

链路时延波动对光纤时间传递稳定性的影响

江少平¹ 张浩¹ 姜文宁¹ 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上海交通大学上海市北斗导航与位置服务重点实验室, 上海 200240

摘要 环境温度和激光器输出波长变化引起的光纤链路时延波动直接影响光纤时间传递的稳定性。采用链路分段处理方法推导了长距离光纤时间传递的稳定性与激光器输出波长及链路温度变化之间的关系;通过分析实测的激光器波长波动数据,建立了激光器波长波动模型。基于实际温度数据构造了3000 km光纤链路,分析了波长波动和链路铺设深度等对双向时分复用(BTDM)和波分复用(WDM)光纤时间传递稳定性的影响。结果表明:光纤链路温度变化主要影响光纤时间传递的长期稳定性,且这种影响与光纤链路铺设深度和时间传递工作季节有关;激光器波长的随机抖动主要影响光纤时间传递的短期稳定性,而波长漂移主要影响漂移周期对应时间尺度上的时间传递稳定性。当两端激光器波长随机抖动标准差从(0.07, 0.05) pm变化为(0.27, 0.25) pm时,3000 km光纤时间传递的稳定度由3 ps/s恶化为12 ps/s。

关键词 光纤光学;长距离时间传递;时间稳定性;时延波动

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.040603

Effects of Link Delay Fluctuations on Stability of Fiber-Optic Time Transfer

Jiang Shaoping¹ Zhang Hao¹ Jiang Wenning¹ Wu Guiling^{1,2} 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 Based Services, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract The delay fluctuations of optical fiber link, related to the variations of laser output wavelength and ambient temperature along the transmission link, directly affect the stability of fiber-optic time transfer. The relationship between the stability of long distance fiber-optic time transfer and the variations of laser wavelength and the temperature of optical fiber link is derived by using a link segmentation processing method. Wavelength fluctuations are modeled based on the analysis of measured wavelength data of laser. A 3000 km optical fiber link is emulated based on the actual temperature data, and the effects of wavelength fluctuations and depth of buried optical fiber link on the stability of fiber-optic time transfer adopting bidirectional time division multiplexing (BTDM) and wavelength division multiplexing (WDM) respectively are analyzed. The results show that the temperature variations of optical fiber link mainly have effect on the long-term stability, and this effect changes with the depth of buried optical fiber link and work season of time transfer. The wavelength jitter of laser mainly degrades the short-term stability of fiber-optic time transfer, while the wavelength drift of laser mainly has impact on the stability at the averaging time related to the cycle of wavelength drift. When the standard deviation of wavelength jitter of laser changes from (0.07, 0.05) pm to (0.27, 0.25) pm, the stability of 3000 km fiber-optic time transfer will deteriorate from 3 ps/s to 12 ps/s.

Key words fiber optics; long-distance time transfer; time stability; delay fluctuations

OCIS codes 060.2360; 120.7000; 120.3940

收稿日期: 2015-11-11; 收到修改稿日期: 2015-11-15; 网络出版日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61127016, 61107041)

作者简介: 江少平(1990—),男,硕士生导师,主要从事光纤时间频率传递方面的研究。

E-mail: jsp776074299@sjtu.edu.cn

导师简介: 姜文宁(1978—),男,博士,副教授,硕士研究生,主要从事 DWDM 光纤通信系统和网络中的放大及传输技术方面的研究。E-mail: jwn@sjtu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wuguilin@sjtu.edu.cn

1 引言

高精度时频传递技术在深空探测、卫星导航、电力传输、科学研究等领域起着至关重要的作用。光纤相对于传统的电缆具有低损耗、高带宽、抗电磁干扰性能强等优点,且比自由空间通道的稳定性更好,利用光纤链路进行高精度远距离时频传递引起了广泛关注^[1-3]。波兰克拉科夫 AGH 理工大学和捷克教育科研网(CESNET)采用波分复用(WDM)的时间传递方案分别报道了 480 km 和 740 km 光纤时间传递实验,天稳定度分别优于 1 ps 和 100 ps^[4-5]。基于 WDM 的光纤时间传递方案存在色散等导致的双向传输时延不对称性,需要复杂的高精度光纤链路标定技术^[6]。文献[6]提出了一种基于双向时分复用(BTDM)的同纤同波光纤时间比对方法,能有效抑制后向瑞利散射的影响并同时保证双向光纤链路的高度对称性。文献[7]报道了基于该方案的 1600 km 光纤时间传递实验,稳定性优于 89 ps/s 和 6 ps/(10⁴ s)。

光纤长度和折射率随温度的变化,以及光纤折射率的波长相关性使得光纤链路的时延随外界环境温度、激光器输出波长的变化而波动,从而影响光纤时频传递的稳定性。文献[8]分析了链路时延波动对光纤频率传递稳定性的影响,分析中采用了周期为天的正弦链路温度变化模型,并考虑了激光器波长随动态结温度变化的漂移。文献[9]采用周期为天和小时的正弦链路温度变化模型分析了温度对长距离光纤时间传递稳定性的影响。上述文献中,整条链路采用同一温度模型参数,没有考虑长距离光纤链路温度分布的不均匀。同时,周期为天的温度模型没有包含温度的长期(如月和季节)变化特征,不能有效分析长期温度变化特征对光纤时间传递稳定性的影响。此外,激光器的波长除了漂移外,还存在随机抖动,波长随机抖动对光纤时间传递的影响还有待研究。

本文对长距离光纤链路采取分段处理,并采用以天和年为周期的光纤链路温度模型,建立了分段的光纤时间传递链路时延模型。通过实测激光器的波长变化和统计分析,建立了激光器波长波动模型。在此基础上,利用实际温度数据构造了 3000 km 光纤链路,分析了光纤链路铺设深度、光纤时间传递工作季节,以及激光器输出波长抖动和漂移对长距离光纤时间传递稳定性的影响。

2 双向光纤时间传递链路时延稳定性模型

双向光纤时间传递原理如图 1(a)所示,图 1(b)给出了基于 WDM 光纤时间传递的时序图。A 端钟源输出的时间信号 1PPS 编码后,经电光转换承载到波长为 λ_A 的光载波上,通过光纤链路传送给 B 端。同时,B 端将本地钟源输出的 1PPS 编码后调制到波长为 λ_B 的光载波上,通过光纤链路传送给 A 端。A、B 两端从接收到的时间码中恢复出对方传递的 1PPS 时间信号,测量本地 1PPS 和接收到的 1PPS 的时间间隔,实现双向时间比对。基于 BTDM 光纤时间传递的时序图如图 1(c)所示,与基于 WDM 的光纤时间传递的主要不同在于:B 端本地的 1PPS 在发送给 A 端前,先经过一段时延 T_d ,以保证任意时刻光纤链路上只有单向传输的光信号。从而使得两个端点既可使用同一个波长达到最大的对称性,又可避免后向瑞利散射对信噪比的恶化。

两种方案中,两端瞬时钟差 ΔT 均可表示为

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

式中 T_{AB} (T_{BA}) 为 A(B) 端 TIC1(TIC2) 测得的时间间隔, τ_A^T (τ_B^T) 为 A(B) 端发送设备延时, τ_A^R (τ_B^R) 为 A(B) 端接收设备延时, T_d 为 TIC3 测量的 B 端本地信号时延量,对 WDM 方案,此项为 0。A、B 端发送和接收设备传输时延只和电学设备和光学设备有关,可以通过高精度的测量方法标定出来, τ_{AB}^F (τ_{BA}^F) 为 A 端到 B 端(B 端到 A 端)信号在光纤链路中的传输时延,在双向链路时延完全对称的情况下,这两项可以完全抵消。但实际光纤链路的时延受环境温度和发射机输出波长影响,使得双向光纤链路传输时延不对称并随温度等波动,从而影响瞬时钟差的稳定性。

考虑到实际长距离光纤时间传递链路要跨越多个温度分布不同的地区,对光纤链路采用分段处理方法,将光纤链路分为 S 段,同一段光纤链路内的温度模型参数相同,如图 2。

第 i 秒 A 端到 B 端的光纤链路时延可以表示为

$$d_A(i) = \sum_{m=1}^S d_A^m(i), \quad (2)$$

式中 $d_A^m(i)$ 是第 i 秒内第 m 段光纤链路的时延,可表示为

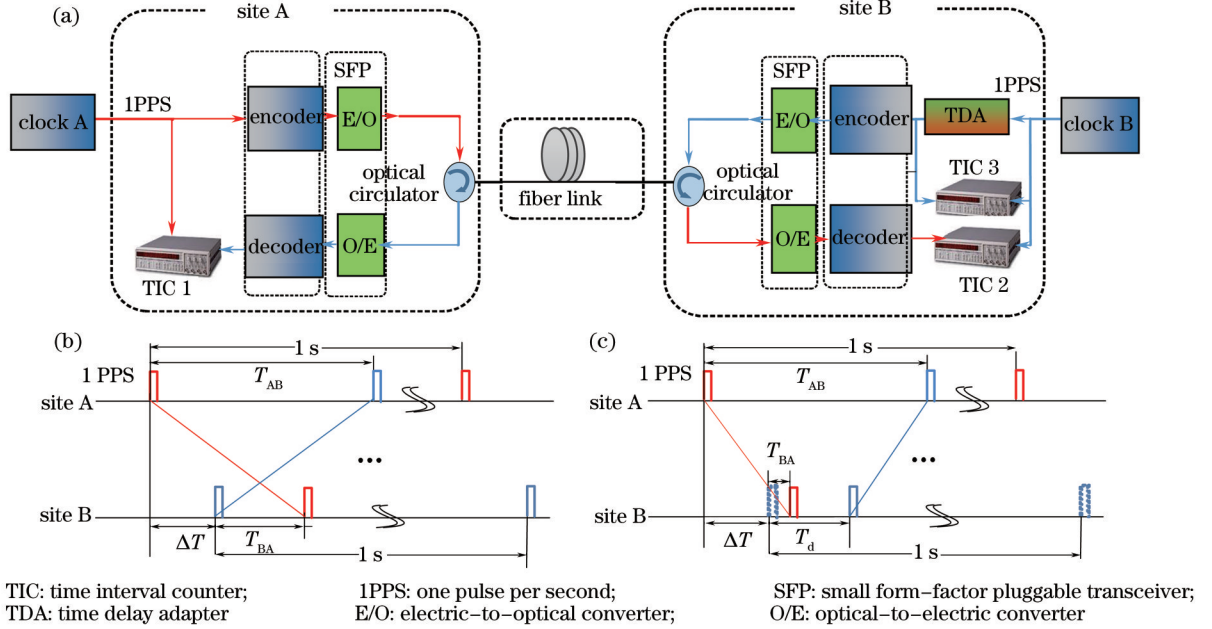


图1 (a) 双向光纤时间传递原理框图; (b) WDM时序图; (c) BTDM时序图

Fig.1 (a) Principle diagram of bidirectional optical fiber time transfer; (b) timing sequence based on WDM; (c) timing sequence based on BTDM

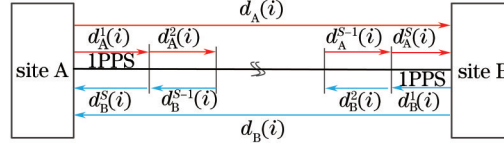


图2 长距离光纤时间传递链路分段模型

Fig.2 Segmentation model of long-distance fiber-optic time transfer link

$$d_A^m(i) = \frac{1}{c} n_g^m(\lambda_A^i, T_{mi}) L_{m0} [1 + \alpha(T_{mi} - T_{m0})], \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速; $n_g^m(\cdot)$ 和 T_{mi} 分别为第 i 秒内 A 端光信号通过第 m 段光纤链路时光纤的群折射率和温度; λ_A^i 为激光器在第 i 秒内输出波长; L_{m0} 和 T_{m0} 分别为第 m 段光纤链路的初始长度和初始温度; α 为光纤热膨胀系数, 典型值为 $5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 。

光纤的群折射率和有效折射率的关系为

$$n_g = n_{\text{eff}} - \lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda}, \quad (4)$$

光纤的有效折射率可由 Sellmeier 公式得到, 表示为^[10]

$$n_{\text{eff}}^2 = A + \frac{B}{1 - C/\lambda^2} + \frac{D}{1 - E/\lambda^2}, \quad (5)$$

式中 A, B, C, D, E 为 Sellmeier 经验系数。熔融石英光纤的 Sellmeier 经验系数见表 1, 它们均和第 i 秒内光信号通过第 m 段光纤链路时的光纤温度 T_{mi} 有关。

表 1 熔融石英光纤 Sellmeier 经验系数^[10]Table 1 Empirically fitted values of fused silica fiber for Sellmeier coefficients^[10]

Sellmeier coefficient	Fitted constant (SiO_2)
A	$6.90754 \times 10^{-6} T_{mi} + 1.31552$
B	$2.35835 \times 10^{-5} T_{mi} + 0.788404$
C	$5.84758 \times 10^{-7} T_{mi} + 0.0110199$
D	$5.48368 \times 10^{-7} T_{mi} + 0.91316$
E	100

每段光纤链路的温度以天和年为周期的正弦变化表示为^[11]

$$\begin{cases} T_{mi} = T_{\text{year}} + A_{T_{\text{year}}} \exp(-zC_{\varphi y}) \sin\left[\frac{2\pi}{P_{T_y}}(t - t_{0y}) - zC_{\varphi y}\right] + A_{T_{\text{d,year}}}(t) \exp(-zC_{\varphi d}) \sin\left[\frac{2\pi}{P_{T_d}}(t - t_{0d}) - zC_{\varphi d}\right] \\ A_{T_{\text{d,year}}}(t) = T_{\text{d,year}} + A_{\text{d,year}} \sin\left[\frac{2\pi}{P_{T_y}}(t - t_{0,\text{year}})\right] \\ t = i + \sum_{j=1}^{m-1} d_{\lambda}^j(i) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 T_{year} 表示在光纤链路深度 $z=0$ 处的年平均温度; P_{T_y} 和 P_{T_d} 为年和天周期(单位为 s); $A_{T_{\text{year}}}$ 表示以年为周期的温度变化幅值; $A_{T_{\text{d,year}}}$ 表示以天为周期的温度变化幅值,它以年为周期正弦变化; t_{0d} 、 t_{0y} 、 $t_{0,\text{year}}$ 为时间偏移常数; $C_{\varphi d}$ 、 $C_{\varphi y}$ 是与土壤类型相关的常数,由土壤导热系数、热容量及土壤密度决定。

实验室光纤时间传递发射机采用商用的光收发模块(SFP光模块)。图3(a)为实测的A、B端SFP光收发模块温度和输出波长随时间的变化,由图可见,在前45 h内,温度变化幅度小,约为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,两端SFP光收发模块输出波长存在随机抖动,其统计分布见图3(b),图中PDF表示概率分布函数。结果表明:在一定温度变化范围内,两端SFP光收发模块波长近似服从均值 x_{mean} 为0、标准差 x_{std} 分别为0.17 pm、0.15 pm的高斯分布。图3(a)后20 h测试了温度变化较大时SFP光收发模块波长的变化,结果表明:波长随温度变化约为 $0.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,与文献[12]结果一致。

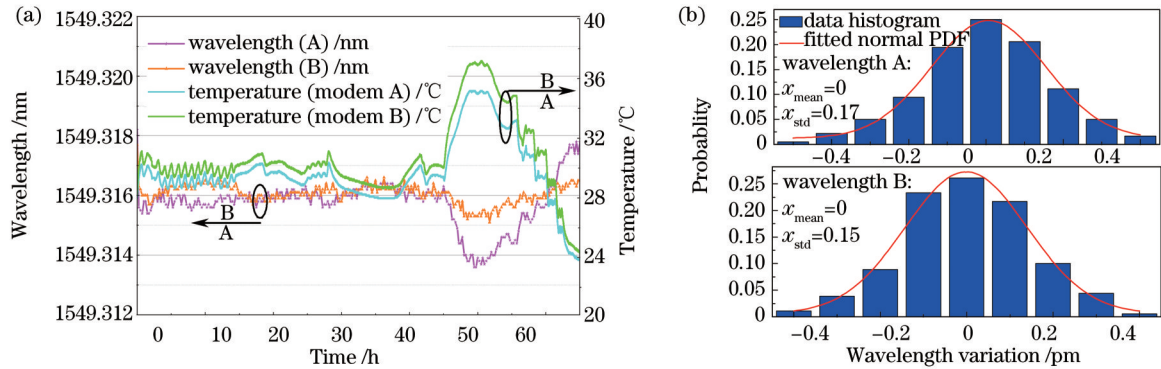


图3 实测的SFP光收发模块(a)波长和温度随时间的变化及其(b)波长变化统计分布

Fig.3 (a) Measured wavelength and temperature variations of SFP transceiver with time and (b) the statistical distribution of wavelength variations

根据上述分析结果,光收发模块输出波长的变化包括随机抖动和随温度的漂移两部分。第 i 秒内两端光发射模块输出波长可以分别表示为

$$\begin{cases} \lambda_A^i = \lambda_A^{i-1} + \sigma_1 \cdot n_{\text{rand}}(i) + k\Delta T_A^i \\ \lambda_B^i = \lambda_B^{i-1} + \sigma_2 \cdot n_{\text{rand}}(i) + k\Delta T_B^i \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $n_{\text{rand}}(i)$ 表示第 i 秒内均值为0、标准差为1的高斯随机数, σ_1 、 σ_2 分别为A、B两端输出波长抖动的标准差,温漂系数 $k=0.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, ΔT_A^i (ΔT_B^i) 为A(B)端SFP光收发模块在第 i 秒内的温度变化。

由(2)~(7)式可得到第 i 秒内A端到B端的光纤链路时延。类似地,可以得到第 i 秒内B端到A端的光纤链路时延,并得到第 i 秒内光纤双向时间比对的时延差,分析链路传输时延差对光纤时间传递稳定性的影响^[13]。

3 性能仿真分析

仿真中,设光纤时间传递端机放置在恒温控制箱内,恒温箱内温度的变化近似为周期性指数上升和下降过程,结合温漂系数 k 即可得到对应周期的波长变化。利用中国从北到南5个城市(长春、北京、郑州、上海、广州)的温度数据^[14],拟合得到了5段光纤链路温度模型参数(见表2),并构造了总长度为3000 km的光纤链路,每段光纤链路长度分别为500、550、600、650、700 km。图4为计算得到的第一段光纤链路在不同深度时一年中温度随时间的变化。可以看出,光纤链路温度变化幅度随光纤链路铺设深度的增加而减小,且在

同一深度下,日温度变化幅度与季节有关,夏季最大,冬季最小。

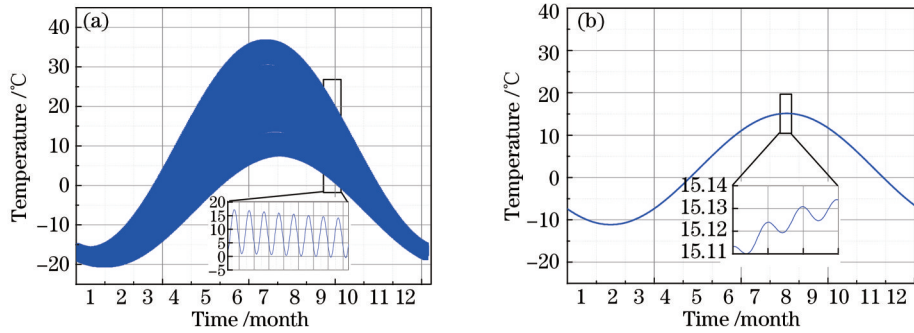


图4 深度为(a) 0 cm和(b) 100 cm时第一段光纤链路一年内的温度变化情况

Fig.4 Temperature variations in a year of the first section of the fiber link at the depth of (a) 0 cm and (b) 100 cm

表2 每段光纤链路的主要温度模型参数(单位: °C)

Table 2 Main parameters of temperature model for each fiber link (unit: °C)

Section	T_{year}	$A_{T_{year}}$	$T_{d,year}$	$A_{d,year}$
1(J_1)	2	20	8	6.5
2(J_2)	8	18	6.4	4.5
3(J_3)	14	15	5.8	3.2
4(J_4)	15	16	3.5	2.5
5(J_5)	16	14	4.5	3

图5给出了分段和未分段链路模型下基于BTDM的3000 km光纤时间传递的稳定性。仿真中,时间间隔为100 ms;A、B端波长随机抖动标准差表示为(0.17, 0.15) pm;恒温箱内温度的变化周期为60 s、峰-峰值为1 °C(对应的波长漂移峰-峰值为0.5 pm)。未分段链路模型分别采用表2中第1段(J_1)和第4段(J_4)链路的温度模型参数,光纤链路深度分别为0 cm和100 cm。分段链路模型中每段光纤链路的深度分别为20、40、50、80、100 cm。从结果可以看出,分段和未分段链路模型下,时间传递的短期稳定性基本相同,但分段链路模型下得到的长期稳定性介于两种未分段情况之间,这是因为温度是一种慢变化过程,主要影响光纤时间传递的长期稳定性。同时,两种未分段情况下的温度模型参数代表的是两个极端的情况,而分段链路模型代表的是5段温度分布不均匀光纤链路的综合效果。由于分段链路模型可以更精确地描述长距离光纤链路温度分布的不均匀(南北走向的光纤链路)、不同步(东西走向的光纤链路)等现象,由此得到的光纤时间传递长期稳定性也更符合实际。

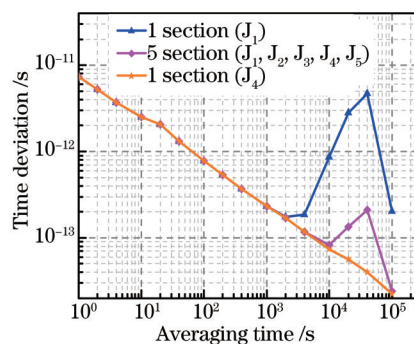


图5 分段与未分段模型下3000 km光纤时间传递的稳定性

Fig.5 Stability of 3000 km fiber-optic time transfer using segmentation and non-segmentation models

图6给出了不同光纤链路铺设深度组合下BTDM和WDM光纤时间传递在不同季节时的稳定性。BTDM光纤时间传递的时间间隔分别为500 ms和20 ms;WDM光纤时间传递的波长间隔分别为0.8 nm和0.4 nm;波长波动参数与图5相同。可以看出,光纤链路铺设深度和时间传递工作季节对光纤时间传递的短期稳定性几乎没有影响,这是因为它们主要影响光纤链路温度的变化,而温度变化主要影响光纤时间传递的长期稳定性。同一个季节内,光纤链路铺设越深,时间传递长期稳定性越好,因为光纤链路铺设深度越深,环境温度变化幅度越小,且由前述光纤链路温度模型可以看出,光纤链路日温度变化幅度随着光纤深度的增加而呈指数下降,

如第一段光纤链路夏季日温度变化的最大值在 0 cm 深处为 28 °C,而在 100 cm 深处只有 0.02 °C,如图 4 所示。类似地,由于夏季的日温度变化幅度比冬季大,同一个深度组合下夏季光纤时间传递的长期稳定性比冬季的差。从图中还可以发现,BTDM 时间间隔和 WDM 波长间隔越大,时间传递长期稳定性对光纤链路铺设深度和季节的变化越敏感。当光纤链路铺设深度和季节的变化使得环境温度变化幅度减小时,时间间隔和波长间隔对光纤时间传递长期稳定性的影响也减小。

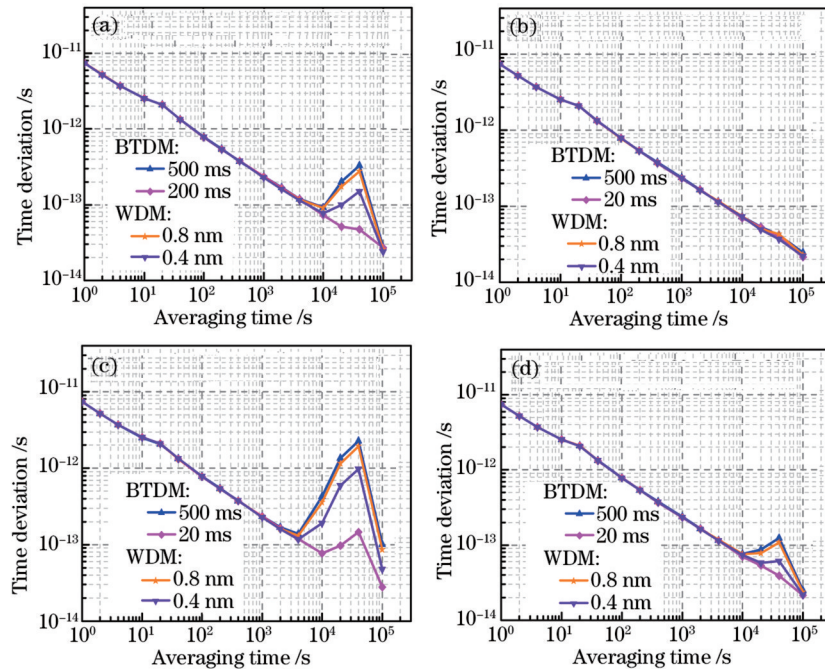


图 6 不同季节、不同深度下 BTDM 和 WDM 光纤时间传递的稳定性。(a) 冬天,(10,25,30,40,45) cm;(b) 冬天,(50,60,65,70,80) cm;(c) 夏天,(10,25,30,40,45) cm;(d) 夏天,(50,60,65,70,80) cm

Fig.6 Stability of BTDM and WDM fiber-optic time transfer in different seasons and depths. (a) Winter, (10, 25, 30, 40, 45) cm; (b) winter, (50, 60, 65, 70, 80) cm; (c) summer, (10, 25, 30, 40, 45) cm; (d) summer, (50, 60, 65, 70, 80) cm

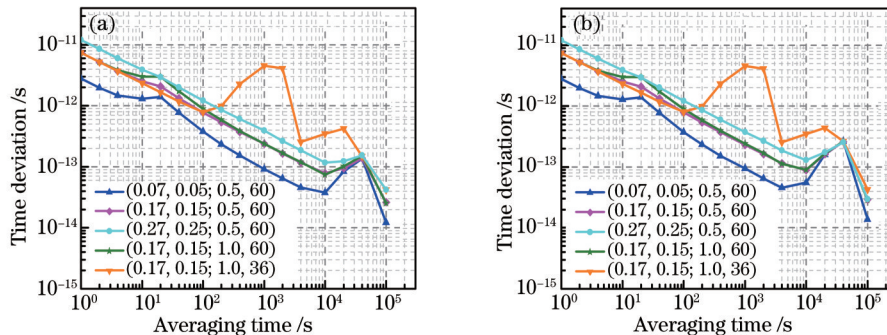


图 7 不同波长波动下(a) BTDM 和(b) WDM 光纤时间传递的稳定性。标记 (x, y, z, t) 中, x 和 y 分别为 A 端和 B 端激光器波长抖动的标准差(pm); z 和 t 分别为激光器波长漂移峰-峰值(pm)和周期(s)

Fig.7 Stability of fiber-optic time transfer based on (a) BTDM and (b) WDM for different wavelength variations. In the legend (x, y, z, t) , x and y represent the standard deviations (pm) of wavelength jitter of laser at site A and B, respectively; z and t are peak-peak value (pm) and period (s) of wavelength drift of laser, respectively

波长随机抖动和漂移对 BTDM 和 WDM 光纤时间传递稳定性的影响如图 7 所示。仿真中,光纤链路铺设深度组合为 20、40、50、80、100 cm,BTDM 光纤时间传递的时间间隔为 100 ms,WDM 光纤时间传递的波长间隔为 0.4 nm。从仿真结果可以看出,波长随机抖动主要影响光纤时间传递的短期稳定性,且随着随机抖动标准差的增大,光纤时间传递的短期稳定性不断恶化。当两端激光器波长随机抖动标准差从(0.07, 0.05) pm 变化为(0.27, 0.25) pm 时,3000 km 光纤时间传递的短期稳定度由 3 ps/s 恶化为 12 ps/s。波长漂移影响的时间传递稳定性时间尺度与漂移周期有关,且漂移的峰-峰值越大影响越大。周期为 60 s 的波长漂

移主要影响 20 s 附近的时间传递稳定度,而周期为 3600 s 的波长漂移主要影响 1000 s 附近的时间传递稳定度。波长随机抖动标准差为(0.27, 0.25) pm 时,周期为 60 s、峰-峰值为 0.5 pm 的波长漂移对时间传递稳定性的影响被波长随机抖动的影响淹没,因而此时基本观察不到漂移对时间传递稳定性的影响。对比图 7 (a)、(b)可以看出,波长随机抖动和漂移对 BTDM 和 WDM 光纤时间传递稳定性的影响基本相同。

4 结 论

采用链路分段处理方法建立了长距离分段光纤时间传递链路时延波动模型,推导了分段链路模型下光纤时间传递稳定性与激光器波长及光纤链路温度变化的关系。根据监测的 SFP 光模块波长变化建立了激光器波长波动模型。以实际温度数据构造了 3000 km 光纤分段链路,研究了波长随机抖动和漂移、光纤链路铺设深度、工作季节等对 3000 km 光纤时间传递稳定性的影响。结果表明:温度主要影响光纤时间传递的长期稳定性,且与光纤链路的铺设深度和光纤时间传递工作季节有关;光纤链路铺设深度和光纤时间传递工作季节变化带来的时间传递长期稳定性损失可以通过减少时间间隔(BTDM)和波长间隔(WDM)来改善;波长随机抖动主要影响光纤时间传递的短期稳定性,两端波长随机抖动标准差小于 0.05 pm 时,光纤时间传递的短期稳定度能优于 3 ps/s;波长漂移主要影响漂移周期对应时间尺度上的时间传递稳定性,且漂移峰-峰值越大,影响越大。

参 考 文 献

- 1 Calhoun M, Sydnor R, Diener W. A stabilized 100-megahertz and 1-gigahertz reference frequency distribution for Cassini radio science[J]. Interplanetary Network Progress Report, 2001, 148: 1-11.
- 2 Amemiya M, Imae M, Fujii Y, *et al.*. Time and frequency transfer and dissemination methods using optical fiber network[C]. Frequency Control Symposium and Exposition, Proceedings of the 2005 IEEE International, 2005: 914-918.
- 3 Ding Xiaoyu, Zhang Baofu, Lu Lin, *et al.*. High precise time transfer with optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 110601.
丁小玉, 张宝富, 卢麟, 等. 高精度时间信号的光纤传递[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 110601.
- 4 Sliwczynski Ł, 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): 133.
- 5 Smotlacha V, Kuna A, Mache W. Time transfer using fiber links[C]. EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 2010: 1-8.
- 6 Hu L, Wu G, Zhang H, *et al.*. A 300-kilometer optical fiber time transfer using bidirectional TDM dissemination[C]. Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 2014: 41-44.
- 7 Zhang Hao, Wu Guiling, Jiang Shaoping, *et al.*. Demonstration of two-way time and frequency transfer over thousands of kilometers fiber link[C]. China Time and Frequency Symposium, 2015: 330-334.
张浩, 吴龟灵, 江少平, 等. 千公里级双向光纤时间传递实验[C]. 全国时间频率学术会议, 2015: 330-334.
- 8 Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, *et al.*. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010602.
李得龙, 程清明, 张宝富, 等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010602.
- 9 Huang Huang, Wu Guiling, Hu Liang, *et al.*. Influence of temperature on the precision of bidirectional TDM based fiber-optic time transfer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506006.
黄璜, 吴龟灵, 胡亮, 等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506006.
- 10 Hedekvist P O, Ebenhag S C, Yasin M, *et al.*. Time and frequency transfer in optical fibers[M]. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- 11 Pinkert T, Boell O, Willmann L, *et al.*. Effect of soil temperature on optical frequency transfer through unidirectional dense-wavelength-division-multiplexing fibre-optic links[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 728-738.
- 12 Buczek Ł. The concept of differential wavelength stabilization of the semiconductor lasers for time and frequency transfer system[C]. European Frequency and Time Forum, 2014: 312-313.
- 13 Dobrogowski A, Kasznia M. Methods of real-time calculation of Allan deviation and time deviation[J]. Advances in Electronics and Telecommunications, 2010, 1(2): 42-46.
- 14 Data sharing infrastructure of earth system science[OL]. <http://www.geodata.cn/Portal/index.jsp>.
地球系统科学数据共享平台[OL]. <http://www.geodata.cn/Portal/index.jsp>.