

光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响

李得龙^{1,2} 程清明³ 张宝富¹ 卢麟¹ 雷平纪² 李晓亚¹

¹解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; ²中国人民解放军 68302 部队, 陕西 渭南 714000;

³中国人民解放军 73686 部队, 江苏 南京 210014

摘要 为研究光纤频率传递的稳定度损失,分析了光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响,得出因温度变化引起的链路长度变化、折射率变化和激光器输出波长漂移带来的时延波动是影响频率传递稳定度的主要因素。建立 Round-trip 时序模型,定量分析时延波动残留,发现因环境温度缓变引入的时延波动可以得到有效补偿,因激光器动态结温度快变导致输出波长漂移引入的时延波动无法有效补偿,是稳定度损失的关键因素。降低激光器动态结温度的变化速率,是提高频率传递稳定度的有效手段。要时时延波动对频率传递稳定度的影响小于 10^{-15} s^{-1} 、 10^{-20} d^{-1} (d^{-1} 即每天),必须采取有效的温控措施,精确控制激光器动态结温度变化率,使其小于 $0.04 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

关键词 光纤光学;频率传递;频率稳定度;时延波动残留

中图分类号 TM935.11 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.010602

Research on the Impact of Optical Fiber Link Delay Fluctuation on Frequency Transfer Stability

Li Delong^{1,2} Cheng Qingming³ Zhang Baofu¹ Lu Lin¹ Lei Pingji² Li Xiaoya¹

¹Institute of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

²Troops 68302 People's Liberation Army, Weinan, Shaanxi, 714000, China;

³Troops 73686 People's Liberation Army, Nanjing, Jiangsu 210014, China

Abstract In order to study the performance of frequency transfer based on fiber link, the impact of the transfer delay fluctuation upon the frequency transfer stability is analyzed. It is found that the transfer delay fluctuations caused by the variations in refractive index, the variation in fiber link length, and the excursion in laser output wavelength are major factors reducing the stability of frequency transfer. Using the newly established round-trip timing sequence model, it is shown that the transfer delay fluctuation resulting from temperature slow variation can be compensated, but the transfer delay fluctuation caused by temperature fast variation cannot be compensated. Reducing the rate of the dynamic junction temperature variations of laser is an effective method to improve the stability of frequency transfer. In order to satisfy the requirement that the short term stability and long term stability are less than 10^{-15} s^{-1} and 10^{-20} d^{-1} , respectively, some effective measure, must be taken and the rate of the dynamic junction temperature variations of laser must be precisely controlled to be less than $0.04 \text{ }^\circ\text{C/s}$.

Key words fiber optics; frequency transfer; frequency stability; transfer delay fluctuate rudimental

OCIS codes 060.2630; 060.3510; 060.5625; 070.1170

1 引言

高精度时频同步在许多关键领域中的应用日显突出。鉴于光纤具有低损耗、高稳定性、抗电磁干扰能力强以及现有的光纤通信网络分布广泛等特点,利用光纤链路进行高精度、远距离时频传递已成为当前研

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-09-11; 网络出版日期: 2013-00-00

基金项目: 国家自然科学基金(61174199, 61371121)

作者简介: 李得龙(1985-),男,硕士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: dleinstan@163.com

导师简介: 张宝富(1965-),男,教授,硕士生导师,主要从事微波光子学及光纤时频传递方面的研究。

E-mail: zhangbaofu@163.com

研究的热点。据最新报道,在 100 km 链路上,频率传递的稳定度已达到 10^{-10} d^{-1} (d^{-1} 即每天)量级,时间传递的精度在 50 ps 以内^[1]。

目前基于光纤链路的时频传递主要采用 Round-trip 补偿链路中因时延波动引起的相位波动^[2-4]。Round-trip 的核心是相位信息的实时探测和精确补偿^[5]。已广泛采用的相位精确补偿方法有电延迟线法^[6]、数字鉴相移相法^[7]、基于压控晶体振荡器和锁相环的精确相位补偿法^[8]。以上方法均基于 Round-trip 中前向路径和后向路径完全对称这一假定条件,对环境温度缓变引起的相位波动可以有效补偿^[9-10],而对于温度快变导致的双向路径不对称的情况没有进行深入的分析研究。

基于以上考虑,本文针对温度对纤芯折射率、光纤热膨胀、激光器波长漂移和色散的影响进行了深入的探讨和研究,分析各自引入的时延波动,建立 Round-trip 时序模型,定量分析了 Round-trip 中双向路径“不对称”引入的时延波动残留对频率稳定度的影响。

2 引起光纤链路时延波动的主要因素

光纤的传输时延由纤芯折射率和链路长度决定,当温度变化时,纤芯折射率和链路长度相应发生变化,引起时延波动。为便于分析,建立光载波在光纤链路上的传输模型,如图 1 所示。

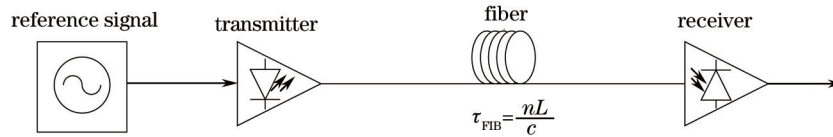


图1 光载波传输模型

Fig.1 Scheme for lightwave transmitted in fiber

图 1 中,射频(RF)信号被调制到光载波上,经长度为 L 的光纤传播,在接收端进行光电转换,恢复出射频信号。 n 表示纤芯折射率, c 表示真空中的光速,传输时延可表示为 $\tau_{\text{FIB}} = \frac{nL}{c}$ 。在热膨胀作用下,光纤长度 L 表示温度的函数。纤芯折射率与温度和波长有关,因此传输时延波动可表示为^[6]

$$\frac{d\tau(t)}{dt} = \frac{n}{c} \frac{\partial L}{\partial T} \Delta T_c(t) + \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_c(t) + \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial \lambda} \Delta \lambda_{\text{laser}} + \Delta \tau_{\text{disp}}(t), \quad (1)$$

式中 $\Delta T_c(t)$ 表示环境温度随时间的波动函数, $\Delta \lambda_{\text{laser}}$ 表示激光器输出波长的漂移量, $\Delta \tau_{\text{disp}}$ 表示色散变化引入的时延波动。(1)式中第一项是光纤热膨胀引入的时延波动,第二项是纤芯折射率受温度变化的影响引入的时延波动,第三项是纤芯折射率受波长漂移的影响引入的时延波动,第四项是色散变化引入的时延波动。

根据文献[11],对环境温度变化建立以下数学模型:

$$\Delta T_c(t) = \frac{\Delta T_c}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P_c} t\right), \quad (2)$$

式中 P_c 表示环境温度的变化周期,取 86400 s。夏季日气温变化范围为 $15^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$,光纤埋地后,环境温度变化对光纤链路的影响降低 99%,变化幅度 ΔT_c 取 0.2°C 。

2.1 光纤链路长度受温度影响引入的时延波动

通信光缆通常埋在地下,光纤的温度随外界温度的变化而变化。石英光纤具有一定的温度系数,其长度在一定范围内与温度成比例变化,由此引发传输时延波动。光纤长度与温度的关系可表示为^[12]

$$L(t) = l_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha \Delta T_c(t) + \beta \Delta T_c(t)^2], \quad (3)$$

式中 $l_{25^\circ\text{C}}$ 表示室温下 (25°C) 光纤的长度; α 、 β 表示光纤的热膨胀系数,分别为 $\alpha = 1.54 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\beta = 5.3 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ 。光纤链路长度受温度影响引入的时延波动可表示为

$$\Delta \tau_{\text{length}} = \frac{n}{c} \frac{\partial L}{\partial T} \Delta T_c(t). \quad (4)$$

2.2 纤芯折射率受温度影响引入的时延波动

根据 Sellmeier 方程,纤芯折射率可表示为^[13]

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

式中 λ 表示光波波长, 单位为 μm ; Sellmeier 方程中 A, B, C, D, E 是 5 个针对熔融石英的经验参数, 均是温度的函数, 对于指定波长, 折射率与温度呈近似线性关系。计算折射率与温度的关系, 波长 $\lambda = 1550.0 \text{ nm}$ 时, $\frac{\partial n}{\partial T} = 1.0636 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。纤芯折射率受温度影响引入的时延波动可表示为^[14]

$$\Delta\tau_{\text{refr}} = \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_c(t). \quad (6)$$

2.3 纤芯折射率受激光器波长漂移影响引入的时延波动

激光器输出波长与激光器动态结温度成线性变化, 在 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 温漂系数为 $k=0.0109 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 线性相关系数大于 0.998^[14]。文献[15]对商用蝶形封装分布反馈(DFB)激光器动态结温度进行测试, 在一个热电制冷(TEC)驱动电流扫描周期(0.25 s)内, 激光器动态结温度变化幅度为 $\pm 0.025 \text{ }^\circ\text{C}$, 变化的趋势近似正弦曲线。对激光器动态结温度变化建立以下模型:

$$\Delta T_i(t) = \frac{\Delta T_l}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P_l} t\right), \quad (7)$$

式中 $\Delta T_i(t)$ 表示动态结温度变化函数, ΔT_l 表示动态结温度的变化幅度, P_l 表示动态结温度的变化周期。根据文献[15], $\Delta T_l = 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_l = 0.25 \text{ s}$ 。激光器相对中心波长漂移 $\Delta\lambda_{\text{laser}}(t)$ 与动态温度结快变的关系可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{laser}}(t) = \Delta T_i(t)k = \frac{\Delta T_l}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P_l} t\right)k. \quad (8)$$

由(5)式, 折射率与波长的关系 $\partial n/\partial\lambda$ 可表示为

$$\frac{\partial n}{\partial\lambda} = \frac{-1}{n\lambda^3} \left[\frac{BC}{(1-C/\lambda^2)^2} + \frac{DE}{(1-E/\lambda^2)^2} \right]. \quad (9)$$

计算得出 $\frac{\partial n}{\partial\lambda} = -1.19388 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 。因此纤芯折射率受激光器波长漂移影响引入的时延波动可表示为^[16]

$$\Delta\tau_{\text{wav}} = \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial\lambda} \Delta\lambda_{\text{laser}} = \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial\lambda} \frac{\Delta T_l}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P_l} t\right)k. \quad (10)$$

2.4 光纤色散受温度和波长漂移影响引入的时延波动

光纤的色散可表示为^[17-18]

$$D = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (11)$$

式中 λ_0 表示零色散波长, S_0 表示色散斜率 ($S_0 = \frac{\partial D}{\partial\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0}$)。色散与温度和波长的关系可表示为

$$D = D_\lambda + \frac{\partial D}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial D}{\partial\lambda} \Delta\lambda, \quad (12)$$

式中 D_λ 表示波长为 λ 时, 室温下对应的色散值; 右边后两项分别表示温度变化和波长变化对色散的影响。由(11)式, 温度和波长对色散的影响分别为^[17]

$$\frac{\partial D}{\partial T} = \frac{1}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \frac{\partial S_0}{\partial T} - \frac{S_0 \lambda_0^3}{\lambda^3} \frac{\partial \lambda_0}{\partial T}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial D}{\partial\lambda} = \frac{S_0}{4} \left(1 + 3 \frac{\lambda_0^4}{\lambda^4} \right). \quad (14)$$

对于 G.652 光纤, 室温下 $\partial S_0/\partial T$ 的典型值为 $-2.46 \times 10^{-6} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km} \cdot ^\circ\text{C})$, $\partial \lambda_0/\partial T$ 的典型值为 $0.026 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, S_0 的典型值为 $9.352 \times 10^{-2} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ^[17-18]。

对于 1550.0 nm 的光波, 室温下色散值 $D_\lambda = 16.7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 温度对色散的影响为 $\frac{\partial D}{\partial T} = -1.04646 \times 10^{-3} \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km} \cdot ^\circ\text{C})$; 波长对色散的影响为 $\frac{\partial D}{\partial\lambda} = 6.0194 \times 10^{-2} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。因此, 色散变化引入的时延波动可表示为

$$\Delta\tau_{\text{disp}} = DL\Delta\lambda_{\text{laser}}(t) = (D_\lambda + \frac{\partial D}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial D}{\partial\lambda} \Delta\lambda)L\Delta\lambda_{\text{laser}}(t), \quad (15)$$

3 时延波动引起的频率稳定度损失分析与仿真

3.1 时延波动与频率稳定度的关系

中心频率为 f_0 的频标信号调制到光载波后,在光纤中传播时,光载波的传输时延会随环境温度的变化而波动,时延波动对频率传递非常敏感。光纤链路中的传输时延 $\tau(t)$ 、相位波动 $\varphi(t)$ 、相对频率波动 $\Delta f(t)$ 三者的关系如下^[19]:

$$\Delta f(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (16)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = 2\pi f_0 \frac{d\tau(t)}{dt}, \quad (17)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{d\varphi(t)}{f_0 dt} = 2\pi \frac{d\tau(t)}{dt}, \quad (18)$$

式中 $\Delta f/f_0$ 表示频率的波动量与频标频率之比,定义为频率稳定度。令 $x_i = \frac{\Delta f(t_i)}{f_0}$, $\bar{y}_i = \frac{x(t_i + \tau) - x(t_i)}{\tau}$, 表示频率稳定度的阿伦方差定义为^[20]

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{(\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2}{2} \right\rangle. \quad (19)$$

3.2 Round-trip 时序图与补偿后的时延波动残留

Round-trip 中相位精确补偿的前提假设条件是前向光载波和后向光载波在经历路径上的时延完全对称。实际应用中,由于环境温度实时变化,前向光载波与后向光载波在相同路径上的时延存在差异,导致相位波动无法完全补偿。Round-trip 的时序图如图 2 所示。

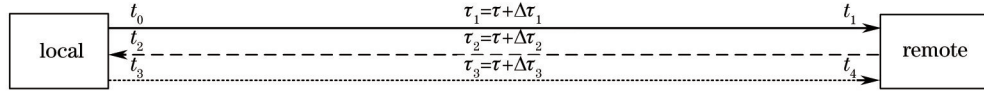


图 2 Round-trip 的时序关系图

Fig.2 Time sequence in round-trip

图 2 中, τ 是光纤链路中的固有时延,定义为 $\tau_1 = nL/c$, $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 是由温度变化引起的时延波动量,随外界环境实时变化,与起始时间密切相关。光载波在 t_0 时刻由 local 端经由长度为 L 的光纤路径,在 t_1 时刻到达 remote 端,传递时间为 τ_1 , $t_1 = t_0 + \tau_1$; 经光学环形器,部分光载波沿原路径返回,在 t_2 时刻到达 local 端,传递时间为 τ_2 , $t_2 = t_0 + \tau_1 + \tau_2$; 经相位补偿模块处理后,在 t_3 时刻再次向 remote 端传递,传递时间为 τ_3 , 相位补偿模块的处理时延为 τ_0 (假定为 1000 ns), 则 $t_3 = t_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_0$ 。由于链路温度与激光器动态结温度处于动态变化中,因此起始时间分别为 t_0 、 t_1 、 t_3 时,时延波动 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 之间存在微小差异,将相位补偿等效在时延波动上,补偿后的时延波动残留可以由下式表示:

$$\Delta\tau_{\text{rudim}} = \tau_3 - \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2} = \Delta\tau_3 - \frac{(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)}{2}, \quad (20)$$

此处的 $\Delta\tau_{\text{rudim}}$ 是 Round-trip 中导致频率稳定度损失的主要因素。

3.3 Round-Trip 中时延波动残留及对频率稳定度的影响仿真

3.3.1 光纤链路长度变化引入的时延波动残留及对频率稳定度的影响

光纤埋地的情况下,外界温度对光纤链路热膨胀的影响是一个缓变效应,时延波动残留约为 5×10^{-17} s, 变化趋势与外界温度一致,对频率稳定度的影响均为 10^{-23} s⁻¹、 10^{-21} d⁻¹, 如图 3 所示。

3.3.2 纤芯折射率受温度影响引入的时延波动残留及对频率稳定度的影响

外界温度对光纤折射率的影响也是一个缓变效应,时延波动残量约为 2.5×10^{-17} s, 变化趋势与外界温度一致,对频率稳定度的影响为 10^{-23} s⁻¹、 10^{-20} d⁻¹, 如图 4 所示。

由以上分析可知,基于环境温度变化是一个缓变过程的前提,温度变化导致光程差变化引入的时延波动可以通过 Round-trip 有效补偿,补偿后的时延波动残留量级为 10^{-17} s, 对频率稳定度的影响量级为

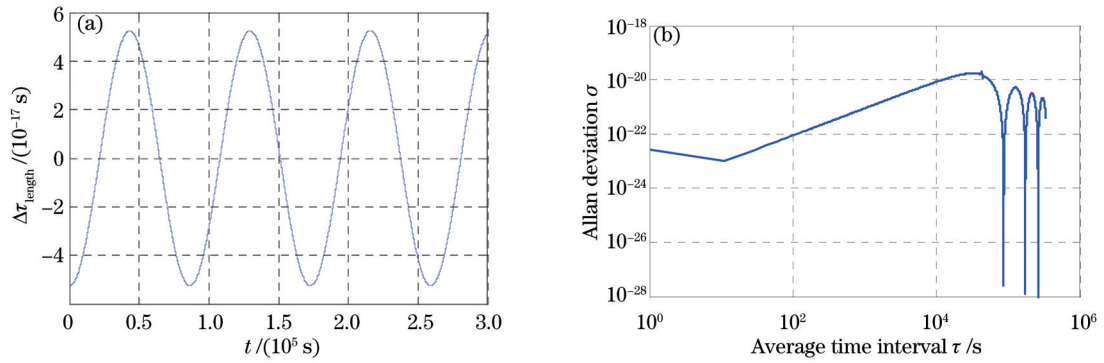


图3 (a) 光纤链路长度变化引入的时延波动残留及(b)对频率稳定度的影响

Fig. 3 (a) Rudimental transfer delay fluctuation introduced by the fiber length variation following with temperature and (b) its impact on frequency stability

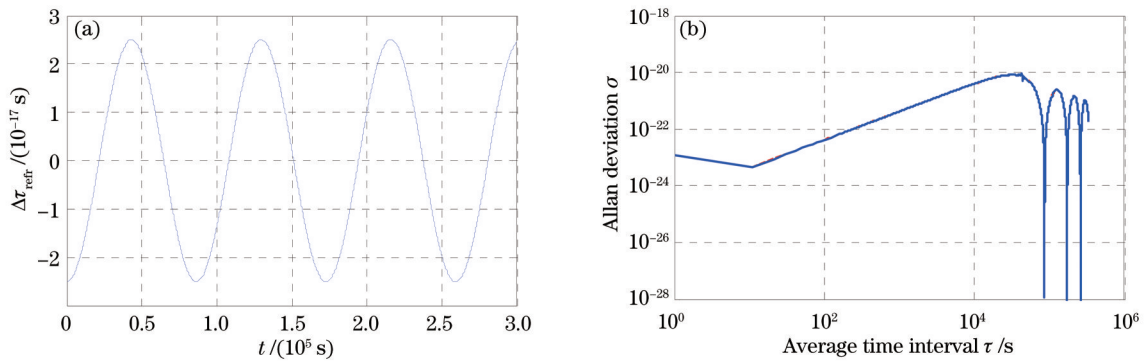


图4 (a) 纤芯折射率受温度影响引入的时延波动残留及(b)对频率稳定度的影响

Fig. 4 (a) Rudimental transfer delay fluctuation introduced by the fiber refractive variation following with temperature and (b) its impact on frequency stability

10^{-23} s^{-1} 、 10^{-20} d^{-1} 。

3.3.3 纤芯折射率受激光器波长漂移影响引入的时延波动残留及对频率稳定度的影响

DFB激光器的波长漂移主要受动态结温度变化的影响。动态结温度的变化是一个快变过程,对1550.0 nm波长进行仿真研究,如图5所示,补偿后的时延波动残留为 $2.7 \times 10^{-14} \text{ s}$,远大于外界温度缓变引入的时延波动残留,周期与激光器动态结温度的变化周期一致,因此温度快变引入的时延波动在Round-trip中不能有效补偿。其对频率稳定度的影响主要体现在短期稳定度劣化上,量级为 10^{-15} s^{-1} 。

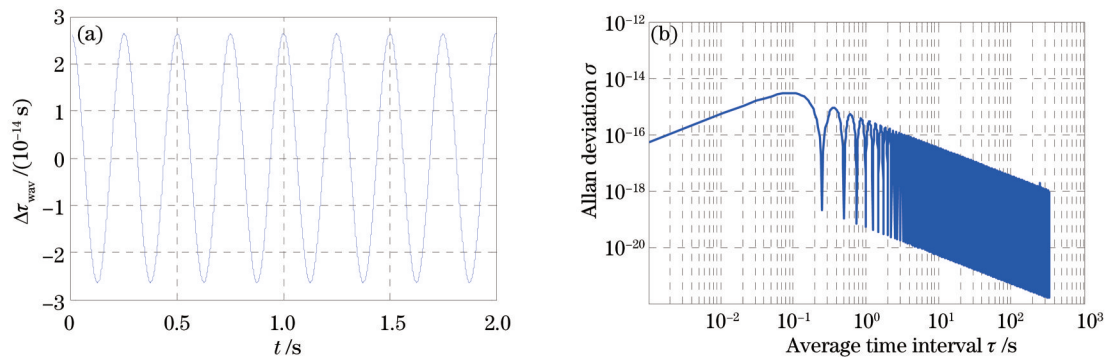


图5 (a) 纤芯折射率受激光器波长漂移影响引入的时延波动残留及(b)对频率稳定度的影响

Fig. 5 (a) Rudimental transfer delay fluctuation introduced by the fiber refractive variation following with wavelength excursion and (b) its impact on frequency stability

3.3.4 色散引入的时延波动残留及对频率稳定度的影响

在同一光纤路径中,色散值与光波波长相对应。当波长恒定时,色散引入的时延波动在Round-trip双

向路径中完全对称,可以有效补偿。激光器动态结温度快变时,输出波长漂移,引起色散值的波动,产生时延波动残留。结合(15)、(20)式,对 1550 nm 波长进行仿真研究,得出色散变化引入的时延波动残留量为 1.1×10^{-14} s,对频率传递的短期稳定度影响为 10^{-15} s^{-1} ,如图 6 所示。

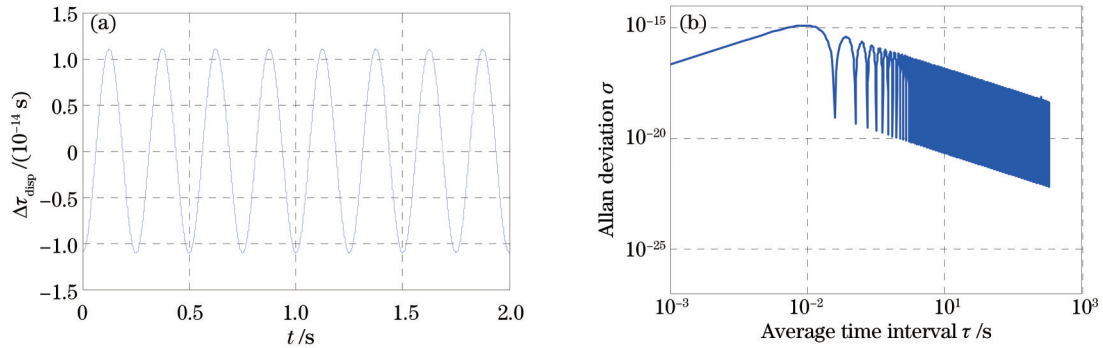


图 6 (a)色散引入的时延波动残留及(b)对频率稳定度的影响

Fig. 6 (a) Rudimental transfer delay fluctuation introduced by the chromatic dispersions variation and (b) its impact on frequency stability

综合以上分析,当温度处于缓变状态时,时延波动在 Round-trip 中可以有效补偿,时延波动残留量为 10^{-17} s,对频率稳定度的影响量为 10^{-23} s^{-1} 、 10^{-21} d^{-1} 。而温度处于快变状态时,时延波动在 Round-trip 中无法有效补偿,时延波动残留的量级为 10^{-14} s,会恶化频率传递的短期稳定性。

计算总时延波动残留及对频率稳定度的影响,如图 7 所示, $\lambda = 1550.0 \text{ nm}$ 时,时延波动残留为 1.5×10^{-14} s,波动周期近似等于激光器结温度变化周期,对频率稳定度的影响量为 10^{-14} s^{-1} 、 10^{-19} d^{-1} 。

研究发现,若降低 DFB 激光器动态结温度的变化速率,即提高激光器输出波长的稳定性,可以提高频率传递的稳定度。分别计算了激光器结温度变化率为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 和 $0.04 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时的频率稳定度,如图 7(b)所示。对频率传递短期稳定度的影响量级分别为 $0.8 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 和 $2 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$,对长期稳定度的影响量级分别为 $2 \times 10^{-19} \text{ d}^{-1}$ 和 $3.5 \times 10^{-20} \text{ d}^{-1}$ 。由此可得出,影响频率传递稳定度的关键因素是激光器动态结温度快变引发的输出波长漂移,激光器输出波长的稳定度提高一个数量级,频率传递的稳定度相应提高一个数量级。

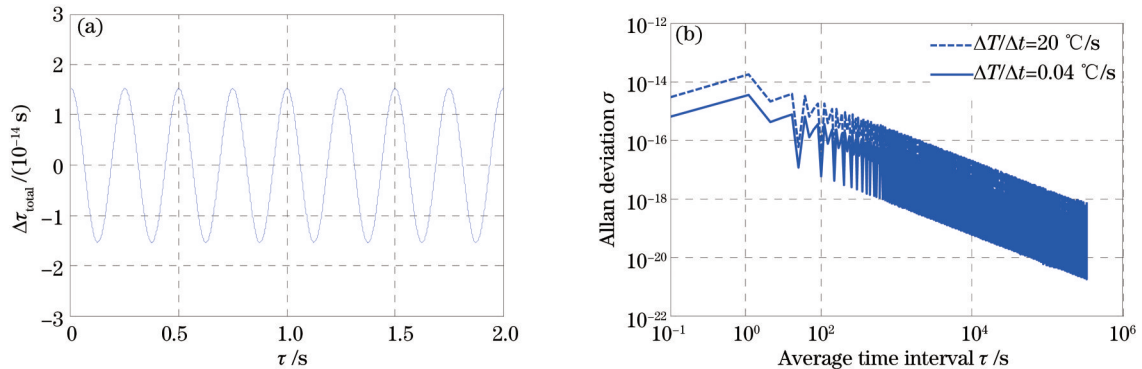


图 7 (a)温度变化时延波动残留及(b)对频率稳定度的影响

Fig.7 (a) Rudimental transfer delay fluctuation introduced by temperature variation and (b) its impact on frequency stability

4 结 论

研究发现,在频率传递过程中,温度缓变引入的时延波动利用 Round-Trip 可以有效补偿,时延波动残留量为 10^{-17} s,对频率稳定度的影响量为 10^{-23} s^{-1} 、 10^{-21} d^{-1} 。而激光器动态结温度变化等温度快变引入的时延波动, Round-trip 不能有效补偿,时延波动残留量为 10^{-14} s,对频率稳定度的影响量级大于 10^{-14} s^{-1} 、 10^{-19} d^{-1} ,这是频率传递稳定度恶化的关键因素。要使频率传递稳定度的理论值在 10^{-15} s^{-1} 、 10^{-20} d^{-1} 量级,必须对激光器采取稳频措施,精确控制激光器动态结温度的变化率,使其小于 $0.04 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

参考文献

- 1 B Wang, C Gao, L J Wang, *et al.*. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- 2 Sliwczynski Ł, Krehlik P, Buczek Ł, *et al.*. Fiber optic RF frequency transfer on the distance of 480 km with the active stabilization of the propagation delay[C]. *IEEE European Frequency and Time Forum(EFTF)*, 2012. 424–426.
- 3 Przemysław Krehlik, Łukasz Sliwczynski, Łukasz Buczek, *et al.*. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2012, 61(10): 2844–2851.
- 4 Sascha Schediwy, Andre Luiten, Kenneth Baldwin. Microwave frequency transfer with optical stabilisation [C]. *IEEE European Frequency and Time Forum(EFTF)*, 2012. 211–213.
- 5 John MacDonald, George Conway. Compensated fiber optic frequency distribution equipment [C]. *42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting (PTTI)*, 2010. 437–450.
- 6 Albin Czubla, Łukasz Sliwczynski, Przemysław Krehlik, *et al.*. Stabilization of propagation delay in fiber optics in a frequency distribution link using electronic delay lines: first measurement results [C]. *42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting (PTTI)*, 2010. 389–396.
- 7 Magnus T L Hsu, Yabai He, Malcolm B Gray, *et al.*. All-digital radio-frequency signal distribution via optical fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(12): 1015–1017.
- 8 C Gao, B Wang, L J Wang. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4690–4692.
- 9 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *et al.*. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506004.
常乐,董毅,孙东宁,等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506004.
- 10 Hua Yun, Gui Youzhen, Yang Fei, *et al.*. Analysis of repeater for time and frequency dissemination via optical fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905002.
华芸,桂有珍,杨飞,等. 光纤时频传递系统的中继技术分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905002.
- 11 Lori E Primas, Ronald T Logan, Jr., George F Lutes. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems [C]. *43rd Annual Symposium on Frequency Control*, 1989. 202–211.
- 12 Dieter H Jundt. Temperature-dependent sellmeier equation for the index of refraction, n_o , in congruent lithium niobate [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(20): 1553–1555.
- 13 Gorachand Ghosh, Michiyuki Endo, Takashi Iwasaki. Temperature-dependent sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses[J]. *J Lightwave Technol*, 1994, 12(8): 1338–1342.
- 14 Shi Yunfei. The temperature characteristics of distributed-feedback fiber laser based on phase-shifted fiber grating [C]. *2007 China Thirteenth Optical Fiber Communication and Fourteenth Integration Optics Conference*, 2007. 235–240.
史云飞. 分布反馈式(DFB)光纤激光器温度特性研究[C]. *2007全国第十三次光纤通信暨第十四届集成光学学术会议*, 2007. 235–240.
- 15 Li Jinyi, Du Zhenhui, Qi Rubin, *et al.*. High precision dynamic junction temperature estimation for DFB laser using thermistor [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 2088–2093.
李金义,杜振辉,齐汝宾,等. 利用热敏电阻精确测量DFB激光器动态结温度[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(9): 2088–2093.
- 16 Ronald T Logan, Jr., George F Lutes, Lute Maleki. Impact of semiconductor laser frequency deviations on fiber optic frequency reference distribution systems [C]. *43rd Annual Symposium on Frequency Control*, 1989. 212–217.
- 17 P S André, A N Pinto, J L Pinto. Effect of temperature on the single mode fibers chromatic dispersion [J]. *J Microwaves and Optoelectronics*, 2004, 3(5): 64–70.
- 18 Paulo S Andre, Armando N Pinto. Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers due to temperature and its effects in high-speed optical communication systems [J]. *Opt Commun*, 2005, 246(2): 303–311.
- 19 Per Olof Hedekvist, Sven-Christian Ebenhag. Time and frequency transfer in optical fibers [C]. *International Naval Technology Expose and Conference*, 2012. 371–386.
- 20 Masaki Amemiya, Michito Imae, Yasuhisa Fujii, *et al.*. Simple time and frequency dissemination method using optical fiber network [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2008, 57(5): 878–883.