

基于 R2CGGTTS 的 GNSS 时间传递数据 生成性能分析

李德楠¹, 梁坤^{1,*}, 孙钰凯², 慕永耀³, 余油¹

(1. 北京交通大学自动化与智能学院, 北京 100044; 2. 烟台持久钟表集团有限公司, 烟台 264003;
3. 烟台持久钟表有限公司, 烟台 264003)

摘要:随着卫星共视时间比对方法的广泛应用, 国际频率咨询委员会 (Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF) 发布了扩展的时间传递标准 (Common GNSS Generic Time Transfer Standard Version2E, CGGTTS V2E), 同时国内外产生了各种数据处理软件来生成全球卫星导航时间传递标准 (Common GNSS Generic Time Transfer Standard, CGGTTS) 文件, 对此类软件的性能评估已成为时间传递领域的需求。为此对比比利时皇家天文台开发的 R2CGGTTS 开展 GNSS 时间传递数据生成性能分析研究, 通过接收机单站验证和双站比对试验, 分析检验不同系统频点 CGGTTS 时差数据生成的一致性和稳定性等性能指标。结果表明, R2CGGTTS 生成 GNSS 时间传递数据的均值差可控制在亚纳秒量级, 且频率稳定度可达到 10^{-15} 量级, 可见由 R2CGGTTS 生成的 GNSS 时间传递数据在多系统时间传递中的可靠性。

关键词: 全球导航卫星系统; 时间传递; 共视比对; 性能评估

中图分类号: TB939

文献标志码: A

Performance Analysis of GNSS Time Transfer Data Generation Based on R2CGGTTS

LI Denan¹, LIANG Kun^{1,*}, SUN Yukai², MU Yongyao³, YU Tian¹

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Yantai Chijiu Clock and Watches Group Co., Ltd., Yantai 264003, China; 3. Yantai Chijiu Clock and Watches Co., Ltd., Yantai 264003, China)

Abstract: With the wide application of satellite common view time comparison method, the Consultative Committee for Time and Frequency released the extended time transfer standard Common GNSS Generic Time Transfer Standard Version2E and at the same time, various data processing software have been generated at home and abroad to generate Common GNSS Generic Time Transfer Standard files, and the performance evaluation of such software has become a demand in the field of time transfer. To address this, a performance analysis was conducted on the GNSS time transfer data generation capabilities of the R2CGGTTS software, developed by the Royal Observatory of Belgium. Through single-station validation and dual-station comparison experiments, performance metrics such as the consistency and stability of CGGTTS

收稿日期: 2025-09-22; 修回日期: 2026-01-21

基金项目: 泰山产业领军人才 (tsex202408155); 烟台市重大科技创新工程项目 (2024ZDCX002); 国家自然科学基金 (12473072) 资助。

作者简介: 李德楠 (2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: GNSS 时间频率传递技术。

通信作者: 梁坤 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向: 精密测量/计量、时间和频率、卫星导航技术。

time offset data generated across different systems and frequencies are evaluated. The results indicate that the bias of time transfer data generated by R2CGGTTS can be controlled at the sub-nanosecond level, and the frequency stability can reach the order of 10^{-15} . This demonstrates the reliability of GNSS time transfer data generated by R2CGGTTS for multi-system time transfer applications.

Keywords: Global Navigation Satellite System(GNSS); Time transfer; Time comparison using common view methods; Performance evaluation

0 引言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 近年来发展迅速, 其灵活性和准确性显著提升, 在时间频率传递领域得到了广泛应用。时间频率传递作为 GNSS 的重要功能之一, 通过高精度的卫星信号同步不同地理位置的时钟系统, 为国际原子时 (International Atomic Time, TAI) 和协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 的计算与维护提供了关键支持。随着北斗导航卫星系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、伽利略导航卫星系统 (Galileo Navigation Satellite System, Galileo) 等系统的全面应用^[1-3], 为了适应多系统融合的时间传递需求, CCTF 推出了支持多 GNSS 系统的 CGGTTS V2E 标准格式。在此背景下, 生成该标准格式的软件工具成为影响时间传递链路质量的核心环节。

为满足这一需求, 国内外相关机构已研发了多种数据处理软件。例如, 中国科学院国家授时中心开发的 Rinex2CGGTTS、Septentrio 接收机内置的 sbf2CGGTTS 以及瑞典 RISE 研究院研发的 RISEGNSS 等。现有研究表明, 这些软件在多模 GNSS 时间传递中均展现出良好性能^[4-8]。在众多工具中, 比利时皇家天文台 (Royal Observatory of Belgium, ROB) 开发的 R2CGGTTS 软件因其成熟的算法逻辑, 被国际计量局 (International Bureau of Weights and Measures, BIPM) 及全球主要时间实验室广泛采用, 作为处理 RINEX 原始观测数据、生成 CGGTTS 文件的标杆工具。

尽管已有研究涉及了不同软件间的横向比对, 验证了各类软件在特定场景下的可用性, 但针对 R2CGGTTS 在多模 GNSS 观测环境下, 特别是其解算数据的一致性和稳定性以及深层噪声特性的量化评估仍有待完善。软件处理策略引入的微

小系统误差或有色噪声, 在纳秒级的高精度比对中不可忽视, 直接关系到时间基准的长期稳定性。鉴于此, 开展对 R2CGGTTS 综合性能的评估。研究选取多组实测数据展开深入分析, 并进行稳定度噪声特征评估, 以期验证该软件在多系统时间传递中的有效性和可靠性, 并为优化 UTC 链路校准精度提供数据支撑。

1 时间传递原理与性能评估方法

1.1 GNSS 时间传递原理

GNSS 时间传递利用卫星信号实现高精度的时间同步, 其核心目标是计算本地时钟与 GNSS 系统时间之间的偏差, 并通过比对消除误差, 实现不同地点时钟的同步。

卫星共视法 (Common View, CV) 是主要的 GNSS 时间传递实现方式之一, 其共视时间传递的原理框图如图 1 所示^[9], 位于两地的用户接收机在同一时刻同时观测同一颗卫星, 那么就可以消除卫星信号传播路径上的部分公共误差, 实现两地的时间比对。假设一端主站的本地时钟时间为 t_A , 另一端副站的本地时钟时间为 t_B , 当主站和副站同时可以观测到一颗卫星时, 卫星时钟的时间为 t_S 。卫星共视法主要以伪距测量为基础, 卫星信号在传播路径上存在误差, 将卫星到主站的总传播时延记作 Δt_A , 卫星到副站的总传播时延记作 Δt_B , 那么主站时钟相对于卫星钟的钟差和副站时钟相对于卫星钟的钟差分别如式 (1) 和式 (2) 所示

$$t_{AS} = t_A - t_S - \Delta t_A \quad (1)$$

$$t_{BS} = t_B - t_S - \Delta t_B \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 可以消除卫星时钟, 实现主站和副站间的时间比对, 即为主站与副站之间的时差, 如式 (3) 所示

$$t_{AB} = t_{AS} - t_{BS} = (t_A - t_B) - (\Delta t_A - \Delta t_B) \quad (3)$$

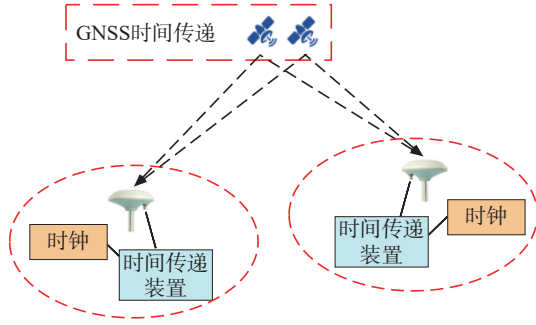


图 1 共视时间传递结构图

Fig. 1 Structure of the common view time transfer

1.2 稳定性指标

时间和频率稳定性在时间传递数据分析中至关重要,直接体现时间同步的精度和可靠性。通常用修正阿伦偏差 (Modified Allan Deviation, MDEV) 表示频率稳定度,其中 MDEV 可通过测量时差或相位差获得,如式 (4) 所示

$$\text{Mod}\sigma_x(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2m^2(N_x - 3m + 1)\tau^2} \sum_{j=1}^{N_x - 3m + 1} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i] \right\}^2} \quad (4)$$

式中: τ ——采样时间, $\tau = m\tau_0$; m ——采样个数; N_x ——时差测量数量即 x_i 个数; x_i ——测得的时差或相位差。

MDEV 也可以根据 τ 间隔内平均频率偏差 $y(\tau)$ 计算,如式 (5) 所示

$$\text{Mod}\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2m^4(M - 3m + 2)} \sum_{j=1}^{M - 3m + 2} \left\{ \sum_{i=j}^{N_x - 3m + 1} \left(\sum_{k=i}^{j+m-1} [y_{k+m} - y_k] \right) \right\}^2} \quad (5)$$

式中: y ——平均频率偏差; M —— y 的个数即取样个数;

其中, M 与 N_x 间满足数量关系如式 (6) 所示

$$N_x = M + 1 \quad (6)$$

时间稳定度可用时间阿伦偏差 (Time Allan Deviation, TDEV) 表示,基于 TDEV 计算的时间稳定度如式 (7) 所示

$$\sigma_x(\tau) = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \text{Mod}\sigma_x(\tau) = \sqrt{\frac{1}{6m^2(N_x - 3m + 1)} \sum_{j=1}^{N_x - 3m + 1} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i] \right\}^2} \quad (7)$$

1.3 幂律谱噪声

幂律谱噪声模型是用于描述信号噪声分布中频率成分随频率变化的一种统计特性,通常包括五种独立噪声过程 ($\alpha = -2, -1, 0, 1, 2$),依次为频率随机游走噪声 (Random Walk Frequency Modulation Noise, RWFM)、频率闪烁噪声 (Flicker Frequency Modulation Noise, FFM)、频率白噪声 (White Frequency Modulation Noise, WFM)、相位闪烁噪声 (Flicker Phase Modulation Noise, FPM) 和相位白噪声 (White Phase Modulation Noise, WPM)^[10],它们呈线性叠加关系,如式 (8) 所示

$$S_y(f) = h_{-2}f^{-2} + h_{-1}f^{-1} + h_0f^0 + h_1f^1 + h_2f^2 = \sum_{\alpha=-2}^2 h_\alpha f^\alpha \quad (8)$$

式中: $S_y(f)$ ——随频率呈幂律形式变化的功率谱密度; f ——频率; h_α ——各噪声分量的系数。

该五种常见幂律谱噪声在修正阿伦偏差中的斜率具有明确的对数-对数线性关系^[11],如表 1 所示,可以通过斜率比较辨别出噪声类型。

表 1 五种噪声在修正阿伦偏差下的斜率

Tab. 1 Slope of five noises under MDEV

噪声类型	相位白噪声	相位闪烁噪声	频率白噪声	频率闪烁噪声	频率随机游走噪声
修正阿伦偏差拟合斜率	-1.5	-1	-0.5	0	1

2 R2CGGTTS 性能分析方法

为实现对 R2CGGTTS 生成的 GNSS 时间传递数据的性能分析,主要设计接收机单站验证和双站比对两部分试验内容来对 R2CGGTTS 数据解算的一致性和稳定性进行量化处理分析。其具体性能分析系统框图如图 2 所示。试验选取多台不同测站和不同型号的 GNSS 接收机,各接收机信息如表 2 所示,采用同一时段稳定有效的 RINEX 观测数据,通过 R2CGGTTS V8.8b 软件处理生成含有 GNSS 时间传递数据的各系统频点 CGGTTS 文件,以该文件中 REFSYS 时差数据反映 R2CGGTTS 的各项性能指标。

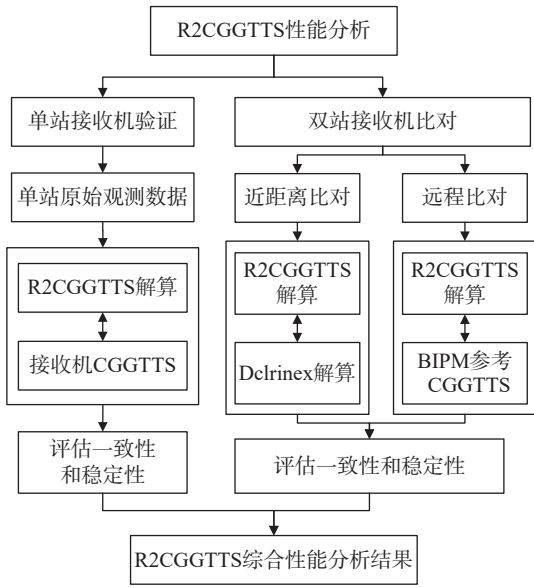


图 2 基于 R2CGGTTS 的 GNSS 时间传递数据生成性能分析系统框图

Fig. 2 System block diagram of R2CGGTTS-based performance analysis of GNSS time transfer data generation

表 2 参测接收机基本信息

Tab. 2 Basic information of the receivers under test

接收机代号	地点	外部参考源	接收机型号
TL01	中国北京	铷钟	TF-BJTU
TL07	中国北京	铷钟	TF-BJTU
BJ02	中国北京	铷钟	TF-GNSS-200B
USN7	美国华盛顿	氢钟	POLARX5TR
PT13	德国不伦瑞克	氢钟	POLARX5TR

在试验数据分析中使用到 RINEX 和 CGGTTS 两种 GNSS 领域广泛应用的数据格式文件。RINEX 格式文件是一种标准化的数据交换格式,用于存储和共享 GNSS 接收机观测数据和导航数据,其采用 ASCII 码存储数据,并主要包含三类文件:观测数据文件、导航文件和气象数据文件,为测地、导航、时间同步和科学研究提供高精度原始数据。而 CGGTTS 格式文件是一种用于高精度时间传递的标准格式文件,可由 RINEX 文件通过工具生成,主要功能是存储 GNSS 接收机基于特定码计算的接收机时钟与 GNSS 系统时间之间的偏差数据,专注于高精度的时间同步,广泛应用于国际时间比对和原子钟校准。其包含头文件和按固定间隔记录

的时钟偏差、伪距、仰角等数据,支持多 GNSS 系统。

为全面评估 R2CGGTTS 的综合性能,在试验内容中构建了 R2CGGTTS 与接收机自身 CGGTTS 比对的单站验证方案,以及近距离比对和远程比对的单站验证方案,以及近距离比对和远程比对的单站验证方案,刻画 GNSS 时频传递链路中常见的超短基线 (Common Clock Difference, CCD) 试验场景和远程 GNSS 长基线试验场景,通过分析 R2CGGTTS 在各时频传递链路中生成的 GNSS 时频传递数据一致性及稳定性指标,进行 R2CGGTTS 的性能评估。

在稳定性指标分析中, MDEV 拟合斜率可作为识别噪声类型的依据,更是量化评估数据处理性能的关键指标。短期斜率表征了软件对观测噪声的平滑水平,中期斜率反映了系统误差模型的修正精度,而长期斜率的演变则揭示了算法处理是否存在累积漂移。优异的数据处理策略在短中期主要呈现显著的相位白噪声特性,其中陡峭的下降斜率意味着测量噪声随平滑时间被更高效地消除,也意味着该软件具备优异的观测噪声抑制效果与算法稳定性。

3 R2CGGTTS 性能分析方案与结果

3.1 单站验证

为分析基于 R2CGGTTS 的 GNSS 时间传递数据生成性能的单站接收机数据比对,试验选取接入本地时标 TS(BJTU)参考源信号的自研时频传递接收机(编号 TL01),选用 2024-11-26—2024-12-02 (简化儒略日 MJD: 60640—60646)期间接收机 TL01 生成的 BeiDou、Galileo 和 GPS 卫星的 RINEX 观测数据,利用 R2CGGTTS 数据处理软件生成的 CGGTTS 文件和 TL01 接收机自身生成的 CGGTTS 文件,分别对 BDS 的双频 L3B(B1I&B2I)、Galileo 的双频 L3E(E1&E5a)以及 GPS 的双频 L3P(L1P&L2P)观测值进行处理,分析解算出时差数据。

两种数据处理方式对于不同系统双频的时间偏差值的表现情况如图 3 所示。两种方式计算的时间偏差的差值统计结果如表 3 所示。针对于 BDS、Galileo 和 GPS 系统的双频频点下 R2CGGTTS 解算出的 CGGTTS 文件和接收机的 CGGTTS 文件所得到的时间偏差值一致性较好,能够在 90% 以上概率维持在 1 ns 的差距范围内,且该时间偏差

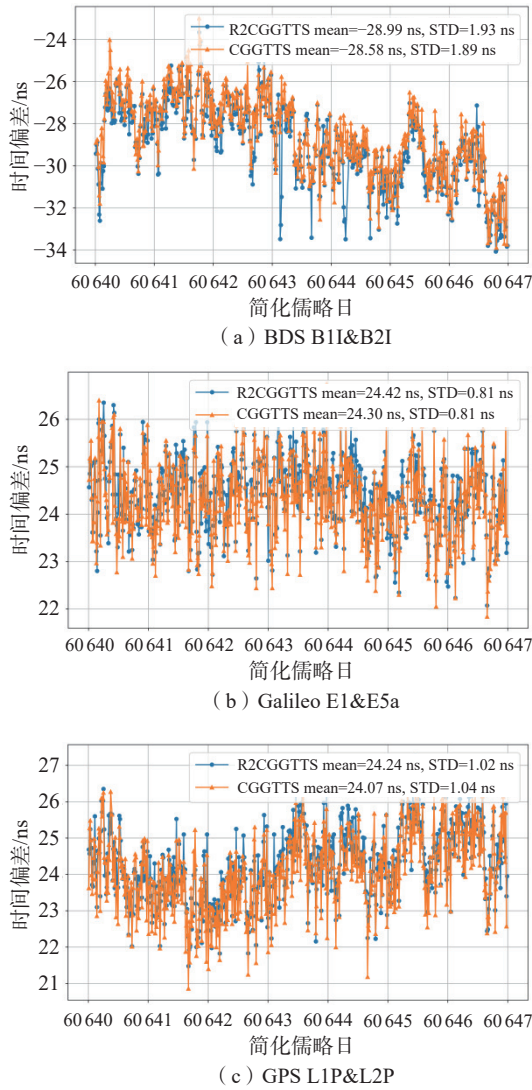


图 3 利用 R2CGGTTS 和自身 CGGTTS 两种方式计算的不同 GNSS 系统频点下时间偏差

Fig. 3 Time offsets for different GNSS frequencies calculated by R2CGGTTS and the receiver's internal CGGTTS

表 3 两种方式计算的时间偏差的差值统计结果
Tab. 3 Statistical results of the differences in time deviations calculated by the two methods

选取系统及频点	单点共视比对结果差值 <1 ns	共视比对结果均值差/ns
BDS(B11&B2I)	90.86%	0.41
Galileo(E1&E5a)	99.84%	0.12
GPS(L1P&L2P)	97.56%	0.17

值的均值之差分别为 0.41 ns, 0.12 ns 和 0.17 ns, 其中对于 Galileo 双频解算时差值一致性是要稍优于

BDS 双频和 GPS 双频, 整体结果可证明 R2CGGTTS 数据处理软件处理 BeiDou、Galileo 和 GPS 卫星观测数据所生成的标准 CGGTTS 的有效性和可靠性。

在此基础上以自研接收机内部固件生成的 CGGTTS 数据作为参照, 通过两者解算结果的互差进行了 MDEV、TDEV 稳定度计算和噪声拟合分析。由上述差值计算得到的 MDEV 和 TDEV 值如图 4 和图 5 所示, 可见该时间传递数据差值计算的频率稳定度较好, 在长期下为 Galileo 信号的 MDEV 和 TDEV 值在三种 GNSS 系统中相对较小, 进而是 GPS 信号, 稳定性相对最差的是 BDS 信号。同时根据差值计算得到的 MDEV 数据进行幂律谱噪声类型分析, 结果如图 6 所示, 对于 BDS、Galileo 和 GPS 系统的双频频点下, 曲线斜率主要分布在 -1.5 左右, 噪声以相位白噪声为主, 可见 R2CGGTTS 与接收机嵌入式固件在处理相同的原始观测数据时, 并未产生随时间积累的系统性偏差, 其中虽相比于 GPS

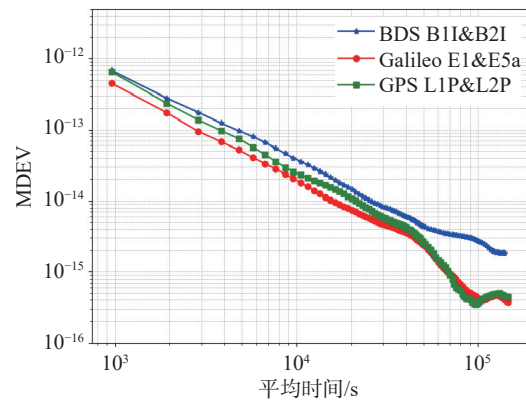


图 4 时间偏差差值的频率稳定度 MDEV

Fig. 4 MDEV of the difference in time deviation

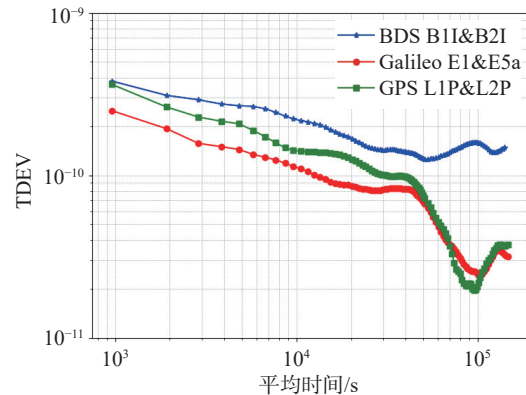


图 5 时间偏差差值的时间稳定度 TDEV

Fig. 5 TDEV of the difference in time deviation

和 Galileo, BDS 系统的 MDEV 拟合曲线量级略高, 但所有系统的稳定度均处于较优水平, 证实了 R2CGGTTS 软件算法逻辑与硬件固件的一致性。

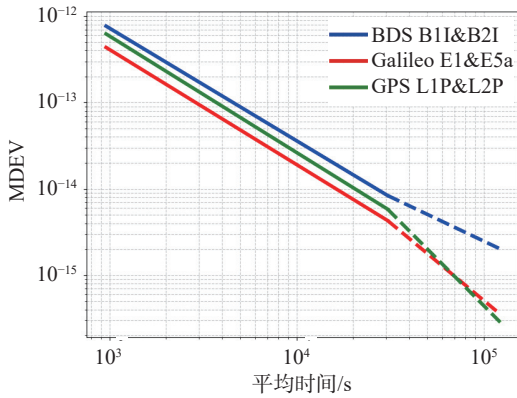


图 6 MDEV 数据直线拟合结果

Fig. 6 Results of straight line fitting for MDEV data

3.2 双站比对

3.2.1 近距离双站比对

为分析 R2CGGTTS 生成 GNSS 时间传递数据的性能, 利用由 BIPM 提供的一种可生成 GNSS 时间传递数据的 Fortran 程序软件 Dclrinex 与 R2CGGTTS 进行数据生成性能比对, 为此选取均接入本地时标 TS(BJTU)_B 参考源信号的自研时频传递接收机(编号 TL07)和 TF-GNSS-200B 型时频传递接收机(编号 BJ02), 均可接收 BDS 和 GPS 等多种 GNSS 系统卫星信号, 在 2024-10-01—2024-10-07(简化儒略日 MJD: 60584—60590)的超短基线 GNSS 时间传递场景(TL07-BJ02)下展开试验与数据分析。

Dclrinex 用于读取两个位于同一站点的接收机 RINEX 观测数据, 计算并输出各 GNSS 系统指定码的伪距差、MDEV 和 TDEV 等数据统计结果, 可为对 GNSS 时间传递数据的进一步分析提供支持, 是 BIPM 用于 GNSS 时间传递链路校准的核心软件工具, 对于保障全球时间传递链路准确性具有关键作用。通过利用 Dclrinex 对 TL07 和 BJ02 两台接收机的 Rinex 文件直接处理生成比对时差数据, R2CGGTTS 通过 Rinex 文件解算生成 CGGTTS 文件来进行共视比对数据输出。R2CGGTTS 生成的接收机 30 s 间隔的 CGGTTS 文件, 和 Dclrinex 生成数据时间戳相对齐进行比较的结果如图 7 所示。结果表明两种软件对 BDS 单频频点 B1I、双

频频点 B1I&B2I 和 GPS 单频频点 L1C、双频频点 L1P&L2P 解算的共视比对结果具有较好的匹配性。两种软件计算共视比对差值的统计结果如表 4 所示。结果表明两种软件解算的共视比对结

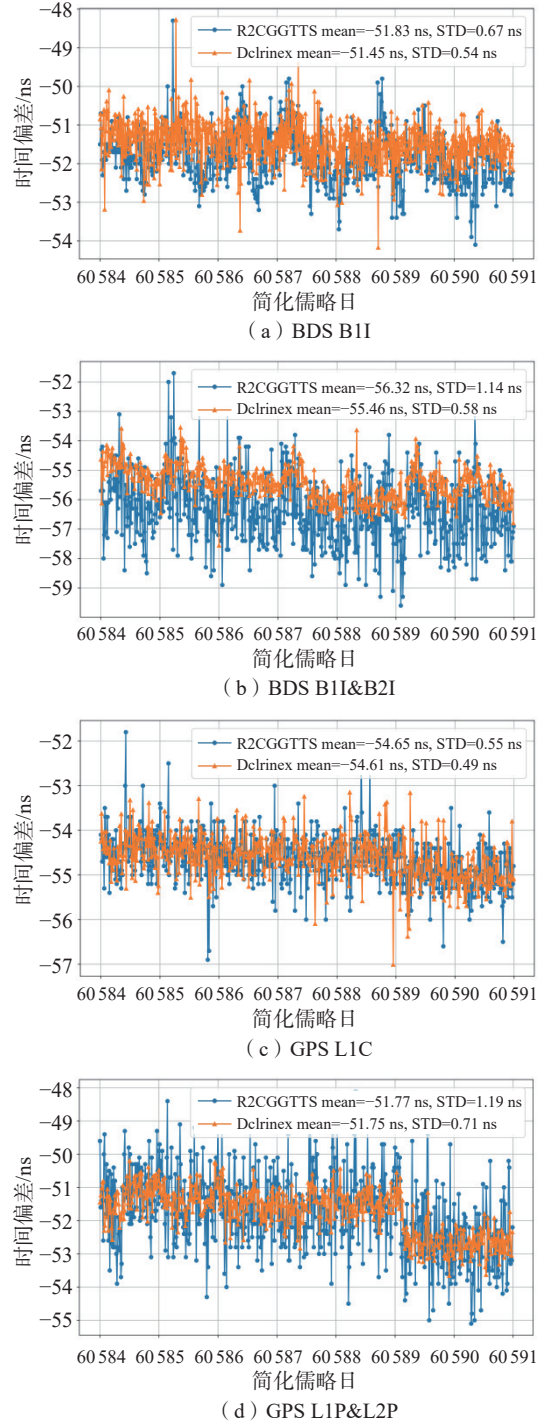


图 7 利用 R2CGGTTS 和 Dclrinex 两种方式计算的不同 GNSS 系统频点下共视比对结果

Fig. 7 Common view comparison results of different GNSS frequencies calculated by R2CGGTTS and Dclrinex

果均能在 83% 以上的概率吻合在 2 ns 范围内, 并且两软件解算的共视比对结果均值之差均处于亚纳秒级精度, 对于 BDS 和 GPS 的单双频情况下的均值之差分别为 0.38 ns、0.86 ns、0.04 ns 和 0.02 ns。

表 4 两种软件计算共视比对的统计结果

Tab. 4 Statistics results of the differences after common view comparison calculated by two software

选取系统及频点	单点共视比对结果差值<2 ns	共视比对结果均值差/ns
BDS(B1I)	98.51%	0.38
BDS(B1I&B2I)	82.94%	0.86
GPS(L1C)	99.60%	0.04
GPS(L1P&L2P)	95.59%	0.02

为了进一步评估 R2CGGTTS 时间数据生成稳定性, 以同业广泛使用的 Dclrinex 软件作为参照, 通过两者解算结果的互差进行 MDEV、TDEV 稳定度计算和噪声拟合分析。由于使用了同一套原始观测数据, 接收机钟差与硬件噪声也已被抵消, 图中的稳定度数据主要反映了两种软件在数据处理模型上的差异特性。

由上述差值计算得到的 MDEV 和 TDEV 如图 8 和图 9 所示, 可见对 TL07 和 BJ02 接收机两种软件生成的 GNSS 时间传递数据差值在频率稳定度和时间稳定度在 BDS 和 GPS 单双频频点下均表现较优。对 MDEV 数据进行具体的幂律谱噪声分析结果如图 10 所示, 在 BDS 和 GPS 单双频下, MDEV 数据整体拟合曲线较为相近, 斜率均位于-1.0~1.5 的范围之内, 主要噪声类型为相位白噪声, 表明

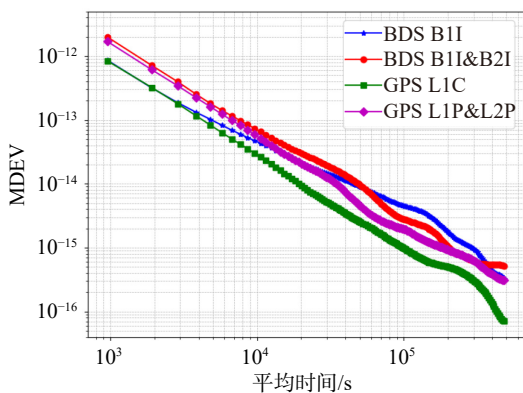


图 8 时间偏差差值的频率稳定度 MDEV

Fig. 8 MDEV of the difference in time deviation

R2CGGTTS 与 Dclrinex 在处理这两类星座时具有一致性。两者间的差值主要表现为高频随机数值噪声, 且随着平滑时间的增加迅速收敛, 未引入任何系统性的频率漂移或随机游走误差, 可见 R2CGGTTS 时间传递数据生成的可靠性。

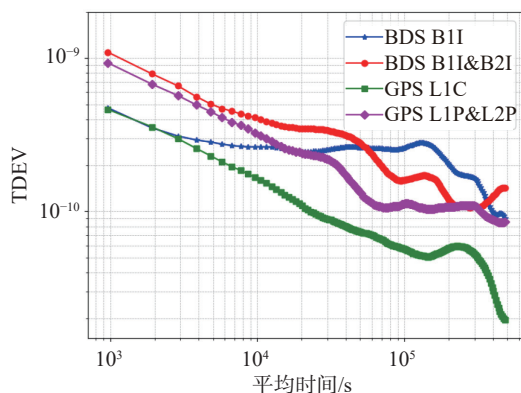


图 9 时间偏差差值的时间稳定度 TDEV

Fig. 9 TDEV of the difference in time deviation

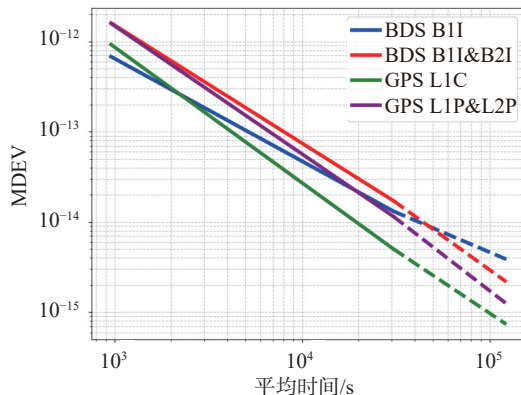


图 10 MDEV 数据直线拟合结果

Fig. 10 Results of straight line fitting for MDEV data

3.2.2 远程双站比对

除了利用本地接收机进行试验数据分析外, 选用两台参与 TAI 合作的时频传递接收机, 分别为美国海军天文台 (United States Naval Observatory, USNO) 测站的编号 USN7 接收机和德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 测站的编号 PT13 接收机, 测站地理位置分布如图 11 所示, 在 2025-05-27—2025-06-02 (简化儒略日 MJD: 60822—60828) 远程 GNSS 长基线观测条件下的 GNSS 时间传递场景 (USN7-PT13) 的试验与数据分析。利用 R2CGGTTS 解算的共视比对比时差结果和经 BIPM 处理并在其 FTP 服务器提供

的参考 CGGTTS 数据解算的比对结果如图 12 所示,可观察到两者在 GPS L1P&L2P 双频下的远程共视比对结果在 95% 左右吻合在 2 ns 范围内,时间传递结果均值差仅为 0.15 ns。

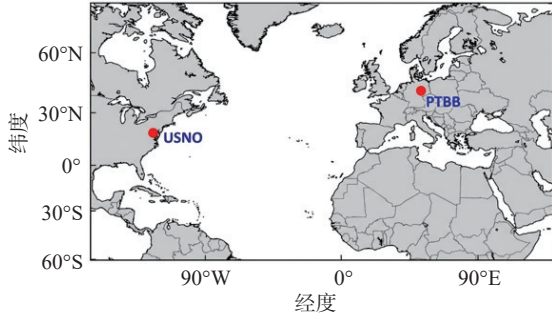


图 11 测站地理位置分布

Fig. 11 Geographical distribution of the stations

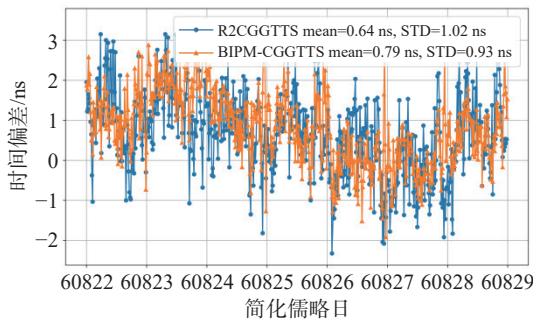


图 12 利用 R2CGGTTS 和 BIPM 参考 CGGTTS 分别得到的共视比对结果

Fig. 12 Common-View Comparison Results Obtained of R2CGGTTS and BIPM Reference CGGTTS

对上述两者时差数据差值计算得到的 MDEV 和 TDEV 如图 13 和图 14 所示,可见对 USN7 和 PT13 接收机两者 GNSS 时间传递数据差值在频率稳定度

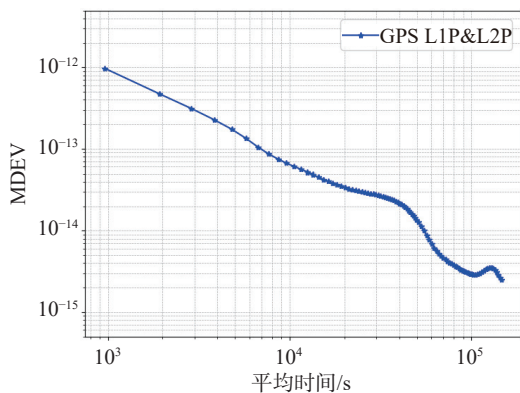


图 13 时间偏差差值的频率稳定度 MDEV

Fig. 13 MDEV of the difference in time deviation

和时间稳定度均表现较优,对 MDEV 数据进行具体的幂律谱噪声分析结果如图 15 所示,其中 MDEV 数据整体拟合曲线斜率接近于-1.5,说明 R2CGGTTS 对于 GPS 的共视解算残差主要由相位白噪声主导,结果表明 R2CGGTTS 处理生成的 CGGTTS 数据与 BIPM 提供的参考 CGGTTS 数据在 GPS 数据处理上可实现一致性,可见 R2CGGTTS 其数据处理模型的正确性和可靠稳定性。

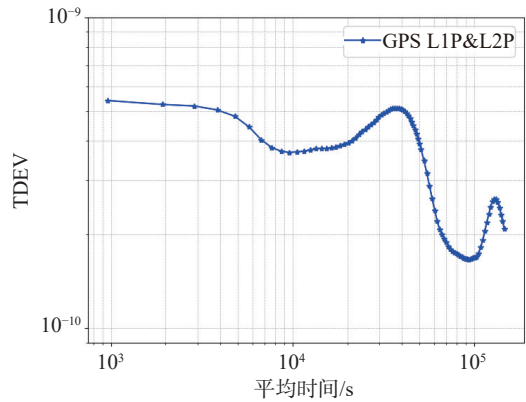


图 14 时间偏差差值的时间稳定度 TDEV

Fig. 14 TDEV of the difference in time deviation

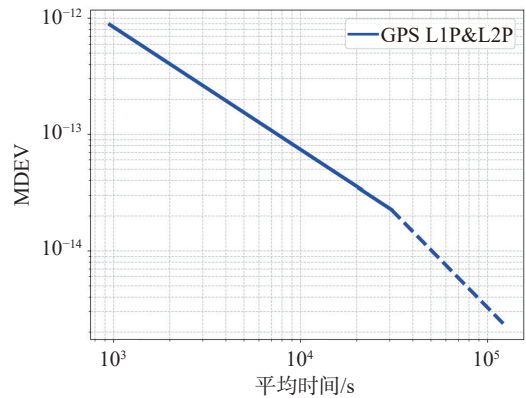


图 15 MDEV 数据直线拟合结果

Fig. 15 Results of straight line fitting for MDEV data

4 结束语

针对 CGGTTS V2E 标准下的多模 GNSS 时间传递应用需求,对 R2CGGTTS 的综合性性能进行了全方面评估,研究采用了接收机单站验证和双站比对的试验方法,并在双站比对中分别于近距离和远程的试验场景下展开验证。在单站验证中,将单站接

收机自身 CGGTTS 作为参考, 比对验证 R2CGGTTS 时间传递数据的生成性能, 试验结果得到在 BDS、GPS 和 Galileo 双频下两者数据计算的均值差可分别达到 0.41 ns、0.17 ns 和 0.12 ns; 在双站比对超短基线 CCD 试验验证中, 利用国际通用软件作为参照进行一致性互差分析试验, 结果显示在 BDS 和 GPS 的单双频情况下计算的均值差可分别达到 0.38 ns、0.86 ns、0.04 ns 和 0.02 ns; 在远程长基线试验验证中, 以 BIPM 提供的参考 CGGTTS 作为比对参考, 对于 GPS 双频的均值差为 0.15 ns。综合上述结果可得, R2CGGTTS 生成 GNSS 时间传递数据的均值差均处于 1ns 范围之内, 同时经稳定度噪声特征评估, 各试验生成数据在全频段内维持了良好的噪声特性, 并实现 10^{-15} 和 10^{-10} 量级的频率稳定度和时间稳定度指标。试验证明, R2CGGTTS 在多模 GNSS 时间传递中兼具一致性与稳定性, 能够为 TAI 与 UTC 的计算维护提供可靠的数据支撑, 具有重要的工程应用价值与推广意义。

参考文献

- [1] ZHANG P, TU R, ZHANG R, et al. Time and frequency transfer using BDS-2 and BDS-3 carrier-phase observations[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(8): 1249–1255.
- [2] VERHASSELT K, DEFRAIGNE P. Multi-GNSS time transfer based on the CGGTTS[J]. *Metrologia*, 2019, 56(6): 065003.
- [3] LYU D, ZENG F, OUYANG X, et al. 2020 Real-time clock comparison and monitoring with multi-GNSS precise point positioning: GPS, GLONASS and Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 560–571.
- [4] DEFRAIGNE P, VERHASSELT K. Multi-GNSS Time Transfer with CGGTTS-V2E[C]// Proceedings of 2018 European Frequency and Time Forum, Turin, 2018: 270–275.
- [5] BAUCH A, PIESTER D, POLEWKA T, et al. Disciplined oscillators for traceable frequency and time in metrology and financial sectors[C]// Proceedings of the 2019 Precise Time and Time Interval Meeting, Reston, 2019: 336–348.
- [6] HUANG W, DEFRAIGNE P. BeiDou time transfer with the standard CGGTTS[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1005–1012.
- [7] JALDEHAG K, JARLEMARK P, RIECK C. Further evaluation of CGGTTS time transfer software[C]// Proceedings of 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, Orlando, 2019: 14–18.
- [8] LI G, WANG C, YE H. Performance analysis of BeiDou-3 Common-View time transferring[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2022, 46(4):471–485.
- [9] 刘旭, 赵当丽. 基于 CGGTTS V2E 标准的共视时间比对算法仿真[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(5): 300–304.
- [10] 薛晨园. 相位噪声测量技术研究[D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] 肖胜红, 蔡志武, 王茂磊, 等. 幂律谱模型原子钟钟差仿真与噪声类型辨识[J]. *测绘科学与工程*, 2014, 34(6): 67–73.