

光纤通信网中波长选择开关的时频传递性能

熊晓锋^{1,2}, 杨飞^{2*}, 桂有珍³, 蔡海文², 苏觉^{4,5}, 朱祖劼⁴

¹中国科学院大学, 北京 100049;

²中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院上海光学精密机械研究所中科院量子光学重点实验室, 上海 201800;

⁴中国科学技术大学, 合肥 安徽 230026;

⁵中国科学院电磁空间信息重点实验室, 合肥 安徽 230027

摘要 为了适应高精度光纤时频传递与光纤通信网融合的发展趋势,对光纤通信网中常用的波长选择开关(WSS)的时频传递性能进行了研究。基于波分复用、单纤双向返回和光学真时延补偿的方案搭建了一套高精度光纤时频传递系统,研究了 WSS 的输出端口、输出损耗和输入光信号的偏振态变化对时频传递性能的影响,并在此基础上研究了含 WSS 的时频传递系统的开闭环特性以及闭环情况下 WSS 的动态切换对时频传递系统的影响。实验结果表明,WSS 的引入对光纤时频传递性能的影响是可以控制的,证实了在含 WSS 的商用光纤通信网中进行高精度时频传递是可行的。

关键词 光纤光学; 波长选择开关; 光纤时频传递; 光纤通信网络

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0106003

Time-Frequency Transfer Performance of Wavelength Selection Switch in Optical Fiber Communication Network

Xiong Xiaofeng^{1,2}, Yang Fei², Gui Youzhen³, Cai Haiwen², Su Jue^{4,5}, Zhu Zuqing⁴

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁴University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

⁵Key Laboratory of Electromagnetic Space Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230027, China

Abstract To adapt to the development trend of combining high precision fiber time-frequency transfer with optical fiber communication network, the time-frequency transfer performance of wavelength selection switch (WSS) which is commonly used in optical fiber communication network is studied. A system with high precision fiber time-frequency transfer is established based on the wavelength division multiplexing, bidirectional return and optical real time delay compensation scheme. The effects of output ports, output loss and variation of polarization state of input optical signal on the time-frequency transfer performance of the system are discussed. In addition, the open-loop and closed-loop performance of time-frequency transfer system including WSS and the influence of dynamic switching performance of WSS under closed-loop on the time-frequency transfer system are studied. The experimental results

收稿日期: 2017-07-07; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030800)

作者简介: 熊晓锋(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: xiongxiaofeng@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文(1975—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光纤时频传递、光纤传感和单频激光器等方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fyang@siom.ac.cn

show that the effect of WSS on the fiber time-frequency transfer performance can be controlled, and it is proved that the high precision time-frequency transfer in the commercial optical fiber communication network with WSS is feasible.

Key words fiber optics; wavelength selective switch; fiber time-frequency transfer; optical fiber communication network

OCIS codes 060.2360; 060.2330; 120.3930; 120.7000

1 引 言

高精度时频传递在基础物理实验、时频计量、雷达管控和导航定位等领域扮演着重要角色^[1-2]。随着原子钟技术的不断进步,商用氢原子钟的秒稳定度已达到 10^{-13} 量级,而近年来飞速发展的光钟的秒稳定度更是达到 10^{-15} 量级^[3]。随着钟源精度的不断提高,传统的卫星授时由于受到大气环境的影响,在某些方面已经无法满足高精度光纤时频传递的需求。光纤具有损耗低、受外界环境影响较小等优点,作为一种较好的传输介质,近年来得到了广泛应用^[4-8]。目前,点对点的光纤时频传递系统已经相对成熟,在下一代的原子钟比对和导航定位等应用中,需要建立更加稳定可靠的高精度时频传递网络。目前,国内外围绕光纤时频传递的网络化,对时频传递网络拓扑结构如级联结构、树形结构和环形结构^[9-11]等方面进行了重点研究,并开展了一些实际应用探索,如研究了美国国家航空和宇宙航行局(NASA)深空探测网和欧洲精准时间频率传递网络等^[12-13]。

目前,光纤时频传递已经实现在线性和环状网络中的多点下载与上传^[11],但是无法在商用光纤网络上实现真正的网络化时频传递。随着互联网的发展,商用光纤网络已经比较成熟,并逐渐向智能化方向发展。可重构的光分插复用器是智能光网络中最核心的功能模块,通常采用波长选择开关(WSS)来实现^[14-15]。因此,想要建立一个智能化的高精度光纤时频传递网络,需要对 WSS 在时频传递过程中的性能演化规律和机理进行研究,从而为基于商用通信网的高精度时频传递网络的建立提供必要的技术支撑。

本文对商用光纤网络中使用的可重构 WSS 在时频传递过程中的性能进行了研究。研究了 WSS 的输出端口、输出损耗和输入光信号的偏振态变化对时频传递性能的影响,并在此基础上研究了含 WSS 的时频传递系统的长期开闭环特性以及闭环情况下 WSS 的动态切换对时频传递系统的影响。

2 实验原理

2.1 WSS 的工作原理与测试内容

目前商用的 WSS 主要基于液晶(LC)技术、硅基液晶(LCOS)技术和微机械系统(MEMS)技术。实验中选用的是基于 LCOS 技术的 WSS。基于 LCOS 技术的 WSS 在广播功能和灵活调节带宽上更有优势,可支持的维度和器件的端口数更多,对智能光网络中具有灵活带宽功能的可重构光分插复用器件有重要意义。

基于 LCOS 技术的 WSS 原理图如图 1 所示,主要由光纤阵列、偏振转换晶体、反射镜、透镜组、衍射光栅和 LCOS 芯片组成^[16]。由于衍射光栅与 LCOS 芯片对入射光的偏振态非常敏感,入射光束首先经过偏振转换晶体转变为线偏光,经反射镜和透镜组后入射到衍射光栅。衍射光栅将不同波长的光信号衍射到不同角度,使不同波长的光信号聚焦在 LCOS 芯片上的不同区域,最后通过对 LCOS 芯片上的液晶单元进行控制,调节光信号的波前,从而控制反射光的方向,达到将任意组合波长的光信号从选定端口输出的目的。

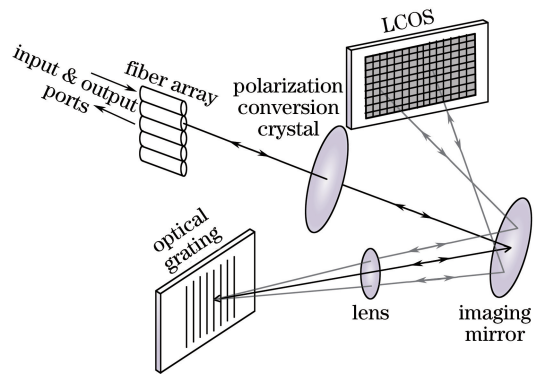


图 1 基于 LCOS 技术的 WSS 原理图
Fig. 1 Principle diagram of WSS based on LCOS technology

WSS 在工作过程中,其内部会产生背向散射光,将 WSS 用于时频传递时,首先要避免背向散射光的影响,因此实验中采用基于波分复用(WDM)的双向不同波长还回技术的时频传递方案,使这部分背向散射光被 WDM 隔离,从而消除背向散射光

对系统时频传递性能的影响。其次, WSS 各端口的输出光在 WSS 内部会经过不同的 LCOS 芯片区域和不同的光纤等, 各端口之间的光学特性也不完全一致, 因此需要研究 WSS 不同端口的时频传递特性。此外, WSS 内部需要进行偏振转换, 偏振转换晶体原理图^[17]如图 2(a)所示, 偏振转换晶体中的半波片是针对特定波长预先设定的, 无法调节, 然而 WSS 传输的光信号波长具有一定的带宽, 因此无法获得严格的线偏光。改变入射光偏振态将会改变 WSS 中的衍射光栅与 LCOS 芯片的光信号传递性能, 进而影响 WSS 的时频传递性能, 因此需要研究 WSS 入射光载波偏振态对系统时频传递性能的影响。

同时, WSS 属于有源器件, 其内部的 LCOS 基本单元^[17]需要通过控制电极上的电压来改变液晶排列, 进而改变光波相位与波前方向, LCOS 单元工作原理图如图 2(b)所示。WSS 在工作过程中可能存在有源强度噪声, 从而对系统时频传递性能产生影响, 所以也需要研究含 WSS 时频传递系统完整的开闭环性能。最后, WSS 最重要的功能是实现光纤路由切换, 而双向光纤时频传递系统在实际工作情况下属于闭环反馈控制系统, 若要实现链路切换, 就需要对反馈过程进行重建, 因此必须对 WSS 时频传递系统动态切换时链路的闭环重构和动态恢复能力进行研究。

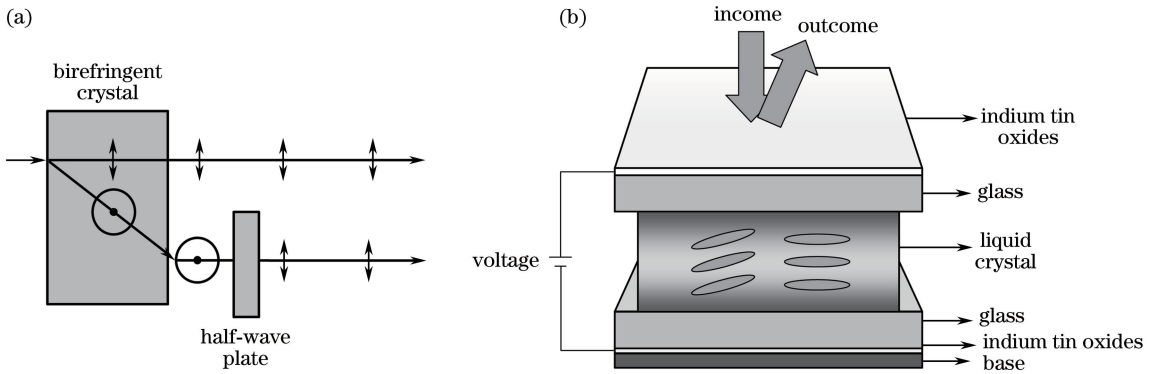


图 2 (a) 偏振转换晶体原理图; (b) LCOS 单元工作原理图

Fig. 2 (a) Principle diagram of polarization conversion crystal; (b) working principle diagram of LCOS unit

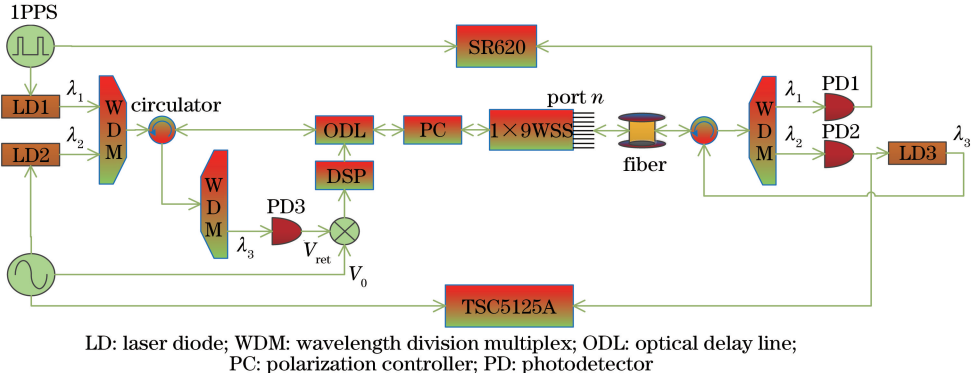
基于 LC、MEMS 和 LCOS 技术的 WSS 在原理上存在相似性^[15-18], 区别主要在于选光单元选用 LC、MEMS 还是 LCOS。首先都需要通过偏振转换晶体改变入射光偏振态, 然后通过光栅衍射分光, 因此基于 LCOS 的 WSS 时频性能的研究可以推广到其他类型的 WSS。

2.2 WSS 高精度时频传递性能测试系统

根据测试内容, 基于 WDM、光纤单纤双向还回和光学真时延补偿方案搭建了一套高精度光纤时频

传递系统^[8], 其中包含 WSS, WSS 时频性能测试系统示意图如图 3 所示。

对于频率信号, 系统中由信号源产生的初始信号 $V_0 = \cos(\omega t + \varphi_0)$, 其中 φ_0 为初始相位, ω 为角频率, t 为传输时间。将频率信号调制到波长为 1550.92 nm 的激光二极管上, 其光载波经过复用后, 依次通过光纤延时线、偏振控制器(PC)、WSS 和光纤链路, 最后经过光环行器并在远端解复用, 通过远地探测器 PD2 解调出频率信号。将解调出的



LD: laser diode; WDM: wavelength division multiplex; ODL: optical delay line; PC: polarization controller; PD: photodetector

图 3 WSS 时频性能测试系统示意图

Fig. 3 Schematic of testing system for time-frequency property of WSS

频率信号分为两路,一路信号作为远地输出信号 V_{out} ,另一路信号调制到波长为 1551.72 nm 的 LD3 上,沿相同链路回传至本地,最终经过环形器到达探测器 PD3,解调得到回传频率信号为

$$V_{ret} = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\varphi_L + 2\varphi_{WSSn} + 2\Delta\varphi_L + 2\Delta\varphi_{WSSn}), \quad (1)$$

式中 φ_L 为链路中除 WSS 以外的部分产生的固定相移, $\Delta\varphi_L$ 为对应部分产生的相位波动(主要受温度变化和振动的影响), φ_{WSSn} 为链路中 WSS 的 n 端口接入时引入的固定相移, $\Delta\varphi_{WSSn}$ 为 n 端口接入时 WSS 引起的相位波动(按照上文分析, WSS 端口存在差异性,当选取不同端口接入链路时,引入的固定时延与时延波动均可能有差异)。由于信号往返两次均经过了链路,因此各项系数均为 2。将 V_{ret} 与信号源分出的一路信号 V_0 进行混频鉴相,获得的鉴相信号为

$$V_{PD} \propto 2\varphi_L + 2\varphi_{WSS} + (2\varphi_{WSSn} - 2\varphi_{WSS}) + 2\Delta\varphi_L + 2\Delta\varphi_{WSSn}, \quad (2)$$

式中 $\varphi_L + \varphi_{WSS}$ 为补偿系统预先设定的工作点,可设为 $\varphi_C = \varphi_L + \varphi_{WSS}$, $\varphi_{WSSn} - \varphi_{WSS}$ 为 WSS 端口差异引入的相移,将该鉴相信号经过比例积分运算后,可得到误差信号 $V_{err} = -\Delta\varphi_L - \Delta\varphi_{WSSn} - (\varphi_{WSSn} - \varphi_{WSS})$,利用该信号反馈控制光纤延时线,使其产生相应的相移 φ'_L , $\varphi'_L = \varphi_L - \Delta\varphi_L - \Delta\varphi_{WSSn} - (\varphi_{WSSn} - \varphi_{WSS})$ 。光纤延时线在补偿链路相位波动的同时,也将补偿由 WSS 端口差异引入的相移,在 WSS 切换端口时链路将会有有一个重新建立平衡的过程。最终,链路中的相位变化得以补偿,在远端将获得相位稳定的频率信号输出 V'_{out} ,即

$$V'_{out} = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi'_L + \varphi_{WSSn} + \Delta\varphi + \Delta\varphi_{WSSn}) = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_L + \varphi_{WSS}). \quad (3)$$

对于秒脉冲(1PPS)时间信号,当频率信号作为误差信号控制链路达到稳定的同时,链路时延值 τ 也将达到稳定^[19-21]。

按原理图搭建实验系统,分别研究 WSS 端口差异、端口衰减和入射光偏振态对含 WSS 光纤链路时频传递性能的影响。进一步研究含 WSS 时频传递系统的长期开闭环特性。最后,在系统闭环情况下改变 WSS 的状态,研究含 WSS 光纤时频传递系统在闭环情况下的动态切换特性。

3 实验与结果分析

3.1 WSS 端口参数和入射光偏振态对时频传递性能的影响

研究了不同输出端口、相同端口不同光衰减和

进入 WSS 的光载波的不同偏振态对时频传递性能的影响。实验传递 100 MHz 频率信号和 1PPS 时间信号,开环测试链路中不含 1 km 光纤链路与 1 km 光纤延时线,且仅在测试偏振态的影响时才在链路中加入 PC,其余情况不含 PC。实验中通过串口程序控制 WSS 输出端口的切换和衰减比例的改变,通过 PC 改变 WSS 的入射光偏振态。

在光纤时频传递中,当不进行主动补偿时,频率和时间的长期稳定度主要由光纤环境的变化决定,因 WSS 引入的长期性能变化将被掩盖,因此在研究 WSS 端口参数与入射光偏振态对系统时频性能的影响时,主要考察系统开环状态下的短期稳定度。WSS 的长期时频特性将在下一节描述系统长期开闭环特性时进行讨论。测试中每组数据的采样时间为 700 s,根据 Allan 偏差百分比误差 $E_{error} = 1/[2(T/\tau - 1)]$,其中 T 为采样时间, τ 为平均时间,用 700 s 的采样结果计算秒稳定度,可得 Allan 偏差的百分比误差为 2.67%,与不同参数下的秒稳定度差异尺度相比,该结果符合要求。此外,测试结果中的最佳秒稳定度为 1×10^{-13} ,而不含 WSS 的系统秒稳定度为 2.2×10^{-14} ,系统本底稳定度远优于测试数据。

对 WSS 的 1, 3, 5, 9 端口分别进行测试时,所传递频率信号的 Allan 偏差如图 4(a)所示,各端口频率信号的秒稳定度分别为 1.19×10^{-13} , 1.86×10^{-13} , 1.3×10^{-13} , 1.1×10^{-13} ,不同端口传递频率信号时,稳定度存在明显差异。对应情况下时间信号的时延特性如图 4(b)所示,不同端口在时延特性上存在明显差异,其中 1 端口和 3 端口的差距最大,时延分别为 176863 ps 和 176549 ps,相差 314 ps。4 个端口时延抖动的均方根(RMS)值差异相对较小,最小值与最大值相差 2.6 ps。

波长通道衰减分别为 0 dBm、1.5 dBm 和 3 dBm 时,所传递频率信号的 Allan 偏差如图 5(a)所示,其中频率信号的秒稳定度分别为 1.19×10^{-13} , 1.79×10^{-13} , 2.5×10^{-13} ,随着信号的不断衰减,Allan 偏差曲线恶化,传递频率稳定度降低。相应情况下时间信号的时延特性如图 5(b)所示,随着信号的不断衰减,传输时延先从 176869 ps 增加至 177239 ps,最后达到 177576 ps。时延抖动的 RMS 值从 10.8791 ps 增加至 13.5532 ps,最后达到 14.0439 ps。随着端口输出信号的不断衰减,时间信号的传输时延和不稳定性都将增大。因此,为了得到较好的时频传递性能,应该让 WSS 在低衰减状态下工作。

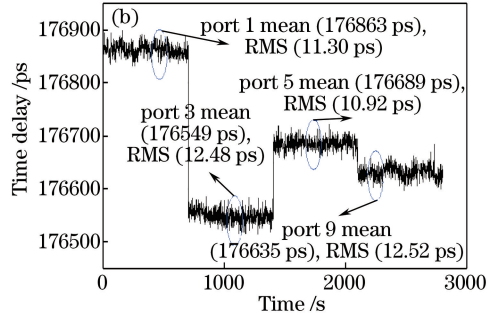
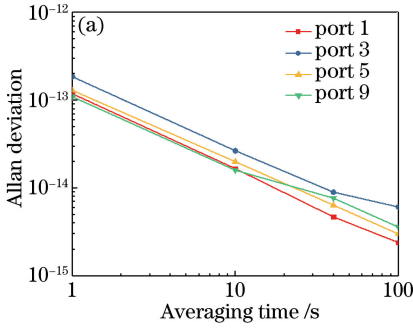


图 4 不同传输端口(a)频率信号的 Allan 偏差(ADEV)及(b)时间信号的时延特性

Fig. 4 (a) Allan deviation (ADEV) of frequency signal and (b) time delay of time signal for different ports

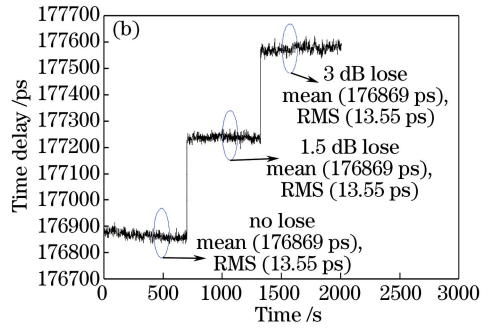
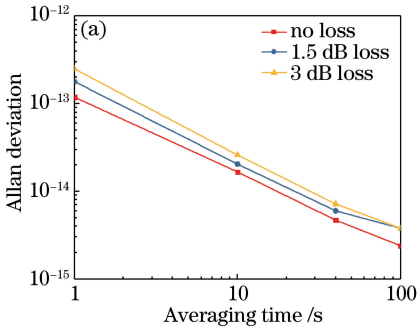


图 5 同一端口不同衰减比例下(a)频率信号的 ADEV 及(b)时间信号的时延特性

Fig. 5 (a) ADEV of frequency signal and (b) time delay of time signal under different attenuation ratios for same port

WSS入射光在三种不同偏振态下频率信号的 Allan 偏差如图 6(a)所示,由图可见,在三种偏振态下,频率信号开环传递的秒稳定度分别为 1.86×10^{-13} , 1×10^{-13} , 2.4×10^{-13} ,不同偏振态下频率信号的传递性能存在明显差异。相应情况下时间信号的时延特性如图 6(b)所示,不同偏振态下,链路时延值分别为 184149, 184215, 184054 ps,同样存在较明显的差异,时延抖动的 RMS 值在 4 ps 以内。

根据基于 LCOS 的 WSS 的工作原理,可得 WSS 的分光元件衍射光栅与 LCOS 芯片的工作对于信号光偏振态是敏感的,而偏振转换晶体无法得到严格的线偏光,因此调节 WSS 入射光的偏振态将会影响 WSS 的性能。实际应用中可以通过改变 WSS 入射光的偏振态保障系统时频传递性能,或通过定制 WSS,使其中的 PC 件与所使用的光载波波长相匹配。

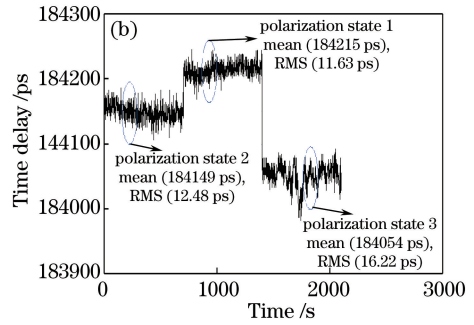
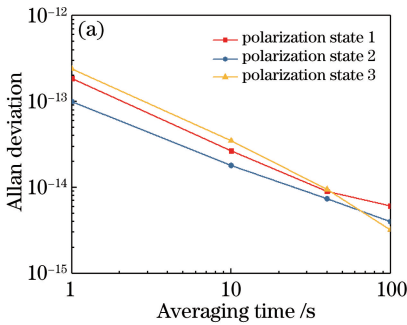


图 6 同一端口不同偏振态下(a)频率信号的 ADEV 及(b)时间信号的时延特性

Fig. 6 (a) ADEV of frequency signal and (b) time delay of time signal under different polarizations for same port

3.2 包含 WSS 的传递链路的长期开闭环时频特性

将 300 MHz 频率信号作为误差鉴相信号,在链路中加入长度约为 1 km 的光纤链路和长度约为 1 km 的温控光纤延时线,通过频率信号的双向不同

波长还回实现系统闭环^[8]。

在开环与闭环情况下,300 MHz 频率信号的相位波动如图 7(a)所示,1PPS 时间信号的传播时延波动如图 7(b)所示。由图 7(a)可见,开环情况下频

率信号相位波动为 52.32 mrad,闭环情况下相位波动减小至 0.82 mrad 且相位差不再向某个方向漂移。由图 7(b)可见,开环情况下时间信号时延波动为

136 ps,闭环情况下时延波动减小至 84 ps 且时延值不再向某个方向漂移。闭环反馈补偿使得链路趋于稳定,相位差与时延值围绕固定值发生细微振动。

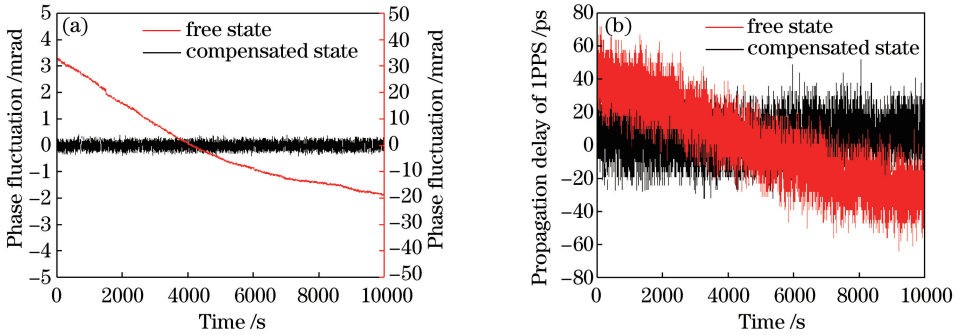


图 7 (a) 300 MHz 频率信号的相位波动;(b) 1PPS 时间信号的传播延时波动

Fig. 7 (a) Phase fluctuation of 300 MHz frequency signal; (b) propagation delay fluctuation of 1PPS time signal

在开环与闭环情况下,5125 比相仪测得的频率信号的 ADEV 如图 8(a)所示,时间信号的时间偏差(TDEV)如图 8(b)所示。通过比较频率信号 ADEV,可得开环和闭环情况下频率信号的秒稳定度分别为 7.50×10^{-14} 和 7.41×10^{-14} ,1000 s 稳定度分别为 3.3×10^{-15} 和 1.24×10^{-15} ,系统实现闭环后对短期稳定度影响不大,但是长期稳定度得到明显

改善。通过比较时间信号的 TDEV,可得开环和闭环情况下时间信号的秒稳定度分别为 9.69×10^{-12} 和 9.41×10^{-12} ,1000 s 稳定度分别为 8.84×10^{-13} 和 7.42×10^{-13} ,该实验结果说明含 WSS 的闭环锁定特征和效果与不含 WSS 的情况^[7]基本一致,即 WSS 的引入不会对链路闭环控制造成不可控制的影响。

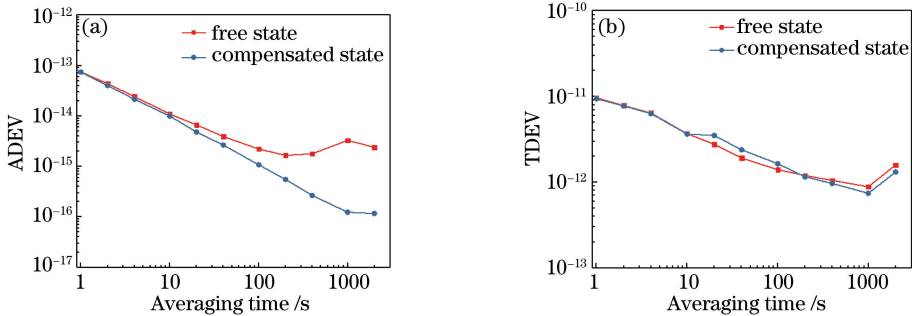


图 8 (a) 频率信号的 ADEV;(b) 1PPS 时间信号的 TDEV

Fig. 8 (a) ADEV of frequency signal; (b) TDEV of 1PPS time signal

3.3 WSS 动态切换过程对系统时频性能的影响

在实际商用光纤链路中传递时频信号时,存在复杂的链路切换和路由变化,因此有必要研究 WSS 动态切换对系统时频传递性能的影响。

实验研究了系统在闭环稳定情况下,改变 WSS 参数对链路稳定性的影响以及 WSS 参数改变后链路的重构能力。在闭环稳定链路中,调节 WSS 端口衰减先由 0 dBm 上升至 2 dBm,再由 2 dBm 上升至 4 dBm,最后将 WSS 端口通道关闭 50 s 之后重新打开,动态切换过程测试中频率信号的相位波动和时间信号的时延波动如图 9 所示。

实验过程中频率信号的相位波动如图 9(a)所示,曲线平稳代表链路稳定,三个突变分别由两次改

变链路衰减和关闭交换机 50 s 后重新打开引起。WSS 通道衰减 2 dBm 及 4 dBm,关闭延时线 50 s 后打开链路重新达到闭环稳定所用的稳定重构时间分别为 92.8,119.1,214.6 s。当链路产生突然衰减时,相位能重新快速达到稳定状态,而关闭交换机端口将导致链路不能形成闭环反馈,使慢变温控光纤延时线的温度偏离补偿链路所需的值,链路重新达到稳定的时间比改变衰减的时间更长,交换机关机时间越短,偏离量越小,则可以越快达到稳定,反之越慢。稳定重构时间也与所传微波信号的频率有关,微波信号频率越高,则可以越快达到稳定。

实验过程中 SR620 测试时间信号的时延波动如图 9(b)所示,在端口无衰减、衰减为 2 dBm、衰减

为 4 dBm 和关闭交换机 50 s 后打开情况下链路时延平均值分别为 8147954, 8148403, 8149194, 8147907 ps, 标准差分别为 10.67, 10.92, 14.42, 11.19 ps。时延值随着 WSS 衰减的增大而增大, 时延不稳定度随着 WSS 衰减的增大而劣化, 与开环

的情况一致。此外, 在关闭交换机 50 s 后再打开情况下, 恢复的时延值与关闭之前的时延值相差 47 ps, 表明闭环重构过程的相位基准点恢复是不一致的, 这需要在后续实验中进行进一步改进, 从而增加系统的一致性。

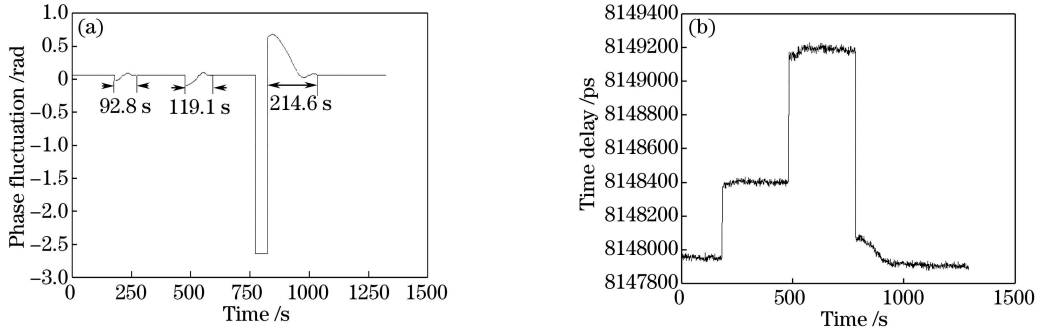


图 9 (a) 频率信号的相位波动; (b) 时间信号的时延波动

Fig. 9 (a) Phase fluctuation of frequency signal; (b) time delay fluctuation of time signal

4 结 论

在可实现双向不同波长还回时频同传的光纤时频传递系统中, 分别研究了 WSS 自身端口参数和入射光偏振态对 WSS 时频传递性能的影响, 并对含 WSS 时频传递系统的长期开闭环特性和闭环情况下的动态切换特性进行了研究。实验结果表明, WSS 自身端口参数和入射光偏振态均会影响 WSS 的时频传递性能, WSS 不同端口的频率信号和时间信号传递稳定度与传递时延不同; 同一端口的衰减增大时, 频率信号和时间信号传递稳定性都会降低, 传递时延增加; 当改变 WSS 的入射光偏振态时, 频率信号和时间信号传递稳定性也会有所改变。因此, 实际应用中应尽量降低 WSS 通道的衰减, 适当调节 WSS 入射光的偏振态, 以提高所传频率信号和时间信号的稳定性, 改变参数时应注意时延值校准。闭环锁定对信号传递长期稳定度有明显的改善, WSS 的引入不会对链路闭环控制造成不可控制的影响。对于 WSS 在闭环链路中的动态切换过程, 系统具有较好的重建能力, 但是链路闭环稳定重建时间依赖于链路实际情况。通过实验系统地测试了 WSS 的时频传递性能, 为今后在含 WSS 商用光纤网络中进行时频信号分发与同步提供了一定的技术基础。

参 考 文 献

[1] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, *et al.* Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks [J]. *Review of Scientific*

Instruments, 2007, 78(2): 021101.
 [2] Macias-Valadez D, Santerre R, LaRochelle S, *et al.* GPS-over-fiber architecture with relative cable delay monitoring for high precision GPS applications[C]// *Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2009: 622-634.
 [3] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
 [4] Rost M, Piester D, Yang W, *et al.* Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps[J]. *Metrologia*, 2012, 49(6): 772-778.
 [5] Chen W, Cheng N, Liu Q, *et al.* High precision time and frequency transfer on 275 km Beijing-Shanghai fiber backbone [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0706001.
 陈炜, 程楠, 刘琴, 等. 275 km 京沪线光纤干线高精度时频传递研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0706001.
 [6] Liu Q, Han S L, Wang J L, *et al.* High precise frequency transfer over a 430 km fiber backbone network using cascaded system[J], *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0906001.
 刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 等. 采用级联方式实现 430 km 高精度频率传递 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0906001.
 [7] Liu Q, Chen W, Xu D, *et al.* Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a cascaded fiber link of 230 km[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0305006.
 刘琴, 陈炜, 徐丹, 等. 采用级联方式在 230 km 光

- 纤链路中同时实现频率传递和时间同步[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305006.
- [8] Yang F, Xu D, Liu Q, *et al.* Accurate transmission of time and frequency signals over optical fibers based on WDM and two way optical compensation techniques [C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Conference, 2013: 14392674.
- [9] Chen W, Xu D, Cheng N, *et al.* Fiber based radio frequency dissemination scheme to multiple users [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings, 2015: 379-386.
- [10] Krehlik P, Sliwczynski Ł, Buczek Ł, *et al.* Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(10): 2844-2851.
- [11] Chen W, Liu Q, Cheng N, *et al.* Joint time and frequency dissemination network over delay-stabilized fiber optic links[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 7901609.
- [12] Accurate time and frequency comparison and dissemination through optical telecommunication networks[EB/OL]. [2017-07-07] http://www.ptb.de/emrp/neatft_home.html.
- [13] Amoozegar F, Paal L, Layland J, *et al.* Uplink array system of antennas for the deep space network [C]. 2004 IEEE Aerospace Conference, 2004, 2: 8274213.
- [14] Zong L, Huang X D, Wang T, *et al.* A novel tunable DeMUX/MUX solution for WSS-based ROADMs and WXC nodes[C]. IEEE Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007: 9682536.
- [15] Wall P, Colbourne P, Reimer C, *et al.* WSS switching engine technologies [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2008: OWC1.
- [16] Baxter G, Frisken S, Abakoumov D, *et al.* Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements[C]. IEEE Optical Fiber Communication Conference, 2006: 8977555.
- [17] Luo D T. Research of wavelength selective switch based on LCOS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
杨东堂. 基于 LCOS 波长选择开关的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [18] Wan Z W. Research on wavelength selective switch based on MEMS technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
宛政文. 基于 MEMS 技术的波长选择开关研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [19] Li X Y, Zhu Y, Lu L, *et al.* Study on high precision disciplined time-frequency transferring experiments through optical fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506004.
李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递时延研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506004.
- [20] Cheng N, Chen W, Liu Q, *et al.* Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42: 0705002.
程楠, 陈炜, 刘琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0705002.
- [21] Cheng N, Chen W, Liu Q, *et al.* Feedback control system of electro-optic modulator used for transferring one pulse per second[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0905002.
程楠, 陈炜, 刘琴, 等. 应用于秒脉冲传递的电光调制器反馈控制系统[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905002.