

基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递

王灵东¹ 吴龟灵^{1,2*} 沈建国^{1,3} 胡亮¹ 李新碗¹ 陈建平^{1,2}

¹上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

²上海交通大学, 上海市北斗导航与位置服务重点实验室, 上海 200240

³浙江师范大学数理信息与工程学院, 浙江 金华 321004

摘要 提出了一种基于光纤的时间和频率同时传递方案。采用基于温控光纤延迟线和压电陶瓷(PZT)光纤延迟线的光学相位噪声补偿技术实现高稳定的频率传递。同时,通过波分复用技术在稳定的光纤链路上进行基于时分复用的高精度同纤同波双向时间传递。在 100 km 的光纤链路上进行了时间和频率同时传递实验,光纤频率传递链路的秒稳定度和天稳定度分别达到 5.25×10^{-14} 和 1.9×10^{-17} ;双向时间比对在 1 s 处的时间传递秒稳定度优于 40 ps,在平均时间 1000 s 处优于 1.5 ps。时间差抖动的峰-峰值和标准差分别小于 400 ps 和 45 ps。

关键词 光纤光学;光纤频率传递;光纤时间传递;相位补偿;频率稳定性;时延抖动精度

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0406004

Simultaneous Transfer of Time and Frequency Over 100 km Fiber Link

Wang Lingdong¹ Wu Guiling^{1,2} Shen Jianguo^{1,3} Hu Liang¹ Li Xinwan¹ Chen Jianping^{1,2}

¹State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

²Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location Services, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

³College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Zhejiang, Jinhua 321004, China

Abstract A simultaneous transfer scheme of time and frequency over optical fiber is presented. High-stable frequency transfer is realized by adopting the active phase noise compensation method based on the temperature-controlled fiber delay line and the piezoelectric ceramics transducer (PZT) delay line. At the same time, high precision two-way time transfer using bidirectional time division multiplexing transmission is carried out on the stable optical fiber link through wavelength division multiplexing technology. A simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber is demonstrated. The results show that the frequency transfer can reach stabilities of 5.25×10^{-14} at 1 s and 1.9×10^{-17} at one day, and the time transfer can reach stabilities of 40 ps at 1 s average time and 1.5 ps at 1000 s average time. The peak-peak value and standard deviation of the two-way time transfer are below 400 ps and 45 ps, respectively.

Key words fiber optics; frequency transfer over optical fiber; time transfer over optical fiber; phase compensation; frequency stability; time delay jitter precision

OCIS codes 060.2360; 060.5625; 120.3940

1 引 言

目前商用化的铯原子钟天稳定度已经达到了 10^{-16} 的量级。现有的基于卫星的长距离时间频率传递技

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61127016, 61107041)、浙江省自然科学基金(LY12F05002)

作者简介: 王灵东(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤时间频率传递方面的研究。E-mail: clsdyn@sjtu.edu.cn

导师简介: 李新碗(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事快速光交换、光电子器件等方面的研究。

E-mail: lixinwan@sjtu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wuguiling@sjtu.edu.cn

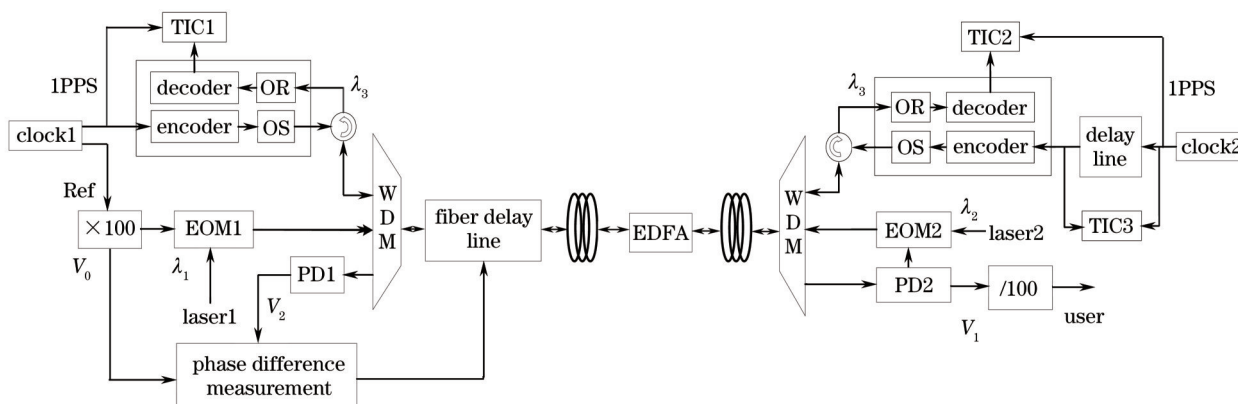
术,其频率传递天稳定度和时间传递精度只能达到 10^{-15} 和 0.5 ns 的水平,无法满足频率标准比对和高精度时间同步的要求。光纤传输具有带宽大、损耗小、抗干扰性强等优点,具备实现高精度时间频率传递的巨大潜力,引起了国内外的广泛关注^[1-5]。

全球卫星导航系统、甚长基线干涉测量等应用需要满足频率同源、时间同步的要求,因此需要高精度的时间和频率同时传递技术来提高系统的性能。Śliwczynski等^[6]将时间信号嵌入到频率信号中,并通过双向波分复用传输实现了 420 km 的时间和频率的同时传递。Yang等^[11]将时间和频率信号分别加载到不同波长上进行 60 km 的光纤传输,在远端利用另外两个不同波长的光波将时间信号和频率信号传回。上述两种双向波分复用的传输方案解决了后向散射的问题,但存在双向链路的不对称性,需要复杂的光纤链路标定。Wang等^[7]将时间和频率信号加载到不同波长进行同时传输,在远端将信号通过环形器送回到本地端。Yin等^[8]将携带时间信号的射频信号和频率信号加载到同一波长上进行传输,在远端通过法拉第旋转镜将信号返回至本地端。上述两种方案中往返的光信号波长相同,保证了链路的双向对称性,但无法消除后向散射噪声的影响。

本文中时间传递部分采用了双向时分复用同纤同波的方案,在保持链路对称性的同时,有效地抑制了后向散射噪声的影响。同时通过波分复用技术将基于时分复用的时间传递与基于光学相位噪声补偿的频率传递相结合,研究了时间和频率同时传递时系统的性能指标。在 100 km 光纤链路上实现了秒稳定度和天稳定度分别为 5.25×10^{-14} 和 1.9×10^{-17} 的频率传递,以及峰-峰值小于 400 ps ,标准差为 45 ps 的高精度双向时间传递。

2 原理与系统方案

光纤时间频率同时传输系统的原理框图如图1所示。系统由光纤频率传递和光纤时间传递两部分构成,并通过波分复用在同一根光纤上实现时间和频率的同时传递。光纤频率传递利用光学相位噪声补偿方案对光纤链路的相位抖动进行补偿。光纤时间传递采用双向时分复用的同纤同波传输方案。



TIC: time interval counter; 1PPS: one pulse per second; EDFA: erbium doped fiber amplifier; EOM: electro-optic modulator; WDM: wavelength division multiplexing; OR: optical receiver; OS: optical sender; PD: photoelectric detector

图1 光纤时间和频率同时传输原理框图

Fig.1 Principle diagram of the time and frequency transferring system based on the optical fiber

2.1 光纤频率传递

基于光学相位噪声补偿的光纤频率传递的基本原理是将传递到远端的频率信号原路返回与本地发送的频率信号进行比较得到链路变化引起的相位抖动,利用得到的相位差信号控制光纤延迟线以稳定光纤链路,从而实现稳定的频率传递。为了减小光纤链路本底噪声对传递频率稳定度的影响^[9],以及提高相位检测的灵敏度,本地端将待传递的原子钟频率倍频到一个高频后通过波长为 λ_1 的光波传给远端。远端将接收到的信号加载到波长为 λ_2 的光波上通过光纤链路返回给本地端。返回信号采用不同波长的光载波是为了抑制往返两路光信号之间的后向散射干扰。

若倍频得到的频率信号为 $V_0 \propto \cos(\omega t + \Phi_0)$, 光纤延迟线和光纤传输链路产生的相位差分别为 Φ_c 和 Φ_p , 远端接收到的频率信号可表示为

$$V_1 \propto \cos(\omega t + \Phi_0 + \Phi_c + \Phi_p), \quad (1)$$

往返的过程中光纤链路和光纤延迟线引入的相位差近似相等, 则返回本地端的频率信号可表示为

$$V_2 \propto \cos(\omega t + \Phi_0 + 2\Phi_c + 2\Phi_p), \quad (2)$$

将鉴相得到返回信号 V_2 与发射信号 V_0 的相位差 $(2\Phi_c + 2\Phi_p)$ 作为控制光纤延迟线的变量, 并通过负反馈使其保持为一个常量, 即 $2\Phi_c + 2\Phi_p = k$, 代入(1)式有

$$V_1 \propto \cos\left(\omega t + \Phi_0 + \frac{k}{2}\right), \quad (3)$$

可见, 远端得到的频率信号与发送的信号只相差一个恒定的相位。

2.2 光纤时间传递

为了避免双向信号同纤同波传输中的后向散射干扰, 采用了基于双向时分复用的光纤时间传递方案^[10]。本地端的时间信号(1PPS)经过时间编码后经光收发模块(波长为 λ_3)输入光纤链路发送给远端。时间码从本地发出后, 停止向光纤链路输入光信号。远端的时间信号通过电延迟线的调整, 在接收到本地端的时间码之后经过同一个波长 λ_3 发送给本地端。由于两端在不发送时间码期间不向光纤链路输入光信号, 因此在任意时刻光纤链路上只有单向传输的光信号, 从而避免了后向散射对信噪比的恶化^[11]。

设本地 1PPS 与从接收到的时间码中恢复的 1PPS 之间的时间差分别为 T_1 和 T_2 。电延迟线调整的时延为 T_3 , 瞬时钟差为 Δt , 则

$$T_1 = t_{tx2} + t_{21} + t_{rx1} + \Delta t + T_3, \quad (4)$$

$$T_2 = t_{tx1} + t_{12} + t_{rx2} - \Delta t, \quad (5)$$

式中 t_{tx1} 和 t_{rx1} 分别为本地端的发送时延和接收时延; t_{tx2} 和 t_{rx2} 分别为远端的发送时延和接收时延; t_{21} 和 t_{12} 分别表示从本地端到远端和从远端到本地端的传输时延。(4)、(5)两式相减可得:

$$\Delta t = \frac{1}{2}[t_{rx1} - t_{tx2} + t_{rx2} - t_{rx1} + (t_{12} - t_{21}) + (T_1 - T_2) - T_3]. \quad (6)$$

考虑到同纤同波长的传输, 可认为 $t_{12} = t_{21}$, 则

$$\Delta t = \frac{1}{2}[(T_1 - T_2 - T_3) + (t_{rx1} - t_{tx2} + t_{rx2} - t_{rx1})], \quad (7)$$

式中 $t_{rx1} - t_{tx2} + t_{rx2} - t_{rx1}$ 表示两端发送和接收时延的不对称性, 可通过标定得到^[12]。

往返两路信号在不同的时段进行传输, 会引起传输时延的不对称性。温度是最主要的影响因素。温度引起的双向传输时延的不对称性可近似表示为 $\Delta t = nLa\Delta T/c$ 。其中, n 为光纤折射率(1.45 左右); L 为光纤长度; ΔT 为时分传输间隔内的温度的变化; c 表示光速; a 为光纤的温度系数(对普通单模光纤约为 $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)^[13]。

实际应用中, 光纤一般埋在地下 1 m 左右。采用正弦温度变化模型^[13]。当取每天和每小时的温度变化幅度分别为 0.5°C 和 0.05°C 时, 对 3000 km 时分复用光纤链路, 取 $\Delta t = 50 \text{ ms}$, 时分复用引起的不对称性小于 0.2 ps , 基本可以忽略。

3 实验结果与讨论

光纤时间频率同时传输实验系统如图 2 所示。时钟源为输出频率为 10 MHz 的铷钟(Symmetricom, 8040c), 倍频后的频率信号为 1 GHz。本地端和远端频率传递的波长分别为 1550.92 nm、1550.12 nm, 时间传递的波长为 1549.32 nm。本地端的色散补偿光纤(DCF)用来减小色散对系统底噪的恶化^[14]。链路中采用一个双纤双向掺铒光纤放大器(EDFA)和一个单纤双向 EDFA 来分别补偿频率传递和时间传递的功率损耗。在相位检测与补偿控制系统中, 采用了双混频时域差分技术以提高相位差信号的测量精度, 并通过改进的积分分离的 PID(proportional integral derivative)算法控制商用压电陶瓷延迟线(PZTDL)和自主设计的温控延迟线(TCFDL, 延迟范围为 7.3 ns)进行主动相位噪声的补偿^[15-16]。

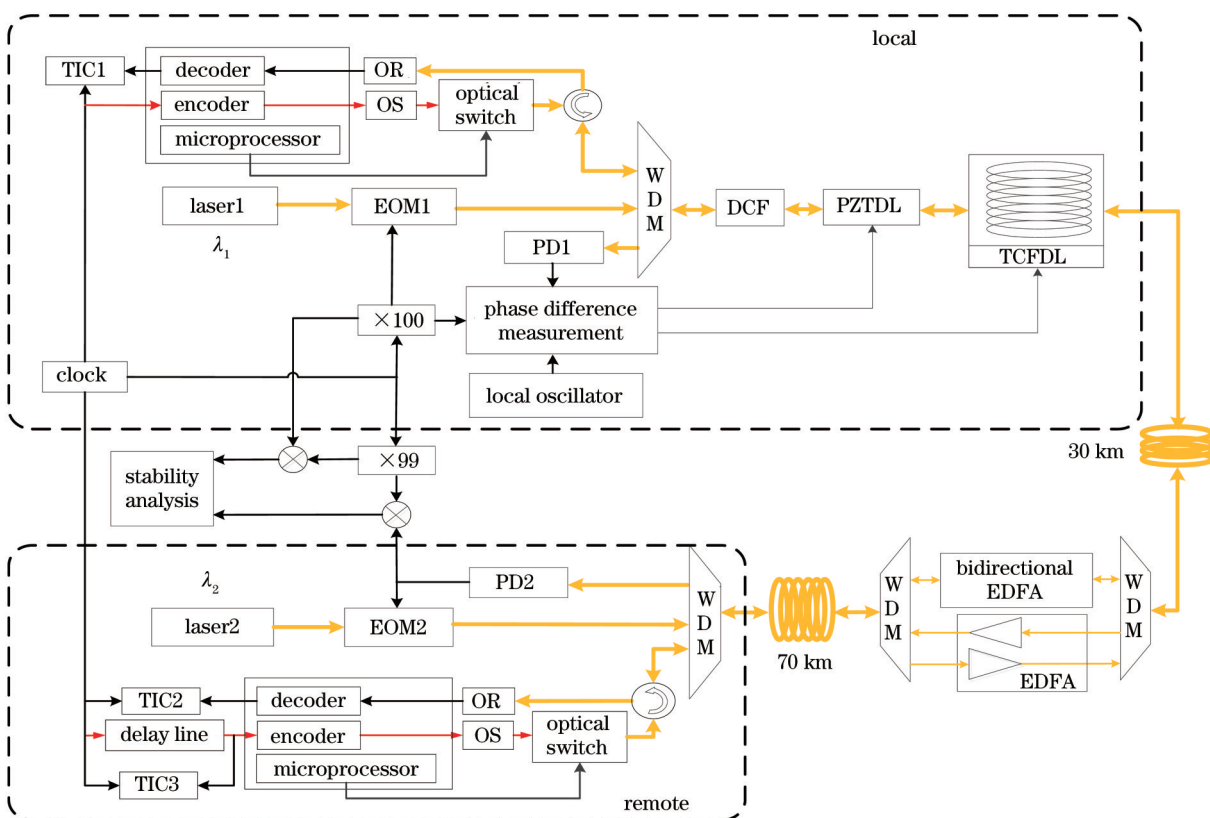


图 2 实验框图

Fig.2 Experimental diagram

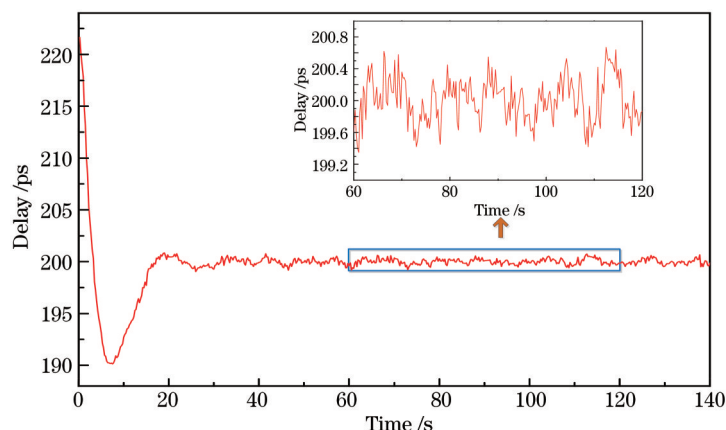


图 3 光纤频率传递相位锁定过程测量的相位差

Fig.3 Phase interval test results of the frequency transfer over optical fiber

图 3 为光纤频率传递相位锁定过程中测得的相位差。由图可见,在经历短暂的波动之后,代表相位差抖动的时间间隔变化逐渐减小,最终稳定到一个围绕设定点上下波动的小阻尼振荡。稳定后,100 km 链路的补偿控制精度(峰-峰值)可以达到 ± 0.6 ps (见图 3 插图)。

图 4 为有、无补偿情况下,测得的光纤频率传递系统相位噪声和阿伦方差。有补偿传递连续测量了 12 d。在无补偿情况下连续测量了 8 d。由图 4(a)可见,补偿后频率传递的相位噪声在 0~100 Hz 带宽内得到了改善。由相位噪声和频率稳定度的关系可知^[17],近端相位噪声的大小与阿伦方差的长期稳定度性有着直接联系。由图 4(b)可见,补偿可以有效改善频率传递的稳定度,尤其是长期稳定度。有补偿情况下频率传递的秒稳定度为 5.25×10^{-14} ,天稳定度为 1.9×10^{-17} 。图中同时给出了测试系统的底噪。可见其稳定度远低于传递系

统的稳定度,不影响测试结果。

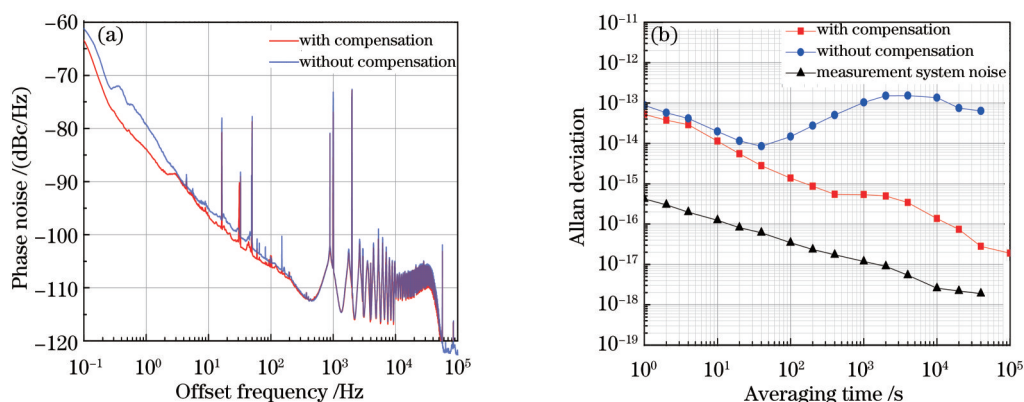


图4 有、无补偿情况下,光纤频率传递的(a)相位噪声和(b)阿伦方差

Fig.4 (a) Phase noise spectral density and (b) Allan deviations of the system with and without compensation

分别在有补偿和无补偿的 100 km 光纤频率传递链路上同时进行了基于双向时分复用的时间传递。有补偿情况下,双向时间传递的峰-峰值小于 400 ps,标准差优于 45 ps。图 5 为用时间方差(TDEV, time deviation)表示的时间传递稳定度^[18]。两种情况下,时间传递的稳定度均优于 40 ps。平均时间小于 300 s 时,有补偿和无补偿光纤链路时间传递的稳定度几乎没有差别;在平均时间大于 300 s 时,有补偿链路的时间传递的稳定度优于无补偿链路时间传递的稳定度。这是因为短期稳定度主要受系统本底噪声的影响,而长期稳定度与温度、波长等对光纤链路双向对称性的影响有关。相位补偿可以有效降低温度等对光纤链路长度长期稳定性的影响,因而可以提高时间传递的长期稳定度。

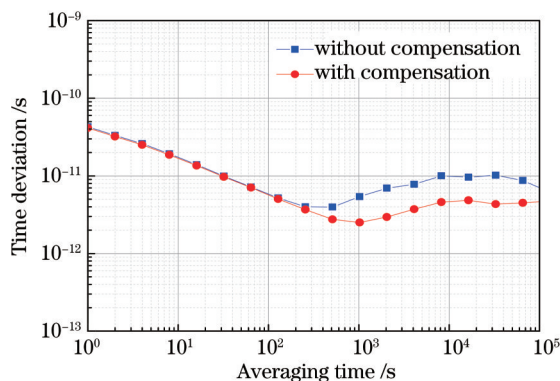


图5 经过相位补偿和未经过相位补偿光纤链路时间传递稳定度

Fig.5 Stability of time signal transfer with and without phase compensation

本文所用的时间传递方案采用双向同纤同波长的传递方式,极大保证了双向传输时延的对称性,可以提高时间传递的准确性。在不同长度的光纤链路上(2 m~300 km)进行了时分复用双向时间比对^[10]。结果表明:在 300 km 范围内,链路可以保持很高的对称性,通过不同距离的光纤测得的钟差间的最大偏差小于 25 ps,达到测量仪器 SR620 的噪底。

4 结 论

提出了一种通过波分复用将基于光学相位噪声补偿的频率传递与基于时分复用的时间传递结合在一起的光纤时间和频率同时传递方案,进行了 100 km 光纤时间和频率同时传递实验。实验结果表明,100 km 光纤频率传递链路的秒稳定度和天稳定度分别达到了 5.25×10^{-14} 和 1.9×10^{-17} 。双向时间传递的秒稳定度优于 40 ps。在平均时间大于 300 s 时,经过相位补偿链路时间传递的稳定度优于 5 ps。

参 考 文 献

1 Fei Yang, Dan Xu, Qin Liu, *et al.*. Accurate transmission of time and frequency signals over optical fiber based on WDM and two

- way optical compensation techniques [C]. CLEO: Applications and Technology, 2013, JTu4A: JTuA.99.
- 2 Olivier Lopez, Amale Kanj, Paul-Eric Pottie, *et al.*. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. Appl Phys B, 2012, 110(1): 3–6.
- 3 Yu longqiang, Lu lin, Wang Rong, *et al.*. Analysis of the Sagnac effect and its influence on the accuracy of time transfer system by the optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306003.
于龙强, 卢麟, 王荣, 等. Sagnac效应对光纤时间传递精度的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306003.
- 4 Li Xiaoya, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.*. Study on high precision disciplined time–frequency transferring experiments through optical fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 34(5): 0506004.
李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究[J]. 光学学报, 2013, 34(5): 0506004.
- 5 Zhang Fan, Hou Dong, Guo Haipeng, *et al.*. Timeing delay jitter compensation of a fiber link with active delay compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 671–675.
张帆, 侯冬, 郭海鹏, 等. 光纤时间频率传输的时延抖动主动补偿[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 671–675.
- 6 Łukasz Śliwczyński, Przemysław Krehlik, Albin Czubla, *et al.*. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km [J]. Metrologia, 2013: 133–145.
- 7 B Wang, C Gao, W L Chen, *et al.*. Precise and continuous time and frequency Synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 556–560.
- 8 Feifei Yin, Zhongle Wu, Yitang Dai, *et al.*. Stable fiber–optic time transfer by active radio frequency phase locking [J]. Opt Lett, 2014, 39(10): 3054–3057.
- 9 Santarelli G, Narbonneau F, Lours M, *et al.*. G. High performance frequency dissemination for metrology applications with optical fibers [C]. Frequency Control Symposium and Exposition, 2005: 29–31.
- 10 L Hu, G Wu, H Zhang, *et al.*. A 300–kilometer optical fiber time transfer using bidirectional TDM dissemination [C]. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting 2014: 41–44.
- 11 Łukasz Śliwczyński, Jacek Kołodziej. Bidirectional optical amplification in long–distance two–way fiber–optic time and frequency transfer systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(1): 253–262.
- 12 M Rost, D Piester, W Yang, *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.
- 13 Shen Jianguo, Wu Guiling, Hong Zehua, *et al.*. Influence of temperature on the stability of the fiber based frequency transmission system and its compensation [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(3): 377–381.
沈建国, 吴龟灵, 洪泽华, 等. 温度对光纤频率传输系统稳定性的影响及其补偿[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 377–381.
- 14 O Lopez, A Amy-Klein, C Chardonnet, *et al.*. 86 km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer [J]. The European Physical Journal D, 200, 48(1): 35–41.
- 15 Chen Ruihao, Wu Guiling, Zou Weiwen, *et al.*. Optical phase compensation system design for frequency transfer over optical fiber [J]. Optical Communication Technology, 2014, (4): 1–4.
陈瑞昊, 吴龟灵, 邹卫文, 等. 光纤频率传递光学相位补偿系统设计[J]. 光通信技术, 2014, (4): 1–4.
- 16 Wu Lei, Shen Jianguo, Wu Guiling, *et al.*. Design of tunable fiber true–time delay lines with continuous wide dynamic range [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2012, (3): 15–17, 28.
吴雷, 沈建国, 吴龟灵, 等. 大动态范围连续可调光纤延迟线的设计与制作[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2012, (3): 15–17, 28.
- 17 Li Zongyang. Time and Frequency Measurement [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 228–229.
李宗扬. 时间频率计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 228–229.
- 18 Li Xiaohui, Yang Xuhai, Liu Ya. Precision Measurement of Time and Frequency Signal [M]. Beijing: Science Press, 2010: 197–214.
李孝辉, 杨旭海, 刘娅. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 197–214.

栏目编辑: 王晓琰