

引用格式: 王维, 张志斌, KALIUZHNYI M, 等. 微型 VLBI 系统的温度效应改正与精度评估[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 142-152.

微型 VLBI 系统的温度效应改正与精度评估

王维¹, 张志斌^{1,2}, KALIUZHNYI MyKolay³, 于亮⁴, 唐正宏¹, 王广利¹

1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 尼古拉耶夫天文台, 尼古拉耶夫 54030;
4. 西安测绘总站, 西安 710054)

摘要: 微型甚长基线干涉测量 (VLBI) 系统 (MVLBI) 因其出色的性价比, 在地球静止卫星监测领域展示出其巨大的应用前景。通过在上海建造包括两台天线与 3 个终端的微型 VLBI 并置站和开展试观测, 发现了微型 VLBI 时延序列随温度变化而出现异常波动。提出一种线性分段拟合算法分析了时延的该特性, 并采用温控措施克服了温度变化所引起的异常效应且获得了稳定的时延序列。基于此, 通过在并置站开展如换线法等测试, 标校了系统误差并评估了单站精度。结果表明时延序列可能会在温度骤变时产生异常波动, 这是由 GNSS 授时模块的温敏效应引起的。此外, 如不考虑系统差, 微型 VLBI 单站的测量精度可达 2.6 ns。

关键词: 甚长基线干涉测量; 时延; 温度; 精度评估

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-02-0142-11

Thermal effect correction and accuracy evaluation on MVLBI

WANG Wei¹, ZHANG Zhi-bin^{1,2}, KALIUZHNYI MyKolay³, YU Liang⁴,
TANG Zheng-hong¹, WANG Guang-li¹

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Mykolayiv Astronomical Observatory, Research Institute, Mykolayiv 54030, Ukraine;
4. Xi'an Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the advantages of being cost effective, the micro VLBI system (MVLBI) shows a great application prospect in geostationary satellite monitoring. We built a co-location station with two antennas and three terminals in Shanghai, and found that the time delay series fluctuates abnormally with temperature changes. A linear piecewise fitting algorithm is developed to analyse this characteristic. Besides, temperature controls are taken to overcome the abnormal effect caused by temperature changing, then the stable delay series is obtained. Thus, by performing tests such as the cable changing method at the co-location station, systematic errors are calibrated and the accuracy of single station is evaluated. It shows the delay series may vary abnormally with the sharp temperature change, due to the thermosensitive in GNSS timing module. In addition, the tested accuracy of

the single MVLBI system can reach up to 2.6 ns regardless of systematic errors.

Key words: VLBI; time delay; temperature; accuracy evaluation

0 引言

随着地球静止卫星 (geostationary earth orbit satellite, GEOS) 数目的快速增长, 地球静止轨道资源已变得相当稀缺。当前可取的一种方法是开展 GEOS 的高精度监测, 从而使得地球静止轨道带上可以容纳更多目标, 这便对 GEOS 的高精度全天时全天候监测提出了需求。作为一项几何相关测时技术, 甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 广泛应用于天体物理、大地测量以及深空探测中^[1]。近年来, VLBI 发展趋势已趋于明朗^[2], 即专镜专用, 一方面, 大口径天线因其灵敏度较高常被分配以观测射电源或深空探测器等暗弱目标^[3], 另一方面, 13 m 口径的宽频速转小天线被用以开展站址坐标以及地球定向参数的监测^[4]。然而, 还有一种 VLBI 天线系统尚未被归类, 该类天线有着小于 2 m 的口径, 即微型 VLBI 系统, 亦称为被动相关测距系统 (passive correlation ranging, PaCoRa), 该系统最初由欧洲空间局于 2013 年提出并开展了仿真及原型机设计^[5]。作为一种非侵入式的相关测距方法, 可用于接收多类下行链路信号。由于其无源特性, 故无需向卫星输入跟踪信号, 从而将对航天器和地面运行的潜在影响降至最低。此外, 因地面站不需要大型天线, 也极大地降低了系统成本; 同期, 乌克兰尼古拉耶夫天文台基于相同原理, 独立开发出一套针对电视通讯 GEOS 的微型 VLBI 接收系统, 所测时延可用以对 Eutelsat-13B GEOS 开展公里级精度的定位^[6-7]; 中国科学院上海天文台也于 2019 年建成了微型 VLBI 观测网, 可对 Apstar6C GEOS 开展百米级精度的连续轨道监测^[8]。

相比于主动式射电观测^[9-11]、光学观测、传统 VLBI 及连线干涉测量系统^[12]等方法, 微型 VLBI 系统具有低成本、全天时、全天候以及被动式观测的特点, 测站设计简洁、布署便捷, 且可实现长基线、长时段、无人值守的 GEOS 连续监测。因其设计理念中遵循了最高性价比的建设原则, 微型 VLBI 系统中省略了一些传统 VLBI 所必须的一些部件或观测方法, 如相位校正或射电源校正等, 这便对该系统的误差校正方法提出了新需求, 因此, 在远端站布设前对微型 VLBI 并置站开展误差标校方法研究显得尤为必要。为进一步精化微型 VLBI 观测系统, 需对其随机性和系统性误差开展深入研究。本文对微型 VLBI 原理、本地测试过程以及系统差评定方法作阐述, 并提出一种用以分析温度序列及相应的时延序列的拟合方法, 来解释微型 VLBI 时延变化原因, 最后给出系统精度评估方法及结论。

1 观测原理及实验

1.1 VLBI 观测 GEO 卫星原理

如图 1 所示, 微型 VLBI 观测 GEOS 原理为: GEOS 转发信号的波前依次到达测站 1 和测站 2, 通过对两个测站记录信号开展相关处理, 可得到两站间的观测时延, 进而通过构建星站之间的测量模型, 开展误差方程求解, 即可实现利用站间时延对 GEOS 开展定位和定轨。

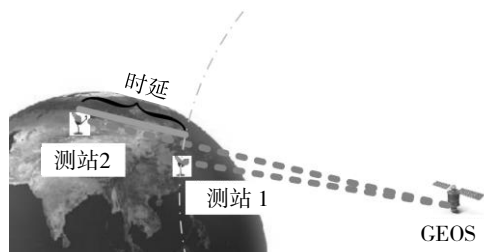


图 1 微型 VLBI 观测 GEOS 示意图

1.2 微型 VLBI 单站信号采集及相关处理

2018 年 5 月, 项目组在上海佘山搭建了两台并置站天线, 并研发了对应的 A 和 B 两套接收终端组成并置微型 VLBI 站。期间微型 VLBI 相关时延表现出异常变化, 这种变化常出现在本地时间的中午时段。为进一步识别和锁定问题, 引入测温仪来监测时延序列和 A、B 终端不同模块处所对应温度。2018 年 11 月, 项目组引入了第 3 套终端 C, 至此得到两天线对应 3 套接收终端的微型 VLBI 并置站, 基于此开展了短基线与零基线的相关测试。

微型 VLBI 单站信号传输路径如图 2 所示。GEOS 信号由 1.2 m 天线面板接收并反射到高频头, 之后通过 SYWV75-5 型同轴电视电缆传输到接收终端的解码模块 (DVB-S) 中, 并从中提取出同相 (in-phase, In) 和正交 (quadrature, Qu) 信号, 简称 I/Q 信号。I/Q 信号将注入虚拟示波器内存中, 并由天宝 GNSS 授时模块提供的秒信号来控制释放时刻。这样, I/Q 信号将被打上时标。同一 GEOS 信号将由两个不同位置的天线接收。通过对单站记录 I/Q 信号开展转换与记录, 相应的相关时延 τ_{res} 可由式 (1) 算出:

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) Y^*(f) e^{i2\pi f\tau} df \quad (1)$$

式 (1) 中: C_{xy} 是互相关谱的傅里叶逆变换, $X(f)$ 和 $Y(f)$ 分别为两个接收站记录信号的傅里叶变换形式, C_{xy} 的最高峰值处即为所求残余时延 τ_{res} 值。两站间总时延可用式 (2) 表示:

$$\tau = \tau_{\text{geo}} + \tau_{\text{res}} + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{atm}} + \tau_{\text{equ}} + \tau_{\text{noi}} \quad (2)$$

式 (2) 中: τ_{geo} 是几何时延, τ_{ion} 和 τ_{atm} 分别为两站差分电离层和大气时延, τ_{equ} 为两个接收系统间的相对设备时延, τ_{noi} 为两站总观测噪声。由于两座天线相距仅十几米, 两站上空电离层大气可近似相同, 即 τ_{ion} 和 τ_{atm} 均为 0。

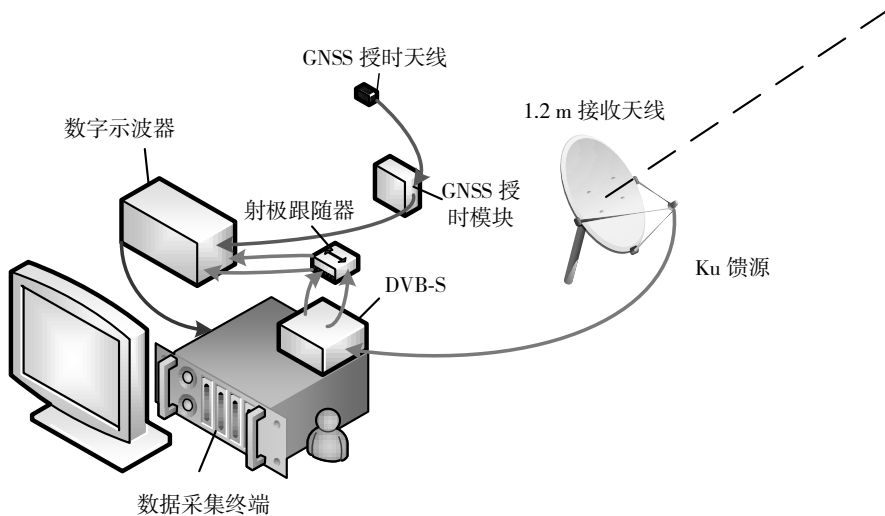


图 2 微型 VLBI 单站组成图

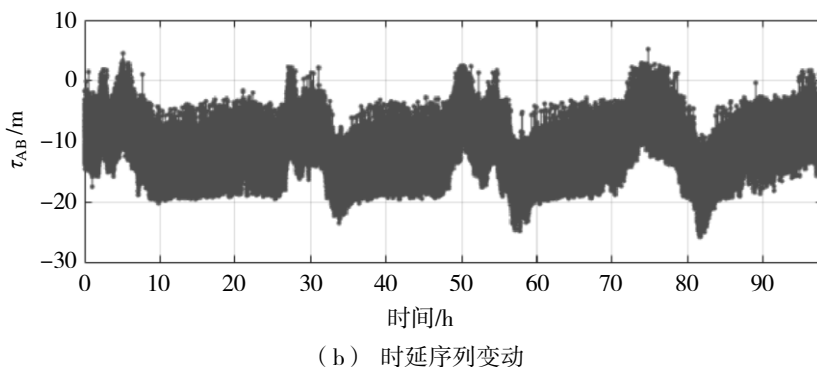
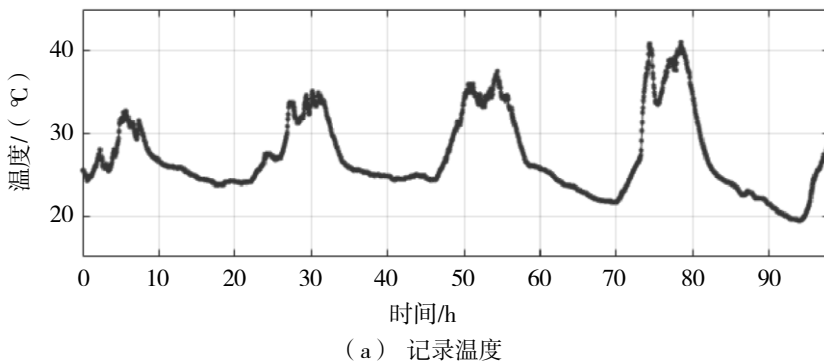
观测目标选取 GEOS Apstar6C (134 号; 垂直极化; 码率: 27 500 kbit/s; 频率: 12.395 GHz), 该卫星为电视信号转发卫星。

2 时延与温度的变化关系

2.1 时延序列与温度序列间的相关性

图 3 所示为时延序列与其对应时刻的环境温度。与转发式测距设备中时延与温度的基本呈线性变

化^[13]不同, 由于并置站的微型 VLBI 时延观测噪声为几十纳秒, 时延与温度间的线性关系并不显著, 其表现为, 当温度在短期内剧烈上升时, 时延序列出现波动。然而, 这种相关并非完全相关。时延序列与温度序列中变化的峰值位置是一一对应的, 但其他部分的变化却是不一致的。通过计算皮尔逊积差相关系数可知两者间相关度为 0.33, 这也表明两种序列是中度相关。但从图 3 来看, 较大温差不会引起更高的时延变化。



注: 零刻度位于约化儒略日 58 382 日 00:00:00

图 3 记录温度与时延序列变动

2.2 时延序列的拟合方法

为分析时延随温度的变化特点, 提出一种非连续线性分段拟合方法 (discontinuous piecewise linear fitting, DPWLF) 来处理该 1 维时间序列。该算法中的关键是在序列中选取合适的分段位置。考虑到计算效率, 提出一种两步法, 如下所示:

第一步的目的是找出整个时间序列 S 中的粗略的分段点位置。这里以 S 的第一个点开始以固定步长, 如 1 000 s, 每秒对应 1 个点, 向前搜寻获得包含 1 001 个点的时间序列 S_A , 采用线性函数拟合该序列, 并计算平均值 $\bar{\tau}_{S_A}$ 以及拟合残差中误差 σ_{S_A} , 继续向前搜索 1 000 个点得到时间序列 S_B 以及相应的 $\bar{\tau}_{S_B}$ 和 σ_{S_B} 。若 $\bar{\tau}_{S_A}$ 和 $\bar{\tau}_{S_B}$ 间的差值小于 $k \cdot \sigma_{S_A}$, 则序列 S_A 和 S_B 间不分段, 此处 k 是衡量序列是否显著跳动的敏感因子 (sensitivity factor, SF), S_B 将被 S_A 吸收来得到更长的序列。反之, 则在 S_A 和 S_B 间标记 1 个断点, 并由 S_B 作为新序列的起点, 如此循环至序列的最后一点。

第二步的目的是在第一步所找出分段点的基础上找出各段间最佳的分段位置。由第一步分段方法可知, 每段固定步长的分段序列之间必有一点可使得该点两侧序列的拟后残差值为最小。对所有固定步长序列中的点, 都将计算其两侧序列的线性拟后残差, 并求出最小残差对应的点位, 最终, 这些点位即是 DPWLF 中的近似分段位置。

不同于连续线性分段拟合法, DPWLF 可有效减小时间序列的拟后残差, 特别是对于某些分散的和

快速变化的时间序列。图 4 中给出一例，图 4 (a) 中是某次调试所得时延序列，图 4 (b) 和 (c) 分别给出了两步法中的拟合线段。其中 SF 设为 2.0，搜索步长为 500 点。通过 DPWLF 的两步拟合，时延序列（单位为 m）的拟后残差由 4.7 m 降到 3.6 m。两步法中第二步的必要性可由图 4 (d) 说明，其最小残差点位于第 3 段分段序列中 379 点处，即该点应被选为序列 2 和 3 之间的分段点。

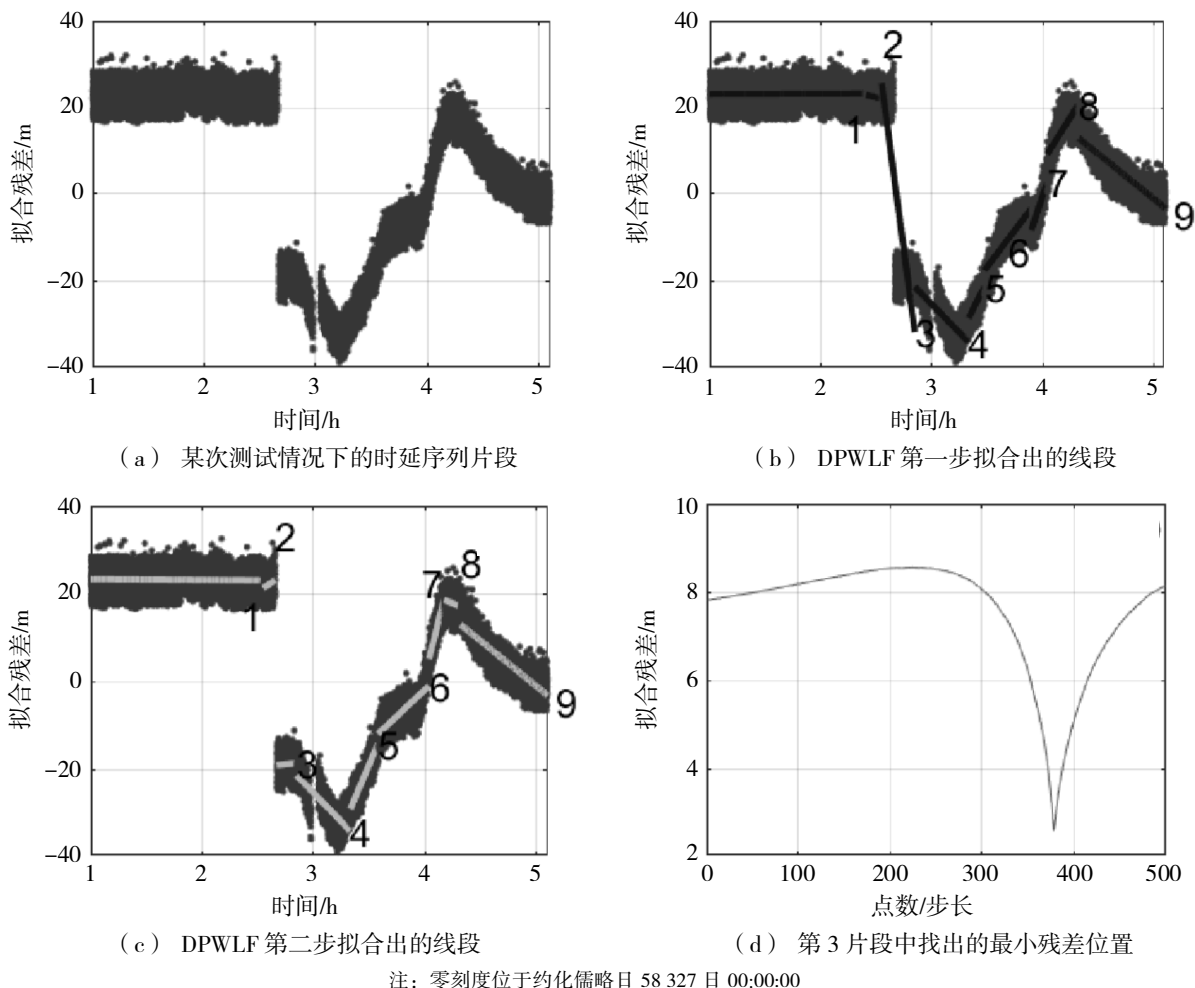


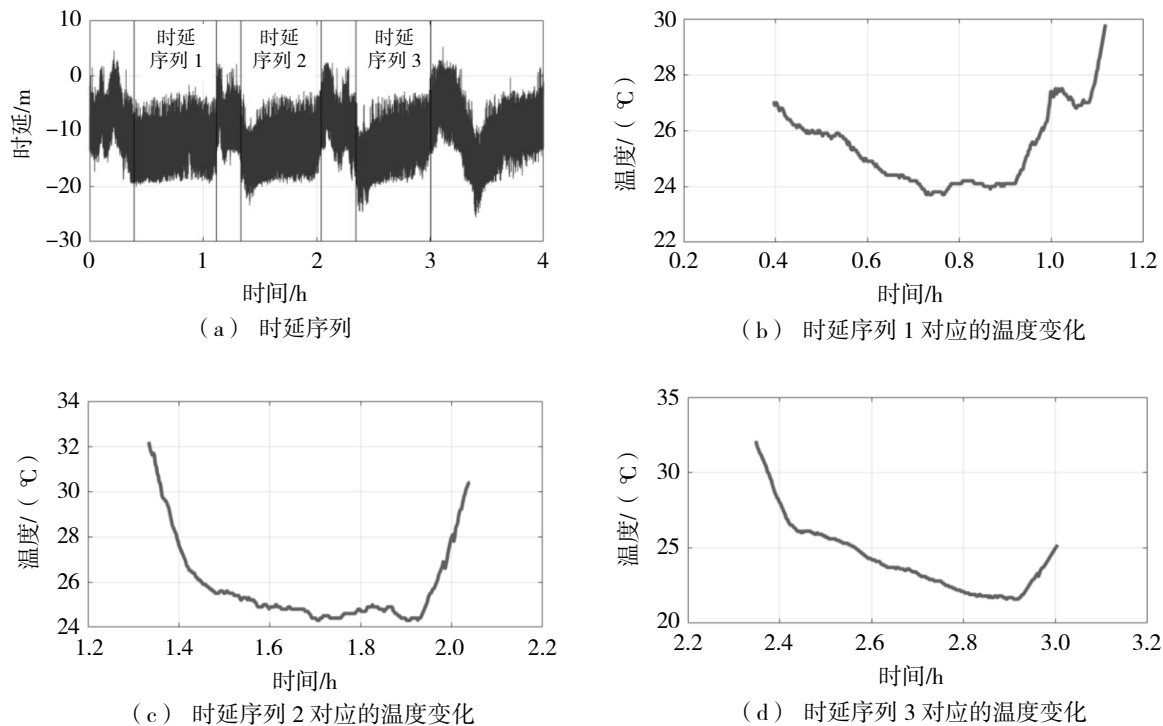
图 4 某次测试情况下的时延序列片段、DPWLF 拟合线段及最小残差位置

3 时延序列变化特性及解释

3.1 时延序列的温度特性

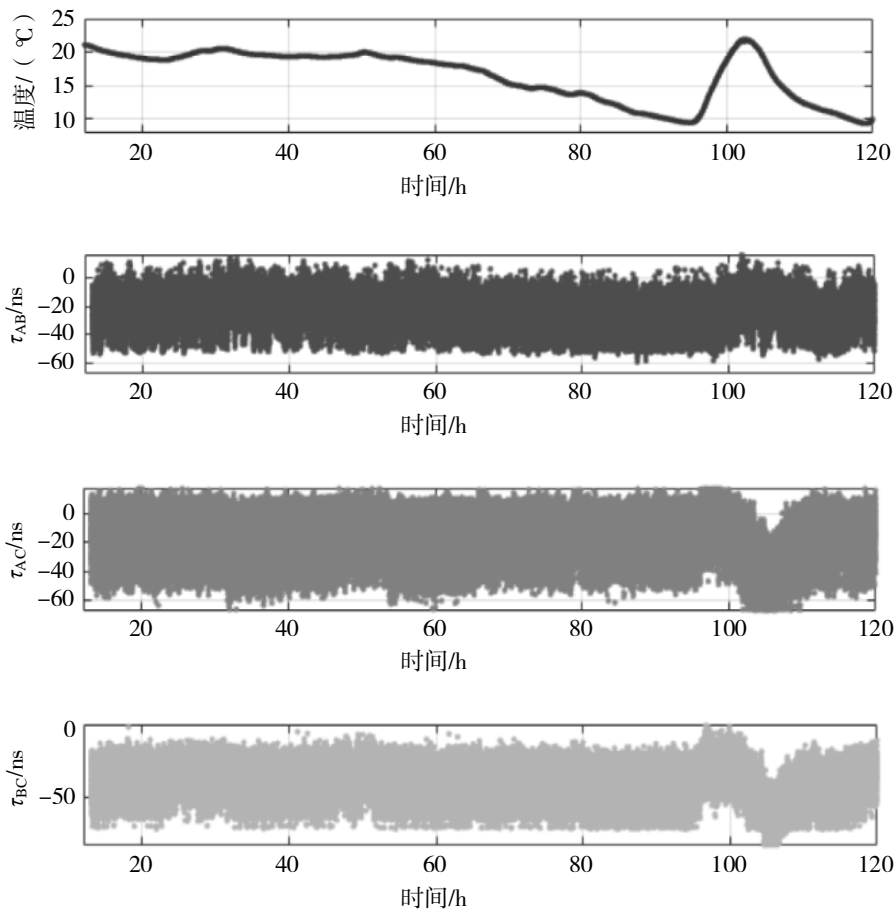
这里用小样本来统计分析微型 VLBI 时延的温度变化特性。结合 DPWLF 方法，对时延相关所得的微型 VLBI 时延序列做了拟合，其中，将稳定时延序列定义为其时延率变化不超过特定值，如 $(7 \sim 8) \text{ m/min}$ （时延单位已换算为 m），考虑到基线与 GEOS 目标方向近乎垂直的关系，将该值设为 30 m/d 。

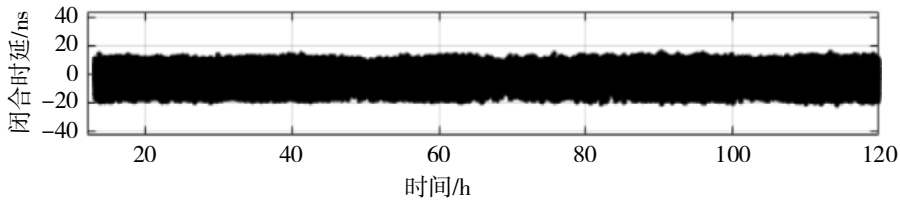
如图 5 (a) 所示，利用 DPWLF (SF = 1.5) 方法，这里拟合出 3 段相对稳定的时延序列。图 5 (b)、(c) 和 (d) 分别给出了这 3 段时延对应的温度变化。这些温度序列均表现出典型的“U”形变化。当温度在较短时段内（约 2 h）且在超过 5°C 的范围内下降和上升后，此后的时延序列将出现隆起。因此可以推断时延序列的不稳定变化是由于短期内温度缓慢下降和急剧升高而引起的。此外，值得注意的是，时延序列的这种变化是不能用同一的温度模型来改正的，因为不同的接收终端有着不同的温敏特性。如图 6 所示，与终端 C 有关的基线在第 95 ~ 110 h 出现了跳动，A、B 基线却保持平稳。



注：零刻度时刻为约化儒略日 58382 日

图 5 时延序列 1、2、3 及其各自对应的温度值





注：零时刻为 2018 年 11 月 5 日 00:00:00

图 6 各基线时延随温度变化特性及闭合时延

3.2 时延序列变动原因

GEOS 通常一周开展一次机动，一般不会连续 3 日在每日同一时段内机动，因此首先排除 GEOS 目标机动的的原因，如仅从微型 VLBI 接收系统组件角度来看，其中 3 个组件可能会受温度变化影响，即差分（或相对）电缆时延变化、GNSS 授时精度随温度变化或者是示波器的模数转换（ADC）模块。

同轴电缆环境温度变化会引起同轴电缆内金属绑线的伸缩，从而一定程度上引起同轴电缆电容的改变，进而改变电缆时延。文献[14-15]分析了同型号号的电视电缆时延相对于温度的变化，结果表明，当温差达到 30℃时，几米长的电缆所产生附加时延的量级在几个皮秒。本试验中，两台微型 VLBI 并置站间电缆长度差为 14.0 m。我们引入了测温设备，实时记录了两条电缆温度，结果表明，针对两条电缆所记录的日最大温差约 15℃，由温度变化所引起的相对电缆时延将不超过几十皮秒（对应厘米级），这显然不是时延序列变化的主要因素。

为了进一步从 GNSS 授时模块和计算机 ADC 中锁定引起时延序列波动的部件，这里对所有天宝 GNSS 授时模块做了隔热处理，如图 7 所示，并由此得到了平稳的时延序列。据此确定了 GNSS 授时模块的热敏特性是引起时延序列变化的原因。

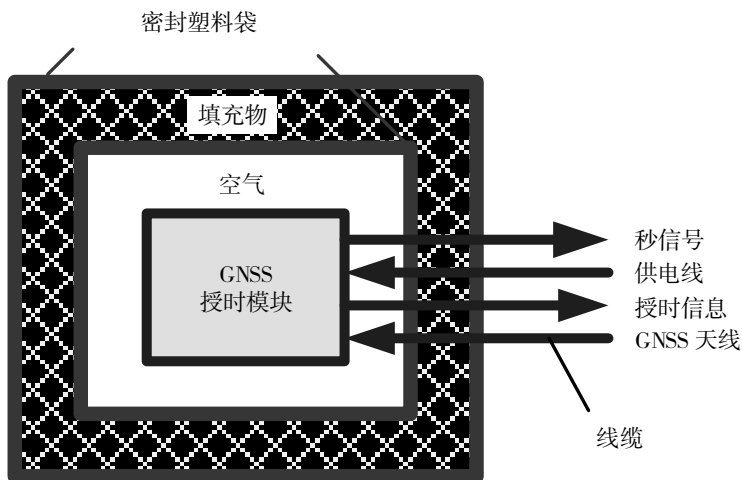


图 7 GNSS 授时模块隔热示意图

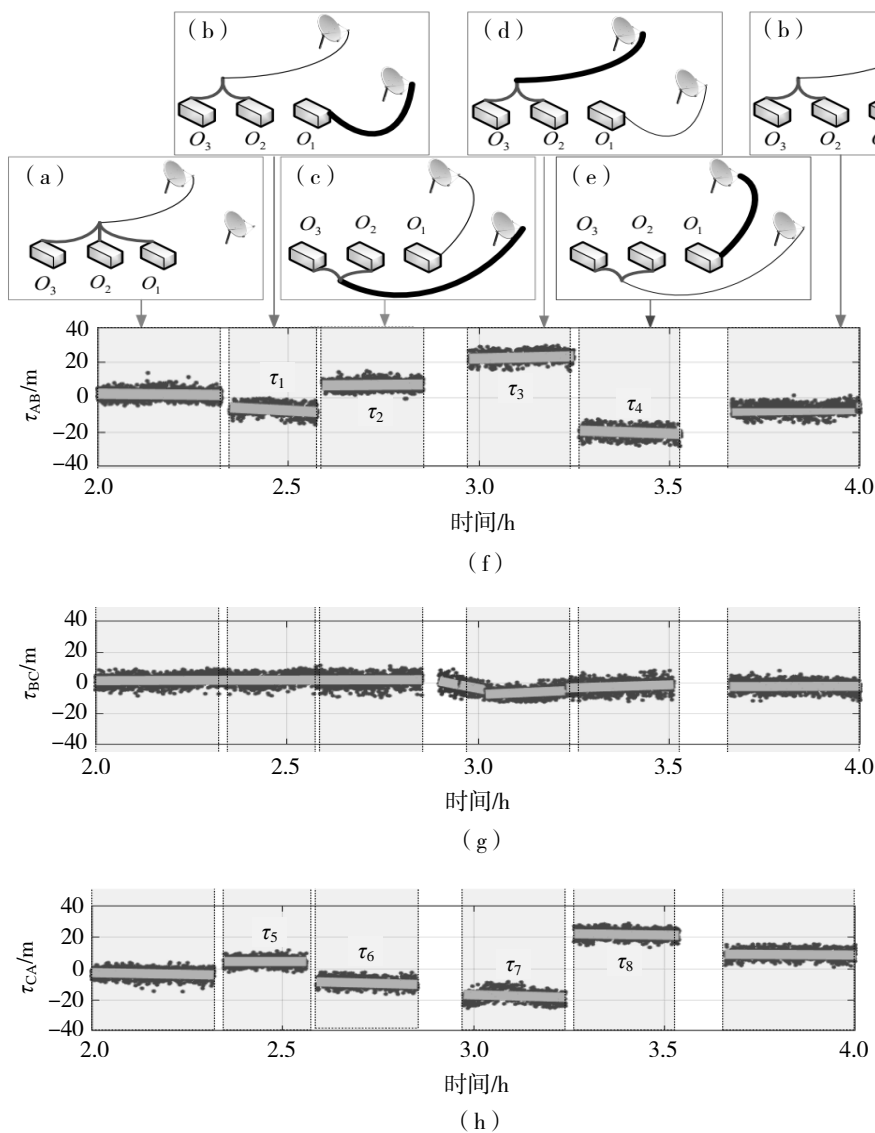
4 系统误差校正与系统精度评估

在对各接收终端的 GNSS 授时模块采取温控措施后，可利用平稳时延来校正设备间的系统误差。不同于传统 VLBI 方法利用射电源校正或相位校正方法来观测 GEOS 目标，单一功能的微型 VLBI 站因暂不能改变天线指向，只能观测一定“视场”内的 GEOS 目标，这样，在将微型 VLBI 测站部署到远端站点之前，必须严格标定测站间的相对系统差，这包括部件间相对误差标定以及系统开关机测试。这里通

过换线法来标记测站间的系统差，具体如下一节所述。

4.1 设备时延校正

如图 8 所示,相对于两座天线和 3 个接收终端,通过引入分流器和交换不同电缆的两端,可产生(a)~(e)等多种不同的设备连接方式。图 8 (a) 中所示为终端 (或示波器) O_1, O_2, O_3 间的零基线测试, 3 条基线所得相关时延均在 0 附近; 由于终端 B 和 C 之间引入了分流器, 且从分流器处连接 O_2 和 O_3 两终端所用的线缆长度相同 (均为 1 m), 所得 O_2 和 O_3 终端间的时延序列均在 0 附近变化; 图 8 (b) ~ (d) 中, 针对两个天线引入两条不同长度的同轴电视电缆, 如图 8 粗细实线所示, 通过逐步更换同轴电缆与天线以及终端之间的连接方式, 终端 O_1, O_2 和 O_1, O_3 间会相应地得到 8 个不同的时延值 τ_i, i 为 1 到 8, 分别见图 8 (f) 和 (h) 中所标记的时延。图 8 (f) (g) (h) 中, 散点为各基线 (或终端间) 通过开展相关处理所得的时延, 短线为通过非连续线性分段拟合方法所拟合的时延值, 即 τ_i 。



注：零时刻为约化儒略日 58 539 日 00:00:00

图 8 利用换线法所测时延来标定系统误差

如此可进一步构建设计矩阵 A 与观测矢量 b , 分别如式 (3) 和式 (4) 所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{b} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4 \quad -\tau_5 \quad -\tau_6 \quad -\tau_7 \quad -\tau_8]^T. \quad (4)$$

包含 4 个参数的待估矢量 \mathbf{x} 可由 8 个独立的方程中估出, 具体表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [d_{L12} \quad d_{C12} \quad d_{k1} \quad d_{k2}]^T \\ d_{L12} = L_2 - L_1 \\ d_{C12} = C_2 - C_1 \\ d_{k1} = C_3 + O_2 - O_1 \\ d_{k2} = C_4 + O_3 - O_1 \end{cases}. \quad (5)$$

式 (5) 中: \mathbf{x} 中包括两个星站距离 L_1 和 L_2 间的差, 即几何时延 d_{L12} (或 τ_{geo}); 两条电视电缆 C_1 和 C_2 间的线缆相对延迟 d_{C12} (或 τ_{cab}); d_{k1} 表示线缆 C_3 与终端 O_2 相对终端 O_1 间的时延; d_{k2} 表示线缆 C_4 与终端 O_3 相对终端 O_1 间的时延; d_{k1} 和 d_{k2} 统称为设备延迟。线缆和设备名称具体如图 9 所示。

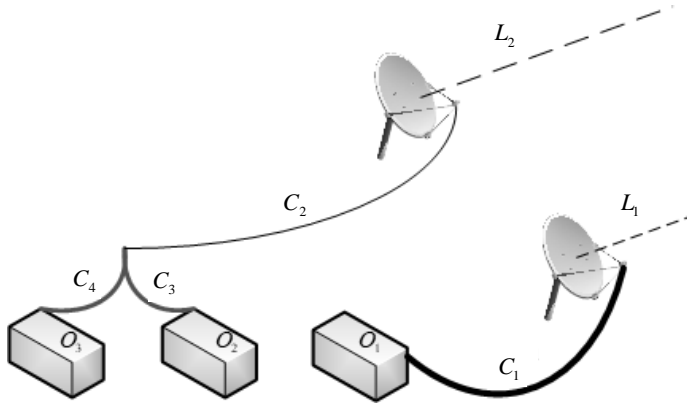


图 9 微型 VLBI 站间几何时延、线缆相对时延和不同部分的设备时延

\mathbf{x} 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 由下式解得:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{b}), \quad (6)$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag} \left\{ \left[\sigma_{\tau_1}^2 \quad \sigma_{\tau_2}^2 \quad \sigma_{\tau_3}^2 \quad \sigma_{\tau_4}^2 \quad \sigma_{\tau_5}^2 \quad \sigma_{\tau_6}^2 \quad \sigma_{\tau_7}^2 \quad \sigma_{\tau_8}^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

式 (6) 和 (7) 中, \mathbf{Q} 为对角形方差阵, σ_{τ_i} 为相应时延序列的拟后残差, $\hat{\mathbf{x}}$ 的方差-协方差矩阵 $\mathbf{D}_{\hat{\mathbf{x}}}$ 可由下式估计:

$$\mathbf{D}_{\hat{\mathbf{x}}} = \frac{\sqrt{\mathbf{V}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{V}}}{2} (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A})^{-1}, \quad (8)$$

式 (8) 中, \mathbf{V} 为拟后残差矢量。

表 1 中列出了利用式 (3) ~ (8) 所估计各项参数, 为了进一步验证参数的可靠性, 计算了并置站两天线相对 GEOS Apstar6C (134 号) 的几何时延, 因条件所限, GNSS 授时模块所用车载天线与 1.2m 面

板间还存在一定距离，因此天线的站点坐标由支持定位功能的智能手机来测定，所测位置精度在 1~2 m 水平，所得几何时延的验证值为 5.1 m，与估计值符合较好，此外，利用卷尺量取了两站同轴电缆的长度差，用以与 d_{C12} 比较，两者间符合较好。

表 1 利用图 8 (f) (g) (h) 所测时延解算的并置站间几何时延、线缆相对时延和设备间相对时延

参数	值 $\pm 1\sigma/m$	验证值/m
d_{L12}	6.8 ± 1.2	5.1
d_{C12}	-13.8 ± 1.2	-13.6
d_{k1}	0.7 ± 1.7	-
d_{k2}	0.3 ± 1.7	-

4.2 系统精度评估

笔者利用 2018 年 11 月 5 日 0 点以后 90 h 内的 3 站连续观测数据 (如图 6 所示)，来评估本系统除系统差影响外的真实系统精度，其中以各序列均值作为其平均偏差，以各序列的 RMS 作为平均偏差的 1σ 形式误差；3 台接收终端共组成 3 条基线，3 条基线的闭合时延 Δ 可由下式计算：

$$\Delta = \tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CA} \quad (9)$$

传播路径上如大气与接收系统中的系统性效应可通过闭合关系消除，闭合时延的理论值应为 0。结果如表 2 所示。由于 3 个站均采用相同型号的硬件，单个系统的接收精度等效于闭合时延的 1σ 形式精度除以 $\sqrt{3}$ ，等效于 2.6 ns。

表 2 3 条基线时延与其闭合时延平均偏差与 RMS 统计

参数	平均偏差 $\pm 1\sigma/ns$
τ_{AB}	-22.8 ± 25.0
τ_{BC}	-17.3 ± 21.1
τ_{CA}	39.8 ± 41.0
Δ	-0.3 ± 4.5

5 结语

系统差的识别与改正是微型 VLBI 系统在部署到远端站点前最为关键的步骤。试验结果表明，GNSS 授时模块的温敏特性会引起时延序列的异常波动。通过提出连续分段线性拟合法，了解到系统环境温度的缓慢下降与迅速上升会引起该异常波动，且这种异常随不同设备而异，因此无法构建统一模型来改正该异常，只能通过温控的方法来获得平稳时延。基于此设计了换线法和闭合时延分别评估了系统精度和单站接收精度，并验证了评估结果，这些结果均与估计值有着较好符合。本研究为后续微型 VLBI 长基线布站奠定了基础。

致谢：感谢中国科学院上海天文台李岩、毛银盾等老师对系统组装与观测试验所提供的大力支持。

参考文献：

- [1] SCHUH H, BEHREND D. VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry[J]. *Journal of Geodynamics*, 2012(61): 68-80.
- [2] 方成. 关于我国未来天文大设备的一点战略思考[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2012, 42(12): 1265-1273.
- [3] 张波. FAST 的 VLBI 观测与科学[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2017, 47(6): 7-16.
- [4] NIELL A, WHITNEY A, PETRACHENKO B, et al. VLBI2010: current and future requirements for geodetic VLBI systems[J]. *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, 2005: 13-40.
- [5] RODRIGUEZ L, KRIER G, THILL M, et al. Passive ranging for geostationary satellites: on a novel system and operational benefits[C]//13th International Conference on Space Operations, AIAA: Pasadena, 2014: 1857-1863.
- [6] BUSHUEV F, KALYUZHNY M A, SLIVINSKY A P, et al. Ranging geostationary telecommunication satellites with satellite TV signals[J]. *Telecommunications & Radio Engineering*, 2016, 53(5): 5-16.
- [7] BUSHUEV F, KALIUZHNYI M, SYBIRYAKOVA Y, et al. Results of the ongoing monitoring of the position of a geostationary telecommunication satellite by the method of spatially separated basis receiving of digital satellite television signals[J]. *Latvian Journal of Physics & Technical Sciences*, 2016, 53(5): 5-16.
- [8] 张志斌, 王维, 杨鹏, 等. 一种用以同步微型监测的微型 VLBI 网[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-08-25]. <http://gb.oversea.cnki.net/KCMS/detail/11.1859.V.20200422.1839.008.html>.
- [9] PELTZER K E. Apollo unified S-band system[EB/OL]. (1996-07-29)[2020-08-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19660018739>.
- [10] HARLES G, SIEBERT P, EBERLEIN E, et al. A novel ranging method using DVB-S transport stream packets[C]// *Proceeding of the Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications*, Sesimbra: [s.n.], 2001.
- [11] 雷辉, 李志刚, 杨旭海, 等. 基于转发式的北斗卫星导航系统地球静止轨道卫星精密定轨试验[J]. *测绘学报*, 2011, 40(S1): 31-33.
- [12] 杜兰, 李晓杰, 王若璞. 基于同波束 CEI 的 GEO 共位卫星相对轨道监视[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(3): 54-58.
- [13] 武文俊, 李志刚, 李孝辉, 等. 转发式测距设备时延中的温度效应[J]. *时间频率学报*, 2013, 36(2): 113-119.
- [14] CZUBA K, SIKORA D. Temperature stability of coaxial cables[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2011, 119(4): 553-557.
- [15] PARASHARE C R, RICHARD F B. 75 Ω Transmission System[EB/OL]. (2011-09-26)[2020-08-05]. <http://eor.berkeley.edu/wpcontent/uploads/2011/09/p011.cparashare.pdf>.