

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-03-0175-10

GPS 多接收机加权组合共视时间比对

张健^{1,2}, 董绍武^{1,3,4}, 武文俊^{1,3,4}, 王威雄^{1,2}, 郭栋^{1,3}, 袁海波^{1,3,4}

(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;

3. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;

4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408)

摘要: 基于全球卫星导航系统的共视时间比对技术一直是全球守时实验室参与协调世界时 (UTC) 计算的重要手段之一。为进一步改善共视时间比对的各项性能指标, 利用中国科学院国家授时中心 (NTSC) 和日本情报通信研究院 (NICT) 两个守时实验室各自的多台接收机, 基于多接收机组合技术原理, 依据接收机性能, 采用等权和非等权两种不同的加权方式对 GPS 共视接收机进行组合, 构建 NTSC 和 NICT 各自的多接收机系统, 进行多接收机系统共视时间比对, 并对两种组合方式的比对结果进行分析。结果表明, 两种组合方式均能改善共视时间比对性能, 但采用非等权组合方式比对结果的标准偏差 (STDEV) 值为 0.954 ns, 优于等权组合的 0.987 ns, 非等权组合方式的天稳为 4.6×10^{-15} , 也优于等权组合的 5.4×10^{-15} 。

关键词: 时间比对; 协调世界时; 多接收机组合; 多接收机系统

GPS multi-receiver weighted combined common-view time comparison

ZHANG Jian^{1,2}, DONG Shao-wu^{1,3,4}, WU Wen-jun^{1,3,4}, WANG Wei-xiong^{1,2},

GUO Dong^{1,3}, YUAN Hai-bo^{1,3,4}

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

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

3. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Common view time comparison technology based on global navigation satellite systems has been one of the important means for global timekeeping laboratories to participate in UTC calculations. To further improve the performance indexes of the common-view time comparison, we utilize multiple receivers of the two timekeeping laboratories, the National Time Service Center of Chinese Academy of sciences (NTSC) and National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT), to build up the multi-receiver system for them each, based on the technical principle of multi-receiver combination and the

收稿日期: 2020-01-18; 接受日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFF0200203)

作者简介: 张健, 男, 博士研究生, 主要从事高精度时间与频率传递研究。

receiver performance while combining the GPS receivers with two different weighting methods (i.e. the equal and non-equal weight methods). We execute multi-receiver system common-view time comparison, and analyse the comparison results of the two combinations. The results show that two combinations both can improve common-view time comparison performance, but the standard deviation (STDEV) value of the comparison result using non-equal weight combination is 0.954 ns, which is superior to the equal weight combination of 0.987 ns, and the non-equal weight combination method has a stability of 4.6×10^{-15} and is thus better than the equal weight combination of 5.4×10^{-15} .

Key words: time comparison; coordinated universal time; multiple receiver combination; multiple receiver system

0 引言

远距离高精度时间比对是计算协调世界时 (coordinated universal time, UTC) 的重要环节之一^[1], 各实验室参与 UTC 计算的时间比对链路都与国际权度局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 指定的时间比对中心节点实验室德国物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 直接建立^[2]。D. Allan 在 1980 年提出将 GPS 共视法用于高精度时间传递的理论后^[3], 1983 年很快便被国际时间局 (Bureau International de l'Heure, BIH) 用于 UTC 的计算, GPS 共视法也一直作为国际时间比对的重要技术手段之一。随着国民经济和空间技术的迅速发展, 各行业对时间比对精度提出了更高的要求。BIPM 的江志恒等人^[4]研究表明单接收机链路存在长期的不稳定性。为了减小这部分误差, 进一步提高 GPS 共视时间比对精度, 时间与频率技术领域的国内外诸多学者对各种组合形式的时间比对展开了一系列研究。P. Defraigne 和江志恒等人^[5-8]对多 GNSS 系统 (GPS 和 GLONASS) 组合和多手段 (GPS 和 TWSTFT) 组合进行了试验及性能分析。我国台湾地区中华电信股份有限公司 (TL) 的林信严等人对多接收机组合进行研究, 并提出多接收机组合理论, 建立 TL 与日本情报通信研究院 (NICT) 多接收机系统短基线时间比对链路。本文基于中国科学院国家授时中心 (NTSC) 和日本情报通信研究院 (NICT) 两个守时实验室各自保持的国家时间基准 UTC (NTSC) 和 UTC (NICT)^[9], 利用等权和非等权方式进行了 GNSS 多接收机组合, 分别构建 NTSC 和 NICT 的多接收机系统, 进行多接收机系统共视时间比对研究试验, 并对两种组合方式的结果进行分析与比较。

1 GPS 共视原理

GPS 共视的基本原理是相距较远的两地守时实验室同时观测一颗或多颗 GPS 卫星, 通过 GPS 接收机可以获得地面和卫星之间的伪距观测值, 利用相关数学模型对伪距观测值中的对流层时延、电离层时延和 Sagnac 效应等误差进行修正后^[10], 得到本地系统时间和 GPS 系统时间 (GPST) 之间的时间偏差, 将两地实验室数据进行交换作差会抵消掉 GPS 系统时间, 便可获得两地之间的钟差。

假设 A 地的时间为 T_A , B 地时间为 T_B , GPS 系统时间为 T_{GPS} , 即:

$$\Delta T_A = T_A - T_{\text{GPS}}, \quad (1)$$

$$\Delta T_B = T_B - T_{\text{GPS}}。 \quad (2)$$

式 (1) 减式 (2) 可得两地之间的钟差:

$$\Delta T_A - \Delta T_B = T_A - T_{GPS} - T_B + T_{GPS} = T_A - T_B = \Delta T_{AB} \quad (3)$$

2 GPS 多接收机组合

GPS 共视作为国际时间比对的主要技术手段之一，具有很好的可靠性和稳定性，为了进一步提高 GPS 共视时间比对精度，以时间比对链路中的接收机为出发点^[1]，基于多接收机组合技术原理，利用 NTSC 的两台 GPS 接收机（在 BIPM 的编号为 NTP1 和 NTP3）组成一个多接收机系统，命名为 NTE1，利用 NICT 的 3 台 GPS 接收机（在 BIPM 的编号为 NC01、NC4s 和 NC5g）组成另一个系统，命名为 NCE1，建立多接收机系统共视时间比对，GPS 接收机输入的时钟信号源分别来自 UTC（NTSC）和 UTC（NICT），原理框图如图 1 所示。多接收机系统数据处理的具体流程如图 2 所示。多接收机系统的 REFGPS 值是组合中所有经过校准接收机的 REFGPS 值进行加权平均后得出的结果，同理它的总时延也会进行加权平均，因为多接收机系统的原始观测值数量是单个接收机系统的两三倍，且原始观测值从不同的接收机上获取。因此，多接收机组合可以有效地减小数据处理环节带来的误差，所以认为多接收机系统时间比对结果的可靠性和稳定性优于单接收机系统是合理的。

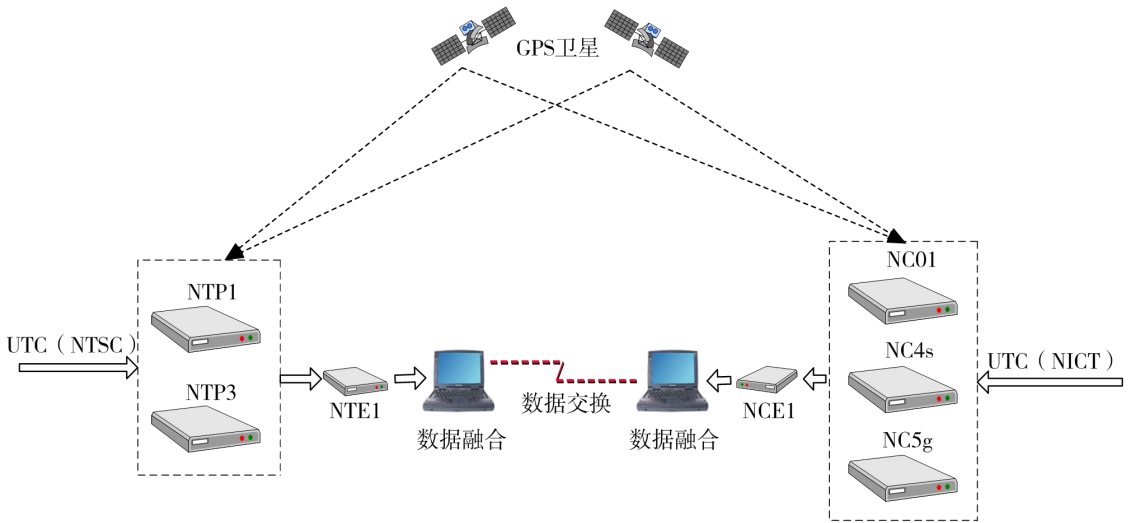


图 1 多接收机系统时间比对

在进行多接收机组合时，采用了两种组合方式，一种是等权组合，另一种是非等权组合，等权组合即在多接收机组合时分配每台 GPS 接收机相同的权重。考虑到每台 GPS 接收机的性能不同，准确性、稳定性和可靠性存在或多或少的差异，因此，还采用了非等权组合方式。计算每台 GPS 接收机星地间比对结果 REFGPS 值的均方根（RMS），以 RMS 值为依据分析接收机稳定性并分配不同的权重，利用这两种组合方式对 GPS 接收机进行组合，建立多接收机系统时间比对链路进行试验，对结果进行分析与比较。式（4）为权重占比的计算公式，表 1 为非等权组合每台接收机的权重。

$$W_i = \frac{1/R_{REC,i}}{\sum_{i=1}^n 1/R_{REC,i}} \quad (4)$$

式（4）中， $R_{REC,i}$ 为 RMS， i 为接收机编号。

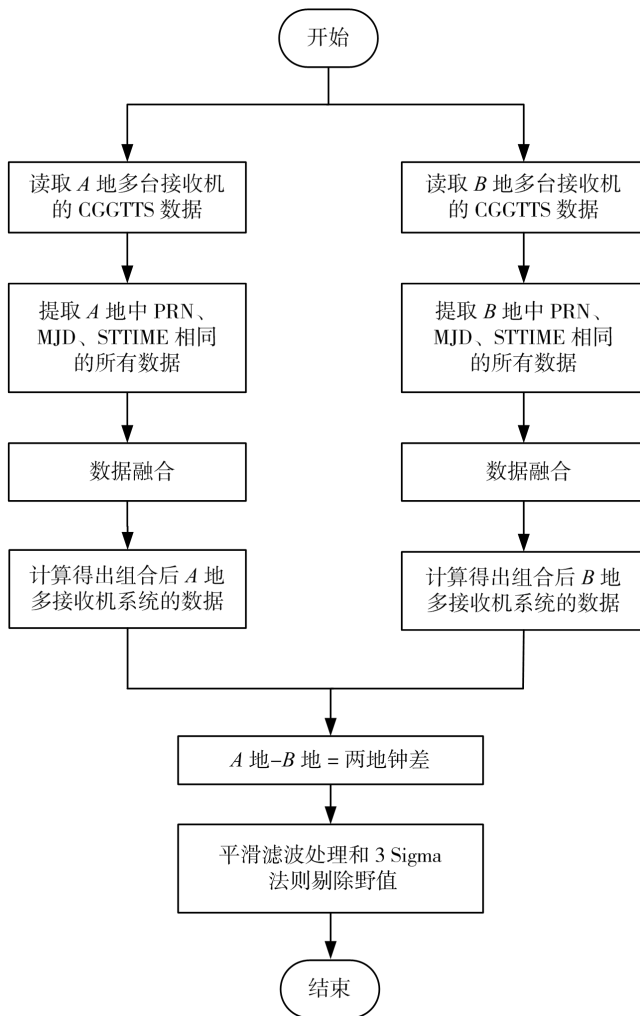


图 2 数据处理流程

表 1 非等权组合每台接收机的权重

接收机编号	星地比对	均方根	权重占比
NTP1	NTP1-GPST	1.450	48.1%
NTP3	NTP3-GPST	1.346	51.9%
NC01	NC01-GPST	5.257	27.9%
NC4s	NC4s-GPST	4.031	31.3%
NC5g	NC5g-GPST	3.602	40.8%

3 误差修正

为了得到更精确的共视时间比对结果,对影响时间比对链路精度的主要误差源进行分析, GPS 共视时间比对过程中,信号从 GPS 卫星传播到地面受到多个因素的影响^[12],主要包括电离层时延、对流层时

延、Sagnac 效应和地面站接收机硬件时延^[13]等，可以利用相关数学模型对各误差建模修正，并对结果进行降噪处理和异常值剔除。

1) 电离层修正

为消除或减少电离层在卫星信号传播过程中的影响，可采用双频消电离层组合伪距公式对电离层时延进行修正^[14]。表达式如下：

$$P = \frac{f_{L2}^2 P_2 - f_{L1}^2 P_1}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}, \quad (5)$$

式(5)中， P 为修正后的双频伪距观测值， P_1 、 P_2 分别是在 $L1$ 和 $L2$ 频段上的伪距观测值， f_{L1} 、 f_{L2} 分别为 $L1$ 和 $L2$ 的频率 1 575.42 MHz 和 1 227.6 MHz。

2) 对流层修正

对流层时延与观测卫星的位置有关，也会随着对流层折射率的变化而改变，折射率取决于当地的温度、压力和相对湿度，可以采用 Hopfield 模型对对流层延迟进行修正。

3) Sagnac 效应

在信号的传播过程中，由于地球自转和卫星高速运动的影响，信号在传播中会受到 Sagnac 效应影响，可以通过卫星坐标改正公式消除 Sagnac 效应带来的影响^[15]。

4) 硬件时延

地面接收机硬件时延是共视时间比对中的一个重要影响因素，一般由移动校准接收机闭环校准确定时延进行修正^[16]。

4 试验结果及分析

本试验选取 2019-07-15/07-24 (MJD: 58 680~58 689) 连续 10 d 的 GPS 伪距观测数据，开展多接收机系统共视时间比对，进一步分析与比较利用不同加权方式进行组合对比对结果的影响。表 2 为两个守时实验室接收机的类型和编号。

表 2 接收机的编号及类型

实验室	实验室编号	接收机类型
NTSC	NTP1	POLARX4TR
	NTP3	POLARX4TR
	NC01	POLARX2TR
NICT	NC4s	POLARX4TR
	NC5g	GTR50

4.1 零基线共钟比对

为测试 GPS 接收机各项性能指标，对 NTSC 连接不同天线的两台接收机 (NTP1 和 NTP3) 进行零基线共钟 (common clock difference, CCD) 比对研究，试验原理图如图 3 所示，比对结果如图 4 所示。

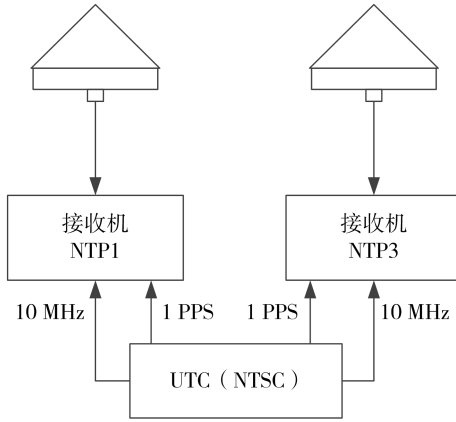


图 3 零基线共钟比对试验原理图

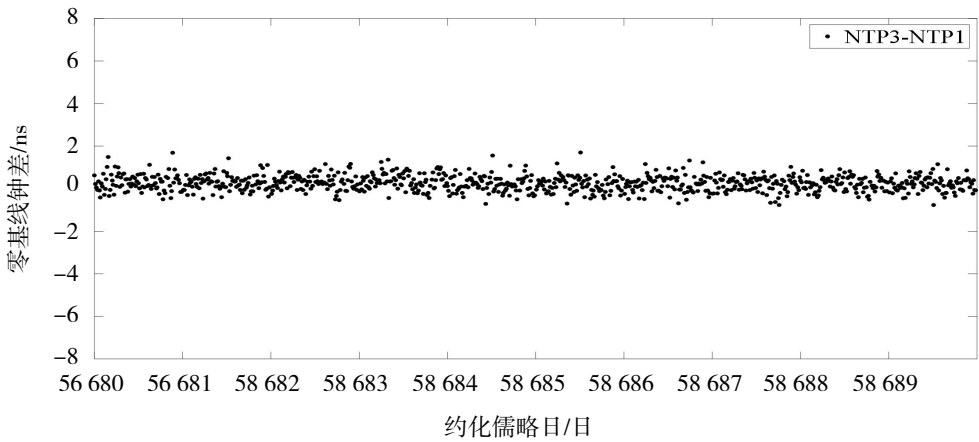


图 4 零基线共钟比对结果

由图 4 结果计算得出，零基线共钟比对结果的标准偏差（standard deviation, STDEV）为 0.37 ns。

4.2 共视结果及分析

共视时间比对时，可视卫星数会影响时间比对的精度，两个守时实验室 10 d 所能同时观测到的 GPS 卫星数如图 5 所示。图 6 和图 7 是利用等权和非等权两种加权方式对 GPS 接收机组合后多接收机链路 与单接收机链路比对结果的比较。

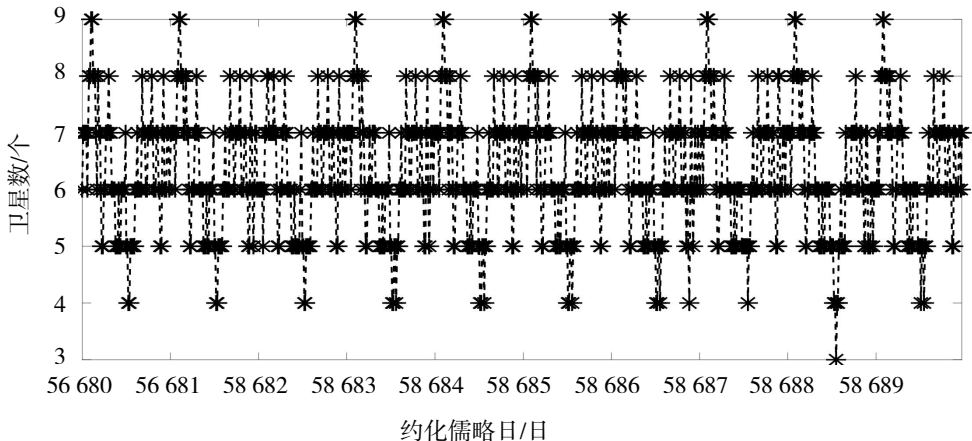


图 5 NTSC 和 NICT 能够同时观测到的卫星个数

由图 5 可以看出，NTSC 和 NICT 在同一时刻同时观测到的 GPS 卫星个数为 3~9 颗。

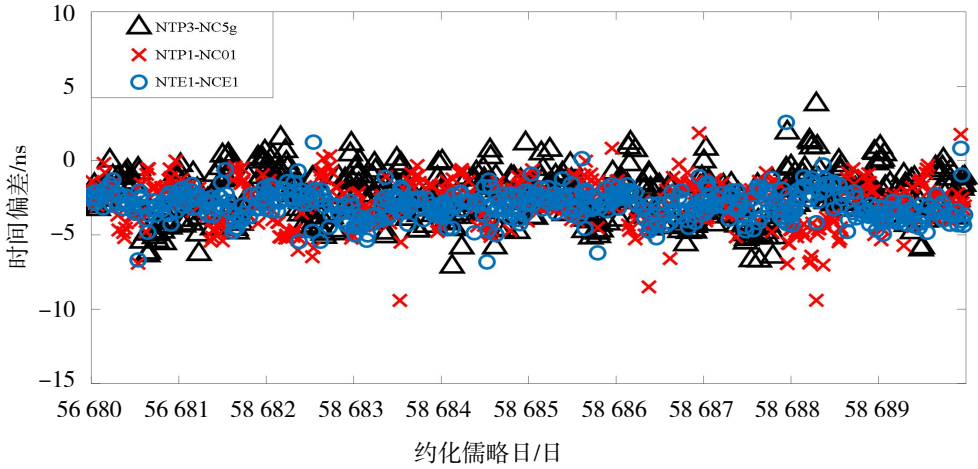


图 6 等权组合

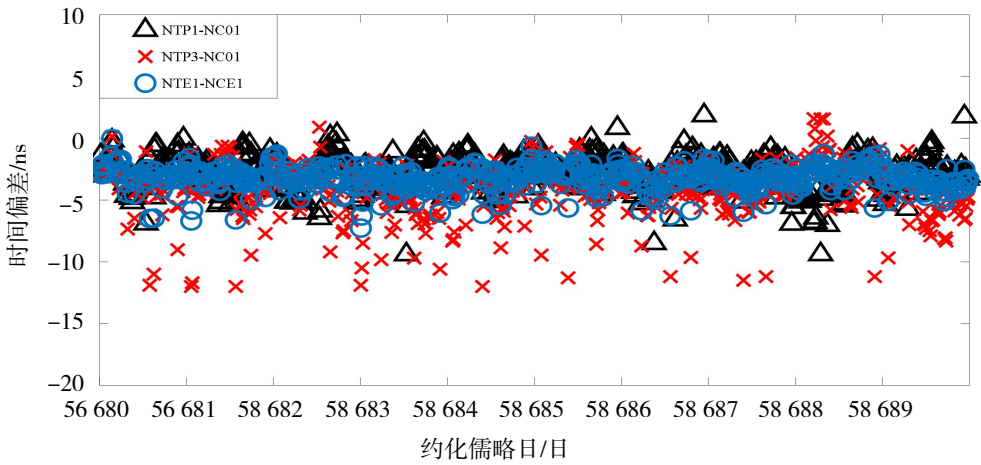


图 7 非等权组合

由图 6 和图 7 可看出，利用两种不同加权方式进行多接收机组合后，多接收机链路比对结果均优于两条单接收机链路的比对结果，表现在图中为多接收机链路的比对结果（圆圈）处于两条单接收机链路（三角形和叉号）之间。表 3 为所有比对链路结果的 STDEV 值。

表 3 所有比对链路结果的标准偏差

链路	标准偏差/ms	增益因子（等权）	增益因子（非等权）
NTP1-NC01	2.046	0.518	0.534
NTP1-NC4s	1.482	0.334	0.356
NTP1-NC5g	1.158	0.148	0.176
NTP3-NC01	2.218	0.555	0.570
NTP3-NC4s	0.996	0.01	0.042
NTP3-NC5g	1.634	0.396	0.416
PTE1-NTE1（等权）	0.987	0.327（均值）	-
PTE1-NTE1（非等）	0.954	-	0.349（均值）

由表 3 可知多接收机链路比对结果的 STDEV 值均优于各单接收机链路，非等权组合方式比对结果

的 STDEV 值为 0.954 ns，优于等权方式。因此，在进行 GPS 多接收机组合时，优先选择非等权组合方式，给予性能较好的接收机分配更高的权重。而采用等权方式进行组合时，所有接收机的权重占比都相同，会忽略掉一些性能较好的接收机的优势，因此，在两端参考源不变的情况下，通过选择较优的组合方式，可以进一步提高共视时间比对的各项性能指标。图 8 至图 11 是不同加权方式多接收机链路和单接收机链路的 Allan 方差和时间方差。

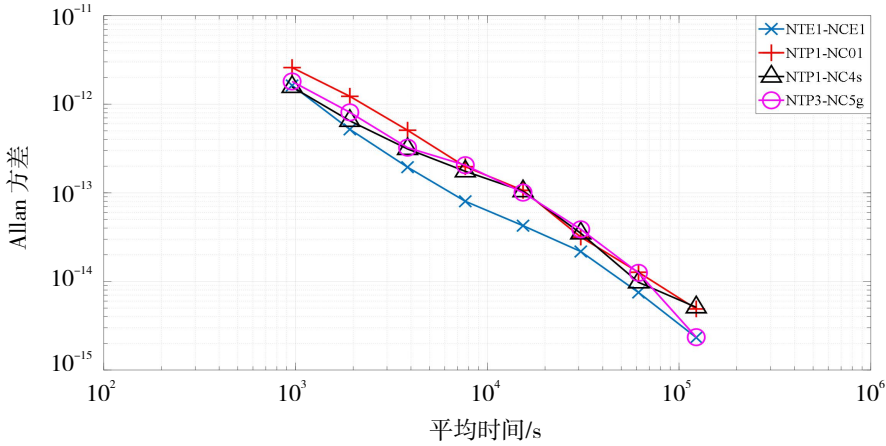


图 8 等权组合的 Allan 方差

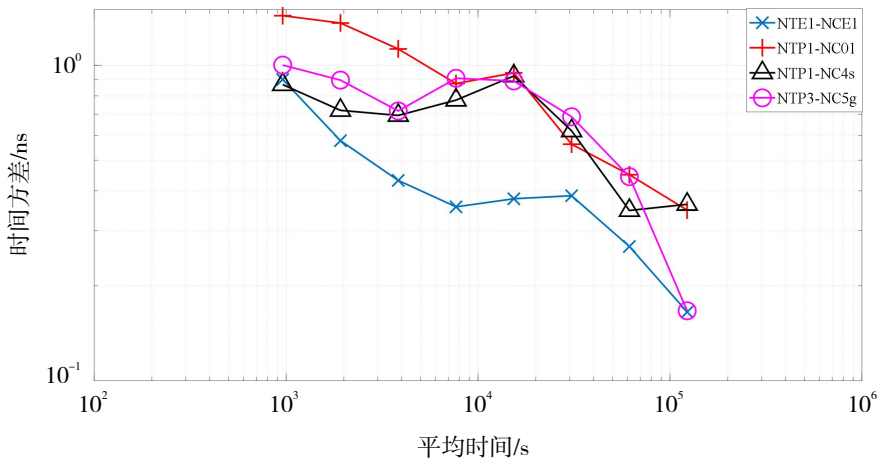


图 9 等权组合的时间方差

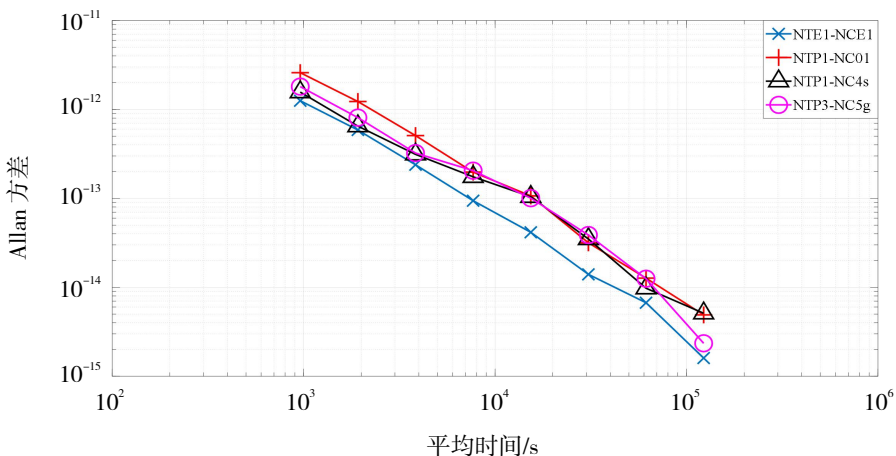


图 10 非等权组合的 Allan 方差

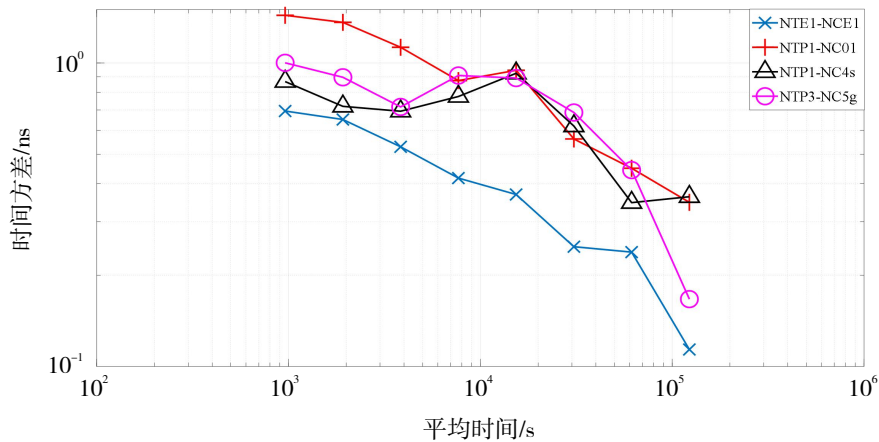


图 11 非等权组合的时间方差

由图 8 和图 10 可知，随着时间的变化，等权组合和非等权组合的频率稳定度越来越高，均优于各条单接收机链路，且计算得出非等权组合方式的天稳为 4.6×10^{-15} ，优于等权组合方式的 5.4×10^{-15} 。由图 9 和图 11 可知，等权组合和非等权组合的 STDEV 值随着时间的变化越来越小，说明两地时间源的同步稳定度较好，同步精度越来越高。

5 结论

利用等权和非等权两种加权方式对 NTSC 和 NICT 两个守时实验室各自的多台接收机进行组合，构建两个实验室各自的多接收机系统，在 NTSC 和 NICT 之间进行多接收机系统高精度共视时间比对试验，分析比较两种组合方式的比对结果。结果表明，两种加权方式均可提高共视时间比对的各项性能指标，组合后多接收机链路的频率和时间稳定度均优于各单接收机链路。等权组合方式和非等权组合方式的增益因子分别为 0.327 和 0.349，非等权组合方式比对结果的标准偏差值为 0.954 ns 优于等权组合。因此，多接收机组合可以提高共视时间比对链路的稳定性和可靠性，基于其他卫星导航系统也可利用多接收机组合技术进行下一步研究。

参考文献：

- [1] PANFILO G. The coordinated universal time[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2016, 19(3): 28–33.
- [2] ARIAS E F, PANFILO G, PETIT G. Timescales at the BIPM[J]. Metrologia, 2011, 48(4): S145–S153.
- [3] JAMES R S. Common-view GPS time transfer accuracy and stability results[J]. Position Location and Navigation Symposium, 1990(4): 383–391.
- [4] JIANG Z H, MATSAKIS D, ZHANG V. Long-term instability in UTC time links[C]//Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Montereu: [s.n.], 2017.
- [5] DEFRAIGNE P, BAIRE Q. Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(2): 265–275.
- [6] HARMEGNIES A, DEFRAIGNE P, PETIT G. Combining GPS and GLONASS in all-in-view for time transfer[J]. Metrologia, 2013, 50(3): 277–287.
- [7] JIANG Z H, PETIT G. Combination of TWSTFT and GNSS for accurate UTC time transfer[J]. Metrologia, 2009, 46(3): 305–314.

- [8] DEFRAIGNE P, MARTINEZ M C, JIANG Z H. Time transfer from combined analysis of GPS and TWSTFT data[C]//Proceedings of 49th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reion: ION PTTI, 2008.
- [9] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2007.
- [10] 高小珣, 高源, 张越, 等. GPS 共视法远距离时间频率传递技术研究[J]. 计量学报, 2008(1): 80-83.
- [11] GOTOH T, OTSUBO T, KUBO'OKA T, et al. GPS common-view with geodetic receivers[C]//18th European Frequency and Time Forum, Guildford: EFTF, 2004.
- [12] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 96-103.
- [13] 武文俊, 广伟, 张继海, 等. 北斗亚欧共视时间比对试验[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 200-205.
- [14] 李变. GPS 共视中电离层时延计算方法比较研究[J]. 时间频率学报, 2009, 32(1): 56-62.
- [15] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2012.
- [16] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 中继式卫星双向时间比对研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 307-316.