

高精度频率远距离光纤传输信道特性研究

李东瑾^{1,2} 梅进杰¹ 胡登鹏^{1,2} 任天鹏²

¹空军预警学院, 湖北 武汉 430019

²航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094

摘要 针对光纤信道特性变化引起频率远距离传输的稳定度损失问题进行了研究。综合光纤热膨胀、折射率分布和色散效应特性随环境温度变化引入的不稳定性,建立了链路时延模型。通过 25 km 单模光纤 1550 nm 光信号的传输实验对该模型进行了验证。实验结果表明,当光纤温度与环境温度同步变化且其他环境因素对传输稳定性影响较小时,该模型计算得出的理论时延变化与实验结果保持一致。对该模型进行了分析讨论,确定了模型参数随温度和波长变化情况,并得出了各特性引入时延变化的量级,当折射率变化引起的相对时延变化为 10.22 ns 时,光纤热膨胀和色散效应引入的相对时延变化分别为 0.7741 ns 和 -0.5983 ps。

关键词 光纤光学; 时延模型; 时延抖动; 时频传递; 色散效应; 折射率

中图分类号 TN911

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0806002

Research on Channel Characteristics of High-Precision Frequency Remote Transmission via Optical Fiber

Li Dongjin^{1,2} Mei Jinjie¹ Hu Dengpeng^{1,2} Ren Tianpeng²

¹Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China

²Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China

Abstract The loss of stability of frequency remote transmission problems caused by fiber channel characteristics is studied. The unstability is introduced by integrated fiber thermal expansion, refractive instability distribution and dispersion effects characteristic changing with temperature. A link delay model is established. 1550 nm signal transmission experiment through the 25 km single mode fiber model is validated. Experimental results show that the theoretical calculated delay variation and experimental results of the model stay consistent, when the optical fiber temperature and environmental temperature change synchronized and other environmental factors have little effect on the stability of the transmission. The model is discussed and the changes of model parameters caused by temperature and wave length are determined, and the order of magnitudes of various features introduced to delay is obtained. When the relative delay caused by changes of refractive index change turns to 10.22 ns, the fiber thermal expansion and dispersion effects caused delays are 0.7741 ns and -0.5983 ps respectively.

Key words fiber optics; delay model; time delay jitter; time and frequency transfer; dispersion effect; refractive index

OCIS codes 060.2310; 060.2270; 120.7000; 060.2330

1 引言

随着时频传输在基础工程和航空航天等领域应用的不断拓展,高精度频率标准的需求日益增大。当前,美国和日本大学的铯原子钟精度已经达到 10^{-18} 量级^[1],而远距离传输后所能实现的同步精度仍受到诸多限制,传统的卫星双向传递方式也仅能实现 10^{-15} 量级的日稳定度^[2]。自光纤问世后,由于其具备损耗小、带宽

收稿日期: 2016-02-01; 收到修改稿日期: 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(11403001)、航天飞行动力学技术重点实验室开放基金(2013afdl009)

作者简介: 李东瑾(1992—),男,硕士研究生,主要从事时间频率传递技术方面的研究。E-mail: li_dong_jin@163.com

导师简介: 梅进杰(1970—),男,博士,副教授,主要从事 DWDM 光通信系统、宽带光纤放大器等方面的研究。

E-mail: meijinjie@tom.com

大、速率高和抗电磁干扰等优点而备受关注,利用光纤进行高精度频率传输逐渐成为主流方向。各国在该领域竞相开展了广泛的理论和实验研究,并建设了大量光纤时频传输系统^[3-7],我国也正积极构建基于光纤的自主时频传输系统以及多基地雷达体系。

光纤频率传输在不作补偿时已经能够达到 10^{-12} 量级的秒稳,补偿后能够实现 10^{-15} 量级的秒稳甚至更高。科技应用等领域的现实需求对传输精度提出了更高的要求,而传输精度的提升受限于以下因素:1) 电信号传输精度,受限于频率源和电器件引入的不稳定性;2) 光信号传输精度,受限于光纤信道和链接器件(激光源、环形器等)引入的不稳定性。随着高稳定频率源和链接器件对传输稳定性的影响日益减小,传输环境不确定性造成的时延抖动成为制约传输精度的主要因素。因此要进一步提高传输精度,必须对环境影响下的光纤信道传输特性进行深入研究。

实际应用中,环境温度变化等因素会导致光纤长度、折射率分布和色散效应发生改变,从而造成传输时延抖动,而目前鲜有光纤传输信道特性方面的系统研究。本文系统分析了光纤信道传输存在的不稳定性因素,建立了较为完善的光纤链路时延变化量模型,并通过实验验证了该模型的有效性。基于该模型,定量分析了传输波长及环境温度变化对模型参数的影响,对模型应用的可行性进行了讨论。

2 光纤信道传输时延变化分析

光纤进行远距离频率传输时,光纤信道传输时延的决定因素主要包括:1) 环境因素,如温度变化、振动、压力等;2) 传输参量,即传输距离、传输光信号波长和光谱宽度,其中传输光信号波长和光谱宽度由激光器决定。光纤信道传输时延可表示为 $\tau = nL/c$,其中 n 为光纤折射率, L 为光纤物理长度, c 为真空光速。其传输时延的度量主要集中在折射率变化和光纤热膨胀上,当考虑传输时延变化时,光纤传输时延还受到激光器稳定性和色散效应的影响。

当环境因素只考虑温度影响时,温度变化引起光纤热膨胀并造成折射率分布和色散效应发生改变,因此链路时延变化量可表示为^[8-9]

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{(\lambda,T)} + \Delta\tau_{\text{disp}} = \Delta \frac{n_{(\lambda,T)}L_{(T)}}{c} + \Delta\tau_{\text{disp}}, \quad (1)$$

等式右边第一项为光纤热膨胀和折射率变化引起的时延变化,第二项为色散效应引起的时延变化, $L_{(T)}$ 为等效光纤长度。一般光纤热膨胀和折射率变化引入的时延抖动较大,色散效应在 10 Gbit/s 以上高速率传输时对时延抖动影响较大。

2.1 光纤长度随环境温度变化

石英光纤具有一定的温度系数,环境温度变化引起光纤热膨胀从而改变光纤长度,则温度为 T 时等效光纤长度为

$$L_{(T)} = L + \frac{\partial L}{\partial T} \cdot \Delta T = L + \alpha_{\Lambda} \cdot L \cdot (T - T_0), \quad (2)$$

式中 $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΔT 为温度差, α_{Λ} 为光纤热膨胀系数,取 $5.6 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ^[10]。

2.2 光纤折射率随传输波长和环境温度变化

环境温度和信号波长变化均会导致折射率发生改变,标准单模光纤(SMF)的 Sellmeier 折射率公式为^[11]

$$n_{(\lambda,T)} = \sqrt{A + \frac{B}{1 - C/\lambda^2} + \frac{D}{1 - E/\lambda^2}}, \quad (3)$$

式中波长 λ 的单位是 μm , 折射率为无量纲参数,折射率参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 均随温度 T 变化。纤芯的折射率参数如表 1 所示,文献[12]测试了包层折射率参数随温度变化的情况。

折射率参数 A 、 B 、 C 、 D 的一次项系数用 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 表示,折射率随温度变化情况用光纤热光系数 α_n 表示为

$$\alpha_n = \frac{\partial n}{\partial T} = \frac{1}{2n} \left[a_1 + \frac{b_1}{1 - C/\lambda^2} + \frac{Bc_1}{\lambda^2 (1 - C/\lambda^2)^2} + \frac{d_1}{1 - E/\lambda^2} \right]. \quad (4)$$

表 1 纤芯折射率参数
Table 1 Refractive index of fiber core

Parameter	Formula
A	$6.90754 \times 10^{-6} \times T + 1.31552$
B	$2.35835 \times 10^{-5} \times T + 0.788404$
C	$5.84758 \times 10^{-7} \times T + 0.0110199$
D	$5.43868 \times 10^{-7} \times T + 0.91326$
E	100

2.3 光纤色散随色散系数和光谱宽度变化

光纤是一种有色散效应的传光介质,色散使不同频率的光信号在光纤中以不同速度进行传输,从而产生时延。色散主要包括材料色散、波导色散和偏振色散^[13],色散效应引起的时延变化由色散系数和激光器输出稳定性共同决定。

综合考虑传输信号波长和环境温度对色散的影响时,色散系数公式为^[14]

$$D = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (5)$$

式中 λ_0 为零色散波长,当光纤材料传输对应 λ_0 波长信号时,理论色散值为零; S_0 为色散斜率, $S_0 = \frac{\partial D}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0}$ 。色散的温度系数为

$$\alpha_D = \frac{\partial D}{\partial T} = \frac{(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)}{4} \cdot \frac{\partial S_0}{\partial T} - \frac{S_0 \lambda_0^3}{\lambda^3} \cdot \frac{\partial \lambda_0}{\partial T}。 \quad (6)$$

对于常用 G.652 标准的单模光纤,当 $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $S_0 = 9.352 \times 10^{-2} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, $\lambda_0 = 1319.30 \text{ nm}$;色散斜率变化度 $\partial S_0/\partial T$ 的典型值为 $2.46 \times 10^{-6} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,零色散波长变化率 $\partial \lambda_0/\partial T$ 为 $0.026 \text{ nm}/\text{ }^\circ\text{C}$ ^[14-16], S_0 和 λ_0 均随温度线性变化。因此,色散系数的另一种形式为

$$D_{(\lambda,T)} = \frac{S_0 \Big|_{T=T_0} + \frac{\partial S_0}{\partial T} (T - T_0)}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0 \Big|_{T=T_0} + \frac{\partial \lambda_0}{\partial T} (T - T_0)}{\lambda^3} \right]^4。 \quad (7)$$

色散效应引入的时延同时受激光器和色散系数的影响,各类激光器的性能指标不一致,通过谱宽描述的色散时延变化为

$$\tau_{\text{disp}} = \lambda_\Delta D_{(\lambda,T)} L_{(T)}, \quad (8)$$

式中 λ_Δ 为激光器光谱宽度,常用光纤传输的激光器谱宽约为 2 nm ,经过特殊控制的可以达到 0.2 nm 甚至低于光谱分析仪的分辨率。激光器光源越理想,光谱宽度越窄,产生的色散效应就越小。

3 链路时延模型

图 1 为光纤频率传输示意图,当环境稳定且传输参量不变时,传输时延恒定为 τ_0 。当环境温度发生改变,传输距离、折射率和色散系数变化引入的传输时延抖动为 $\Delta\tau$,综合(1)、(2)、(3)和(8)式,得出链路时延变化量表达式为

$$\Delta\tau = \Delta \frac{n_{(\lambda,T)} L_{(T)}}{c} + \Delta(D_{(\lambda,T)} L_{(T)} \lambda_\Delta), \quad (9)$$

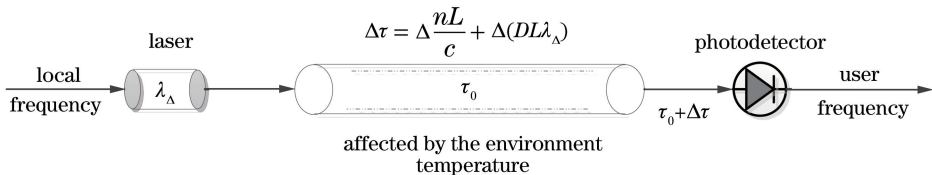


图 1 光纤频率传输示意图

Fig. 1 Schematic of the frequency transfer over optical fiber

式中各变量均连续变化,因此采用微元形式进行分析。当传输参量确定后,光纤物理长度 L 、光信号波长 λ 和光谱宽度 λ_Δ 随之确定。引起时延变化的关键因素是温度变化,温度恒定为 T 时的 $n_{(\lambda,T)}$ 、 $L_{(T)}$ 、 $D_{(\lambda,T)}$ 均可量化为一个确切的值,此时若选取足够小的温度变化 ΔT ,则对应引入时延变化为 $\Delta\tau$,其变化可表示为

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta T} = \frac{n_{(\lambda,T)}}{c} \cdot \frac{\Delta L_{(T)}}{\Delta T} + \frac{L_{(T)}}{c} \cdot \frac{\Delta n_{(\lambda,T)}}{\Delta T} + L_{(T)}\lambda_\Delta \cdot \frac{\Delta D_{(\lambda,T)}}{\Delta T} + D_{(\lambda,T)}\lambda_\Delta \cdot \frac{\Delta L_{(T)}}{\Delta T}, \quad (10)$$

即

$$\frac{d\tau}{dT} = \left[\frac{n_{(\lambda,T)}}{c} + D_{(\lambda,T)}\lambda_\Delta \right] \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{L_{(T)}}{c} \frac{\partial n}{\partial T} + L_{(T)}\lambda_\Delta \frac{\partial D}{\partial T} + \left[\frac{L_{(T)}}{c} \frac{\partial n}{\partial \lambda} + L_{(T)}\lambda_\Delta \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right] \frac{d\lambda}{dT}, \quad (11)$$

式中第一项为光纤热膨胀引入的时延抖动,第二项为折射率变化引入的时延抖动,第三项为色散效应引入的时延抖动,第四项为波长漂移引入的时延抖动。掺镱激光器输出光信号波长随温度漂移 $d\lambda/dT$ 约为 $0.04 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[17],理想光源只输出理想光信号时,色散不引起时延变化。实际应用中,高稳定光源一般处于相对稳定的环境,波长微量漂移几乎可以忽略($d\lambda/dT=0$),此时链路的时延变化量为

$$d\tau = \left\{ L\alpha_\Delta \left[\frac{n_{(\lambda,T)}}{c} + D_{(\lambda,T)}\lambda_\Delta \right] + \frac{\alpha_n L_{(T)}}{c} + \alpha_D L_{(T)}\lambda_\Delta \right\} dT = (\alpha_{th} + \alpha_{re} + \alpha_{dis}) dT, \quad (12)$$

式中光速 $c=3.0 \times 10^{-7} \text{ km/ps}$, α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 分别为光纤热膨胀、折射率变化和色散效应引入时延的温度漂移系数。进行相对时延变化计算时,选取合适的时延基准点 τ_{T_0} ,对(12)式两边进行积分变换即可,即

$$\Delta\tau = \tau_T - \tau_{T_0} = \int_{T_0}^T (\alpha_{th} + \alpha_{re} + \alpha_{dis}) dT, \quad (13)$$

式中 T_0 为起始温度。令 α_τ 为传输时延温度漂移系数,且 $\alpha_\tau = \alpha_{th} + \alpha_{re} + \alpha_{dis}$,单位为 $\text{ps}/^\circ\text{C}$ 。温度 T 变化情况与光纤所处环境相关,参数 $L_{(T)}$ 、 $n_{(\lambda,T)}$ 、 α_n 、 α_D 、 $D_{(\lambda,T)}$ 均随温度变化且可由(2)、(3)、(4)、(6)、(7)式分别求出。

4 实验验证

4.1 实验方案设计

为了验证本文模型的有效性,设计了 G.652 单模光纤的 25 km 传输测试,通信窗口为 1550 nm。图 2 为传输时延测试方案, DH1001 铷原子钟提供高精度的 10 MHz 正弦频率信号, Agilent 53132A 型频率计(采样间隔为 31 ms)实现两路输入信号的高精度采样和脉冲信号转换,并将得到的脉冲信号用于测定基准端和用户端时延变化量,时延数据实时存入中心电脑。测试开始时,将光纤盘移置热水系统, Elitech RC-4 型温度记录仪(采样间隔为 10 s)用于记录水温变化,其余设备均置于环境相对稳定的空调房内。光纤初始温度为 $21.8 \text{ }^\circ\text{C}$,初始水温为 $57.9 \text{ }^\circ\text{C}$,以初始时延 τ_{T_0} 为零基准时延点,测试时长为 5.89 h。

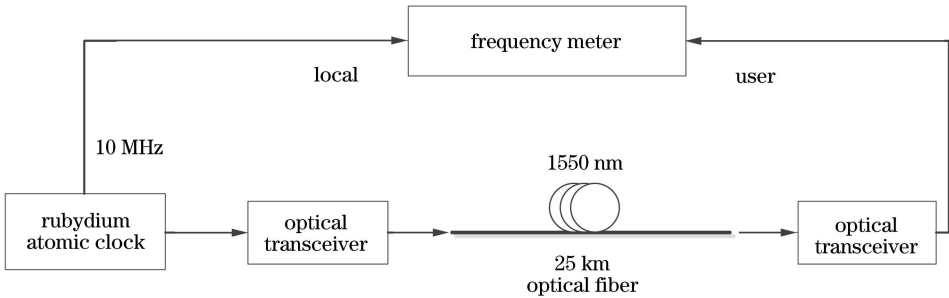


图 2 传输时延测试方案

Fig. 2 Test method of the transmission delay

4.2 仿真参数设计

为了得到相同的零基准时延点,在环境温度数据最前端加入光纤初始温度数据 T_0 为 $21.8 \text{ }^\circ\text{C}$;为了确保理论计算的精度,对温度数据进行三次样条插值得到每一秒间隔的温度变化,理论时延数据的采样间隔与温度数据保持一致。光端机处于相对恒温环境,可忽略波长漂移,因此理论时延计算采用(13)式, λ_Δ 设置为 2 nm 。

4.3 实验及理论计算结果对比分析

传输测试结果如图 3 所示,其中平滑处理结果由时延数据进行 60 次平均得到。对比发现,约 33 °C 的水温变化范围内引入时延抖动超过 17 ns;相对时延最大值 17.23 ns 出现在水温下降段的 0.6821 h 时刻,此时水温约 42.1 °C。

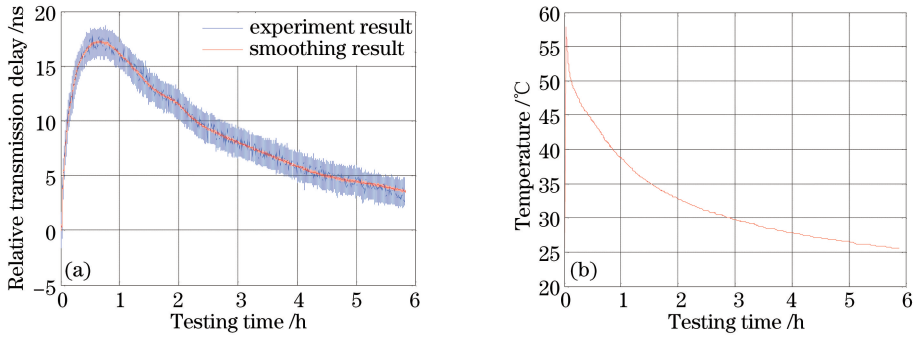


图 3 测试结果。(a)相对时延变化;(b)热水系统温度变化

Fig. 3 Test results. (a) Variation of relative transmission delay; (b) variation of hot water temperature

将实验测得的水温变化数据用于时延模型,得到理论时延变化结果如图 4 所示。对比理论计算和实测结果发现,0~1 h 时段内的理论时延与实测结果不符,2 h 左右测试数据在外界环境(不含温度因素)影响下也存在少量偏移,其余时段两者变化基本一致。造成 0~1 h 时段内曲线不吻合的原因是光纤从 21.8 °C 的环境移至热水系统,需要一定的时间吸热升温,时长约 0.6821 h,但光纤温度最大值仍然低于该时刻水温;此后光纤温度随环境温度一起降低,直到 1 h 时刻,光纤温度变化才基本与环境温度变化保持一致;1 h 后,光纤温度变化与水温变化保持一致,理论时延结果与实测结果也基本一致。

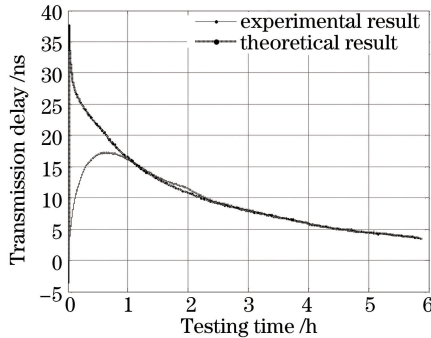


图 4 时延变化理论计算结果与实验实测结果对比

Fig. 4 Transmission delay comparison of theoretical and experimental result

综合实验结果得出,当光纤温度与环境温度同步变化时,通过温度数据和链路时延模型计算得到的理论时延结果与实测结果保持一致变化,验证了该模型用于时延计算的有效性。

5 分析及讨论

该模型适用于远距离传输的单模光纤,本文中 α_D 和 D 相关参数的选取主要依据目前国内广泛使用的 G.652 单模光纤;若选用其他标准的光纤,模型中的 α_D 和 D 参数需重新调整。模型应用时,首先需要依据实际情况确定传输参量 λ_Δ 、 L 和 λ ,然后通过环境温度数据实时计算 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} ,并通过(13)式进行整体时延计算。模型参数 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 均随 λ 和 T 改变,对整体时延变化起着决定性作用。

5.1 模型参数随温度变化

取 $\lambda_\Delta = 2$ nm, $L = 25$ km。当传输波长为 1550 nm 时,光纤热膨胀、折射率变化和色散效应引入时延的温度漂移系数随温度变化情况如图 5 所示。在 0~150 °C 的温度变化范围内 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 均为近似线性变化,其变化率分别为 4.9667×10^{-4} , 5.70×10^{-3} , 8.8667×10^{-6} ps/°C²。变化量级按 α_{re} 、 α_{th} 、 α_{dis} 的顺序依次递减,

表明在相同的温度变化范围内其对时延抖动的影响程度依次减小,具体引入的时延变化结果与温度变化过程相关。

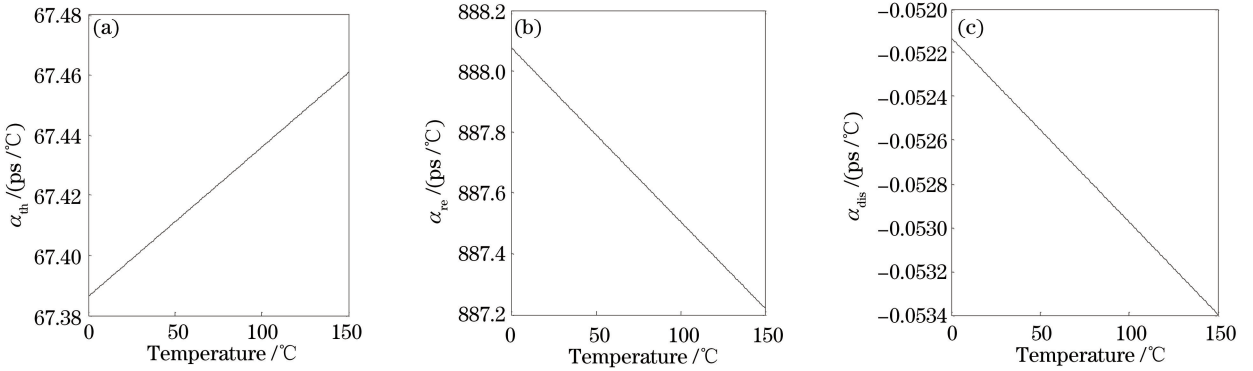


图 5 温度漂移系数随温度变化情况。(a) α_{th} ; (b) α_{re} ; (c) α_{dis}

Fig. 5 Temperature drift coefficient changes with the temperature. (a) α_{th} ; (b) α_{re} ; (c) α_{dis}

5.2 模型参数随波长变化

取 $\lambda_{\Delta} = 2 \text{ nm}$, $L = 25 \text{ km}$ 。当传输环境温度为 $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度漂移系数 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 随波长变化情况如图 6 所示。在 $1100 \sim 2000 \text{ nm}$ 的通信窗口内, α_{th} 、 α_{dis} 随波长单调变化,变化量分别为 $-0.5144, 0.2609, 0.2609 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$; α_{re} 变化范围为 $887.4441 \sim 893.6692 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$,其最小值 $887.4441 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 出现在传输波长为 1781 nm 时。对于不同波长的传输信号,其同一温度下的模型参数值并不一样,传输带来的时延差也存在差异。因此,现有反馈补偿系统的双向对比传输应尽可能使用同一波长信号,避免不同波长传输引入的时延差异。

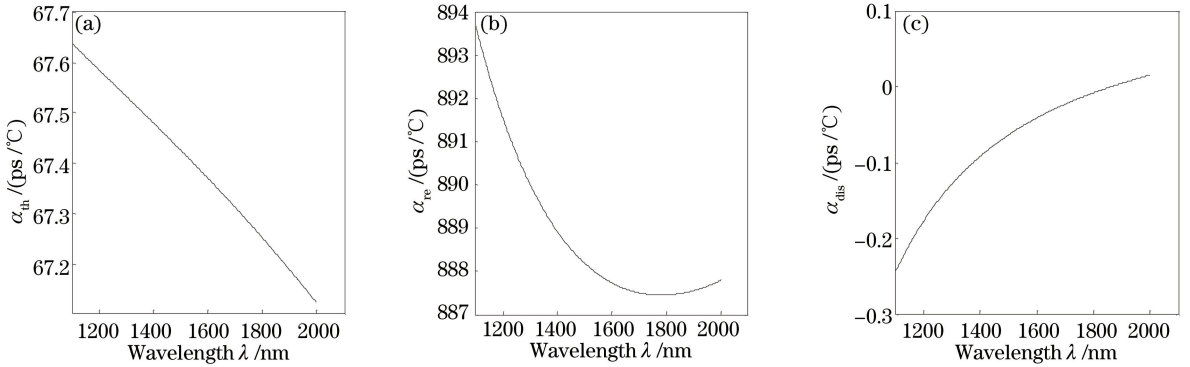


图 6 温度漂移系数随波长变化情况。(a) α_{th} ; (b) α_{re} ; (c) α_{dis}

Fig. 6 Temperature drift coefficient changes with the wavelength. (a) α_{th} ; (b) α_{re} ; (c) α_{dis}

综合仿真结果和时延模型,选取光纤物理长度为 25 km ,谱宽为 2 nm ,传输 1550 nm 光信号。当传输环境温度 $T = 46 \text{ }^{\circ}\text{C}$,温差 $\Delta T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,计算得出温度偏移系数 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 分别为 $67.4105, 887.9399, -0.0525 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$,可见三者的数量级存在较大差异。

为了进一步确定各特性引入时延变化的量级,给出了图 7 所示实验环境下的具体相对时延结果,当 $\Delta\tau_{re} = 10.22 \text{ ns}$ 时, $\Delta\tau_{th} = 0.7741 \text{ ns}$, $\Delta\tau_{dis} = -0.5983 \text{ ps}$ 。综合仿真结果得出,折射率变化引起的相对时延变化 $\Delta\tau_{re}$ 最大,色散效应引入的相对时延变化 $\Delta\tau_{dis}$ 最小,但在高精度传输时都不容忽略。因此,时延补偿应综合考虑光纤热膨胀、折射率变化和色散效应的影响,采用光纤封装技术、地下掩埋方式和温控措施能够一定程度地降低环境对光纤的影响,从而提升传输稳定性;但要做到更高精度的传输,必须通过时延补偿系统、色散补偿技术^[18-19]等方式来进行高精度补偿。

5.3 可行性分析

该模型直接对光纤温度进行时延计算,得到的精度较高。但光纤温度变化很难获取,一般通过环境温度变化来进行近似计算。当环境温度快变时,光纤温度与环境不同步可能导致计算误差;实际应用中,光纤处

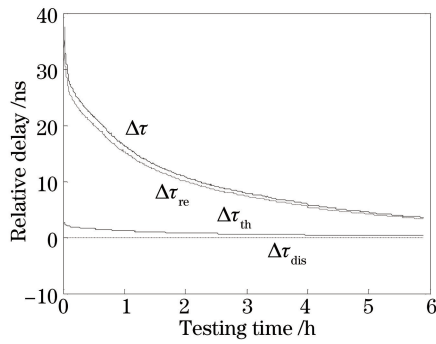


图 7 实验环境下的相对时延变化结果

Fig. 7 Variation result of relative transmission delay in the experiment

于昼夜温差较小的地下掩埋环境,环境温度变化较为平缓,光纤温度变化基本与其保持一致,用实测环境温度进行计算也能得到较高的精度。因此,该模型在实际应用中具有可行性。

6 结 论

从影响光纤信道频率传输稳定性的因素出发,建立了链路时延模型,并进行了模拟环境条件下 25 km 光纤链路的传输实验。实验结果表明,当光纤温度与环境温度变化同步时,通过模型得出的时延变化与实验结果保持一致,验证了该模型的有效性。通过仿真,定量分析了模型参数 α_{th} 、 α_{re} 、 α_{dis} 随温度和波长的变化情况,确定了折射率变化、光纤热膨胀和色散效应引入时延变化的量级依次递减。当总体时延抖动保持在纳秒量级时,光纤热膨胀和折射率变化引入时延抖动为纳秒量级,色散效应引入时延抖动为皮秒量级。该模型的建立使得定量分析单模光纤传输时延变化更为简便,同时也为光纤传输稳定性衡量和实验分析提供了指导依据。

参 考 文 献

- Liu Jie, Gao Jing, Xu Guanjun, *et al.* Study of optical frequency transfer via fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 120602.
刘杰,高静,许冠军,等.基于光纤的光学频率传递研究[J].物理学报,2015,64(12):120602.
- Yao K, Xuhai Y, Hong C, *et al.* Method of precise common-view frequency transfer based on BeiDou GEO satellite[C]. Proc IEEE International Frequency Control Symposium, 2014: 1-4.
- Ye J, Peng J, Jones R J, *et al.* Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20(7): 1459-1467.
- Daussy C, Lopez O, Amy-Klein A, *et al.* Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} [J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(20): 203904.
- Wang Lingdong, Wu Guiling, Shen Jianguo, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406004.
王灵东,吴龟灵,沈建国,等.基于100 km光纤链路的时间和频率同时传递[J].光学学报,2015,35(4):0406004.
- 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, 2014, 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,2014,34(5):0506004.
- 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.
- Czubla A, Sliwczynski L, Krehlik P, *et al.* Stabilization of the 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.
- Pan S, Wei J, Zhang F. Passive phase correction for stable radio frequency transfer via optical fiber[J]. Photonic Network Communication, 2016, 31(2): 327-335.

- 10 Lin K C, Lin C J, Lee W Y. Effects of Gamma radiation on optical fibre sensors[J]. IEEE Proc Optoelectron, 2004, 151(1): 12-15.
- 11 Ghosh G, Endo M, Iwasalu T. Temperature-dependent sellmeier coefficients and chromatic dispersionsfor some optical fiber glasses[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1338-1342.
- 12 Medhat M, El-Zaiat S Y, Radi A, *et al.* Application of fringes of equal chromatic order for investigating the effect of temperature on optical parameters of a GRIN optical fiber[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(2): 174-179.
- 13 Yasin M, Harun S W, Arof H. Recent progress in optical fiber research[M]. Rijeka: In Tech Open Access Publi-sheer, 2012.
- 14 André P S, Pinto A N, Pinto J L. Effect of temperature on the single mode fibers chromatic dispersion[C]. Journal of Microwaves and Optoelectronics, 2004, 3(5): 64-70.
- 15 André P S, Pinto A N. Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers dueto temperature and its effects in high-speed optical communication systems[J]. Optics Communications, 2005, 246(4-6): 303-311.
- 16 Hamp M J, Wright J, Hubbard M, *et al.* Investigation into the temperature dependence of chromatic dispersion in optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(11): 1524-1526.
- 17 Qiao Qiquan, Chen Bai, Chen Jialin, *et al.* Compensation for wavelength change of Yb-doped fiber laser caused by temperature variation[J]. Chinese J Laser, 2003, 30(4): 300-302.
乔启全, 陈 柏, 陈嘉琳, 等. 掺 Yb 光纤激光器输出波长温度漂移补偿的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(4): 300-302.
- 18 Peng Chengzhu. The techniques of overcoming fiber dispersion effect[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 1999, 11(2): 12-16.
彭承柱. 克服光纤色散影响的技术[J]. 重庆邮电学院学报, 1999, 11(2): 12-16.
- 19 Sliwczynski Ł, Kolodziej J. 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.