

超长距离高精度光纤双向时间传递

吴龟灵^{1,2}, 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, 北斗导航与位置服务上海市重点实验室, 上海 200240

摘要 采用双向时分复用同纤同波传输(BTDM-SFSW)方案进行了超长距离高精度双向时间传递实验, 设计了改进的IRIG-B时间码和相应的低抖动、自对准时间编/解码器。在2000 km的光纤环路上, 实现了稳定度优于89 ps/s和23 ps/10⁵ s时间传递。针对现有单纤双向光放大器受后向散射噪声影响, 以及无法有效利用现有光网络资源的问题, 结合BTDM-SFSW的特点, 提出了一种单向放大单纤双向传输的方法; 在6000 km的光纤环路上, 实现了稳定度优于190 ps/s和61 ps/10⁵ s时间传递。计算的时间传递不确定度小于70 ps, 并进行了实验验证。

关键词 时间传递; 光纤传输; 双向光放大; 不确定度

精准的时间传递和同步是国家/国际时间频率体系、全球导航定位、大地测量与观测、精密计量、深空探测等前沿科学研究和重大基础设施中的共性基础问题和关键技术之一^[1-4]。为了不恶化高精度时间频率基准的性能, 时间传递的精度必须比被传递的时间频率基准高一个量级以上。现有的时间传递方案中, 基于同轴电缆的时间传递受限于电缆带宽和损耗, 距离限制在1 km以内。通过卫星链路的时间传递, 如双向时间传递(TWSTT)、GPS共视(GPS CV)等, 距离可达数千上万km。但由于环境(温度、电离层变化等)对自由空间传输通路的干扰, 其时间传递精度限制在数百ps量级。随着新的时间频率基准(如: 冷原子微波原子钟的天稳定度已达10⁻¹⁶量级^[5], “光钟”的秒稳定度已达10⁻¹⁷^[6])的发展, 亟需研究发展新的超长距离高精度时间传递方法与技术。

由于光纤通路受外界扰动相对较小、不受电磁干扰、不存在多径效应, 其稳定性明显优于自由空间通路。同时, 光纤通路还具有低损耗、高可靠、大带宽等优点。因而, 光纤时间频率传递是一种能突破现有技术限制、实现超长距离高精度时间频率传递的有效途径, 引起了技术发达国家政府和研究机构的高度关注^[7-14]。

时间传递要扣除链路传输时延、实现两端定时信号(如1 PPS)相位的精确对准。基于光纤的高精度时间传递主要有环回法(round-trip)和双向时间比对法(two-way)两种。这两种方案都是基于双向传输时延对称的假设, 需要同时保证双向传输延时的对称性和抑制后向散射噪声的影响。目前普遍采用的同纤双向波分复用传输方案可通过光学滤波有效抑制后向散射的影响^[8-11]。但需要精确标定出色散等导致

的链路双向传输时延差, 才能实现精准的时间传递和同步。链路时延标定涉及波长、链路长度、色散等的高精度测量, 且测量误差随光纤长度的增加而线性增加。对于实际的长距离光纤链路来说, 不同子段链路特性不同, 且光纤通路上设备和链路的任何改变都需要重新标定。因此, 运行和维护的难度大、成本高。基于CDMA扩频码的同纤同波传输可以有效抑制后向散射的影响, 并保证对称性。但高精度的扩频编码/解码等技术复杂、价格昂贵。双向光放大是实现超长距离光纤时间传递的关键。将传统EDFA两端隔离器替换为双向滤波器的单纤双向光放大(single fiber bidirectional amplifier, SFBA)可以最大程度保证双向对称性。然而, 进入SFBA的后向散射不仅影响其工作的稳定性, 而且经SFBA放大后对信噪比的恶化更严重, 从而限制了链路中SFBA的个数和传递的距离。基于拉曼或布里渊的分布式双向放大还处于探索阶段。

此外, 从实际实施成本和工程可行性来讲, 最大限度地利用现有光网络基础设施实现超长距离光纤时间传递显得尤为关键。现有光纤通信网络中, 均采用“单纤单向”传输方式, 光放大器等设备均为单向工作。而为了最大限度保证双向对称性, 现有高精度光纤时间传递方案基本都采用“单纤双向”传输方式和SFBA等专门的双向光放大器。因此, 难以与现有光网络业务共用同一光纤链路, 必须采用专用光纤。铺设或租用数千公里专用光纤链路的高昂成本将严重阻碍相关方案的实际应用。

为了发挥同纤同波的优势, 并克服后向散射等的影响, 提出了一种双向时分复用同纤同波(bidirectional time divi-

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61535006)

作者简介: 吴龟灵, 教授, 研究方向为光子信息处理与传输, 电子邮箱: wuguilin@sjtu.edu.cn

引用格式: 吴龟灵, 陈建平. 超长距离高精度光纤双向时间传递[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 99-103; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.011

sion multiplexing transmission over single fiber with the same wavelength, BTDM-SFSW) 的光纤时间传递方案^[14-15]。在 2000 km 的光纤环路上,进行了稳定度优于 89 ps/s 和 23 ps/10⁵ s 时间传递。在此基础上,进一步提出了一种新的高对称、低噪声单向放大单纤双向传输(single-fiber bidirectional-transmission with unidirectional optical amplifiers, SFBT-UOA)方案,并具备与现有光纤网络传输链路兼容的能力。在实验室进行了 6000 km 光纤时间传递实验,在无需链路标定的情况下,时间传递精度优于 70 ps,验证了基于现有光纤网络传输链路进行数千公里高精度时间传递的可行性。

1 BTDM-SFSW 光纤时间传递

BTDM-SFSW 时间传递的主要思想是时间同步站点通过同纤同波光纤维链路向对方发送定时信号最大限度地保证双向时间传输时延的对称性;同时,通过轮流交替的时分复用使不同站点发送的光信号在时域上错开,以抑制后向散射噪声对接收信号抖动的影响,如图 1 所示。A 站通过波长为 λ 的光载波发送本地时间信号(如 1 Hz)给 B 站。B 站的本地时间信号经过一段延时 T_d ,被延迟到接收完 A 站的时间信号后,再通过同一光纤同一波长 λ 发送给 A 站。每个站在不发送本地时间信号时,不向光纤链路发送光信号。由于任意时刻,光纤链路上只有单向传输的光信号,因此可以完全避免由本地光源引起的单次后向散射与反射噪声对接收信号质量的影响。同时,两个方向的时间信号通过同纤同波传输,可最大

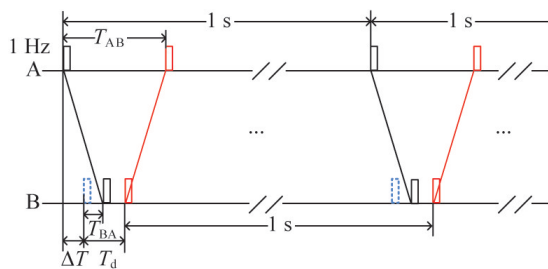


图 1 BTDM-SFSW 光纤时间传递原理
Fig. 1 Scheme of BTDM-SFSW based time transfer

限度地消除色散等因素造成的双向时延及其变化的不对称性,避免复杂的光纤链路标定及由此带来的标定误差。

由于采用双向同纤同波传输,在绝大多数的缓慢变化环境下,两个方向的传输时延可认为是相等的,两站间的钟差可表示为

$$\Delta T = \frac{1}{2} \left[(T_{AB} - T_{BA} - T_d) + (\tau_A^T - \tau_A^R + \tau_B^R - \tau_B^T) + \sum_i \Delta \tau_i^0 \right] \quad (1)$$

其中, T_{AB} 和 T_{BA} 分别为 A 站和 B 站本地定时信号和接收到的定时信号之间的时间间隔; τ_A^T 和 τ_B^T 分别为两端的发送时延; τ_A^R 和 τ_B^R 分别为两端接收时延; $\sum_i \Delta \tau_i^0$ 是链路中间所有器件和设备(如光放大器)的双向时延差之和。

式(1)中, T_{AB} 、 T_{BA} 、 T_d 可以用高精度时间间隔测试仪实时精确测得;两端的发送时延和接收时延(τ_A^T 、 τ_B^T 、 τ_A^R 、 τ_B^R)可精确标定。对双向时间传递来说,中间设备也必须能支持双向传输。在超长距离传输中,中继光放大器的个数可达到数十个(通常,每几十 km 1 个光放大器)。多个光放大器双向时延不对称和噪声的累积都会严重恶化时间传递的精度。理论上,可以通过精确测量对链路中每个器件和设备的双向时延差 $\Delta \tau_i^0$ 进行标定。但超长距离链路中的设备数量多且分布在不同地方,实现标定的难度和成本都很高,且标定的精度还随着测量误差的积累而恶化。

图 2 为超长距离高精度光纤时间传递实验平台示意图。为了消除时钟漂移对时间传递性能评估的影响,从同一原子钟输出的 1 Hz 同时进入 A 站和 B 站。A 站将输入的 1 Hz 信号编入时间码调制到波长为 1549.32 nm 的光载波上,并通过响应时间小于 1 ms 的光开关(OS)输入光纤环。光纤环由一个响应时间小于 300 ns 的 2x2 电光开关、400 km G.652 光纤和 4 个双向泵浦的 SFBA 组成。携带时间码的光信号通过 2x2 电光开关进入光纤环,并在光纤环内循环一定圈数后,经 2x2 电光开关输出到 B 站。原子钟输入的本地 1 Hz 经过一个时延调整模块(time delay adjuster, TDA)后,再经过与 A 站类似的过程传输到 A 站。两站分别从接收到的时间码中提取出 1 Hz,并用时间间隔计数器(SR620)测得提取出的 1 Hz 与本地 1 Hz 的时间差。B 站的 TDA 的时延也由 SR620 测得。

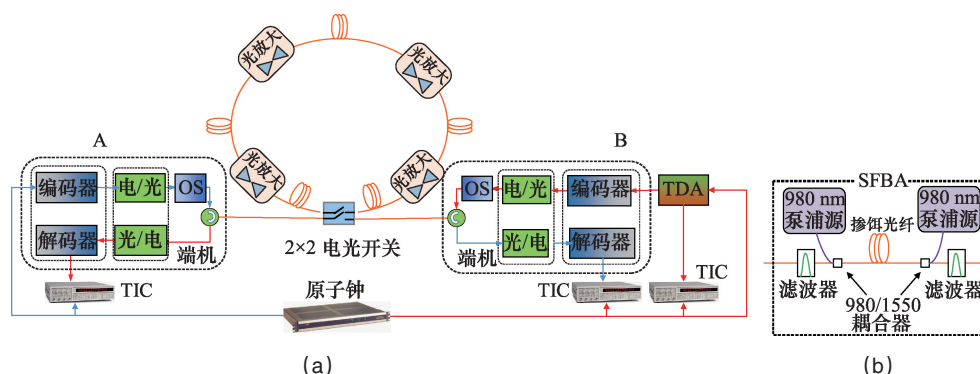


图 2 BTDM-SFSW 光纤时间传递实验系统(a)及双向泵浦的单纤双向光放大器结构(b)
Fig. 2 Experimental testbed of time transfer using BTDM-SFSW (a) and single fiber bidirectional amplifier with bidirectional pumps (b)

实验中采用的双向泵浦SFBA的结构如图2(b)所示,两个方向传输的光信号分别经过对应输入端口的光滤波器进入同一根掺铒光纤放大。双向传输的路径完全相同,保证了双向传输时延的对称性。两端的光滤波器用于滤除光放大叠加到输出信号中的ASE噪声。实验中用的是0.4 nm的商用滤波器。考虑到双向时分复用下两个方向的波长相同,两端可以选用带宽更窄的光滤波器来更有效地滤除ASE噪声。通过控制双向泵浦的电流对两个方向的增益进行调节。

针对光纤传输的特点,设计了一种改进的IRIG(Inter-Range Instrumentation Group)-B时间码(图3)。帧长200 bit,不仅可携带IRIG码原有信息,还可携带两端测得的时延差等信息,传递给对方用于钟差计算。时间码发送速率100 Mbit/s。单个帧的时间长度为2 μs,有利于双向时分复用的实现(帧长越短,越有利于时分复用)。图4(a)为采用的同步时间编/

解码器结构^[16]。基于掩码和组合电路技术,实现了编码产生的时间码中的1 Hz标记与输入1 Hz的精确自对准,以及解码输出的1 Hz与接收到的时间码中的1 Hz标记的精确自对准。图4(b)为测得的编/解码器的时延抖动。可见,采用同步编/解码方案时的时延抖动小于27 ps,接近所用测量仪器SR620的噪底。

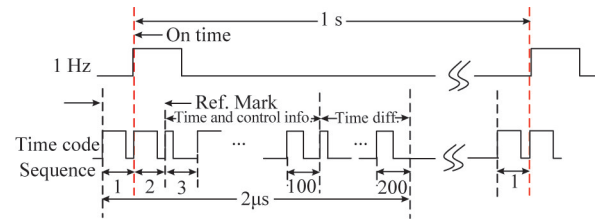


图3 改进的IRIG-B时间码格式
Fig. 3 Modified IRIG-B time code format

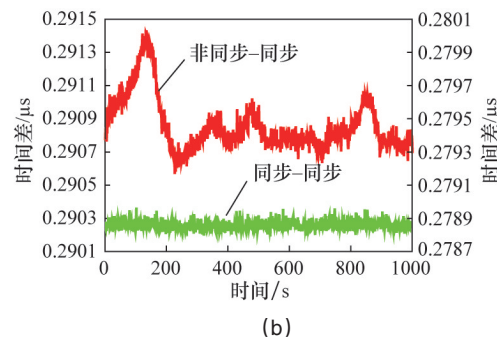
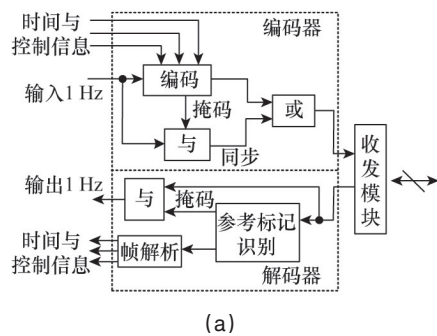


图4 编/解码器的结构(a)及其稳定性测试(b)

Fig. 4 Schematic hardware structure of the codec (a), and the measured time differences for different encoder-decoder combinations(b)

图5为不同传输距离下测得的双向时间传递钟差的稳定度(时间偏差TDEV, time deviation)。由于2 m光纤很短,2 m光纤链路下的TDEV(优于20 ps/s和3 ps/10³ s)可以认为是系统端机在实验室条件下的噪底。该噪底主要由编/解码、光收发模块和时间间隔测试仪等决定。随着传输距离的增加,时间传递的短期稳定度和长期稳定度都恶化。短期稳定度

(1~100 s)的恶化主要与光纤传输距离增加引起的接收信号信噪比下降有关;而长期稳定度(100~10000 s)的恶化则主要是因为光纤链路传输时延差随温度的变化,以及发射波长的漂移的影响,这些影响随距离的增加而增加。传输距离为2000 km时,时间传递的稳定度优于89 ps/s和23 ps/10³ s。

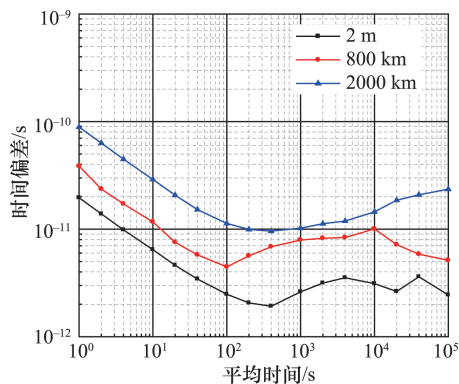


图5 不同距离双向光纤时间传递的稳定度
Fig. 5 Time deviation (TDEV) of time transfer over different fiber lengths

2 单向放大的BTDM-SFSW光纤时间传递

第1节的光纤时间传递实验中采用的SFBA两端用双向光滤波器替代光隔离器实现了通过同一光纤的高对称双向放大。但是由于没有光隔离器,后向散射噪声会进入光放大器进一步放大、恶化系统性能,并且还会影响放大器增益及工作的稳定性。SFBA数量越多,累积的影响越大。因此,难以支持超长距离传输。在上述采用SFBA的实验中,最长的传输距离只有2000 km左右。此外,这种放大器也无法与现有光通信网络中的单向光放大方案兼容。

结合BTDM-SFSW传输的特点,提出了一种单向放大单纤双向传输方案(single-fiber bidirectional-transmission with unidirectional optical amplifiers, SFBT-UOA),如图6所示。该方案的基本思想是通过分/合波器从光纤波长通道中分离出

时间传递波长通道,通过控制2×2光开关的状态使时间传递通道上前向和后向传输的光信号分时通过同一单向光放大器(两端带光隔离器),实现同纤同波双向放大,最大程度地保证双向对称性。单向光放大器两端的光隔离器有效避免了后向散射噪声进入放大器引起的多次放大对时间传递性能的影响。SFBT-UOA的另一重要特点是可以同时支持光网络中的正常业务。光网络中的正常业务一般都是单纤单向的,这些业务的波长通道通过分波和合波后仍然可以不受影响地通过同一单向光放大器放大。这一特点使得超长距离时间传输通道很容易嵌入到现有光纤网络中,且不影响现有业务。从而可最大限度地利用现有光网络基础设施,降低成本。

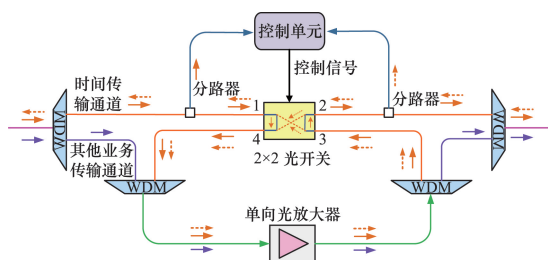


图6 单向放大单纤双向传输方案示意
Fig. 6 Diagram of the SFBT-UOA

采用SFBT-UOA方案,将传输距离拓展到6000 km,并获得了优于190 ps/s和61 ps/10⁵ s的时间传递稳定度(图7)。

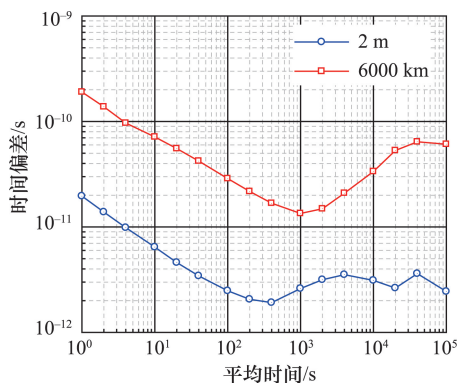


图7 采用SFBT-UOA的双向光纤时间传递的稳定度
Fig. 7 TDEV of the time transfer with SFBT-UOAs over different fiber lengths

3 不确定度分析

表1列出了6000 km BTDM-SFSW时间传递的不确定度预算。前3项是不确定度的主要来源。其中,时间间隔的测试不确定度和两站端机收发时延标定的不确定度利用SR620标定得到,波长差引起的不确定度可通过精确控制两端光发送模块的波长差来减少。图8为实验中所用两光发送模块的波长差随温度的变化。可见,通过温度控制可以将两站的波长差控制在0.5 pm甚至更低的范围内。

表1 6000 km BTDM-SFSW 时间传递不确定度预算

Table 1 Uncertainty budget for BTDM-SFSW based time transfer over 6000 km

来源	系数	估计值	贡献值	类型
时间间隔测试	1	25.9 ps	25.9 ps	A&B
端机	1	38.8 ps	38.8 ps	A
波长差	0.5DL	1 pm	51 ps	B
偏振模色散	0.5√L	0.05ps/√km	1.9 ps	B
双向光放大器	0.5√60	0.5 ps	2 ps	A
Sagnac效应	2ω/c ²	SA _k	7 ps	B
总不确定度			69.5 ps	A&B

注: D 为光纤色散系数,取典型值17 ps/(nm·km); L 为光纤长度; ω 为地球自转角频率; SA_k 为地心到光纤的矢量扫过的表面在赤道投影的不确定度,光纤定位精度为1 km。

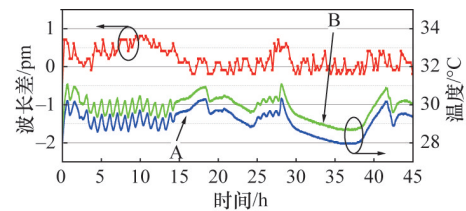


图8 两个光发送模块间波长差随温度的变化

Fig. 8 Wavelength difference of two SFP transceivers and their external temperatures

图9为不同距离下测得的钟差,其中发送和接收时延不对称性是通过2 m光纤连接两端标定得到。由于,两端的定时信号来自同一个原子钟,理论的钟差应该为0。由图9可见,不同距离下测得的平均钟差与理论值的偏差始终在理论计算的扩展不确定度范围内且最大不超过100 ps。验证了不确定度分析的正确性,以及优于100 ps的时间传递准确度。

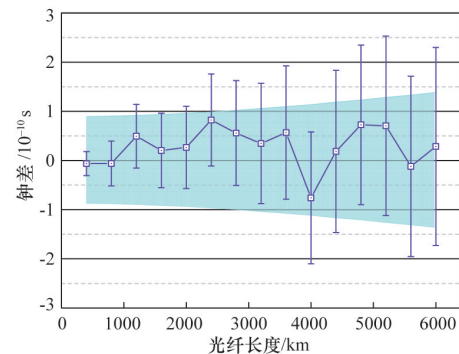


图9 不同光纤传输距离下测得的钟差

Fig. 9 Measured clock differences over different fiber lengths, the light blue background illustrates the theoretical calculated expanded uncertainty (coverage factor $k=2$)

4 结论

采用BTDM-SFSW传输方案构建了基于光纤环的超长距

离双向时间传递实验平台。通过同纤同波传输保证双向传输时延的对称性,时分复用有效抑制后向散射噪声对信号抖动的影响,从而实现超长距离高精度的光纤时间传递。设计了改进的IRIG-B时间码和相应的低抖动、自对准时间编/解码器;在2000 km的光纤环路上,实现了稳定度优于89 ps/s和23 ps/10⁵ s时间传递。针对BTDM-SFSW的特点,通过单向放大单纤双向传输,有效解决了现有单纤双向光放大器受后向散射噪声影响,以及无法有效利用商用光网络资源的问题。在光纤环路上,实现了6000 km、稳定度优于190 ps/s和61 ps/10⁵ s时间传递,时间传递不确定度小于70 ps。

参考文献 (References)

- [1] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, et al. Femtosecond-laser-based synthesis of ultrastable microwave signals from optical frequency references[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(6): 667-669.
- [2] Marion H, Pereira D S F, Abgrall M, et al. Search for variations of fundamental constants using atomic fountain clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(15): 150801.
- [3] DeCamp M F, Reis D A, Bucksbaum P H, et al. Coherent control of pulsed X-ray beams[J]. *Nature*, 2001, 413(6858): 825-828.
- [4] Shillue B, Albanna S, D'Addario L. Transmission of low phase noise, low phase drift millimeter-wavelength references by a stabilized fiber distribution system[C]//IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 201-204.
- [5] Heavner T P, Donley E A, Levi F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 174-182.
- [6] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, et al. High-accuracy optical clock based on the octupole transition in 171Yb⁺[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(9): 186-191.
- [7] European metrology research[EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.ptb.de/emrp/neatft-home>.
- [8] Śliwczyński L, Krehlik P, Czubla A, et al. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km [J]. *Metrologia*, 2013, 50(2): 1.
- [9] Smolacha V, Kuna A, Mache W. Time transfer using fiber links[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum. Noordwijk, The Netherlands: IEEE, 2010: 1-8.
- [10] Ebenhag S C, Jaldehag K, Jarlemark P, et al. Time transfer using an asynchronous computer network: Results from a 500 km baseline experiment[C]. 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Long Beach, California, November 27-29, 2007.
- [11] Kihara M, Imaoka A, Imae M, et al. Two-way time transfer through 2.4 Gb/s optical SDH system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(3): 709-715.
- [12] Rost M, Piester D, Yang W, et al. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps[J]. *Metrologia*, 2012, 49(6): 772-778.
- [13] Lopez O, Kanj A, Pottie P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network[J]. *European Frequency & Time Forum & International Frequency Control Symposium*, 2012, 110(1): 474-476.
- [14] Zhang H, Wu G, Hu L, et al. High-precision time transfer over 2000 km fiber link[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1.
- [15] Wu G L, Hu L, Zhang H, et al. A round-trip fiber-optic time transfer system using bidirectional TDM transmission[C]//2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum. Denver, CO: IEEE, 2015: 773-776.
- [16] Wu G L, Hu L, Zhang H, et al. High-precision two-way optic-fiber time transfer using an improved time code[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 114701.

Ultra-long haul high-precision fiber-optic two way time transfer

WU Guiling^{1,2}, CHEN Jianping^{1,2}

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

2. Shanghai Key Lab of Navigation and Location Based Services, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Ultra-long haul high-precision fiber-optic two-way time transfer is demonstrated by adopting the proposed scheme called bidirectional time division multiplexing transmission over single fiber with the same wavelength (BTDM-SFSW), which can effectively eliminate the impact of Rayleigh backscattering and reach the maximum bidirectional symmetry at the same time. The inter-range instrumentation group (IRIG-B) time code is modified by increasing bit rate and defining new fields for the proposed BTDM-SFSW time transfer scheme. A dedicated codec (encoder and decoder) with low delay fluctuation and self-synchronization is developed by using a mask technique and combinational logic circuit. A BTDM-SFSW based time transfer testbed is built with the employment of loop configuration in laboratory to evaluate the performance of fiber-optic time transfer over thousands of kilometers. Stabilities of less than 89 ps/s and 23 ps/10⁵ s are achieved for the time transfer over a 2000 km fiber link with single fiber bidirectional amplifiers (SFBA). In order to overcome the issues of using the SFBA including the impact of Rayleigh backscattering and incompatibility with commercial fiber links, a novel time transfer scheme of single-fiber bidirectional-transmission with unidirectional optical amplifiers (SFBT-UOA) is proposed. Transmission over 6000 km is experimentally demonstrated with the time deviations of 190 ps/s and 61 ps/10⁵ s, respectively. A full uncertainty budget for the BTDM-SFSW based time transfer is provided, which considers the contributions of different factors, including the precision and stability of transmitted wavelengths, power dependence of transceivers' receiving delays, Sagnac effect, etc. The calculated theoretic combined uncertainty is not beyond 70 ps without the requirement of fiber link calibration, which well agrees with the experimental verification over different lengths of non-calibrated fiber link.

Keywords time transfer; optical fiber transmission; bidirectional optical amplification; uncertainty

(责任编辑 刘志远)