

温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响

黄 璜¹ 吴龟灵^{1,2} 胡 亮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上海交通大学北斗导航与位置服务上海市重点实验室, 上海 200240

摘要 理论推导了光纤链路双向时延差(TDEV)的稳定度与温度、双向时间间隔、波长间隔,以及距离的关系,并分析了温度对双向时分复用(TDM)光纤时间传递精度的影响。结果表明,随着温度变化幅度、双向时间间隔、以及传输距离的增加,双向TDM光纤链路时延差的稳定度逐渐变差。典型温度变化情况下,时间间隔小于100 ms时,3000 km双向TDM光纤链路时延差的稳定度优于1 ps/d。相同温度变化和距离的情况下,时间间隔小于100 ms的双向TDM光纤链路时延差的稳定度优于波长间隔为0.1 nm的双向波分复用(WDM)光纤链路。在实验室内,进行了双向TDM光纤时间传递实验。实验结果表明:室温环境下双向TDM光纤时间传递系统不对称偏差的均值随光纤长度(2 m~100 km)的变化小于29 ps,接近时间间隔测量仪器的噪底。100 km光纤双向TDM光纤时间传递的稳定度优于30 ps/s和20 ps/d。

关键词 光纤光学; 时间传递; 光纤温度系数; 时间偏差

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0506006

Influence of Temperature on the Precision of Bidirectional TDM Based Fiber-Optic Time Transfer

Huang Huang¹ Wu Guiling^{1,2} Hu Liang¹ 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 relationship of bidirectional propagation time deviation of optical fiber link with the temperature, bidirectional time interval, wavelength difference, and fiber length is derived. The influence of temperature on the precision of bidirectional fiber-optic time transfer based on time division multiplexing (TDM) is analyzed theoretically. The results show that the stability of time deviation of bidirectional TDM fiber link is degraded with the increase of the amplitude of temperature change, bidirectional time interval, and fiber length. For typical ambient temperature change, the stability of time deviation of 3000 km TDM fiber link can be less than 1 ps/d when the bidirectional time interval is less than 100 ms. When temperature change and fiber length are same, the stability of time deviation of bidirectional TDM fiber link with a time interval of less than 100 ms is always less than that of wavelength division multiplexing (WDM) fiber link with a wavelength spacing of larger than 0.1 nm. Bidirectional TDM time transfer experiments are carried out in laboratory on different lengths of fiber. The results show that the fluctuation of average asymmetry of TDM time transfer system is less than 29 ps when the fiber length is changed from 2 m to 100 km, close to the noise floor of the adopted time interval counter. The measured stabilities of bidirectional TDM time transfer over 100 km fiber link are better than 30 ps/s and 20 ps/d, respectively.

Key words fiber optics; time transfer; optical fiber temperature coefficient; time deviation

OCIS codes 0601.2360; 060.5625; 120.3940

收稿日期: 2014-12-09; 收到修改稿日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61127016, 61107041)

作者简介: 黄璜(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤时间频率传递方面的研究。E-mail: huanghuanghappy@sjtu.edu.cn.

导师简介: 吴龟灵(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微波光子信息处理与传输方面的研究。

E-mail: wuguilin@sjtu.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

光纤通路具有带宽高、稳定性好、损耗低等优点,基于光纤的时间传递成为高精度时间传递的有效途径^[1-5]。目前高精度光纤时间传递主要有环回法(Round-trip)^[6]和双向比对法两种^[7]。波兰克拉科夫理工大学(AGH University of Science and Technology)^[8]和法国的激光物理实验室^[9]报道了基于环回法方案的420 km和540 km光纤时间频率传递实验。捷克教育科研网(CESNET)^[10]和瑞典SP技术研究所^[11]报道了基于双向时间比对方案的744 km和560 km光纤时间传递实验。为了抑制后向瑞利散射和菲涅耳反射对传输信号信噪比的影响,上述方案均采用双向波分复用(WDM)传输方式。但双向WDM传输方案存在光纤色散效应引起的双向不对称性,并且距离越长,不对称性越大。AGH理工大学通过测量色散系数和往返链路波长差等方法标定双向时间传递链路的不对称性^[8]。但是标定的精度随着光纤距离的增加而下降,而且实际光纤链路往往由多段不同特性的子光纤链路组成,使得逐段标定的复杂性大大增加。文献[12]提出了一种双向时分复用(TDM)的光纤时间传递方案,该方法在同一光纤链路上用同一波长在不同时间段内传输两端站的定时信号,链路高度对称,并能有效抑制后向散射噪声的影响,可以实现长距离高精度的双向时间传递。

本文理论推导了双向光纤时间传递的稳定性与温度变化、时间间隔以及双向波长差的关系,分析了温度与光纤长度等对双向TDM(CBDM)光纤时间传递系统稳定性的影响。在实验室环境下,比较了双向TDM和WDM光纤时间传递的不对称偏差均值随光纤长度(2 m~100 km)的变换关系;测试分析了100 km双向TDM光纤时间传递稳定度以及其与温度、光纤长度的关系。

2 原理与理论分析

2.1 双向时分复用光纤时间传递原理

双向时分复用光纤时间传递方案如图1所示,两端站(A站和B站)通过一根光纤链路连接。A站的时间信号(1PPS,1 Pulse Per Second)编码后经过光收发模块(假设波长为 λ_1)发送至B站。时间码发送完后,停止A站光信号的发送。B站的时间信号(1PPS)经过延时调整,在接收到A站的时间码信号后,编码调制到同一波长上(λ_1)发送给A端。时间码发送完后,停止B站光信号的发送。A站与B站分时利用光纤链路传输时间码,避免了两站同时有光信号在链路里传输,从而抑制了后向散射噪声的影响。

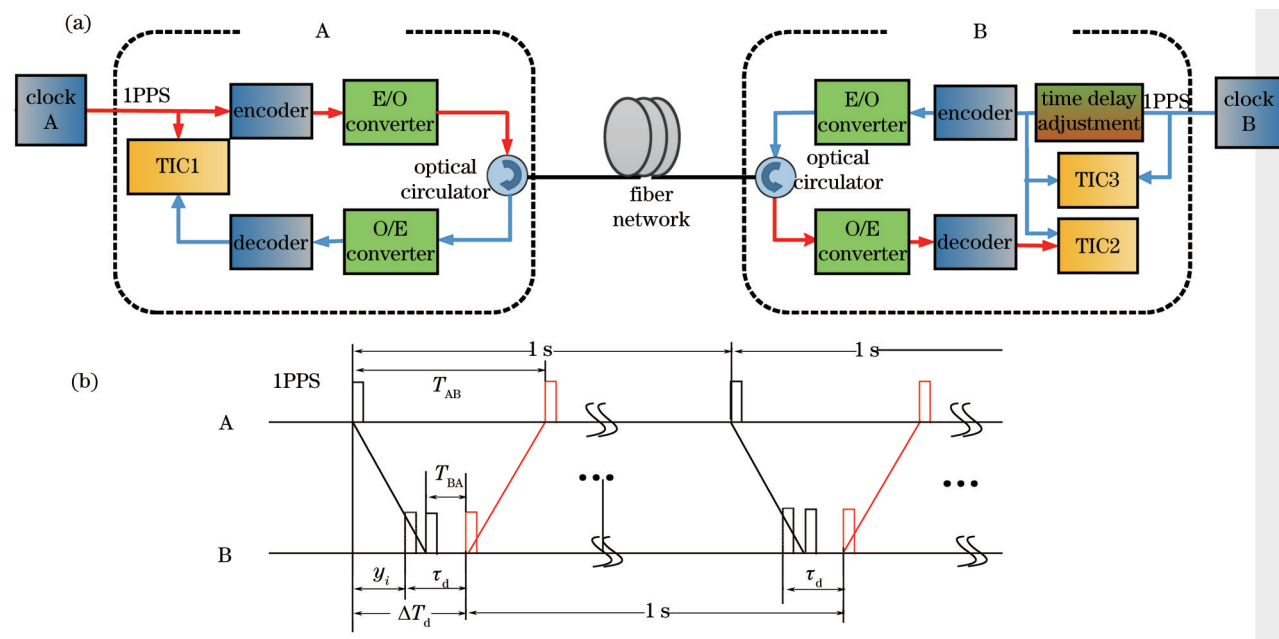


图1 双向时分复用光纤时间传递。(a)原理框图;(b)工作机制

Fig.1 (a) Diagram and (b) working mechanism of bidirectional time division multiplexing based fiber-optic time transfer

A、B两站分别通过各自配备的时间间隔计数器(TIC)测量本地发送的1PPS信号和对站传递过来的1PPS信号之间的时间间隔,读数分别是 T_{AB} 、 T_{BA} 。B站的TIC3用于测量B站1PPS的延迟调整量 τ_d 。由图1(b)可

以得到

$$\begin{aligned} T_{AB} &= y_i + \tau_d + \tau_B + \tau_{BA} + \tau'_A \\ T_{BA} &= -y_i - \tau_d + \tau_A + \tau_{AB} + \tau'_B \end{aligned} \quad (1)$$

式中 y_i 为 A 站与 B 站的瞬态钟差, $\tau_{AB}(\tau_{BA})$ 为定时信号由 A(B)站发送到 B(A)的光纤传输时延; $\tau_A(\tau_B)$ 为 A(B)站的发送设备时延; $\tau'_A(\tau'_B)$ 为 A(B)站接收设备的时延。

由(1)式可得, A 站与 B 站的瞬态钟差为

$$y_i = \frac{1}{2}[(T_{AB} - T_{BA}) + (\tau_A - \tau_B) + (\tau_{AB} - \tau_{BA}) + (\tau'_B - \tau'_A)] - \tau_d. \quad (2)$$

2.2 温度对传输稳定度影响的分析

本文主要分析光纤链路传输时延随温度变化对时间传递稳定度的影响,不考虑两端传递端机时延随温度的变化。不失一般性,假设光纤双向时间传递系统前向和后向传输的波长分别为 λ_1 、 λ_2 ,传输开始时刻分别为 t_1 、 t_2 。由于温度是缓慢变化的,分析中假设一次单向传输过程中光纤的折射率和长度都不变,则第 i 秒内光纤双向传输时延差引入的钟差 x_i 可表示为

$$x_i = \frac{1}{2} \left[\frac{n_2(t_2)L(t_2)}{c} - \frac{n_1(t_1)L(t_1)}{c} \right], \quad (3)$$

式中 $n_1(t_1)$ 为 t_1 时刻波长 λ_1 的光纤折射率; $n_2(t_2)$ 为 t_2 时刻波长 λ_2 的光纤折射率; $L(t_i)$ 表示 t_i 时刻的光纤长度; c 表示光速。

由光程与温度的近似关系^[13],以及不同波长光纤折射率之间的关系 $n_2(t_2) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} n_1(t_1)$, 可得

$$n_2(t_2)L(t_2) = n_2(t_1)L(t_1)(1 + \alpha\Delta T) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} n_1(t_1)L(t_1)(1 + \alpha\Delta T), \quad (4)$$

式中 α 为光纤的温度系数; ΔT 为 t_1 时刻至 t_2 时刻温度的变化。结合(3)、(4)式,可得

$$x_i = \frac{n_1(t_1)L(t_1)}{2c} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 + \alpha\Delta T) - 1 \right]. \quad (5)$$

时间偏差(TDEV)的定义式为^[14]

$$T_{\text{TDEV}}(m) = \sqrt{\frac{1}{6m^2(N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2}, \quad (6)$$

式中 m 为观测的平均时间,单位为秒, N 是采集数据点的个数。将(5)式代入(6)式即可计算出光纤链路双向传输时延差引入的钟差 x_i 的 TDEV。

上述分析中,当双向传输的波长相同($\lambda_1 = \lambda_2$),传输时间不重叠(τ_d 大于一次光纤单向传输时延)时,则为双向 TDM 光纤时间传递方案。当两个方向光波长不相同,为双向 WDM 光纤时间传递方案。

根据文献 [15],采用正弦变化的温度模型,将温度随时间的变化近似表示为: $T(t) = A_1 \sin\left(2\pi \frac{t}{T_1}\right) + A_2 \sin\left(2\pi \frac{t}{T_2}\right) + T_0$ 。其中, T_1 、 T_2 是温度变化的周期; A_1 、 A_2 是相应的变化幅度; T_0 是日平均温度。仿真中,取 T_0 为 25℃; $T_1 = 24 \times 3600$ s; $T_2 = 3600$ s; $\alpha = 7 \times 10^{-6}$ /℃^[16]; $c = 3 \times 10^8$ m/s; 初始时刻的光纤折射率 $n_1 = 1.468$ 。

图 2 给出了当 $A_1 = 5$ °C, $A_2 = 0.5$ °C 和 $A_1 = 10$ °C, $A_2 = 2$ °C 时,光纤长度为 3000 km,双向(a),(b)TDM 和(c),(d)WDM 光纤时间传输链路引入的钟差稳定度。由图可见,双向 TDM 和 WDM 双向传输链路引入的钟差稳定度与温度变化的周期(T_1 和 T_2)存在相关性,平均时间在 $\frac{T_1}{4}$ 附近($2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ s)和 $\frac{T_2}{4}$ 附近(900~1000 s)都会出现极大值,平均时间在 T_1 附近($8 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ s)和 T_2 附近($3 \times 10^3 \sim 4 \times 10^3$ s)出现极小值。平均时间在 $1 \sim \frac{T_2}{4}$ 之间时,双向 TDM 传输链路引入的钟差稳定度先减小到一个最小值,再持续增加,这主要是由时间间隔 τ_d 内的温度变化引起的。

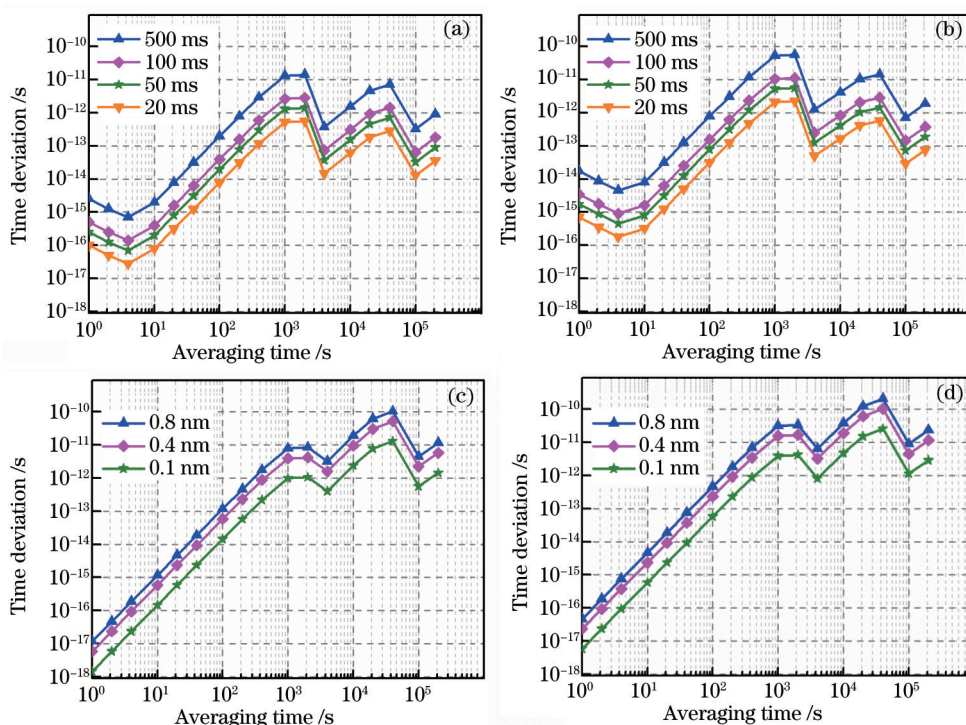


图2 当 $A_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $A_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 2\text{ }^\circ\text{C}$ 时,双向(a),(b)TDM 和(c),(d)WDM 光纤时间传递链路引入的钟差稳定度

Fig.2 Bidirectional propagation induced stabilities of (a), (b)TDM system and (c), (d)WDM system when $A_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ and $A_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 2\text{ }^\circ\text{C}$

由图2(a)、(b)可知,随着双向传输时间间隔的增加,双向TDM传输链路引入的钟差稳定度逐渐变差。但是当时间间隔小于50 ms时,在所有平均时间下的稳定度都小于10 ps。同时可见,温度变化幅度越大,双向TDM传输链路引入的钟差稳定度越小。比较TDM和WDM时间传递的结果可见,温度对双向TDM和WDM时间传递链路引入的钟差的短期(0<100 s)稳定性的影响都小于 10^{-12} ,对传递稳定度的影响可忽略不计;当平均时间大于 10^4 s时,时间间隔100 ms的双向TDM时间传递链路引入的钟差稳定度明显高于波长间隔为0.1 nm的双向WDM时间传递链路。

图3给出了当 $A_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 0.5\text{ }^\circ\text{C}$,时间间隔分别为(a) 50 ms和(b) 500 ms时,双向TDM光纤时间传递链路引入的钟差稳定度与光纤长度的关系。由图可见,在时间间隔一定的情况下,随着光纤长度的增加,双向传输链路引入的钟差稳定度都会变小。但是双向传输链路引入的钟差的短期稳定性随距离的变化明显小于其长期稳定性的变化。当光纤长度从2 m增加到3000 km时,双向传输链路引入的钟差的短期(<100 s)稳定度的

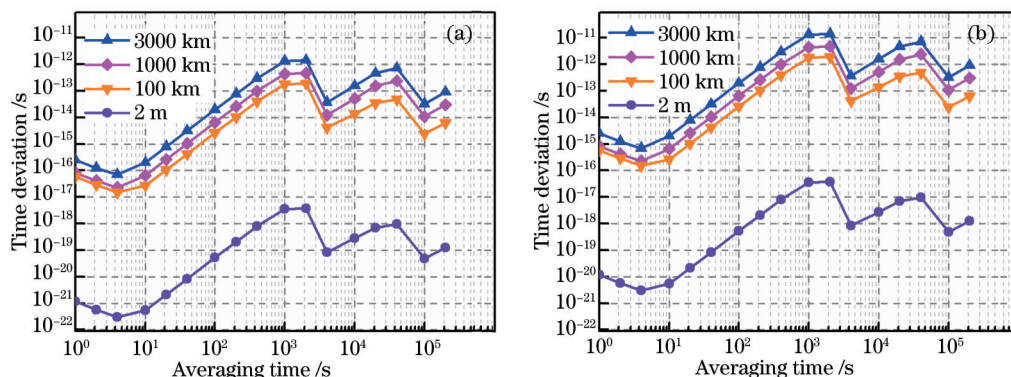


图3 当 $A_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,时间间隔分别为(a) 50 ms和(b) 500 ms时,不同长度光纤的双向TDM 光纤传输链路引入的钟差的稳定度

Fig.3 Bidirectional propagation induced stabilities of TDM system over different lengths of fiber link with an time interval of (a) 50 ms and (b) 500 ms when $A_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $A_2 = 0.5\text{ }^\circ\text{C}$

变化小于 0.1 ps,影响可忽略不计;而其长期(>100 s)稳定度变化超过 10 ps(时间间隔为 500 ms 时)。双向 TDM 时间传递适用距离与双向时间间隔以及传递的稳定度要求有关。当时间传递要求的长期稳定度为皮秒量级时,由图可见,该方法在时间间隔为 50 ms 时的适用距离可接近 3000 km,在时间间隔为 500 ms 时的适用距离只能在 100 km 左右。

3 实验与结果分析

为了研究传输系统的性能,消除钟源的影响,两端站共用同一钟源在实验室内 2 m~100 km 的光纤链路上进行了双向光纤时间传递实验。由于两端站共用同一钟源,测得的钟差 $(T_{AB} - T_{BA})/2$ 实际上就是系统的不对称性偏差。

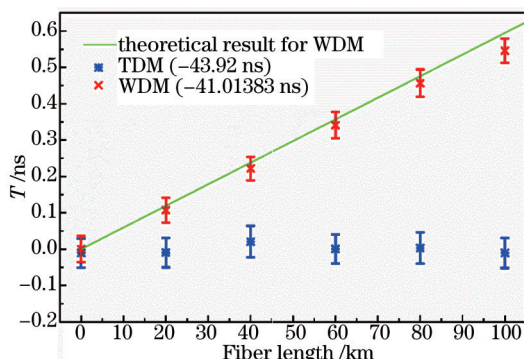


图 4 双向 TDM 和双向 WDM 光纤传递系统的不对称性偏差随光纤长度的变化

Fig.4 Asymmetric deviation based on bidirectional TDM and WDM time transfer over different lengths of fiber

在不同长度光纤上,双向时间传递系统在 1 h 内测得的不对称性偏差的均值和标准差如图 4 所示。结果表明:每一同一光纤长度下,双向 TDM 和双向 WDM 时间传递系统不对称偏差的标准差均小于 45 ps。双向时间传递系统不对称性偏差包括双向链路的时延差和两端站的不对称性偏差。当光纤长度为 2 m 时,双向 TDM 和双向 WDM 光纤时间传递系统不对称偏差的均值分别为 43.920 ns 和 41.014 ns。由于此时双向链路的时延差可以忽略,因此测到的双向时间传递系统的不对称性偏差可以看作是系统两端站的不对称性偏差。为了清晰地观察双向传输链路时延差引入的钟差与光纤长度的关系,图 4 中,减去了对应系统两端站的不对称性偏差。由图可见,在不同长度的光纤链路上(2 m~100 km),双向 TDM 光纤时间传递系统不对称偏差均值的波动小于 29 ps,接近测量仪器(SR620)的噪底。而双向 WDM 光纤时间传递系统的不对称偏差均值随着光纤长度增加而线性增加,且与色散带来的双向链路不对称性偏差的理论值相符。

综上所述,由于双向 TDM 光纤时间传递系统往返链路的波长相同,100 km 内双向 TDM 光纤时间传递往返链路时延差引入的钟差小于 29 ps,即链路双向时延差引起的时间传递的不确定度可以小于 29 ps。

图 5(a)为 100 km 光纤双向 TDM 时间传递系统连续 10 d 的测量结果。由图可见,实验室温度在 24.062 °C~29.187 °C 波动,单向传输时延 T_{AB} 、 T_{BA} 的峰峰值分别为 17.942 ns 和 17.935 ns,标准差分别是

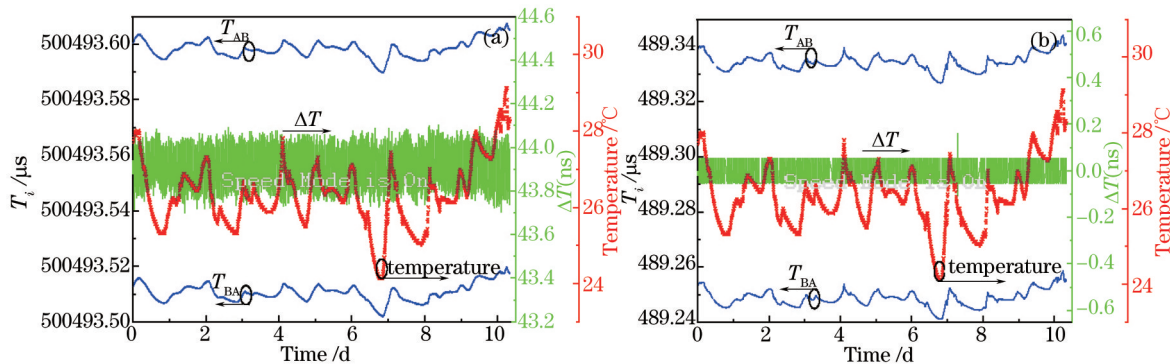


图 5 100 km 光纤链路双向 TDM 时间传递时(a)实验结果和(b)理论结果

Fig.5 (a) Experimental and (b) theoretical results of bidirectional time transfer over 100 km optical fiber link

3.141 ns 和 3.144 ns。测得钟差波动的峰峰值为 402 ps,标准差为 44 ps。由于往返链路高度对称,往返链路单向时延随温度的变化近似相等,从而使得双向时间比对测到的钟差的波动性远远小于单向时延的波动,在很大程度上消除了温度的影响。图 5(b)给出了室温情况下,光纤长度为 100 km,时间间隔为 0.5 s 时,仿真得到双向 TDM 光纤时间传递系统的单向传输时延和两端站的钟差。比较图 5(a)、(b)可知,在室温下,温度变化时,在 100 km 光纤双向 TDM 时间传递系统上测量得到的单向传输时延随温度的变化趋势和大小与仿真结果吻合。但是在实际测量中时间传递系统还受到测量仪器、两端站不对称性等因素的影响,测到的两端站的钟差的抖动要大于仿真得到的钟差。

室温下 100 km 光纤双向时间传递系统测试和理论计算的稳定度如图 6 所示。可以看出,双向 TDM 系统的秒稳定度优于 30 ps,天稳定度优于 20 ps。所有平均时间上的稳定度均小于 30 ps,并且在约 250 s 处,达到了最小值,约为 4 ps。为了比较,图 6 中同时给出了同一链路上的双向 WDM(波长间隔为 0.8 nm)光纤时间传递系统的稳定度。可见,100 km 光纤双向 TDM 时间传递系统与双向 WDM 时间传递系统的稳定度相当。仿真得到,室温下 100 km 双向 TDM 时间传递链路引入的钟差秒稳定度在 30 ps 左右,与 2 m 光纤的双向 TDM 时间传递系统的秒稳定度相当,其长期稳定度远远小于 2 m 光纤的双向 TDM 时间传递系统的长期稳定度,可知温度对 100 km 双向 TDM 时间传递链路的影响可忽略不计。同时仿真结果显示温度对 100 km 双向 WDM 时间传递链路的影响可忽略不计。理论上,100 km 光纤双向 TDM 和双向 WDM 时间传递系统的稳定性应与 2 m 光纤双向 TDM 时间传递系统的稳定度相当。但图 6 的实验结果中,两种系统 100 km 光纤时间传递的长期稳定性明显低于 2 m 光纤双向 TDM 时间传递系统的长期稳定度。这可能主要与激光器发射波长随温度的缓慢变化、偏振模色散^[17]等有关。

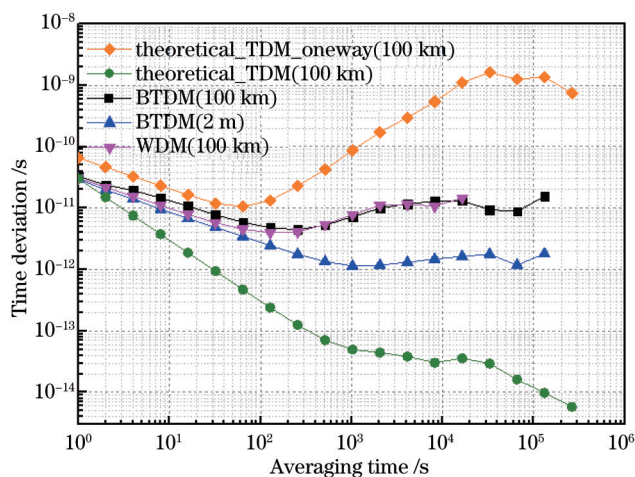


图 6 室温下,100 km 光纤双向时间传递系统测试和理论计算的稳定度

Fig.6 Experimental and theoretical time transfer stability of 100 km bidirectional time transfer fiber link under room-temperature

4 结 论

理论分析了温度对双向 TDM 和双向 WDM 光纤时间传递稳定性的影响、光纤长度与双向 TDM 时间传递系统稳定性的关系,并在实验室环境下,进行了 2 m~100 km 光纤双向 TDM 和 WDM 光纤时间传递实验。结果表明,随着温度变化幅度、双向时间间隔、以及传输距离的增加,双向 TDM 光纤链路时延差的稳定度逐渐变差。在典型温度变化情况下,时间间隔小于 100 ms 时,3000 km 双向 TDM 光纤链路时延差的稳定度优于 1 ps/d。相同温度变化和距离的情况下,时间间隔小于 100 ms 的双向 TDM 光纤链路时延差的稳定度优于波长间隔为 0.1 nm 的双向波分复用 WDM 光纤链路。实验结果表明:光纤长度从 2 m 增加到 100 km 时,双向 TDM 光纤时间传递系统在 1 h 内的不对称偏差的均值的波动接近测量仪器(SR620)的噪底;而双向 WDM 光纤传递系统不对称偏差均值与色散带来的双向链路不对称性偏差的理论值相近。100 km 双向 TDM 光纤时间传递中测量得到的单向传输时延随温度变化的趋势与理论结果吻合,钟差波动的峰峰值为 402 ps,标准差为 44 ps。

参 考 文 献

- 1 W J Riley. Handbook of Frequency Stability Analysis[M]. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2008.
- 2 M Amemiya, M Imae, Y Fujii, *et al.*. Simple time and frequency dissemination method using optical fiber network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(5): 878–883.
- 3 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.
- 4 O Lopez, A Amy–Klein, M Lours, *et al.*. Hing–resolution microwave frequency dissemination on an 86–km urban optical link[J]. Appl Phys B, 2010, 98(4): 723–727.
- 5 M Fujieda, M Kumagai, T Gotoh, *et al.*. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1223–1228.
- 6 Lu Lin, Wu Chuanxin, Zhu Yong, *et al.*. High accurate time transfer on 125 km fiber[C]. First Session of the China Satellite Navigation Conference, 2010.
卢 麟, 吴传信, 朱 勇, 等. 125 km 高精度光纤时间传递实验[C]. 第一届中国卫星导航学术年会, 2010.
- 7 Yu Longqiang, Lu Lin, Wang Rong, *et al.*. Analysis of the Sagnac effect and its influence on the accuracy of the optical fiber time transfer system[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.
- 8 Ł Sliwczyński, P Krehlik, A Czubla, *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): 133–145.
- 9 O Lopez, A Kanj, P E 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.
- 10 V Smotlacha, A Kuna, W Mache. Time transfer using fiber links[C]. 24th European Frequency and Time Forum, 2010: 1–8.
- 11 S C Ebenhag, P O Hedekvist, P Jarlemark, *et al.*. Measurements and error sources in time transfer using asynchronous fiber network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(7): 1918–1924.
- 12 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.
- 13 A Steimacher, A N Medina, A C Bento, *et al.*. The temperature coefficient of the optical path length as a function of the temperature in different optical glasses[J]. Journal of Non–Crystalline Solids, 2004, 348(15): 240–244.
- 14 W D Grover, D Stamatlakis. Continuous TDEV calculation for *in-situ* synchronisation monitoring in SONET/SDH networks[J]. Electron Lett, 1993, 29(16): 1405–1406.
- 15 M Calhoun, L R Sydnor, W Dienerl. A Stabilized 100–Megahertz and 1–Gigahertz Reference Frequency Distribution for Cassini Radio Science[R]. IPN Progress Report, 2002: 42–148.
- 16 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.
- 17 O Lopez, A Amy–Klein, C Daussy, *et al.*. 86–km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer[J]. The European Physical Journal D, 2008, 48(1): 35–41.

栏目编辑: 王晓琰