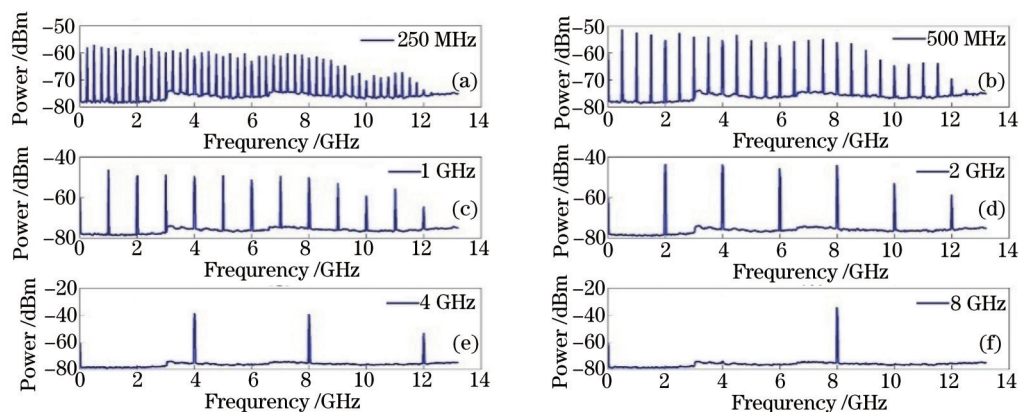


图 5 使用频谱分析仪对 250 MHz 到 8 GHz 时分复用过程测量

Fig.5 Measurement results of the multiplexing processes using spectral analyzer from 250 MHz to 8 GHz

4 分析与讨论

各级时分复用偏振特性的实验结果如表 1 所示。 $S_1 \sim S_3$ 为斯托克斯参量, f_{PER} 为偏振消光比, σ 为标准差。在入射光脉冲进入系统经历 1~5 级复用连续调节的过程中:实时测量所得的偏振态在庞加莱球上的位置稳定(图 4);各级复用间的斯托克斯参量和偏振消光比的变化微小。考虑到环境对光纤的影响而引起的测量误差,表 1 的结果说明,整个时分复用产生光脉冲具有相同的偏振态,并具有极高的稳定性。

时分复用过程中的误差来源于时间和幅度调节,光纤延迟线调节精度为 30 fs,可调衰减器调节精度为 0.3%,根据(7)式进行计算,对应奇频点功率密度变为 0.3%,偶频点功率密度变为 2.003%,有效数位为 8.38 bit。实际情况下,时分复用调节精度受限于频谱分析仪测量精度(图 3),频谱分析仪本底噪声为 -75 dBm,当复用倍数为 5 级 32 倍时,8 GHz 频点功率为 -38 dBm,频谱分析仪负载为 50 Ω ,因此系统实际有效数位达到了 6.15 bit。

表 1 各级时分复用偏振态斯托克斯参量和偏振消光比

Table 1 Measurement results of the state of polarization of the multiplexing processes

Step	S_1	S_2	S_3	f_{PER}/dB
0	-0.635	0.141	-0.746	1.840
1	-0.651	0.138	-0.748	1.830
2	-0.652	0.137	-0.748	1.840
3	-0.650	0.135	-0.749	1.830
4	-0.650	0.136	-0.749	1.820
5	-0.649	0.135	-0.751	1.830
σ	0.0064	0.0023	0.0016	0.0075

5 结 论

针对光时分复用系统偏振态容易受外界环境扰动缺点,提出了一种偏振态一致的光时分复用系统,其复用产生的所有光脉冲幅度相等,从而极大地提高了系统稳定性。采用频谱分析仪对各级复用后脉冲的时间和幅度抖动进行实时检测,在仪器本底噪声为-75 dBm,系统的有效数位达到了6.15 bit。

参 考 文 献

- Nuermaiti, Wang Lei, Fan Xiuhong, *et al.*. Optoelectronic analog-to-digital conversion based on optical time division multiplexing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(7): 1263-1267.
努尔买买提, 王 蕾, 范修宏, 等. 基于光时分复用的电光模数转换[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(7): 1263-1267.
- Yu Fengmei, Yang Xuejun, Chen Xiaotian. Application of time-division multiplexing in digital pulse compression technique in radar [J]. *Land-Based Air Defence Weapons*, 2012, 43(1): 47-56.
于凤梅, 杨薛军, 陈晓天. 时分复用技术在雷达数字脉冲压缩中的应用[J]. *地面防空武器*, 2012, 43(1): 47-56.
- Geng Shuwei, Yu Youlong. Fiber Bragg grating sensor system using time-division multiplexing technique[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(2): 204-206.
耿淑伟, 余有龙. 光纤光栅时分复用传感系统[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(2): 204-206.
- Peng Qixian, Li Zeren, Wang Detian, *et al.*. Time-divided laser interference velocimetry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 191-194.
彭其先, 李泽仁, 王德田, 等. 时分复用激光干涉测速技术研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(2): 191-194.
- Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, *et al.*. Research on multiplex technology and experiment of multiplexed photonic Doppler velocimetry [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105009.
李建中, 刘寿先, 刘 俊, 等. 多路复用光子多普勒测速复用方案分析及实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105009.
- Lu Jun, Xiao Cheng, Wang Lidong. Influence of time-division multiplexing technology on performance parameters of three-axis fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 456-461.
鲁 军, 肖 程, 王立冬. 时分复用技术对三轴光纤陀螺系统性能指标的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 456-461.
- Qian Yinbo, Liu Deming, Zhang Minming, *et al.*. Long reach WDM/TDM hybrid passive optical network system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2505-2511.
钱银博, 刘德明, 张敏明, 等. 长距离波分时分混合复用无源光网络系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2505-2511.
- Li Jibo, Liu Xiguo, Wang Hongxing, *et al.*. Improved ultraviolet communication time division multiplexing network method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105003.
李济波, 刘锡国, 王红星, 等. 改进的紫外光通信时分复用组网方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105003.
- Wu Ting, Li Tangjun, Jia Nan, *et al.*. Suppression of intra-channel four-wave mixing by strong dispersion management in 160 Gb/s OTDM transmission[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0105002.
吴 婷, 李唐军, 贾 楠, 等. 强色散管理抑制 160 Gb/s 光时分复用传输系统中的带内四波混频效应[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0105002.
- Li Yan, Feng Lishuang, Xu Hongjie, *et al.*. Light route research on optical fiber polarization characteristics test system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 430-433.

- 李彦,冯丽爽,徐宏杰,等.保偏光纤偏振特性测试系统的光路研究[J].红外与激光工程,2005,34(4):430-433.
- 11 Zhao Jing, Cai Libo, Li Tangjun. Experimental investigation in polarization sensitivity of OTDM system using 1×4 optical fiber coupler [J]. Optical Communication Technology, 2005, 29(8): 58-59.
- 赵晶,蔡立波,李唐军.采用1×4光纤耦合器的光时分复用系统偏振敏感性实验研究[J].光通信技术,2005,29(8):58-59.
- 12 Zhou Guangtao, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, *et al.*. Two-stage adaptive polarization mode dispersion compensation experiment in 40 Gb/s optical time division multiplexing system[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 15-20.
- 周光涛,张晓光,席丽霞,等.40 Gb/s光时分复用系统中两级偏振模色散自适应补偿实验研究[J].光学学报,2005,25(1):15-20.
- 13 Xu Kun, Dai Yitang, Mao Jin, *et al.*. Study of dynamic PMD compensation system using signal DOP as the feedback control signal[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1024-1029.
- 徐坤,戴一堂,毛晋,等.基于光信号偏振度的偏振模色散补偿系统的研究[J].光学学报,2003,23(10):1024-1029.
- 14 Wang Muguang, Li Tangjun, Cai Libo, *et al.*. Experimental study on the properties of a four-stage optical time-division multiplexer in 16×10 Gb/s optical signal generation system[C]. SPIE, 2006, 6351: 63512X.
- 15 Yang Y F, Lou C Y, Feng Y M. A stable ultrashort pulse generator based on EAM and well-designed compressor for applications in 160 Gbit/s OTDM networks[J]. Chin Phys Lett, 2006, 23(9): 2465-2467.

栏目编辑:何卓铭