

光纤双向时间同步系统不确定度评定

杨文哲^{1,2,3},王海峰^{1,2,3},张升康^{1,2,3},冯克明^{2,3}

(1. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100854;

2. 计量与校准技术国家重点实验室, 北京 100854; 3. 中国航天科工集团 第二研究院, 北京 100854)

摘要: 光纤双向时间同步技术是一种应用广泛的高精度时间同步方法, 为了明确该类方法的时间同步不确定度并进一步提高时间同步精度, 介绍了光纤双向时间信号传递系统的基本原理, 分析了系统不确定度的来源, 重点研究了各不确定度来源对于系统时间同步结果的影响, 并对系统各不确定度进行了评定。最后, 以本系统为例, 给出了光纤双向时间信号传递系统的合成标准不确定度, 其数值约为 34.17ps, 并提出了针对主要不确定度来源的相应解决方法。该不确定度评定过程指明了光纤双向时间同步系统的进一步改进方向, 对其它光纤时间同步类系统具有参考价值。

关键词: 光纤; 时间同步; 色散效应; 不确定度分析

中图分类号: TB939 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)06-0030-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber two-way time synchronization system uncertainty analysis

YANG Wenzhe^{1,2,3}, WANG Haifeng^{1,2,3}, ZHANG Shengkang^{1,2,3}, FENG Keming^{2,3}

(1. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China;

2. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100854, China;

3. The Second Research Institute of China Aerospace Science and Technology Group, Beijing 100854, China)

Abstract: Optical fiber two-way time transfer technology is a high precision time synchronization method which is widely used. In order to identify errors of the method and further enhance the precision of time synchronization, the basic principle of optical fiber two-way time transfer method is introduced. Then, the system error sources are analyzed, the influence of various error sources on time synchronization result and the system uncertainty which is introduced by various error sources are mainly studied. Finally, using our system as an example, the compound standard uncertainty of optical fiber two-way time transfer system is given, and the value is approximately 34.17ps, and the corresponding solutions to main error sources are proposed. The uncertainty evaluation indicates the further improvement direction of optical fiber two-way time synchronization system and has reference value for other optical fiber time synchronization systems.

Key words: optical fiber; time synchronization; dispersion effect; uncertainty analysis

0 引言

高精度时间同步技术可实现时间标准的播发和比对, 例如在基础量子物理学^[1-3]、大地测量学^[4]和无线电天文学^[5]等诸多学科的基础实验中, 远程时间传递

技术能够为射电天文望远镜等实验设备提供精确、稳定和一致的时间参考信号, 保证其长期稳定运行。光纤信道具有传输稳定、带宽大和不易受干扰等优点, 因此利用光纤信道作为传输介质以提升时间同步精度的方法已成为新的研究热点。

光纤双向时间同步方法是利用双向同时传输信号消除链路噪声的一类光纤微波时间同步方法, 具有时间同步精度高、链路噪声小等优点。本文重点研究各个不确定度来源对于系统时间同步结果的影响。

收稿日期: 2019-01-25。

作者简介: 杨文哲(1991-), 男, 北京人, 博士研究生, 本科毕业于北京航空航天大学, 现就读于中国航天科工集团第二研究院研究生院, 主要研究方向是时间同步与校准技术、光纤时间频率传递技术、时间频率计量和电子电路设计等。



1 光纤双向时间同步基本原理

光纤双向时间同步原理如图 1 所示。时间同步原理是利用双方向链路时延相等的特点,通过数据解算消除信号传输时延中的噪声。本文将 A、B 两地钟差记为 ΔT ,通过光纤链路连接的 A 站和 B 站分别向对方发送信号,同时接收来自对方的信号。将 A 站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_A ,B 站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_B 。因此站点 A、B 测量的时延为:

$$T_A = T_{A2} - T_{A1} = \Delta T + (T_{A2} - T_{B1}) \quad (1)$$

$$T_B = T_{B2} - T_{B1} = -\Delta T + (T_{B2} - T_{A1}) \quad (2)$$

其中, T_{A1} 、 T_{B1} 分别为 A 站、B 站发射时刻, T_{A2} 、 T_{B2} 分别为 A 站、B 站接收时刻。为实现高精度时间同步,通过式(1)、式(2)可得两地钟差 ΔT 为:

$$T_A - T_B = 2\Delta T + (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB}) + (\tau_{BA} - \tau_{AB}) \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_A - T_B) - (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB}) + (\tau_{AB} - \tau_{BA})] \quad (4)$$

其中, τ_{TXA} 、 τ_{TXB} 为 A 站和 B 站的信号发射时延, τ_{REA} 、 τ_{REB} 为 A 站、B 站的信号接收时延, τ_{AB} 、 τ_{BA} 为信号由 A 站到 B 站和由 B 站到 A 站的链路传输时延。本文采用两站同钟的形式进行 100km 光纤微波双向时间同步试验。光纤链路由 2 根 50km 单模光纤(SMF)和 1 个掺铒光纤双向放大器(EDFA)组成。EDFA 用于补偿信

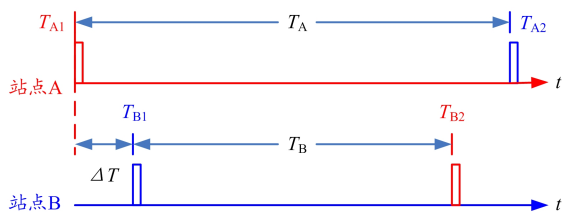


图 1 光纤双向时间同步原理图

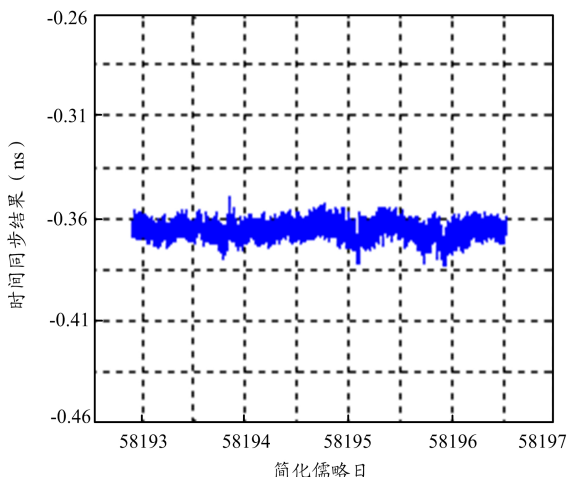


图 2 光纤双向时间同步结果

号在光纤链路中的传输损耗。系统时间同步结果如图 2 所示,图中曲线为式(4)中 ΔT 的变化情况,变化峰峰值小于 35ps,标准差达到 3.6ps。

2 不确定度分析

光纤双向时间同步系统不确定度主要包括站点设备测量不确定度、对信号发射和接收时延的校准不确定度以及对双方向传输不对称时延的估计不确定度。不确定度评定方法分为 A 类和 B 类:A 类不确定度指被测量在测量过程中的随机性偏差;B 类不确定度指由于环境、系统等其它因素对被测量产生的非随机性偏差。

2.1 设备测量不确定度

A 站和 B 站发送信号时间与接收信号时间之差 T_A 和 T_B 都是通过本地设备的伪码跟踪单元和时间间隔测量单元测量得到的。伪码相位测量单元采用归一化相干延迟锁定环路(DLL)跟踪环境,其相位测量不确定度主要由热噪声导致,误差均方差 σ_{DLL} 满足公式:

$$\sigma_{DLL} = T_c \sqrt{\frac{4F_1 d^2 B_n}{C/N_0} \left[2(1-d) + \frac{4F_2 d}{TC/N_0} \right]} \quad (5)$$

其中, T_c 为伪码的码片宽度, F_1 为伪码跟踪环鉴相器相关因子, d 为前后相关器间距, B_n 为码环路的噪声带宽, C/N_0 为接收信号载噪比 (单位为 $\text{dB} \cdot \text{Hz}$), F_2 为码跟踪环鉴别器类型因子, T 为相干积分时间。根据式(5)计算得到本文系统的伪码相位测量误差均方差 σ_{DLL} 随信号载噪比 C/N_0 的变化情况,如图 3 所示。可以看出,当系统稳定工作时,接收信号载噪比保持在 $60\text{dB} \cdot \text{Hz}$ 以上,因此伪码相位测量设备所引入的系统 A 类不确定度小于 32ps。

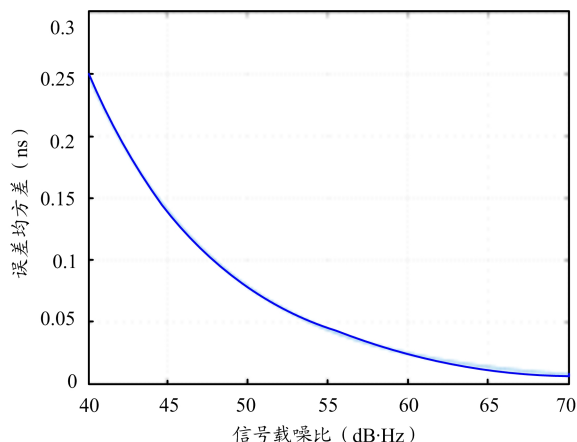


图 3 伪码相位测量误差均方差随信号载噪比的变化情况

此外,伪码相位测量单元随着环境温度变化,还会存在长期相位漂移,造成B类测量不确定度,这部分不确定度的大小与温度变化范围有关,也与采用的锁相环路结构有关。在本文试验系统中,两端锁相环路结构相同,零基线下所处环境温度变化情况也相同,因此在双向比对过程中,这部分不确定度几乎被完全抵消。

时间间隔测量单元通常采用时间间隔计数器,其工作原理是利用脉冲信号的上升沿或下降沿进行触发,而2次触发之间包含的计数时标信号的个数对应了时间间隔测量值。由于不同厂家不同型号的时间间隔测量单元的测量不确定度不同,因此对于时间间隔测量单元引入的不确定度可采用实验测量的方法进行评定。

2.2 发射接收时延的校准不确定度

为了获得高精度的时间同步结果,在每次工作前应采用零基线实验对系统进行校准。校准过程中光信号传输链路为1m SMF,校准实验结果如图4所示。系统两站点信号发射和接收时延之间的差值平均值为-1.079ns,标准差为3.3ps,且除去两站信号发射接收时延差,这一结果中还包含了上节中所阐述的系统设备测量不确定度。因此,设备测量过程和发射接收时延校准过程一同引入的系统A类不确定度为3.3ps。

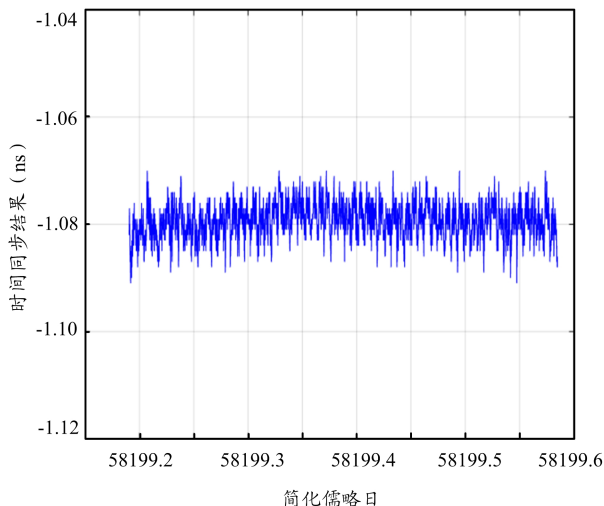


图4 校准实验时间同步结果

2.3 不对称时延的估计不确定度

光信号在链路中传输时,造成双方向传输时延不相等的因素很多,包括色散效应、光纤双向放大器、Sagnac效应和偏振模色散(PMD)效应。

2.3.1 色散效应引起的不确定度

对于波分复用系统,色散效应会导致不同波长的

光信号在光纤中的传播速度和传播时延不同,不对称时延通常为纳秒级。因此,需要对这部分不对称时延进行校准。然而,校准后的系统时间同步结果依旧存在残差,造成残差的2个原因是:①在校准后,温度、震动等环境因素发生变化,导致校准值与系统工作时的不对称时延不符;②在校准过程中,色散系数、链路长度和激光波长参数的测量值存在不确定度。由于环境震荡情况具有偶然性和随机性,所以只考虑环境温度变化引入的时间同步不确定度可表示为:

$$\Delta\tau_{\text{Dispersion}} = D(\lambda_A - \lambda_B) \frac{dL}{dw} \Delta w + L(\lambda_A - \lambda_B) \frac{dD}{dw} \Delta w + LD \left(\frac{d\lambda_A}{dw} \Delta w_A - \frac{d\lambda_B}{dw} \Delta w_B \right) \quad (6)$$

其中, D 为光纤色散系数, L 为光纤链路长度, w 为光纤所处环境的温度, λ_A 、 λ_B 分别为A站和B站的光信号波长, w_A 、 w_B 分别为A站和B站的实验室温度。以本文实验系统情况为例,实验室温度变化范围大致在25.3℃~29.4℃,光纤色散系数的温度变化系数小于 $4.5 \times 10^{-3} \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,光纤热膨胀系数小于 $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,考虑到A、B两站的激光器型号相同,且位于同一实验室,等式右侧第三项可以忽略不计。温度变化导致的残留不确定度约为1.7ps。另外,光谱分析仪、光学时域反射计和色散分析仪等测量设备的不确定度会影响系统对于不对称时延的补偿。测量不确定度导致的系统时间同步不确定度可以表示为:

$$u_{\Delta\tau_{\text{Dispersion}}} = D(\lambda_A - \lambda_B) u_L + L(\lambda_A - \lambda_B) u_D + LD u_{\Delta\lambda} \quad (7)$$

其中, u_L 为光纤链路长度的测量不确定度, u_D 为色散系数的测量不确定度, $u_{\Delta\lambda}$ 为A、B波长差的测量不确定度。本文实验采用EXFO公司的MaxTester 715B型光学时域反射计测量光纤长度,2段光纤长度测量结果为50.4308km和50.4690km,测量不确定度约为8.1m;采用EXFO公司的FTB-5700型色散分析仪测量光纤色散系数,光纤色散系数为 $18 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$,测量不确定度为 $0.06 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$;采用AQ6370D型光谱分析仪测量光信号波长,2个激光器信号波长的测量结果分别为1550.016nm和1550.825nm,波长差测量结果为0.809nm,测量不确定度为10pm。因此,校准过程引入的不确定度约为23.2ps,总不确定度结果约为23.3ps。

2.3.2 光纤双向放大器不确定度

为补偿链路传输损耗,实验系统中采用了EDFA。对于EDFA引入误差造成的不对称时延,我们很难建立精确模型,通常采用实验比对的方式进行测定和校

准。在比对实验中,将 EDFA 依次按不同的方向连接进入光纤链路,而其它实验设置均保持不变,温度等环境条件也尽量保持一致,使 2 次实验的 EDFA 不对称时延大小相同、方向相反。因此,EDFA 引入的不对称时延应为 2 次实验结果之差的一半,其实验结果如表 1 所示。最终,EDFA 引入的不对称时延为 -11.5ps ,校准所引入的系统 A 类不确定度约为 4.5ps 。

表 1 EDFA 双方向不对称时延校准结果

实验结果	第一次实验	第二次实验	EDFA 不对称时延
钟差平均值(ns)	0.902	0.925	-0.0115
钟差标准差(ps)	4.56	4.53	4.54

2.3.3 Sagnac 效应和 PMD 效应引起不确定度

Sagnac 效应是指在光纤双向时间同步系统中,地球自转运动引起的信号传播路径变化,从而导致双方向传输时延不同;与地球自转方向相同的信号的实际传输路径距离变长,而与地球自转方向相反的信号的实际传输路径距离变短^[9],最终产生双方向传输不对称时延。由于本文系统的光纤链路由卷轴光纤级联而成,光纤链路可以视为在地球上的一个点上,因此 Sagnac 效应可以忽略不计。

PMD 效应是由光纤双折射引起的。在实际工程中由于光纤椭圆度、环境温度、震动和弯曲度等因素的影响,2 个相互垂直的偏振态在光纤中的传播速度不再相同,引起脉冲展宽,产生时延差。本实验系统中链路长度 L 为 100km ,PMD 效应引起的不对称时延约为 0.6ps 。

2.4 系统合成标准不确定度

本文对光纤双向时间同步系统的各部分不确定度进行了分析和估算,根据等式(4),系统合成标准不确定度 u_c 可以表示为:

$$u_c = \sqrt{(u_{\tau_{A,B}})^2 + \left(\frac{1}{2}u_{\text{Cai}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{\text{EDFA}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{\text{Disp}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{\text{PMD}}\right)^2} \quad (8)$$

其中, u_{Cai} 为信号发射接收校准不确定度, u_{Disp} 为光纤色散效应引入的系统不确定度。计算结果如表 2 所示。可以看出,最终系统合成标准不确定度约为 34.17ps

由于实验钟差数据结果经过了 120s 滑动平均计算,因此,分析结果与实验数据结果基本吻合,均为 3.5ps 左右。此外,系统合成标准不确定度的主要成分是伪码相位测量不确定度,其值为 32ps 。

表 2 光纤双向时间同步系统不确定度

来源	不确定度(ps)	类型
伪码相位测量	32	A&B
设备测量和校准	3.3	A
双向光放大器	4.5	A
色散效应	23.3	B
PMD 效应	0.6	B
Sagnac 效应	可忽略	B
合成标准不确定度 u_c	34.17	A&B

3 结束语

光纤双向时间同步系统是一种以光纤为传输媒介的高精度时间同步系统。系统时间同步不确定度主要包括了由站点设备的时间间隔测量不确定度、对信号发射和接收时延的校准不确定度和对双方向传输不对称时延的估计不确定度。其中,设备测量不确定度约为 32ps ,是系统合成标准不确定度的主要成分。光纤双向时间同步系统的合成标准不确定度约为 34.17ps 。因此,为了进一步提高光纤微波双向时间同步系统的精度,需要优化和改良伪码测量单元。下一步工作将主要针对系统端机中的测量单元进行优化和改进;同时,可以考虑利用中频信号的载波相位信息提升端机对于时间戳的测量精度。

参考文献:

- [1] SCHILLER S, TINO G M, GILL P, et al. Einstein Gravity Explorer-a medium-class fundamental physics mission [J]. Experimental Astronomy, 2010, 23(2): 573-610.
- [2] WOLF P, BORDÉ C, CLAIRON A, et al. Quantum physics exploring gravity in the outer solar system: the SAGAS project [J]. Experimental Astronomy, 2009, 23(2): 651-687.
- [3] SHELKOVNIKOV A, BUTCHER R J, CHARDONNET C, et al. Stability of the Proton-to-Electron Mass Ratio [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(15): 150801-1-150801-4.
- [4] BONDARESCU R, BONDARESCU M, HETÉNYI G, et al. Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping[J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(1): 78-82.
- [5] CLICHE J F, SHILLUE B. Precision timing control for radioastronomy: maintaining femtosecond synchronization in the Atacama Large Millimeter Array[J]. Control Systems IEEE, 2006, 26(1): 19-26.
- [6] TEISSEYRE R, MAJEWSKI E, TAKEO M. Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 413-438.