

高精度时间信号的光纤传递

丁小玉¹ 张宝富¹ 卢麟¹ 田毅² 朱少华¹

(¹解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

²69210 部队通信科, 新疆 莎车 844700

摘要 天基时间同步网络的精度限制以及光钟的出现,使得用光纤来进行时间信号的传递和检测成为高精度时间同步的主要方案之一。介绍了高精度时间传递和检测的原理,分析了利用光纤进行高精度时间传递的同步误差来源,并提出了相应的改善措施。采用一种新型的模拟与数字混合编码和检测的方式设计实现了一个利用光纤链路进行高精度时间传递的实验系统,验证了所提出的改善系统性能的措施。实验测试表明,光纤时间同步精度在 200 ps 以内,时间同步准确度在 ± 600 ps 以内,此结果优于以往任何形式的天基时间传递系统。

关键词 光纤光学;高精度时间传递;时间同步精度;误差分析

中图分类号 TB939

OCIS 060.2310 060.4250 060.4510

文献标识码 A

High Precise Time Transfer with Optical Fiber

Ding Xiaoyu¹ Zhang Baofu¹ Lu Lin¹ Tian Yi¹ Zhu Shaohua¹

(¹*Institute of Communication and Engineering, People's Liberation Army of University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*
²*The Communication Section of No. 69210 Unit, Shache, Xinjiang 844700, China*)

Abstract Due to the limited precision of the existing space-based time synchronization network and the emergence of optical clock, using fiber to transfer and detect time signal has become a major high-precision time-synchronization system. The principle of high precision time transfer is introduced, the sources of error in time transfer system using optical fiber are analyzed and some methods to improve the system are proposed. Meanwhile, a new coding and decoding mixed with analog and digital methods is used to design and outcome a time transfer system with optical fiber line. Finally, the experiment of optical time transfer system is carried out and the time accuracy is tested, which is approximately 200 ps while the time veracity is ± 600 ps. These result are better than any existing space-based time transfer system.

Key words fiber optics; accurate time transfer; precision of time-synchronization; error analysis

1 引言

2010年1月13日下午因美国未提前预告就对其GPS系统进行升级维护造成涉及绝大多数省份的中国电信CDMA系统发生告警。这次告警事件虽然没有影响到业务的中断,但足以表明:我国网络安全的关键技术还掌握在别人手里,在通信网络及导航定位等有关时间频率同步网络的技术上如果完全依赖于美国GPS系统,将存在很大隐患。因此发展独立自主的高精度时间传递系统进而实现高精度时间同步网络是我国亟待解决的国家基础设施之一。利用光纤进行高精度时间信号传递具有结构简单、成本低廉、抗干扰能力强、抗毁性高和传输损耗低等优势,使得其成为高精度时间传递手段的一种发展趋势。

国外在20世纪80年代后期就开始研究利用光纤来传递时间信息进行时间同步,且取得了优良的时间同步效果。目前在光纤时间传递技术领域走在世界前列的主要有美国的National Institute of Standards

收稿日期: 2010-04-29; 收到修改稿日期: 2010-06-02

作者简介: 丁小玉(1983—),女,硕士研究生,主要从事光纤时间传递方面的研究。E-mail: dingxy1983@qq.com

导师简介: 张宝富(1965—),男,教授,硕士生导师,主要从事复杂电磁环境下ROF技术和无线光通信等方面的研究。

E-mail: zhangbaofu@163.com

and Technology(NIST)^[1~3]、喷气推进实验室(JPL)^[4~6]和国家航空航天局(NASA)^[7,8]、日本的 NTT 公司^[9~11]、法国的 IN-SNEC 公司^[12]和瑞典 SP 研究院和时频中心^[13]。各国的研究都取得了长足的进步,时间同步的精度由百纳秒级到纳秒级甚至亚纳秒级,传递的距离从几十米到上百公里甚至近千公里。但各国的研究主要都还集中于实验研究,尚没有形成大规模的全国范围内的应用。

国内对于光纤时间传递的设想和研究最早是由国家授时中心于 2003 年提出的^[14],该文献中提出可以用光纤 TV 信道或者扩频技术进行高精度的光纤时间传递,并估算两种传输方式均可以达到纳秒级的时间同步精度。但这只是一种设想,文章中并没有详细的精度分析和具体的实验验证。目前国内对于光纤时间传递的研究主要利用 SDH 传送网进行传输^[15,16],它的精度一般只能达到百纳秒级。本文采用一种新的时间编码技术,利用波分复用(WDM)技术设计实现了一个基于光纤链路的高精度时间传递系统,实验测得时间同步的精度可达百皮秒量级。

2 高精度时间传递的原理

在高精度时间传递系统中中心站一般配备有高稳原子钟如铯原子喷泉钟等,系统需要将此高稳钟源输出的标准时间信息如 1 pps(秒脉冲)信号准确的送给终端站,并在终端站恢复出来送给时间用户。送给用户的时间要与钟源输出的时间相一致,于是系统所需要做的工作是克服或者是补偿时间信号从钟源输出到终端站恢复过程中的传输时延,一般是将钟源的时间信号在中心站推迟送出或者将终端站接收到的时间信号进行延时,推迟或延时的量为 1 s 减去传输时延,这样终端站的秒脉冲位置将与中心站下一秒的位置相重合,只需要将协调世界时(UTC)的时刻值简单加 1,即可实现终端站恢复的时间信号与钟源输出时间信号完全重合。其实现原理如图 1^[17]所示,其中 ΔT_n 为当前的传输时延。

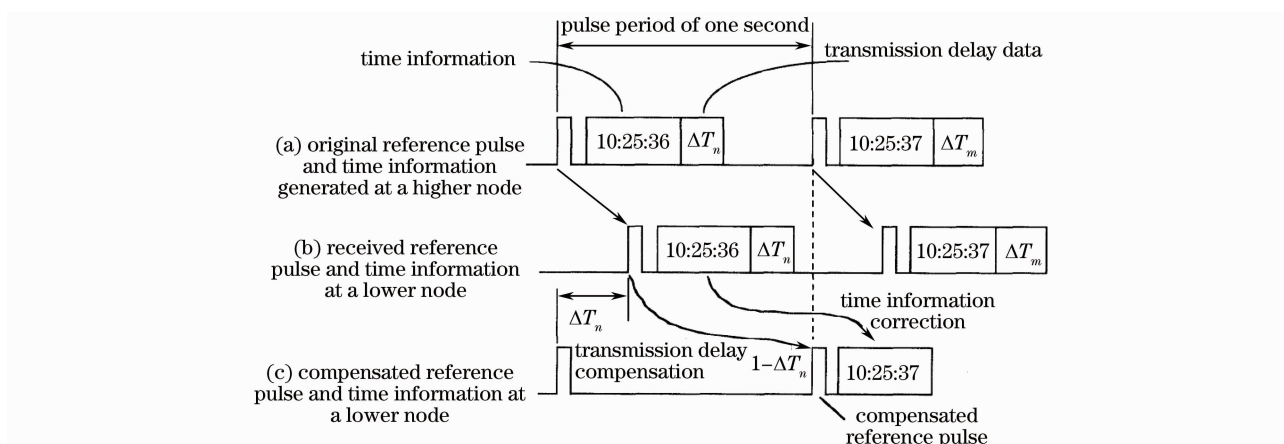


图 1 高精度时间传递的基本原理

Fig. 1 Basic principle of high precision time transfer

根据高精度时间传递的基本原理和光纤通信的特点,本文设计了一个典型的光纤时间传递系统,在保留秒脉冲模拟上升沿的同时对时间信息进行数字编码,在接收端解调恢复出秒脉冲的上升沿位置。最后通过测量时间信息从中心站到终端站再从终端站返回中心站的环路时延,取环路时延的一半做为信号从中心站到终端站的单程传输时延,以此单程传输时延对终端站恢复的时间信息进行补偿,在接收端恢复出与中心站相同步的秒脉冲。其原理如图 2 所示,其中 OS 为光发送模块;OR 为光接收模块;TIC 为时间间隔计数器。 T_{AEO} 为中心站电光延时; T_{ASO} 为中心站发送光处理延时; T_{AB} 为中心站到终端站光纤传输延时; T_{ARO} 为中心站接收光路延时; T_{AOE} 为中心站光电转换延时; T_{BA} 为终端站到中心站光纤传输延时; T_{BSO} 为终端站发送光处理延时; T_{BEO} 为终端站电光延时; T_{BOE} 为终端站光电延时; T_{BRO} 为终端站光路接收延时。

在该系统中采用了 WDM 技术,使往返链路的光信号在同一根光纤中传输,这样在物理上克服了往返链路光信号传输路径的不对称性,故可用环路总时延的一半做为信号的单程传输时延。

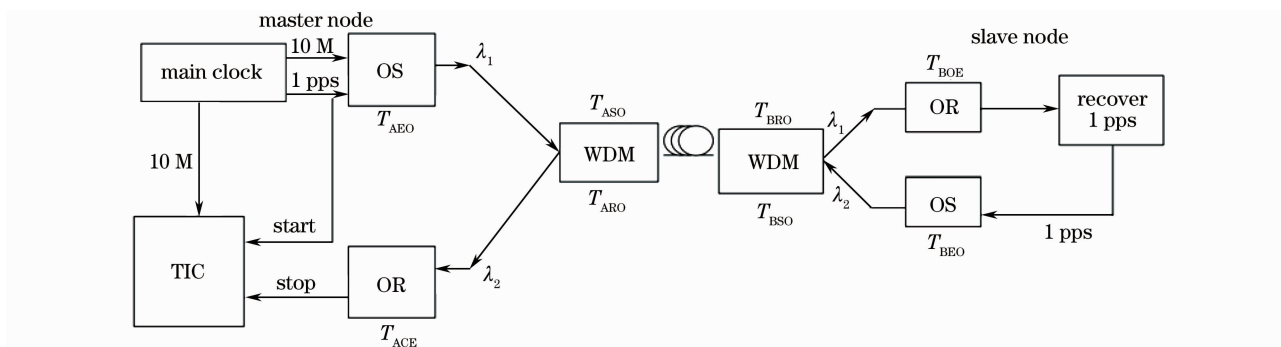


图 2 基于 WDM 技术的 Round-Trip 法时间传递的原理框图

Fig. 2 Principle of the Round-Trip method time transfer with WDM technology

系统中时间间隔计数器所测得时间的组成部分如下式所示：

$$T = T_{AEO} + T_{ASO} + T_{ARO} + T_{AOE} + T_{AB} + T_{BA} + T_{BSO} + T_{BEO} + T_{BOE} + T_{BRO}. \quad (1)$$

需要补偿的时延量为从钟源输出经中心站和光纤线路到终端站恢复 1 pps 的单程时延 τ ，即

$$\tau = T_{AEO} + T_{ASO} + T_{AB} + T_{BRO} + T_{BOE}. \quad (2)$$

终端站和中心站采用相同的硬件设备和调制解调方式，故可以认为

$$T_{AEO} = T_{BEO}, \quad T_{AOE} = T_{BOE}, \quad T_{ASO} = T_{BSO}, \quad T_{BRO} = T_{ARO}. \quad (3)$$

又因往返光信号在同一根光纤中传输，故可认为

$$T_{AB} = T_{BA}. \quad (4)$$

于是可得

$$\tau = T/2. \quad (5)$$

由上式可得信号传输的单向时延即为用时间间隔计数器测得的环路时延的一半，利用该单向时延对终端站接收到的 1 pps 进行补偿，可使终端站的 1 pps 与中心站的 1 pps 不同步。

3 高精度时间光纤传递的误差来源

在光纤时间传递系统中引入误差的因素很多，但从以下几个方面进行分析：

1) 由高精度时间传递的原理可以看出，在高精度时间传递中是用上一秒的传输时延来对这一秒的时间信息进行补偿，使终端站这一秒的时间与钟源不同步，如图 1 所示。若传输时延存在波动 $\Delta T_m \neq \Delta T_n$ ，则补偿之后终端站输出的秒脉冲会与中心站钟源输出的秒脉冲有一定差值，这样就引入了同步误差，此类误差称为传输时延波动误差，记作 ΔT_T ；

2) 用来测量传输时延的测量仪表本身也存在误差，这种误差同样会带来系统的同步误差，此种误差称为测量误差，记作 ΔT_M ；

3) 在精确测量传输时延的基础上还要有精密的时延补偿手段才能保证系统的同步性，时延补偿手段的不够精密同样会给系统带来同步误差，此种误差称为时延补偿控制误差，记作 ΔT_C 。

3.1 传输时延波动误差

3.1.1 时间信息处理引入的误差

时间信息处理包括时间信息的调制和解调，只包含时间信息的数据流速度很低（如果只传输 1 pps，则只有 1 Hz），而光器件的处理速度较高，要实现两者之间的结合必须对时间信息进行编码调制和解调，将其调制到适合光模块工作的速率并在接收端从高速码流中解调出来。这个信号电域处理的过程需要一定的时间，记作 ΔT_{ED} ，它与温度变化密切相关。根据文献[18]所提供的实验数据，温度变化在 5 °C 以内时温度对信号的处理时延的影响约为 0.3~0.4 ns，在本实验系统中经过多次反复实验得到电信号的处理时延随温度的变化量约为 40~60 ps/°C，即处理时延的变化量 $\Delta T_{ED} \approx 60 \text{ ps}/^\circ\text{C} \times (\Delta T)$ ，其中 ΔT 为温度的变化量。

3.1.2 信道误差

采用单纤双向传输的主要优势在于信号在同一根光纤中传输，物理上克服了来回链路的不对称性，所以

在(5)式中做了一个重要的假设,认为单纤双向传输的来回链路传输时延相等,即 $T_{AB} = T_{BA}$ 。但实际上由于往返链路上选用的波长不同,光纤的色散特性导致了不同波长的光信号在光纤中传输的群时延并不相等,这就带来了往返链路的传输时延不对称性,且该不对称性与距离成正比。研究提出了一种抑制该不对称性误差的公式,从理论分析和仿真结果上可以在千公里距离内使该不对称性误差降低到 20 ps 以下^[19],即信道不对称性引入的误差 ΔT_{US} 经修正后可降到 20 ps。

3.1.3 光器件引入的误差

光器件引入的误差主要是有源光器件(激光器和光检测器)引入的误差,无源光器件原则上不会给系统带来额外的误差抖动。记光器件带来的误差为 ΔT_O 。

有源光器件引入的误差主要有两个方面:1)光器件在完成光信号和电信号的互换过程中会有一些的时延抖动,此抖动给系统带来的误差记为 ΔT_{OC} ,该抖动误差经过抑制后可以达到 4 ps,假设各有源光器件之间互相独立不相关,则系统中光/电/光转换引入的时延抖动误差为 $\Delta T_{OC} = \sqrt{\Delta T_{AEO}^2 + \Delta T_{AOE}^2 + \Delta T_{BEO}^2 + \Delta T_{BOE}^2}$,约为 8 ps;2)激光器发光波长不稳定性引入的误差,记为 ΔT_{OS} ,此误差经补偿后可以降到 34 ps^[20]。由以上分析可得光器件引入的误差 $\Delta T_O = \sqrt{\Delta T_{OC}^2 + \Delta T_{OS}^2} \approx 35$ ps。

由时间信息处理中时延抖动误差、信道误差和光器件引入的误差三个方面的分析可得传输时延的波动误差 $\Delta T_T = \sqrt{\Delta T_{ED}^2 + \Delta T_{US}^2 + \Delta T_O^2}$,在温度变化 5 °C 以内时约为 302.7 ps。

3.2 测量误差

系统中对精确时延的测量采用时间间隔计数器来完成,它的工作原理如图 3 所示。对于不足一个时钟周期的时间间隔它采用门电路的方式来测量,以通过门电路的多少来确定时间间隔。如图 3 所示的 F_{C1} 和 F_{C2} 就是通过计数门电路的多少来确定的,整数个时钟周期的部分以计数器计数的时钟周期数乘以时钟周期来得到,最后测到的时间间隔即为整数时钟周期计数部分和门电路计数部分综合的结果。例如要测量图 3 中所示的 start 信号与第一个 stop 信号之间的时间间隔,时间间隔计数器(TIC)通过计数通过门电路的数量测量 start 脉冲的上升沿和相邻的校准时钟上升沿之间的时差,这就产生了精确计数 F_{C1} ,然后计数器开始记下通过的校准时钟的周期数 n_c 直到接收到 stop 信号,打开精确计数部分,计数 stop 信号上升沿与其后到来的第一个校准时钟上升沿之间的时差,产生第二个精确计数 F_{C2} ,测量的最终结果为

$$T = T_{CLK} \times n_c + (F_{C1} - F_{C2}), \quad (6)$$

式中 T_{CLK} 为校准时钟周期, n_c 为整数周期数。本实验系统中的时间间隔计数器的测量精度可达 125 ps,即 $\Delta T_M = 125$ ps。

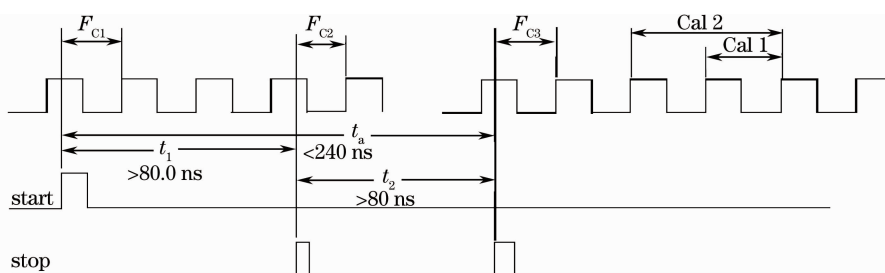


图 3 时间间隔计数器的工作原理

Fig. 3 Principle of time interval counter

3.3 控制误差

控制误差主要由延时控制的精度所决定,本实验系统中设计了一种控制精度可达 10 ps 的时延补偿方式,即 $\Delta T_C = 10$ ps。若认为以上所分析的三方面误差相互独立不相关,则可以用它们的均方根的形式来表示 Round-Trip 法光纤时间传递所能达到的时间同步误差,即 $\Delta T = \sqrt{\Delta T_T^2 + \Delta T_M^2 + \Delta T_C^2}$ 。它与系统的工作温度变化量有关,当控制设备工作温度变化在 5 °C 以内时,时间同步误差可控制在 327.6 ps 以内。若更好的控制温度变化在 1 °C 以内,则系统的同步误差更高,可以达 145 ps。如果进一步提高各器件的性能,它可能达到更高的精度。若所有器件都能达到理论的零误差,则 Round-Trip 法光纤时间传递可以达到的理论精

度取决于由测得的环路总时延得到的单向时延的精度,也就是经补偿后往返时延不对称性引入的误差,采取目前克服传输时延不对称性的手段系统传输 1000 km 所能达到的理论精度为 20 ps。

另外,以上对于光纤时间传递的误差分析都是基于钟源是高度稳定的,相邻两个 1 pps 之间的间隔是绝对 1 s 的前提下进行的。实际上,当没有高稳钟源的情况下钟源给系统带来的误差也必须考虑。一般恒温晶振或者通用 GPS 模块的稳定性都只有 $10^{-8} \sim 10^{-9} s^{-1}$,这种钟源给系统带来的误差可在 1~10 ns。在衡量系统的指标时必须要考虑扣除钟源本身的影响。

钟源对系统误差的影响原理如图 4 所示。时间传递的原理是在测得中心站 A 与终端站 B 之间的传输时延 ΔT_n 之后将下一秒的 1 pps 从中心站推后 $(1 - \Delta T_n)$ 秒发出或者在终端站延迟 $(1 - \Delta T_n)$ 秒后送给用户,送给用户的时间信息 1 pps 实际上是与中心站的下一秒的 1 pps 对齐。此原理是在中心站的钟源输出相邻 1 pps 之间间隔是绝对 1 s 的前提下进行的。如果中心站的钟源不稳定,相邻 1 pps 之间的时间间隔是动态变化的量,则经补偿后终端站输出给用户的时间信息与中心站标准钟源输出的时间信息就存在误差(误差量如图 4 中虚线所示)。

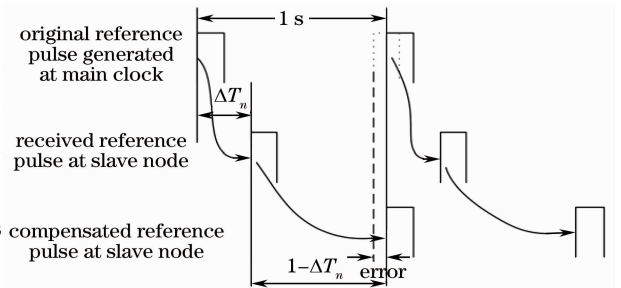


图 4 钟源误差原理图

Fig. 4 Error caused by main clock

4 实验结果

4.1 测试框图

实验系统的测试框图如图 5 所示。钟源输出的 1 pps 脉冲和 10 MHz 标准频率送给时间传递系统中心站,经过若干长度的光纤传输后在终端站恢复出 1 pps 时间信息,将终端站恢复的 1 pps 与钟源输出的 1 pps 相对比,用 53132A 测量它们的时间差。并将测得的结果送给 PC 机进行数据统计和计算。

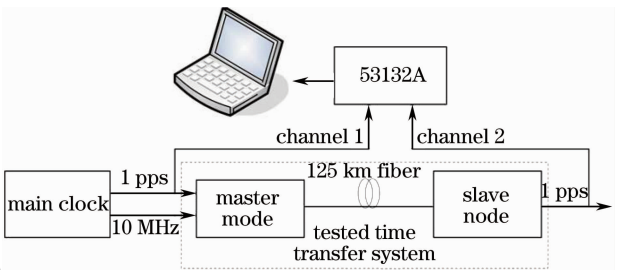


图 5 实验系统测试框图

Fig. 5 Test method of the experiment system

钟源采取的是稳定度约为 $1 \times 10^{-9} s^{-1}$ 的恒温晶振,时间间隔测量仪表采用的是 Agilent 公司的 53132A,测量精度为 150 ps,显示精度为 100 ps。

4.2 对色散不对称性进行估算补偿实验

对色散引起的不对称性所做的实验如图 6 所示。图 6 中最上面的曲线为短光纤情况下将终端站恢复时

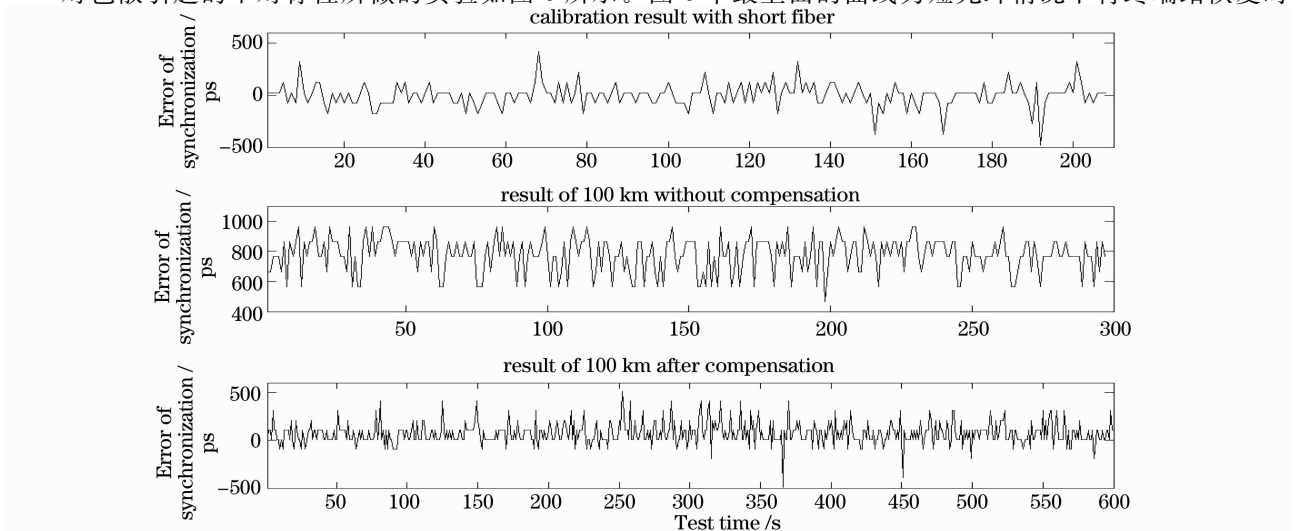


图 6 色散不对称性实验结果

Fig. 6 Asymmetry of time delay caused by dispersion

间信号与中心站校准后的情况,中间的曲线为不经过色散补偿传输 100 km 的时间同步结果,可以明显看出存在约 800 ps 的偏差,最下面的曲线为利用色散估算进行补偿后传输 100 km 的结果,均值大约为 70~80 ps,可见用估算法可以有效地克服色散引起的不对称性偏差。由于实验室没有恒温措施,为了尽量减小温度等环境因素对测试结果的影响,每次测量时间都较短。

另外由实验结果也可以看出这种时延估算补偿法并不能完全补偿色散不对称性,分析认为主要是由于光纤的传输时延随当前时刻的温度和应力等环境变化而变化,使得补偿后有一定的不对称性残余。

4.3 光纤时间传递同步实验结果

在 100 km 光纤链路上用 Agilent 53132A 测试 9.9 h 的时间同步稳定度为 298.3 ps(测试结果的标准方差 1σ 为时频领域的通用标准),准确度为 ± 1.2 ns,分钟准确度在 ± 160 ps 以下。测试结果如图 7 所示,其中黑线表示每秒实时测量的结果,白线表示分钟平均的结果。

对测试结果的数据分布进行统计,比较其与标准高斯分布的吻合程度,只有符合高斯分布才能用 1σ 作为其时间同步精度的指标。数据分布图如图 8 所示。由分布图可以看出测量结果与标准高斯分布基本吻合,故可以用测试结果的标准差(1σ)来表征实验系统时间同步的稳定度。

测试的结果虽然已经优于 GPS 授时的时间同步精度两个数量级,但由前文的误差分析可知实验中所用的钟源会给系统带来较大的误差,为了进一步研究系统所能达到的真实精度,到某配备高稳氢原子钟的研究所进行了相关实验,换用高稳钟源后 125 km 光纤时间传递测试 24 h 的最终同步结果如图 9 所示,“□”表示小时平均的结果。由测试结果可得光纤时间传递系统的时间同步稳定度约为 116 ps,准确度约为 ± 0.6 ns。基本上反映了论文所设计的实验系统所能够达到的时间同步精度。从实验结果也可以看出,对于如此高精度的时间同步测量,实验中所使用的测量仪表测量精度明显不够,如果能够有更高精度的测量仪表,则其测量结果可能更好。

5 结 论

对误差来源的分析可得光纤时间传递的理论精度可达 20 ps 以下。设计的时间传递系统实验测得的时间同步精度为 116 ps,比理论分析的结果偏大,其主要原因为测量仪表的精度不够和实验环境不理想。如果有更好的实验条件和测试仪表,光纤时间传递的实验精度可以达 100 ps 以下。

参 考 文 献

- 1 S. R. Jefferts, M. A. Weiss, J. Levines *et al.*. Two-way time transfer through SDH and SONET system[C]. EFTF, 1996. 461~464
- 2 M. A. Weiss, S. R. Jefferts, J. Levine *et al.*. Two-way time and frequency transfer in SONET[C]. IEEE IFCS, 1996.

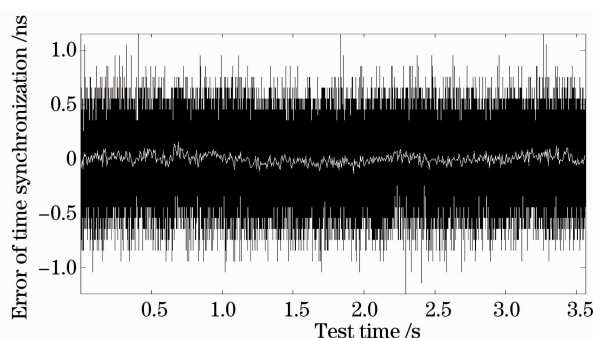


图 7 100 km 光纤时间传递的同步结果
Fig. 7 Result of the optic time transfer system with 100 km

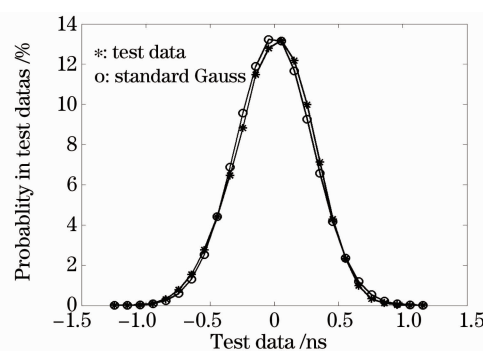


图 8 时间传递结果的数据分布
Fig. 8 Data distribution of the time transfer system

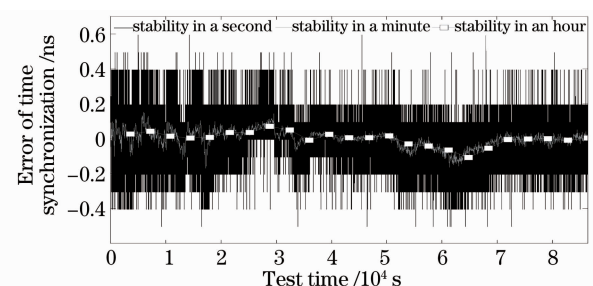


图 9 光纤时间传递的最终时间同步结果
Fig. 9 Final accuracy of the optic time transfer system

- 1163~1168
- 3 S. R. Jefferts, M. A. Weiss, J. Levine *et al.*. Two-way time and frequency transfer using optical fiber[J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 1997, **46**(2): 209~211
 - 4 L. Primas, G. Lutes, R. Sydnor. Fiber optic frequency transfer link[C]. IEEE IFCS, 1988. 478~484
 - 5 E. Lori, L. Primas, T. Ronald *et al.*. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems[C]. IEEE IFCS, 1989. 202~211
 - 6 R. T. Logan, G. F. Lutes. High stability microwave fiber optic systems: demonstrations and applications[C]. IEEE IFCS, 1992. 310~316
 - 7 K. Sato, T. Hara, S. Kuji *et al.*. Development of an ultrastable fiber optic frequency distribution system using an optical delay control module[J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2000, **49**(1): 19~24
 - 8 K. W. Holman, D. J. Jones, D. D. Hudson *et al.*. Precise frequency transfer through a fiber network using 1.5- μm mode-locked sources[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(13): 1554~1556
 - 9 A. Imaoka, M. Kihara. Accurate time/frequency transfer method using bidirectional WDM transmission[J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 1998, **47**(2): 537~542
 - 10 A. Imaoka, M. Kihara. Time signal distribution in communication networks based on synchronous digital hierarchy[J]. *IEEE T. Commun.*, 1997, **45**(2): 247~253
 - 11 M. Amemiya, M. Imae. Time and frequency transfer and dissemination methods using optical fiber network[J]. *IEEE T. Fund. Mater.*, 2006, **126**(6): 458~463
 - 12 C. Lopes, B. Riondet. Ultra precise time dissemination system[C]. IEEE IFCS, 1999, **1**: 296~299
 - 13 S. C. Ebenhag, P. O. Hedekvist, C. Rieck *et al.*. Evaluation of output phase stability in a fiber-optic two-way frequency distribution system[C]. PTTI, 2008. 117~124
 - 14 Liang Shuangyou, Ren Yan. High-precision time transfer via optical fiber[J]. *J. Time Freq.*, 2003, **26**(1): 75~80
梁双有, 任 燕. 利用光纤进行高精度时间传递[J]. *时间频率学报*, 2003, **26**(1): 75~80
 - 15 Xie Yi. Time synchronization network[J]. *Mod. Sci. & Tech. Telecommu.*, 2004, (11): 2~4
谢 毅, 时间同步网络[J]. *现代电信科技*, 2004, (11): 2~4
 - 16 Zhang Dayuan, Xie Yi, Meng Aili *et al.*. Transferring high accuracy standard time signal by SDH 2.048 mbit/s channel [J]. *Mod. Sci. & Tech. Telecommu.*, 2006, (12): 17~25
张大元, 谢 毅, 孟艾立 等. 利用光纤数字同步传送网 2.048 mbit/s 支路传送高精度标准时间信号[J]. *现代电信技术*, 2006, (12): 17~25
 - 17 M. Kithara, A. Imaoka. System configuration for standardizing SDH-based time and frequency transfer[C]. EFTF, 1996, **418**: 465~470
 - 18 M. Kihara, A. Imaoka. Two-way time transfer through 2.4 Gb/s optical SDH system[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2001, **50**(3): 709~715
 - 19 Lai Xianzhu. The Study of High Precision Time Service Basic of Optic Network[D]. Nanjing: People's Liberation Army of University of Science and Technology, 2009. 31~37
赖先主. 基于光网络的高精度授时技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2009. 31~37
 - 20 Ding Xiaoyu, Lu Lin, Zhang Baofu *et al.*. The error analysis of fiber time service using round-trip method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040603
丁小玉, 卢 麟, 张宝富 等. 光纤 Round-Trip 法授时误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 040603