

温度对光纤长度测量精度影响的研究

郑祥亮¹ 孙权社¹ 赵发财^{1,2} 韩 忠¹ 霍明明^{1,2} 王洪超¹

¹中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555

²电子测试技术国家重点实验室, 山东 青岛 266555

摘要 理论分析了温度通过热胀冷缩效应对光纤长度产生影响的机理,并在不同波长情况下通过不同长度的光纤进行了实验验证。实验结果表明:在不同波长下,当温度每变化 1 °C 时每千米单模光纤长度改变量相差不大;对于不同长度的光纤,当温度每变化 1 °C 时单模光纤长度改变量与光纤长度基本呈正比例关系,基本与理论分析结果一致。

关键词 光纤光学;长度测量;温度效应;测量精度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s105004

Study on the Effect of Temperature on the Measured Accuracy of the Fiber Length

Zheng Xiangliang¹ Sun Quanshe¹ Zhao Facai^{1,2} Han Zhong¹

Huo Mingming^{1,2} Wang Hongchao¹

¹ The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China

² National Key Laboratory of Electronic Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract The mechanism of temperature effect on fiber length by heat expansion and cold contraction effect have been analyzed theoretically. Experimental verifications have been carried out by different lengths in different wavelengths. Experimental results show that in different wavelengths, single-mode fibers of different lengths change little per km when the variation of temperature is 1 °C. For fibers of different lengths, when the variation of temperature is 1 °C, the variation of single-mode fiber length is proportional with fiber length, which is consistent with theoretical analysis results.

Key words fiber optics; length measurement; temperature effects; accuracy of measurement

OCIS codes 060.2300;060.2310;060.2330;060.2340

1 引 言

随着光纤通信技术的迅猛发展,光缆生产和铺设中对光缆长度的测量是不可避免的,而目前测量光纤和光缆的主要测试仪器是光时域反射计,因此对光时域反射计的校准就显得尤为重要^[1-3]。实验室采用脉冲延迟的方法对光纤长度进行准确定标,测量精度可以达到厘米级,因此若要实现光纤长度的精确定标需要将温度对光纤长度测量产生的影响进行修正^[4]。另一方面由于光纤纤芯与光缆保护层的膨胀系数不同,纤芯收缩大于光缆保护层。纤芯在接头盒中盘绕,冷空气造成纤芯收缩,纤芯中个别纤芯拉成多个直角弯或者死结,造成通信中断^[5-9]。本文研究了温度对光纤长度测量精度的影响,并通过实验验证了温度与光纤长度的量值关系,对光纤长度精确测量以及通信中断的预防有重要意义^[10-12]。

2 原 理

收稿日期: 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-03-10

基金项目: 国防军工技术基础科研项目(J312013A002)

作者简介: 郑祥亮(1987—),男,硕士,助理工程师,主要从事光通信与光显示等方面的研究。

E-mail: zxlhaoyun-619@163.com

2.1 光纤热胀冷缩原理

工作物质在温度变化时长度会随之发生微小变化,这就是热胀冷缩原理。光纤作为工作物质的一种,同样遵循热胀冷缩原理。设光纤的热膨胀系数为 α ,温度的变化量为 ΔT , L 为光纤在初始温度下的长度值,则光纤随温度变化的长度值为 $\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L$ ^[13-14]。其根本原理是:热胀冷缩效应会对光纤群折射率产生影响,而光纤群折射率的变化会引起光纤长度的变化。光纤群折射率与温度的关系可表示为

$$n(T) = n(T_0) + n'_T(T - T_0), \quad (1)$$

式中 n'_T 为群折射率温度系数。通常,温度对群折射率的影响,都与热膨胀系数 α 联系在一起:

$$n'_T = \frac{dn}{dT} = \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial n}{\partial T} - 3\alpha \rho \frac{\partial n}{\partial \rho}, \quad (2)$$

由(2)式可以看出 n'_T 是一个随温度变化的量,所以光纤群折射率与温度之间存在非线性关系。当温度从 20 °C 上升到 900 °C 时,通过实验数据拟合可得光纤群折射率与温度的关系为^[15]

$$n(T) = 1.4435 + 2.1233 \times 10^{-5} T + 0.6 \times 10^{-8} T^2. \quad (3)$$

而光纤长度是通过计算被测光纤的传输时延 Δt 得到:

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{n(T)}, \quad (4)$$

式中 L 为被测光纤的长度, $n(T)$ 为光纤群折射率, c 为光在真空中的传播速度, Δt 为经过被测光纤的传输时延。

2.2 光纤群折射率与光纤长度理论关系

由于光纤群折射率的改变而引起的光纤长度改变量如表 1 所示,选定的被测光纤长度为 2 km。

表 1 光纤长度随光纤群折射率变化而变化的关系

Table 1 Relationship between optical fiber length and the change of optical fiber group refractive index

Optical fiber group refractive index n	Transmission delay $\Delta t/\mu s$	Optical fiber length L/m
1.46000000	9.74007	1999.99968
1.47000000	9.74007	1986.39424
1.46100000	9.74007	1998.63075
1.46010000	9.74007	1999.86270
1.46001000	9.74007	1999.98598
1.46000100	9.74007	1999.99831
1.46000010	9.74007	1999.99954
1.46000001	9.74007	1999.99966

因此,理论上光纤长度随温度的变化而产生非线性的变化,实际上当光纤群折射率差达到 10^{-8} 时光纤的长度差为 $10^{-5} m$ 量级,对光纤长度的影响可以忽略不计,实际上的光纤长度变化与温度变化呈准线性关系。

3 实验装置

实验采用图 1 所示的实验系统对光纤长度与温度的关系进行实验验证。

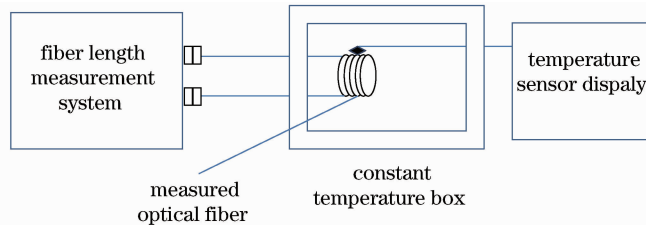


图 1 光纤长度与温度关系验证实验系统

Fig. 1 Verified experimental system of the relationship between the optical fiber length and temperature

实验系统主要包括恒温箱、光纤长度测量系统^[16]、温度传感器及其显示器以及被测光纤组成。实验中的光纤长度测量系统是通过光脉冲延迟法进行测量的,被测光纤为长飞公司型号为 G. 652 的单模光纤。其中光纤长度测量系统的测量精度最高可以达到厘米级,恒温箱的温度测量范围在 $-60\text{ °C} \sim 120\text{ °C}$ 之间,测量精度可以达到 $\pm 0.5\text{ °C}$ 。

实验步骤如下所示:首先将两盘不同长度的被测单模光纤放入恒温箱中,并且将温度传感器贴于被测光纤的表面,再将单模光纤的两个接头从恒温箱中引出来接入光纤长度测量系统中。测试前将光纤长度测量系统搭建好,并设置好脉宽等参数,恒温箱从-20 ℃到 40 ℃范围内进行升温,设置的温度点分别为-20 ℃、10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃、30 ℃、40 ℃,并在各个温度点上稳定 40 min 从而保证温箱内的光纤表面温度与温箱内的温度一致,通过贴于被测光纤表面的温度传感器引出的显示器进行监视;同样地,恒温箱从 40 ℃到 -20 ℃范围内的降温过程,设置的温度点和上升的温度点相同,在每个温度点上也是稳定 40 min 直至温箱内的光纤表面温度与温箱内的温度一致。通过光纤长度测量系统把每个温度点处对应的两盘单模光纤的长度值测量出来,这样就得到了两盘单模光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化值。

4 实验结果及分析

4.1 温度对单模光纤长度的影响

在 1310 nm 波段下,长度为 2 km 的短光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 2(a)所示;长度为 40 km 的长光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 2(b)所示。

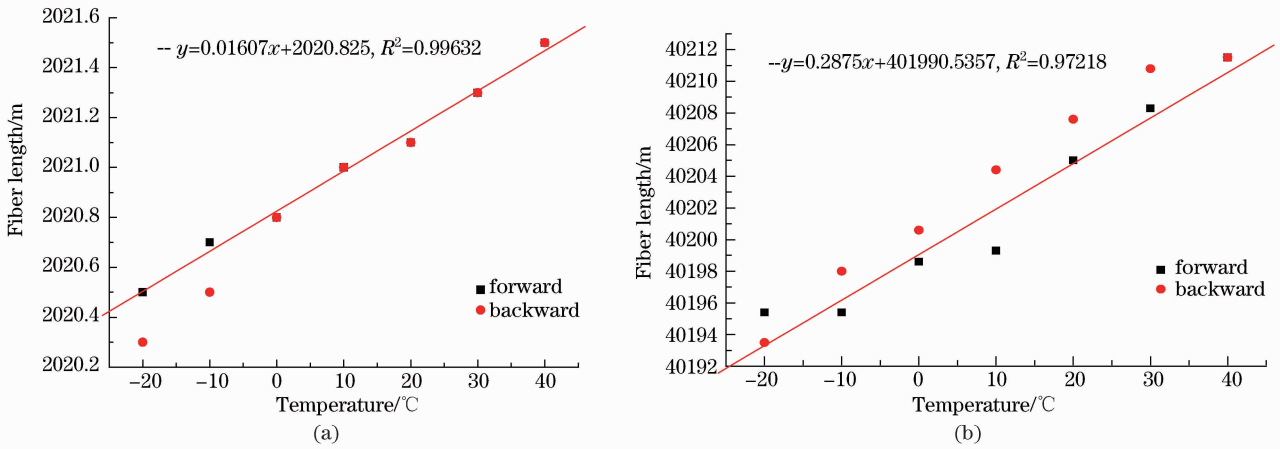


图 2 (a)短光纤(2 km)长度和(b)长光纤(40 km)长度随温度变化关系图(在 1310 nm 处)

Fig. 2 Relationship between (a) the short fiber (2 km) length, (b) the long fiber (40 km) length and temperature (at the wavelength of 1310 nm)

在 1490 nm 波段下,长度为 2 km 的短光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 3(a)所示;长度为 40 km 的长光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 3(b)所示。

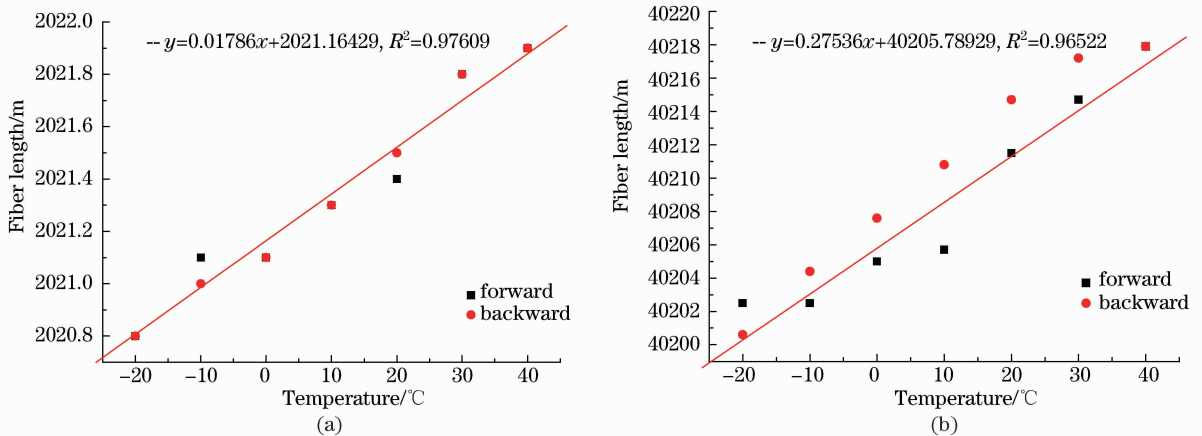


图 3 (a)短光纤(2 km)长度和(b)长光纤(40 km)长度随温度变化关系图(在 1490 nm 处)

Fig. 3 Relationship between (a) the short fiber (2 km) length, (b) the long fiber (40 km) length and temperature (at the wavelength of 1490 nm)

在 1550 nm 波段下,长度为 2 km 的短光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 4(a)所示;长度为 40 km 的长光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 4(b)所示。

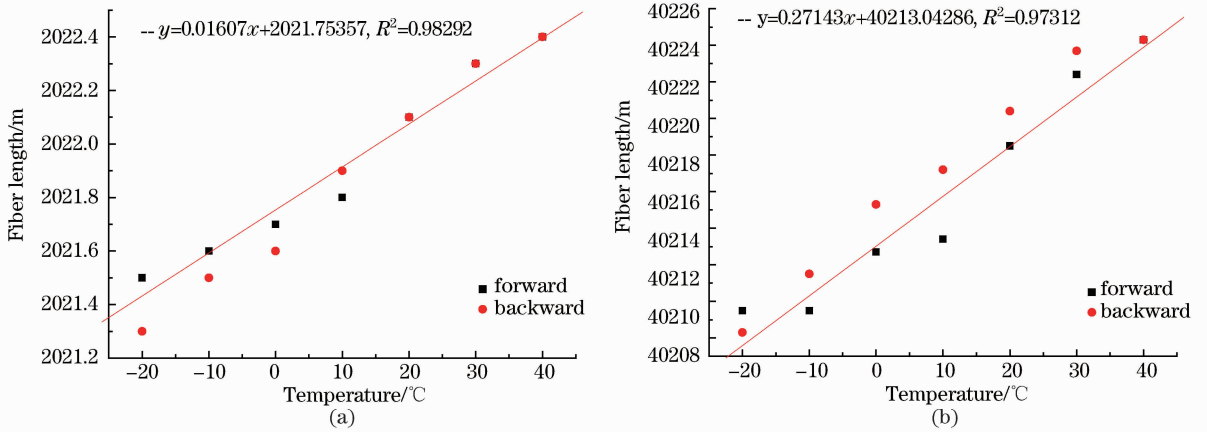


图 4 (a)短光纤(2 km)长度和(b)长光纤(40 km)长度随温度变化关系图(在 1550 nm 处)
Fig. 4 Relationship between (a) the short fiber (2 km) length,(b)the long fiber (40 km) length and temperature(at the wavelength of 1550 nm)

在 1625 nm 波段下,长度为 2 km 的短光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 5(a)所示;长度为 40 km 的长光纤随温度上升和下降过程中的光纤长度变化曲线如图 5(b)所示。

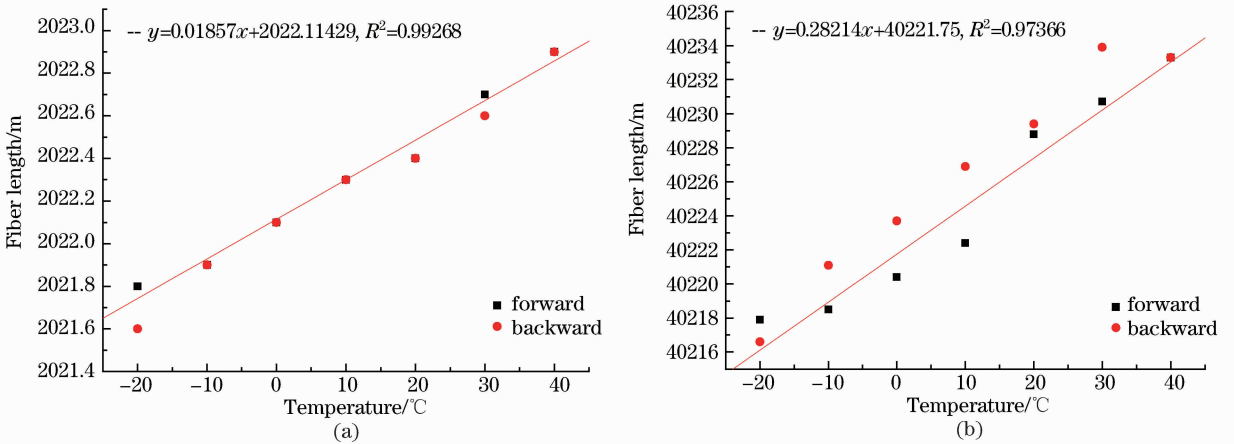


图 5 (a)短光纤(2 km)长度和(b)长光纤(40 km)长度随温度变化关系图(在 1625 nm 处)
Fig. 5 Relationship between (a) the short fiber (2 km) length,(b)the long fiber (40 km) length and temperature(at the wavelength of 1625 nm)

结果分析:通过图 2~5 中所示的数据,对比在 1310、1490、1550 和 1625 nm 波段下长光纤与短光纤的长度随温度变化而产生的变化,长度为 2 km 的短光纤温度系数分别为 0.01607、0.01786、0.01607、0.01857 m/°C,截距分别为 2020.825、2021.16429、2021.75357、2022.11429 m。长度为 40 km 的长光纤温度系数分别为 0.2875、0.27536、0.27143、0.28214 m/°C,截距分别为 40199.05357、40205.78929、40213.04256、40221.75 m。因此对于 2 km 的光纤而言,在 1310、1490、1550 和 1625 nm 波段下温度每变化 1 °C 情况下每千米光纤长度变化分别为 0.00795、0.00884、0.00795 和 0.00918 m;对于 40 km 的光纤而言,在 1310、1490、1550 和 1625 nm 波段下温度每变化 1 °C 情况下每千米光纤长度变化分别为 0.00715、0.00685、0.00675 和 0.00701 m。

4.2 实验结果分析

2 km 光纤与 40 km 光纤得到的温度每变化 1 °C 情况下每千米光纤长度变化值不同的可能原因为:

- 1) 当被测光纤长度越长时,缠绕在光纤盘上的圈数也越多,会引起被测光纤盘里圈的光纤未达到恒温箱的温度,从而导致上述光纤长度变化值的不同;
- 2) 光纤群折射率与温度存在非线性关系,当光纤长度较长时就无法将温度的二次方项省略,从而引起温

度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下 2 km 光纤与 40 km 光纤每千米光纤长度变化值不完全一致。

5 结 论

通过对不同波长点以及不同长度的光纤进行重复性温度实验,得到了温度与光纤长度变化的关系,详细分析了不同长度光纤温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下,每千米光纤不同的长度变化值。 2 km 光纤和 40 km 光纤在温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下,每千米光纤长度变化值相差不超过 2 mm ,基本符合理论分析的结果。目前,光纤长度最高计量标准为计量院的光纤长度检定装置,其不确定度为 $(0.1+1\times 10^{-5}L)\text{ m}$,无论是采取 2 km 光纤的长度变化系数还是取 40 km 光纤的长度变化系数,即使温度变化 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为采取的系数不同而引起的不确定度也不超过 0.02 m ,因此上述温度修正系数能满足单模光纤长度定标的要求。

参 考 文 献

- 1 Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effects in a Brillouin fiber-optic gyroscope [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1):162-165.
万生鹏,何兴道. 温度对布里渊光纤陀螺的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1):162-165.
- 2 Yuan Guoliang. Optical Fiber Communication Principle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
袁国良. 光纤通信原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- 3 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6):1413-1420.
江 毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(6):1413-1420.
- 4 Shen Yuan, Yin Zongmin. New design of optical temperature sensor based on dilatibility[J]. Optical Technique, 2004, 30(3):365-369.
申 远,殷宗敏. 基于膨胀法的新型光纤测温仪[J]. 光学技术, 2004, 30(3):365-369.
- 5 R. Mavadaat. Ray analysis of microbend fiber sensor[J]. Sensors Actuators, 1984, 6(4):289-295.
- 6 Ye Quanyi, Yang Chun. Fiber length measurement system based on phase modulation optical link [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5):0505003.
叶全意,杨 春. 基于相位调制光链路的光纤长度测量系统[J]. 中国激光, 2013, 40(5):0505003.
- 7 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3):569-572.
谢孔利,饶云江,冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射射光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3):569-572.
- 8 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3):988-991.
钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. 光学学报, 2008, 28(3):988-991.
- 9 Wang Xia, Ouyang Hong, Li Su. Coupling technology of LD and optical fiber [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(3):26-32.
王 侠,欧阳宏,李 苏. 半导体激光二极管的光纤耦合技术[J]. 光电技术应用, 2010, 25(3):26-32.
- 10 Christopher A Hill, Denis R Hall. Coupling loss theory of single-mode waveguide resonators[J]. Appl Opt, 1985, 24(9):1283-1290.
- 11 Yu Wu, Rao Yunjiang, Chen Yihuai, *et al.*. Miniature fiber-optic temperature sensors based on silica/polymer micro fiber knot resonators [J]. Opt Express, 2009, 17(20):18142-18147.
- 12 Hu Xiaodong, Hu Xiaotang, Liu Wenhui. Study on the distributed optical fiber temperature sensing technique using Brillouin amplifier structure[J]. Journal of Tianjin University, 1999, 32(6):678-681.
胡晓东,胡小唐,刘文晖. 基于布里渊放大结构的分布式光纤温度传感技术的研究[J]. 天津大学学报, 1999, 32(6):678-681.
- 13 Li Cunlei, Lu Yuangang, Wang Liang, *et al.*. The effect of temperature on the fiber strain in reeled optical cables [J]. Optical Communication Technology, 2008, (1):58-60.
李存磊,路元刚,汪 亮,等. 温度对盘装光缆中光纤应变的影响[J]. 光通信技术, 2008, (1):58-60.
- 14 Khan Ma, Allem C, Eagar T W. Noncontact temperature measurement interpolation techniques [J]. Rev Sci Instrum, 1994, 62(2):392-402.
- 15 Zhao Lijuan. Influence of environment temperature wide-range variation on brillouin shift in optical fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(9):6219-6223.
赵丽娟. 环境温度宽范围变化对光纤布里渊频移的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(9):6219-6223.
- 16 Zheng Xiangliang, Sun Quanshe, Zhu Xingbang. Method of measuring fiber length based on optical pulse delaying[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s206003.
郑祥亮,孙权社,朱兴邦. 基于光脉冲延迟法的光纤长度测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s206003.

栏目编辑: 何卓铭