

引用格式: 郭鹏嵩, 韦沛, 马浪明, 等. 干涉测量数据采集设备时延的温度效应[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 54-61.

干涉测量数据采集设备时延的温度效应

郭鹏嵩^{1,2}, 韦沛^{1,*}, 马浪明¹, 王伟¹, 贾浩然^{1,2}, 杨旭海¹

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 干涉测量是一种被动测量手段, 是目前角分辨率最高的天文观测手段, 且不占用星上资源, 广泛应用于天文学、测地学和深空导航领域。提高干涉测量的一个重要途径是精确测定干涉测量仪器的系统误差, 数据采集设备时延是其重要组成部分, 目前干涉测量的时延测定精度可达到亚纳秒级水平, 对设备时延有更高的精度要求。本文利用实际观测的数据研究数据采集设备的设备时延, 分析室内温度、设备温度与该设备时延的相关性, 建立设备时延与设备温度之间的数学模型, 并对设备时延进行修正。试验结果表明: 该数据采集设备的设备时延变化与设备温度呈线性关系, 通过本文方法修正后, 在温度控制单元没有开启情况下(设备温度变化大), 精度改善可达 60% 以上, 温度控制单元开启情况下(设备温度变化不大), 精度也会有所改善, 达 10% 左右。

关键词: 干涉测量; 设备时延; 温度系数

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0054-08

Temperature effects of instrumental delay in interferometric data acquisition equipment

GUO Peng-song^{1,2}, WEI Pei^{1,*}, MA Lang-ming¹,

WANG Wei¹, JIA Hao-ran^{1,2}, YANG Xu-hai¹

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Interferometry is a passive measurement method, and it is the astronomical observation method with the highest angular resolution at present. It does not occupy the resources on the satellite and is widely used in astronomy, geodesy and deep space navigation. An important way to improve the precision of interferometry is to improve the measurement of the system error, and the delay of data acquisition equipment is a main part of it. The precision of interferometry can reach sub-nanosecond level, which places high demands on device delay measurement. This paper uses the observation data to study the instrumental delay of the data acquisition equipment and analyzes the correlation between the station temperature, the equipment temperature and the delay of the data acquisition equipment and establishes a mathematical model between the equipment delay and

收稿日期: 2023-01-19; 接受日期: 2023-03-25; *: 通讯作者

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12073034; 12273047); 中国科学院“一带一路”团队项目(XAB2018YDYL01); 中国科学院青年创新促进会(2022412)

the equipment temperature, and corrected the instrumental delay. The results show that the instrumental delay of data acquisition equipment has a linear relationship with the equipment temperature. After correction, the performance of data acquisition equipment delay measurement got improved over 60% while the temperature control unit turned off (the temperature of the equipment is not stable). When the temperature control unit is turned on (the temperature of the equipment stays stable), the improvement can reach 10%.

Key words: interferometry; instrumental delay; temperature coefficient

干涉测量是利用测量两个测站接收同一信号的相位差来实现目标至测站间时延差的测量^[1]。根据测站间基线长度和观测类型的差别,分为甚长基线干涉测量技术(VLBI)和连线干涉测量技术(CEI)。VLBI技术是目前角分辨率最高的天文观测技术^[2-3],20世纪中叶起广泛应用于深空探测、人造卫星、时间传递等多个领域^[4-7]。CEI技术可进行高精度的相位时延观测,具有基线短、布网灵活、实时性好的特点^[8-9]。2013年,中国科学院国家授时中心按照VLBI2010系统标准设计并建成了国内首套宽带VLBI系统,该系统主要用于世界时UT1的测定、时间传递及人造卫星的轨道测定及相关研究^[10-11]。

在干涉测量系统中,主要误差有设备时延、对流层时延、电离层时延和站间钟差^[12]。其中对流层时延以及电离层时延可以通过交替观测致密射电源进行修正。VLBI设备时延难以与钟差分离,会严重影响时间传递的精度。数据采集设备是干涉测量系统中的核心设备,担负着中频信号的采集和记录的工作^[13],其设备时延测量精度直接影响后续干涉测量相关处理的结果。

目前VLBI时延测量精度可达0.1 ns,连线干涉精度可达皮秒级,试验证明在昼夜温差较大的地区,设备时延波动范围可以达到纳秒级别,有学者研究表明设备时延与设备本身的温度有关^[14-15];显然设备时延随温度的变化会严重影响干涉时差测量的精度^[16],有必要开展设备时延的温度特性研究。

1 干涉测量原理

干涉测量的观测为同一信号波前到达两个测站的时延差,通过对两测站接收的信号进行相

关处理,可以得到该条基线的时延差及时延差的变化率观测量。干涉测量原理如图1所示^[17]。

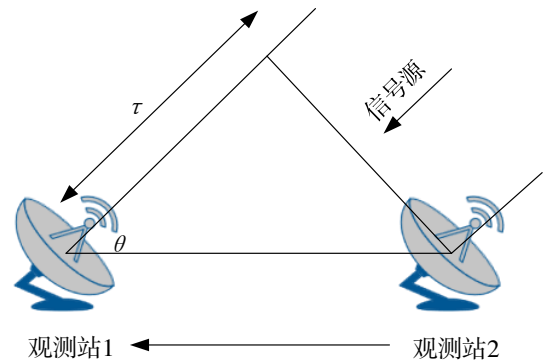


图1 干涉测量原理图

其中两观测站测得的总时延可以表示为

$$\tau = \frac{B \cdot \cos \theta}{c} \quad (1)$$

由一阶 Taylor 展开的误差传递公式^[18]可得:

$$\Delta \tau = \frac{\partial \tau}{\partial B} + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} = \frac{\Delta B \cdot \cos \theta}{c} - \frac{B \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta}{c} \quad (2)$$

式(2)中, B 为基线长度, c 为真空中的光速, θ 为基线方向与信号源方向的夹角, τ 为总时延, $\Delta \tau$ 为时延测量误差, ΔB 为基线长度误差(经较长时间的观测可精确的测定)。由式(2)可知时延测量误差会影响到测角精度。

VLBI 观测射电源及卫星时,除几何时延外,还有站间钟差、中性大气、电离层、硬件设备等造成的时延误差。干涉测量的理论时延 τ' 可表示为^[19]

$$\tau' = \tau_g + \tau_{\text{clk}} + \tau_{\text{atm}} + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{dev}} + \tau_{\text{etc}} \quad (3)$$

式(3)中, τ_g 为几何时延, τ_{clk} 为站间钟差, τ_{atm} 为中性大气中传播造成的时延, τ_{ion} 为电离层时延, τ_{dev} 为设备时延, τ_{etc} 为其他可能引起的时延,如站位置的变化、模型的不精确、相对论影响。在长基线实验中,站间钟差可以通过 GNSS (Global

Navigation Satellite System) 数据进行补偿, 中性大气时延差可以用模型改正或用水汽辐射计实时测定, 电离层时延可以根据双频无电离层组合模型进行修正; 短基线或零基线实验中, 站间钟差(共用同一台钟)、大气时延差、电离层时延差通常可记为 0。而设备时延在处理时通常难以和钟差分离, 且容易受到温度影响, 其中数据采集设备时延是设备时延中重要的一部分, 本文将仅对数据采集设备的设备时延进行分析。

2 试验平台与试验方法

2.1 系统搭建

为了研究数据采集设备时延变化与温度的相关性变化, 笔者基于国家授时中心转发测轨网的时频、天线系统、VLBI (very long baseline interferometry) 全球观测系统的相关处理中心, 搭建试验平台。试验系统框图如图 2 所示: 测站天线系统负责指向和跟踪目标, 通过天线反射面将信号源汇集聚焦至天线馈源系统, 馈源系统将所需的信号分离为所要求的偏振形式传至低噪放大器。低噪放大器将天线汇集的射频信号进一步放大, 然后经下变频器进行混频, 将射频信号变换为中频信号, 最后将中频信号传送至数据采集设备。数据采集设备通过频带选择、模数转换、数字下变频, 以及基于时标的数据格式化(在该试验中为 Mark5B 格式)对信号进行采集。格式化后的数据通过网络传输传至相关处理中心。测站配备有以高性能氢原子钟为主钟的原子钟组, 其 10 MHz、1 PPS 信号通过时钟分配单元输入至下变频器、数据采集设备和 SR620 时间间隔计数器。温度计 P 测量值为数据采集设备温度, 传感器探头贴合放置于数据采集设备外壳, 温度计 Q 测量值为测站室内温度, 传感器探头悬空。SR620 接入时钟分配单元输出的稳定的 1 PPS 信号和数据采集设备输出的 1 PPS_{out} 信号, 则 SR620 测得数据为设备时延, 测得数据通过网络传输至相关处理中心。其中数据采集设备为笔者采用基于 USRP-X310 开发的自研设备。温度计 P、Q 在常温下(20 ℃~80 ℃)精度为 0.5 ℃, 分辨率为 0.1 ℃。通过 SR620 时间

间隔计数器在 7 月 28 日至 8 月 6 日(北京时间)对数据采集设备时延与温度进行测试。

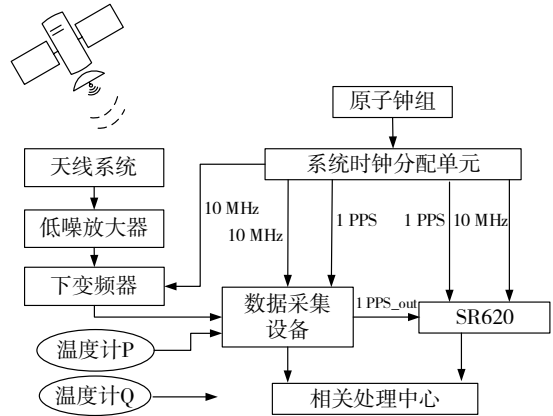


图 2 系统框图

2.2 设备时延与温度的相关系数分析

为确定设备时延与设备温度、室内温度的相关性, 分别计算设备时延 d 和设备温度 T_m 、室内温度 T_{in} 的相关系数:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_1 &= \frac{E[(d - E[d])(T_m - E[T_m])]}{\sqrt{D[d]}\sqrt{D[T_m]}} \\ \rho_2 &= \frac{E[(d - E[d])(T_{in} - E[T_{in}])]}{\sqrt{D[d]}\sqrt{D[T_{in}]}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式(4)中: $D[d]$ 和 $E[d]$ 分别为设备时延的方差和期望值; $D[T_m]$ 和 $E[T_m]$ 分别为设备温度的方差和期望值; $D[T_{in}]$ 和 $E[T_{in}]$ 分别为室内温度的方差和期望值; $E[(d - E[d])(T_m - E[T_m])]$ 为设备时延与设备温度的协方差; $E[(d - E[d])(T_{in} - E[T_{in}])]$ 为设备时延差与室内温度的协方差。通过分别求 ρ_1 和 ρ_2 的值可以看出设备时延与温度的相关性, 具体可分析设备温度和室内温度哪一项与设备时延的相关性更强, 便于后续研究中的数据分析。

2.3 设备时延温度数学模型的建立

根据实际测量数据推测, 设备时延与温度存在线性关系, 不妨令:

$$d = AT + B + \varepsilon \quad (5)$$

式(5)中, A 、 B 为温度系数, ε 为测量误差, T 为测得的温度, d 为温度是 T 时的设备时延。

以温度为 T_{re} 时的设备时延为参考，则可以得到：

$$\Delta d = A(T - T_{re}) \tag{6}$$

式 (6) 中， T_{re} 表示参考温度， Δd 为温度是 T 时求得相对于参考温度时的设备时延差。

设备时延可使用标准差评估，其公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d - \bar{d})^2}{N}} \tag{7}$$

3 结果与分析

3.1 试验结果

图 3 给出了在北京时间 7 月 28 日 0 时至 8 月 2 日 0 时（开启温度控制单元的恒温环境）内 5 d 设备时延以及设备温度、室内温度变化趋势，图 4 是北京 8 月 2 日 11 时至 8 月 6 日 11 时（关闭温度控制单元的室温环境）4 d 内设备时延以及设备温度、室内温度变化趋势。

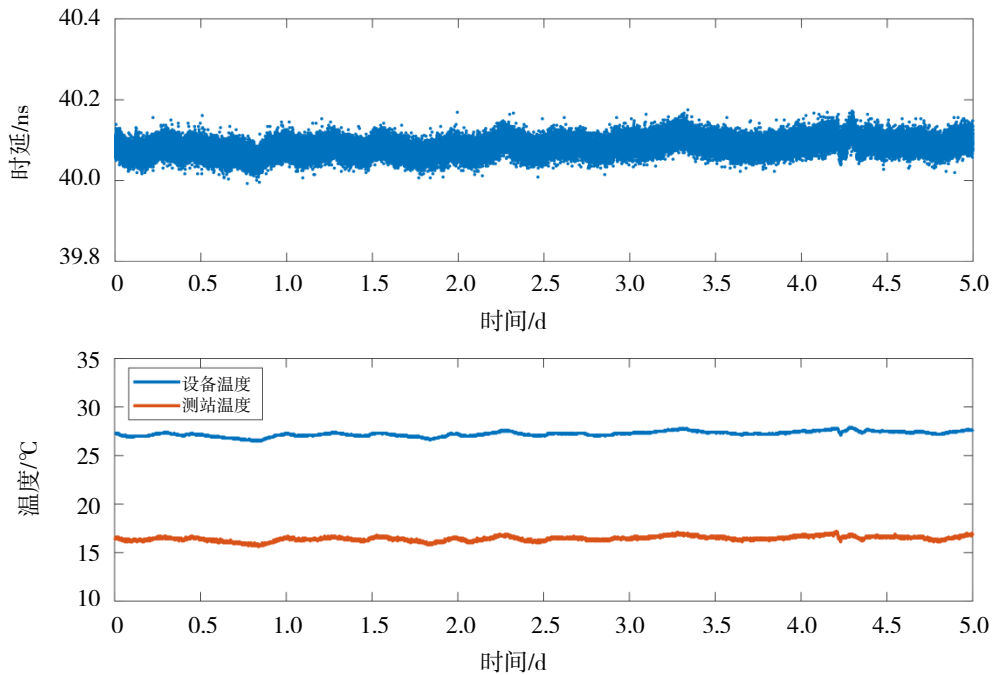


图 3 2022 年 7 月 28 日 0 时至 2022 年 8 月 2 日 0 时设备时延与温度变化图

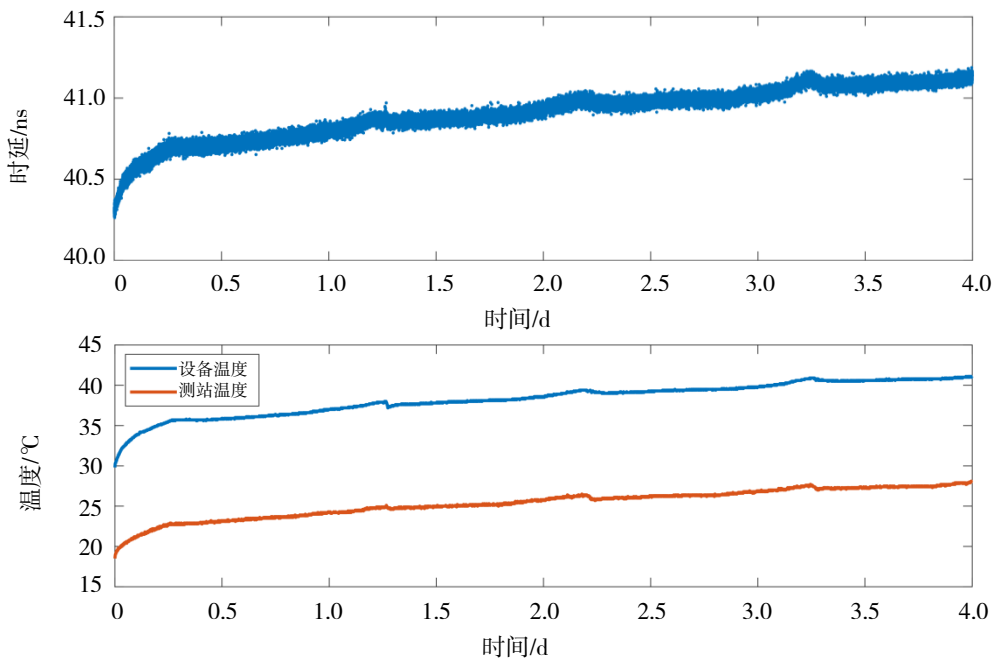


图 4 2022 年 8 月 2 日 11 时至 2022 年 8 月 6 日 11 时设备时延与温度变化图

在图 3 和 4 中可以看到温度变化与时延变化之间存在相同的趋势性和一定的周期性。

由于温度控制单元开启时,室内温度会稳定在 16℃附近,设备温度会稳定在 27℃附近,为此本文选取该温度条件下的设备时延作为标准

参考。在设备温度保持恒定 27℃(此时室温为 16℃)观测得 2 h 内设备时延数据,分析得:在设备温度恒定为 27℃时,设备时延均值为 40.07 ns,STD(标准差)为 0.014 0 ns。测得数据如图 5 所示。

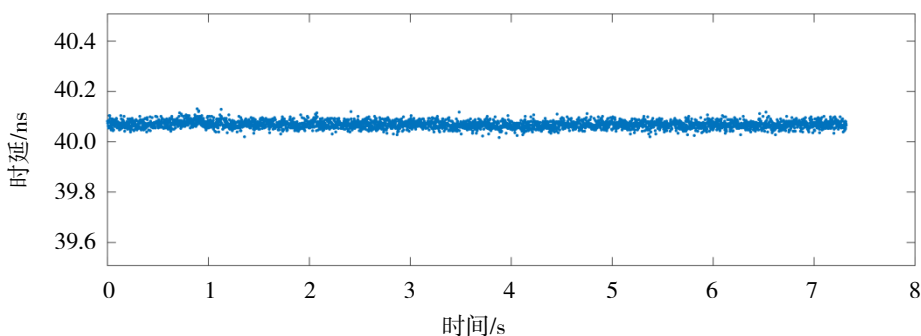


图 5 设备温度为 27℃时设备时延图

3.2 设备时延与温度的相关系数分析

设备时延分别与设备温度以及室内温度的相关系数的结果如表 1 及表 2 所示。

表 1 设备时延与开启温度控制单元时温度相关系数

日期	设备时延与设备温度的相关系数	设备时延与室内温度的相关系数
20220728	0.531 9	0.493 6
20220729	0.463 7	0.427 8
20220730	0.495 3	0.458 1
20220731	0.544 7	0.517 3
20220801	0.527 5	0.439 7
0728/0801	0.660 2	0.612 6

表 2 设备时延与关闭温度控制单元时温度相关系数

日期	设备时延与设备温度的相关系数	设备时延与室内温度的相关系数
20220802/ 20220803	0.981 9	0.975 2
20220803/ 20220804	0.949 1	0.944 0
20220804/ 20220805	0.928 1	0.911 8
20220805/ 20220806	0.927 4	0.903 5
0802/0806	0.993 8	0.992 1

从表 2 中可以看出在温度变化较大的 8 月 2 日 11 时到 8 月 6 日 11 时之间,设备时延与温度表现出了高度的相关性,在温度变化较大的时候相关性更高,而在设备温度恒定,室内温度一定的情况下也表现出了显著的相关性;同时也可以看出设备时延的变化与设备温度的相关性更高。下文对设备温度进行分析。

3.3 误差传递计算

由误差传递函数计算可知公式(5)的误差传递如下:

$$\dot{d} = \dot{A}(T - T_{27}) + A \times \dot{T} \quad (8)$$

式(8)中, \dot{A} 为所求系数标准差,令 \dot{T} 为该温度计分辨率即 0.1℃。考虑到 2022 年 8 月 2 日 11 时至 2022 年 8 月 6 日 11 时只有为期 4 d 的实测数据,在下述两种处理方法中均采用了滑动窗口的方式。其中方法一设置滑动窗口分别为 8 h, 1 d, 3 d, 步长为 1 h。

本文分析的是温度与设备时延之间的关系,与时间关系较小。且在试验中发现某些时间段温度变化波动较小,会影响参数的解算精度。因此在方法二中以温度为参考设置滑动窗口,窗口大小为 2℃,步长为 0.1℃。

求得结果如表 3 所示。

表 3 误差传递函数结果

方法	系数标准差 $\dot{A}/(\text{ns}/^\circ\text{C})$	温度系数 $A/(\text{ns}/^\circ\text{C})$	系统误差 \dot{d}/ns
方法一 (8 h)	0.000 539 6	0.073 9	0.014 3
方法一 (1 d)	0.000 366 0	0.073 9	0.012 1
方法一 (3 d)	0.000 077 0	0.074 0	0.008 4
方法二 (1 $^\circ\text{C}$)	0.000 491 8	0.073 7	0.013 7
方法二 (2 $^\circ\text{C}$)	0.000 338 1	0.073 8	0.011 7
方法二 (3 $^\circ\text{C}$)	0.000 241 4	0.073 9	0.010 5

由表 3 可以看到，温度系数 A 基本保持在 $0.073\ 9\ \text{ns}/^\circ\text{C}$ ，温度系数 A 的标准差可以达到皮

秒级，整体系统误差 \dot{d} 可以达到 0.01 纳秒级，同时随着窗口的增大，整体系统误差也在随之下降，可满足干涉测量的要求。

3.4 建立设备时延与温度的线性拟合函数及拟合残差

根据上文试验结果，令 A 为 $0.073\ 9\ \text{ns}/^\circ\text{C}$ ，分别对不开启温度控制单元的 8 月 2 日 11 时至 8 月 6 日 11 时 4 d 的数据以及开启温度控制单元后的 7 月 28 日 0 时至 8 月 2 日 0 时 5 d 的数据进行验证。

图 6 和图 7 分别给出了不开启温度控制单元后的设备时延与修正后的设备时延图以及开启温度控制单元后的设备时延与修正后的设备时延图。原始设备时延标准差及修正后的设备时延标准差结果见表 4 和 5 所示。

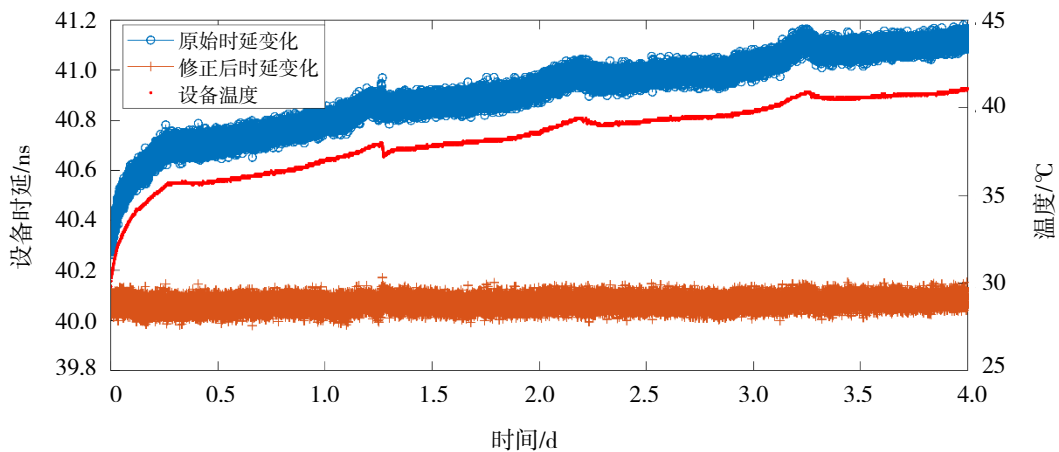


图 6 不开启温度控制单元设备时延与修正后的设备时延变化图

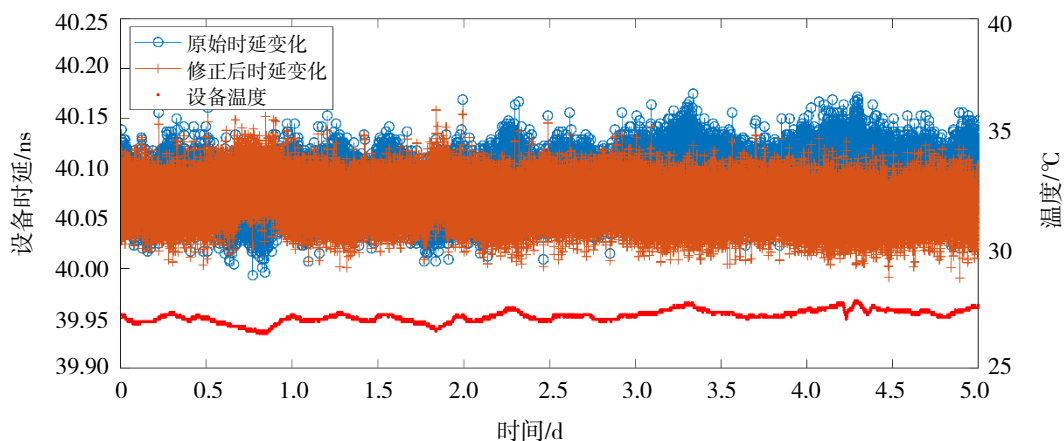


图 7 开启温度控制单元设备时延与修正后的设备时延变化图

表 4 设备时延标准差 (不开启温度控制单元)

日期	原始时延	修正后时延	改善程度
	变化标准差 /ns	变化标准差 /ns	
20220802/ 20220803	0.093 0	0.017 6	81.1%
20220803/ 20220804	0.054 3	0.016 9	68.9%
20220804/ 20220805	0.044 3	0.017 2	61.2%
20220805/ 20220806	0.045 8	0.016 7	63.5%
0802/0806	0.155 3	0.018 5	88.1%

表 5 设备时延标准差 (开启温度控制单元)

日期	原始时延	修正后时延	改善程度
	变化标准差 /ns	变化标准差 /ns	
20220728	0.016 5	0.016 4	0.6%
20220729	0.015 5	0.014 8	4.5%
20220730	0.015 6	0.014 0	10.3%
20220731	0.016 3	0.014 0	14.1%
20220801	0.016 4	0.014 2	13.4%
0728/0801	0.018 4	0.015 7	14.7%

在开启温度控制单元的 7 月 28 日 0 时至 8 月 2 日 0 时内, 可以看到温度变化起伏不大; 但是在不开启温度控制单元的 8 月 2 日 11 时至 8 月 6 日 11 时内, 设备时延起伏很大。在经过修正后, 使得设备时延稳定度在温度变化情况下提升 60% 以上; 即使在开启温度控制单元的情况下也有 10% 以上的改善。

4 结语

本文从温度和设备时延的相关性进行分析, 并建立了设备时延与设备温度之间的拟合函数。分析结果表明: 温度变化与时延变化之间存在强

相关性。经过本文方法修正后, 在温度变化较大的情况下, 设备时延单日精度提高超过 60%, 最高达到 80%。在没有温度控制单元的测站环境下, 通过该修正方法, 基本可以达到开启温度控制单元的效果。开启温度控制单元时也可通过该方法进一步提高设备时延的稳定性。建议在实际应用中, 应当测量设备温度, 并进行修正, 以获得更好的测量精度。

参考文献:

- [1] 任天鹏, 唐歌实, 刘景勇, 等. 基于 CEI 的高精度相位干涉测量试验[J]. 遥测遥控, 2015, 36(6): 8-12.
- [2] THORNTON C L, BORDER J S. Radiometric tracking techniques for deep-space navigation[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons Interscience, 2003.
- [3] 朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1893-1899.
- [4] 舒逢春, 郑为民, 蒋栋荣, 等. 利用国内 VLBI 网跟踪大椭圆轨道卫星[J]. 天文学报, 2007(2): 239-247.
- [5] PLANK L, HELLERSCHMIED A, MCCALLUM J, et al. VLBI observations of GNSS-satellites: from scheduling to analysis[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(7): 867-880.
- [6] MCCLATCHEY R A. Aerospace meteorology-past, present and future plans[C] // 24th Aerospace Sciences Meeting (AIAA), Reno, NV: [s.n.], 1986.
- [7] 舒逢春, 张秀忠, 郑为民. 地球同步卫星的 VLBI 观测[J]. 上海天文台年刊, 2003(24): 105.
- [8] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [9] 李晓杰. CEI 在精密定轨中的应用研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [10] 朱梦祎, 吴元伟, 姚当, 等. 基于天文开源软件的卫星干涉测量数据处理系统[J]. 天文学报, 2021, 62(4): 86-103.
- [11] 韦沛. GEO 卫星无源测定轨关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2020.

- [12] KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] 魏海涛, 蔚保国, 李刚, 等. 卫星导航设备时延精密标定方法与测试技术研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010(5): 623-627.
- [14] 王礼亮, 王淑芳. 影响卫星导航定位系统设备时延的主要因素[J]. 无线电工程, 2005(8): 6-8.
- [15] 万晓东. 影响卫星导航定位系统设备时延的主要因素探讨[J]. 通讯世界, 2019, 26(4): 43-44.
- [16] 黄承强, 杨旭海, 成璇, 等. 转发式测轨系统地面设备时延测量方法[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(1): 81-86.
- [17] 魏绍杰, 侯孝民, 马宏, 等. 深空测控 VLBI 数字基带转换器发展现状研究[J]. 遥测遥控, 2014, 35(4): 1-9.
- [18] 张建方. 关于误差的传递公式[J]. 数理统计与应用概率, 1995(3): 57-70.
- [19] PETTIT G, LUZUM B. IERS conventions (2010)[EB/OL]. [2022-12-11]. http://center.shao.ac.cn/shao_gnss_ac/publications/GNSS-course-slides/IERS%20Convention%202010.pdf.