

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209937

基于超快速 Δ LOD/UT1 融合的近实时 UT1 序列*

李西顺^{1,2}, 吴元伟^{1,3}, 叶仁琼⁴, 杨旭海^{1,3}, 张首刚^{1,5}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049;
3. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600; 4. 中华女子学院管理学院 北京 100101;
5. 中国科学院时间效率基准重点实验室 西安 710600)

摘要:针对目前世界时(UT1)产品滞后的现象,不能满足用户实时性需求,提出将超快速日长变化(Δ LOD)序列与甚长基线干涉测量(VLBI)观测的UT1序列使用Vondrak算法进行融合,并在融合过程中结合马尔科夫链蒙特卡罗模拟方法研究UT1和 Δ LOD的权比选择,从而得到优化的近实时UT1产品,填补国内外超快速融合UT1产品的空白,并为UT1预报提供数据支撑。使用该方法将国家授时中心的UT1序列和iGMAS的超快速 Δ LOD序列、IVS的UT1序列和IGS的超快速 Δ LOD序列分别进行融合,并将融合后的数据和IERS的每日预报数据分别与IERS C04 UT1序列进行精度评估,结论表明,使用超快速 Δ LOD序列融合后可得到近实时UT1产品,且国外和国内融合后,UT1精度分别达到45.91 μ s、87.40 μ s,精度均优于IERS的每日预报产品。

关键词:世界时;日长变化;超快速;近实时

中图分类号: TH75 P228 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Near real-time UT1 sequence based on ultra-rapid Δ LOD/UT1 fusion

Li Xishun^{1,2}, Wu Yuanwei^{1,3}, Ye Renqiong⁴, Yang Xuhai^{1,3}, Zhang Shougang^{1,5}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 4. China Women's University, School of Management, Beijing 100101, China; 5. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: In view of the lag of universal time (UT1) products, which cannot meet the real-time requirement of users, it is proposed to fuse the ultra-rapid variation of length of day (Δ LOD) sequence with the UT1 sequence observed by very long baseline interferometry (VLBI) through the Vondrak algorithm. In the fusion process, combined with the Markov chain Monte Carlo simulation method, the weight ratio selection of UT1 and Δ LOD is studied to obtain the optimal real-time UT1 product. It fills the lack of ultra-rapid UT1 products at home and abroad, which provides data support for UT1 prediction. By using this method, the UT1 sequence of national time service center and ultra-rapid (Δ LOD) sequence of iGMAS, UT1 sequence of national time service center and ultra-rapid (Δ LOD) sequence of IGS, UT1 sequence of IVS and ultra-rapid (Δ LOD) sequence of IGS are fused respectively, and the fused data are compared with IERS C04 UT1 sequence. Results show that real-time UT1 products can be achieved after ultra-rapid sequence fusion, the accuracy of UT1 reaches 45.91 μ s and 87.40 μ s, respectively. They are better than the daily forecast products of IERS.

Keywords: UT1; Δ LOD; ultra-rapid; near real-time

0 引言

地球定向参数(earth orientation parameters, EOP)是

实现天球参考框架与地球参考框架之间坐标转换的必要参数,而在EOP参数中,世界时(universal time, UT1)变化最快,因此最难精确解算,监测UT1变化,特别在空间基准长期维持方面,具有至关重要的作用^[1-2]。同时UT1

在国家标准时间产生以及深空探测、航天器测控等领域中,有着重要需求^[3-5]。

其中官方的 UT1 等 EOP 数据发布机构是国际地球自转与参考系服务组织 (international earth rotation service, IERS)^[6]。IERS 发布的事后精密产品 EOP C04 综合了甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)、全球卫星导航 (global navigation satellite system, GNSS) 卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR)、卫星多普勒定轨定位系统 (doppler orbitography by radiopositioning Integrated on Satellite, DORIS) 技术的数据^[7]。该 UT1 是目前公认的最精确的事后精密产品,但由于时效性的原因,滞后一个月,该产品主要用于精度评估、科学分析,无法直接用于实时/准实时应用^[8]。基于历史数据,国内外学者进行了 EOP 数据的向后预报研究,包括最小二乘 (least square, LS) 外推^[9]、最小二乘+自回归分析法 (auto regressive, AR)^[10]、融合地球流体有效角动量函数的 LS+AR^[11]、小波分解与自协方差^[12]、基于神经网络预报方法^[13]等。

空间大地测量技术如 VLBI、GNSS、SLR、DORIS 等能够直接或间接获取高精度 UT1 等 EOP 数据,但由于观测数据量大、数据处理过程复杂以及各技术间参考基准的不一致性,使得 UT1 数据的获取需要滞后数天甚至数周,不能满足用户实时性需求,这给人造卫星定轨及深空探测带来了不小的挑战。其中,GNSS 技术在 EOP 数据解算中速度最快,可解算日长变化 (the variation of length of day, Δ LOD)、极移等产品,一般 1~2 h 即可给出准实时的数据结果,但长期稳定性较差^[14]; VLBI 技术因其较高的测角精度和长期的稳定性的特点,在解算 UT1 等 EOP 数据方面具有不可替代的作用。目前,VLBI 技术测量 UT1 精度最高,但因观测数据量大,处理过程复杂等,导致数据解算滞后 2~5 天且难以保证连续测量 UT1^[15]。文献^[16]提到,将 GNSS 的 Δ LOD 数据与 VLBI 的 UT1 数据进行融合解算,可提高 UT1 数据的连续性。

本文使用改进的 Vondrak 方法将超快速 Δ LOD 数据与 UT1 数据融合,在融合过程中使用马尔科夫链蒙特卡罗模拟 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 进行超快速 Δ LOD 数据与 UT1 数据融合时最优权比的选择。将国内宽带 VLBI2010 系统测量得到的 UT1 序列与国际 VLBI 大地和天体测量服务组织 (international VLBI service for Geodesy & Astrometry, IVS) 的 UT1 序列,分别与国际监测评估系统 (international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS) 解算的超快速 Δ LOD 序列及国际 GNSS 服务 (international GNSS service, IGS) 解算的超快速 Δ LOD 序列,通过 Vondrak 方法组合在一起,经过比对分析,融合后的 UT1 序列,实时性更高,连续性更好,精度更高,同时具备 UT1 的长期稳定性和 Δ LOD 较高的时间

分辨率以及较高的实时性,滞后 6 h,可得到近实时的每日 UT1 数据,填补了国内外超快速融合 UT1 产品的空白。

1 数据来源

1.1 UT1 数据

采用的 UT1 数据有两种,分别是国际 INT1/INT2 序列以及国家授时中心 (National Time Service Center, NTSC) 宽带 VLBI 系统自主测定的 UT1 序列。

1) 国际 INT1/INT2 序列

为近实时测量 UT1 参数,IVS 利用 VLBI 站开展了 UT1 加强观测,相关后的数据保存为 3 种数据格式,分别为 NGS、VGOSDB 和 DB,可从网上下载。

2) NTSC 宽带 VLBI 实测 UT1 序列

鉴于 UT1 数据在我国授时服务、航天测控、卫星导航等应用需求,摆脱对国外 UT1 数据的依赖,NTSC 在 2020 年建立了主要用于 UT1 测量的 13 m 宽带 VLBI 试验系统,由 3 个 13 m VLBI 观测站和 1 个数据处理中心组成。3 个观测站分别位于喀什、吉林和三亚,数据处理中心位于西安。其中最长的吉林-喀什基线长度为 4 000 km,目前使用吉林和喀什两站,开展单基线 UT1 自主测量研究^[17]。

本文使用了 2021 年 7~10 月期间利用 IVS 的观测数据自主解算的 UT1 序列和 NTSC 通过 13 m 天线自主测量并解算的 UT1 序列。

1.2 Δ LOD 数据

采用的 Δ LOD 数据有两种,分别是来自于 IGS 提供的 Δ LOD 产品以及 iGMAS 解算的 Δ LOD 产品。

1) IGS 提供的 Δ LOD 序列

IGS 下设 8 个分析中心,提供超快速、快速和最终的卫星轨道、钟差、地球定向参数等产品。超快速产品可实时和近实时使用,超快速产品每天 4 次在 UTC 的 00:00、06:00、12:00 和 18:00 发布;IGS 快速产品,延迟大约 17 h,约 17:00 UTC 每天发布;IGS 最终产品每周五提供一次,延迟 13~20 天。

2) iGMAS 提供的 Δ LOD 序列

NTSC 作为 iGMAS 的重要参研单位,承担了 iGMAS 国内跟踪站、西安数据中心和 NTSC 分析中心的研制建设与运行维护工作,UTC (NTSC) 为 iGMAS 系统提供网络授时服务。其分析中心提供卫星轨道、地球自转参数、电离层等产品。根据产品特点和更新周期,又将产品分为最终、快速、超快速和实时产品。其中,实时产品 (超快速预报产品) 每 6 h 更新一次,在 UTC 的 00:00、06:00、12:00 和 18:00 点发布,其 Δ LOD 为 0.06 ms;超快速产品

(观测)每 6 h 更新一次,在 UTC 的 00:00、06:00、12:00 和 18:00 点发布,其日长变化精度为 0.03 ms;快速产品每天更新一次,在 UTC 的 12:00 点发布,其 ΔLOD 为 0.03 ms;最终产品每周更新一次,在 UTC 的 12:00 点发布,其日长变化精度为 0.02 ms。

本文使用了 2021 年 7~10 月期间 IGS 发布的超快速 ΔLOD 产品和 iGMAS 发布的超快速 ΔLOD 产品。

1.3 EOP 预报数据

1) IERS 每日产品的预报数据

IERS 发布的每日产品主要有两种,即 `finals2000A.daily` 与 `finals.daily`。`finals2000A.daily` 文件和 `finals.daily` 文件,包含了向前 90 天的 Bulletin A,向后 90 天的预报,总长度 181 天,即无论是 `finals.daily`,还是 `finals2000A.daily`,当天的 EOP 数据均为预报值,与 Bulletin A 有关的更详细的过程可参考文献[18]。

2) IVS 与 IGS 预报数据

基于 IVS 的服务器下载的预处理后的数据(时延序列),解算的 `IVS_UT1` 与 IGS 的最终/快速 ΔLOD 产品融合,得到融合后的 UT1 和 ΔLOD 产品。并基于近期此融合序列与历史 C04 数据通过 LS+AR 方法进行 UT1 数据的建模预报。

3) NTSC 与 iGMAS 的预报数据

使用 NTSC 宽带 VLBI 系统自主测量,解算的 `NTSC_UT1` 与 iGMAS 的最终/快速 ΔLOD 产品融合,得到融合后的 UT1 和 ΔLOD 产品。并基于近期此融合序列与历史 C04 数据通过 LS+AR 方法进行 UT1 数据的预报。

本文使用了 2021 年 8~10 月期间 IERS 发布的 `finals2000A.daily` 文件中的每日 UT1 预报数据、基于 `IVS_UT1` 与 `IGS_ ΔLOD` 融合产品每日的预报数据、基于 `NTSC_UT1` 与 `iGMAS_ ΔLOD` 融合产品每日的预报数据。该预报数据的作用是对基于超快速 ΔLOD 与 UT1 数据融合的近实时 UT1 数据进行比对分析。

1.4 事后精密 EOP 数据

事后精密 C04 序列,从巴黎天文台服务器或者 IERS 下载。该产品结合了国际 VLBI 大地和 IVS、IGS、国际激光测距服务(international laser ranging service, ILRS)、国际星载多普勒测轨和无线电定位系统服务(international DORIS service, IDS),4 个国际组织的数据。其产品精度最高,但产品时效性较差,主要用于精度评估。

2 数据处理方法

近实时 UT1 产品对于卫星定轨,深空探测等具有重要意义,然而国内外均未有公开的近实时融合 UT1 产品(超快速融合 UT1 产品)。权威的国际 IERS 组织目前只

公布了延迟 30 天的事后精密产品(月报)及延迟 7/1 天的快速产品(周报和每日产品)。

本文填补了超快速融合 UT1 产品的缺失,提出使用 GNSS 的超快速 ΔLOD 序列与 VLBI 的 UT1 序列进行融合,即结合 ΔLOD 产品的时效性与连续性及 UT1 产品的准确性与稳定性,得到连续且稳定的近实时超快速融合 UT1 产品。为了弥补 UT1 产品的时效性不足,国内外许多专家利用已有历史 UT1(事后与快速)数据进行了预报研究,并取得了不错的成绩。然而预报模型的建立深度依赖历史数据,历史数据的增加将会促进预报模型进一步优化。

2.1 日长变化与世界时的关系

地球自转的“日长变化”,用 ΔLOD 来表示,定义为^[19]:

$$\Delta\text{LOD} = -\frac{d(\text{UT1} - \text{TAI})}{dt} = -\left(\frac{d\text{UT1}}{dt} - \frac{d\text{TAI}}{dt}\right) \quad (1)$$

UT1 是指格林尼治平太阳时,是以地球自转运动为参考的时间系统,反映了在惯性坐标系下的地球自转角(earth rotation angle, ERA),与 UT1 相比,国际原子时(international atomic time, TAI)较稳定^[20], $(\text{UT1}-\text{TAI})$ 差值的累积,反映了地球自转每天的长度在变化;“日长变化”可视作“地球自转角速度”与“均匀角速度”的差,地球自转的速率增加时, ΔLOD 减小,日长相对变短,反之亦然。

2.2 融合算法

目前国际上 UT1 融合方法的主流分别是 Vondrak 算法^[21]与卡尔曼滤波算法^[22]。通过式(1),可将 ΔLOD 作为 UT1 的一阶导数。满足 Vondrak 算法的使用条件(两种数据中,前者为后者的导数),本文使用改进的 Vondrak 算法对超快速 ΔLOD 和 UT1 数据进行融合处理。

Vondark 组合平滑方法是捷克科学家 Vondrak 和 Cepek 在 2000 年提出的,它通过对两种互不相关的技术测得某一参数序列及该参数的导数序列进行平滑处理,可有效降低噪声水平,且使其更加连续稳定^[23]。设有两组独立的观测数据,即 VLBI 观测的 UT1 数据 (x_i, y_i) , $(i = 1, 2, \dots, N)$ 与 GNSS 观测的 ΔLOD 数据 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) , $(i = 1, 2, \dots, N)$,通常前者的间距较大,后者的时间分辨率较高,即两者的观测频率略有不同。其中 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 观测数据满足 (x_i, y_i) 观测数据的导数, Vondark 平滑方法公式如下:

$$Q = S + \frac{1}{\lambda^2}F + \frac{1}{\lambda^2}\bar{F} = \min \quad (2)$$

$$F = \sum_{i=1}^N p_i (y'_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^N \bar{p}_i (\bar{y}'_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$S = \int_{x_j}^{x_N} [f'''(x)]^2 dx \quad (5)$$

式中: F 为 UT1 观测数据拟合度, y'_i 为 UT1 观测数据的平滑值, p_i 为 UT1 观测数据的权重; \bar{F} 为 Δ LOD 观测数据的拟合度, 即 UT1 的一阶导数, \bar{y}'_i 为 Δ LOD 观测数据的平滑值, \bar{p}_i 为 Δ LOD 观测数据的权重; S 为平滑度, 三阶差分平方和, 其中 $y = f(x)$, 三阶差分平方和越小, 则代表曲线越光滑; $1/\lambda^2$ 与 $1/\bar{\lambda}^2$ 是平滑因子, 具有调节平滑度与拟合度的功能。

因 $f(x)$ 的表达式是未知的, 故 Vondrak 平滑函数采用 4 个相邻点的三次拉格朗日多项式来表示:

$$L_i(x) = \sum_{k=0}^3 \left(\prod_{\substack{j=0 \\ (j \neq k)}}^3 \frac{(x - x_{i+j})}{(x_{i+k} - x_{i+j})} \right) y'_{i+k} \quad (6)$$

对式(6)求三阶导, 代入式(5), 可得 S 的具体表达式。使 Q 达到极小值, 须满足:

$$\frac{\partial Q}{\partial y_i} = \frac{\partial S}{\partial y_i} + \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial F}{\partial y_i} + \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \frac{\partial \bar{F}}{\partial y_i} = 0 \quad (7)$$

将式(3)~(6)代入式(7), 进行解算可得到具体的方程解。

2.3 参数优化

由式(7)可知, 通过调节 $1/\lambda^2$ 与 $1/\bar{\lambda}^2$ 两个平滑因子, 可使搜索到的平滑曲线与观测值及其一阶导数的“拟合度”和曲线的“平滑度”之间找到折衷。平滑因子越大, 曲线的平滑程度越弱, 观测数据及其一阶导数的权重就越大, “平滑”值就越接近观测值。

在实际应用中, 平滑因子的合理选取将影响最终的平滑效果, 传统的选取方法有, 测量误差法, 平滑误差法, 频率响应法, 交叉认证法^[24]。由于 VLBI 观测 UT1 数据集时间分辨率的随机性及 GNSS 观测 Δ LOD 精度的不稳定性, 本文拟采用 MCMC 算法进行平滑因子的模拟实验。如文献^[25]和^[26]所述, 不论样本多么复杂, MCMC 总能得到收敛的马尔科夫链。故采用 MCMC 算法对 UT1 与 Δ LOD 的权重取值进行大样本的随机采样, 统计不同的权重取值下的融合精度, 使权重比值与融合精度收敛于一个稳定的值。此时的权重比值即为最优的平滑因子之比。

本文使用 Vondrak 组合平滑算法及 MCMC 马尔科夫链蒙特卡罗模拟算法, 对 UT1 与超快速 Δ LOD 数据进行融合。该方法将 UT1 序列和超快速 Δ LOD 序列通过 Vondrak 算法进行融合, 并结合马尔科夫链蒙特卡罗模拟方法研究融合过程中 UT1 和超快速 Δ LOD 的最优权比, 从而得到近实时连续高精度的超快速融合 UT1 序列。

3 国外实测数据融合分析

首先需对 IVS 与 IGS 的数据进行预处理, 然后将预处理之后的数据进行融合解算, 最终将融合结果(即近实时 UT1)、IERS_dalily 数据的当日预报数据、基于 IVS 与 IGS 融合的当日预报数据(未使用超快速 Δ LOD)分别与对应日期的精密 C04 进行比对分析, 评估精度。

IVS 预处理: 使用 IVS 下载的时延序列, 进行最小二乘解算得到 IVS_UT1, 选择儒略日 59 396~59 487 的数据, 依次展开, 合成 2021 年 8 月 1 日~9 月 30 日的共 60 个文件, 每个文件控制 30 天数据。

IGS 预处理: 选择儒略日 59 396~59 487 天的数据, 依次展开, 合成 2021 年 8 月 1 日~9 月 30 日的共 60 个文件, 每个文件控制 30 天数据。在合成每天的文件时, 前面的 29 天数据使用快速和事后精密 Δ LOD 数据, 最后一天使用超快速 Δ LOD(00:00 时刻的)。比如 2021 年 8 月 1 日(简化儒略日 59 427), 包含儒略日 59 396~59 427 天的数据, 其中儒略日 59 396~59 426 的数据为最终或者快速 Δ LOD 数据, 而儒略日 59 427 为超快速 Δ LOD 数据。

融合解算: 使用 Vondrak 方法将上述预处理后的每天的 IVS_UT1 数据文件与每天的 IGS_ Δ LOD 数据文件进行融合解算, 得到当日的融合近实时 UT1。

权重选取: 在融合过程中, 使用 MCMC 算法寻找最佳权重, 经过 1 000 次的模拟实验后, 得出当 UT1/ Δ LOD 的比值在 2.725 附近收敛, 此时融合后的精度也收敛于稳定值。

精度评估: 由于比对的对象为当日的融合数据与当日的预报数据, 一般的事后 UT1 精度评估方法将不再适用, 故采用均方根误差(root mean squared error, RMSE)的方法进行评估。

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_j^i - O_j^i)^2} \quad (8)$$

其中, P_j 为 j 点的预报/融合值, O_j 为 j 点对应的 IERS 事后精密值, i 为预报/融合跨度, n 为预报/融合期数。本文统计 60 期 1 天的预报/融合产品与 IERS 事后精密比对, 分别计算对应的 UT1 的偏差, 并将偏差的 RMSE 作为 UT1 的精度。

如图 1 所示, 图例从上到下依次表示为: 使用基于 IGS 超快速 Δ LOD 与 IVS_UT1 融合得到的当日近实时 UT1 数据(使用最优权比)与事后精密 C04_UT1 的差值、IERS_dalily 数据的当日预报数据与事后精密 C04_UT1 的差值、基于 IVS 与 IGS 融合的当日预报数据与 C04_UT1 的差值(未使用超快速 Δ LOD)。其中横坐标为简化儒略日, 纵坐标为 UT1 差值, 单位为 μ s。(图例和图表中

的_PRE 代表 prediction, 表示预报产品, _COM 代表 combination, 表示融合产品)。

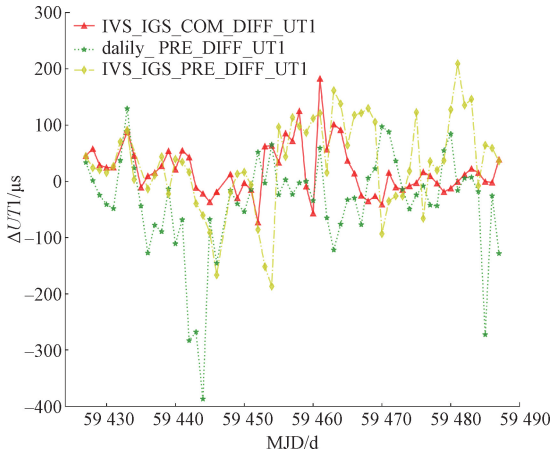


图 1 基于 IVS_IGS 融合的近实时 UT1 数据比对分析

Fig. 1 Comparison and analysis of combination UT1 data based on IVS_IGS

进一步采用柱状图对上图差值分析, 如图 2 所示; 图 2 横坐标代表 UT1 差的数值, 纵坐标表示数量。由图 2 可知, 基于 IVS_IGS 超快速 Δ LOD 融合后的 UT1 数据相对 IERS 事后精密序列的偏差较 IERS_dalily 数据的当日预报数据与 C04_UT1 的差值以及 IVS 与 IGS 融合的当日预报数据与 C04_UT1 的差值更集中于零点附近, 且分布集中, 融合后的近实时 UT1 其最值较其余两者更小。

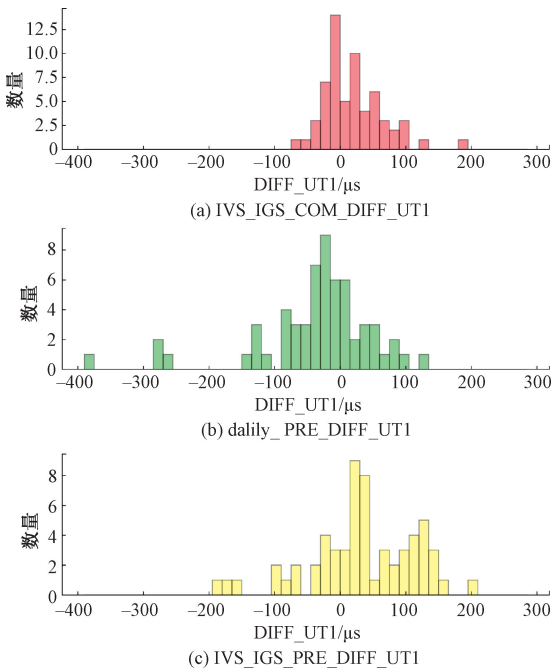


图 2 IVS_IGS 融合的近实时 UT1 精度比对分析

Fig. 2 Comparison and analysis of near real-time UT1 accuracy of IVS_IGS combination

如表 1 所示: 使用超快速 Δ LOD 数据融合的近实时 UT1 均方根误差为 $45.91 \mu\text{s}$, 而未使用超快速 Δ LOD 数据的预报数据均方根误差为 $81.20 \mu\text{s}$, IERS 发布的 dalily 文件的每日预报数据均方根误差为 $91.67 \mu\text{s}$ 。使用超快速 Δ LOD 融合后近实时 UT1 的均方根误差、均值、中位数、最小值均比 IERS 每日预报产品数据小, 使用超快速 Δ LOD 融合, 可得到更连续、更稳定的且实时性更强的 UT1 序列, 其精度比 IERS 每日预报产品提高了 49%, 比基于 IVS_IGS 数据融合的预报算法提高了 43%。

表 1 基于 IVS_IGS 融合的近实时 UT1 精度统计分析
Table 1 Statistical analysis of near real-time UT1 accuracy based on IVS_IGS combination

产品	统计特征量/ μs				
	均方根误差	均值	中位数	最大值	最小值
IVS_IGS_COM	45.91	19.50	14.20	182.80	-73.10
IVS_IGS_PRE	81.20	33.18	34.55	209.00	-180.70
dalily_PRE	91.67	-37.58	-24.05	129.10	-387.00

4 国内实测数据融合分析

国内数据处理方法与国外数据处理类似, 首先需对 NTSC 与 iGMAS 的数据进行预处理, 然后将预处理之后的数据进行融合解算, 最终将融合结果(即近实时 UT1)、IERS_dalily 数据的当日预报数据、基于 NTSC 与 iGMAS 融合的当日预报数据(未使用超快速 Δ LOD)分别与对应日期的精密 C04 进行比对分析, 评估精度。

NTSC 预处理: 采用 2021 年 NTSC 的宽带 VLBI 系统的 UT1 实测数据集, 选择儒略日 59 396~59 487 的数据, 依次展开, 合成 2021 年 8 月 1 日~9 月 30 日的共 60 个文件, 每个文件控制 30 天数据。iGMAS 预处理: 选择儒略日 59 396 到 59 487 天的数据, 依次展开, 合成 2021 年 8 月 1 日~9 月 30 日的共 60 个文件, 每个文件控制 30 天数据, 合成方法参见 IGS。

融合解算: 使用 Vondrak 方法将上述预处理后的每天 NTSC_UT1 数据文件与每天的 iGMAS_ Δ LOD 数据文件进行融合解算, 得到当日的融合近实时 UT1。在融合过程中, 使用 MCMC 算法寻找最佳权重, 经过大量采样实验, 得出当 UT1/ Δ LOD 的数值在 0.700 (UT1/ Δ LOD) 附近收敛。

如图 3、4 所示, 基于 NTSC_iGMAS 超快速 Δ LOD 融合后的近实时 UT1 数据(使用最优权重)与 IERS 事后精密序列的偏差较基于 NTSC_iGMAS 融合的当日预报数据(未使用超快速 Δ LOD)与 C04_UT1 的差值分布更为集

中且稳定。如表2所示,使用超快速 Δ LOD 数据融合的近实时 UT1 均方根误差为 $87.40 \mu\text{s}$,而未使用超快速 Δ LOD 数据的预报数据均方根误差为 $171.76 \mu\text{s}$,IERS 发布的 daily 文件的每日预报数据标准差为 $91.67 \mu\text{s}$ 。使用超快速 Δ LOD 融合后近实时 UT1 的均方根误差、最小值均比 IERS 每日预报产品数据小,使用超快速 Δ LOD 融合,可得到更连续、更稳定的且实时性更强的 UT1 序列,其精度比 IERS 每日预报产品提高了 4%,比基于 NTSC_iGMAS 数据融合的预报算法提高了 49%。

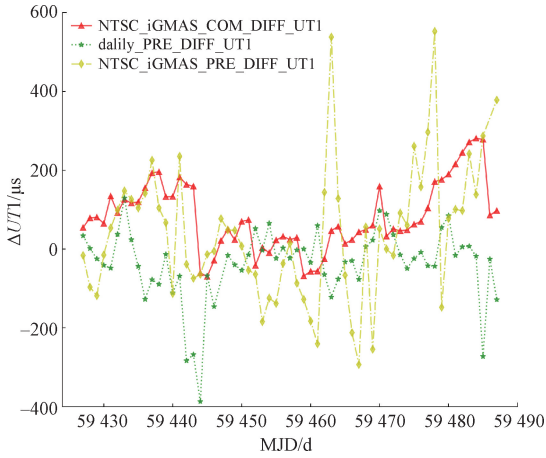


图3 基于 NTSC_iGMAS 融合的近实时 UT1 数据比对分析
Fig. 3 Comparison and analysis of combination UT1 data based on NTSC_iGMAS

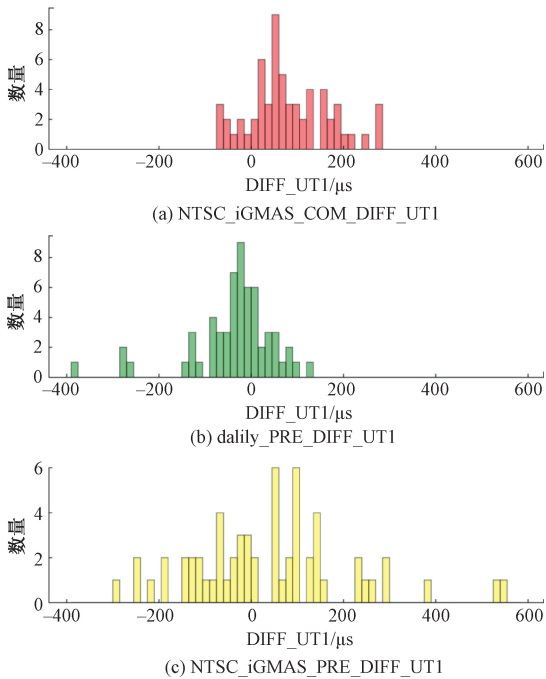


图4 NTSC_iGMAS 融合的近实时 UT1 精度比对分析
Fig. 4 Comparison and analysis of near real-time UT1 accuracy of NTSC_iGMAS combination

表2 基于 NTSC_iGMAS 融合的近实时 UT1 精度统计分析
Table 2 Statistical analysis of near real-time UT1 accuracy based on NTSC_iGMAS combination

产品	统计特征量/ μs				
	均方根误差	均值	中位数	最大值	最小值
NTSC_iGMAS_COM	87.40	81.63	64.60	280.56	-69.90
NTSC_iGMAS_PRE	171.76	39.32	47.80	552.20	-293.20
daily_PRE	91.67	-37.58	-24.05	129.10	-387.00

5 结 论

针对 UT1 数据存在滞后性的问题,无法满足用户实时性的需求,提出使用超快速 Δ LOD 序列进行近实时 UT1 序列研究。本文弥补了超快速融合 UT1 产品的缺失,并为 UT1 预报产品提供了数据支撑。采用 Vondrak 融合方法将 UT1 数据与超快速 Δ LOD 进行融合,且在融合过程中使用 MCMC 算法进行权比的最优化 (UT1/ Δ LOD),并结合国外 IVS 与 IGS 数据,国内 NTSC 与 iGMAS 数据进行相关研究,结论如下:

- 1) 对于 IVS 与 IGS 近实时 UT1 融合实验,得出使用超快速 Δ LOD 进行融合后,可得到稳定且精度与实时性更高的 UT1 数据。其精度比 IERS 每日预报精度提升 49%。
- 2) 对于 NTSC 与 iGMAS 近实时 UT1 融合实验,得出使用超快速 Δ LOD 进行融合后,可得到稳定且精度与实时性更高的 UT1 数据。其精度比 IERS 每日预报精度提升 4%。

参考文献

[1] SEKODO M, TAKIGUCHI H, KOYAMA Y, et al. Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI [J]. Earth Planets Space, 2008, 60:865-870.

[2] WANG G L, XU M H. An analysis of UT1 determined by IVS intensive observations [J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2012, 36:408-416.

[3] NASTULA J, CHIN T M, GROSS R, et al. Smoothing and predicting celestial pole offsets using a Kalman filter and smoother [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94 (3) : 2-17.

[4] GAMBIS D, LUZUM B. Earth rotation monitoring, UT1 determination and prediction [J]. Metrologia, 2011, 48(4) :165-170.

- [5] 王广利, 徐明辉. 利用 IVS 加强观测确定 UT1 的分析研究[J]. 天文学报, 2012, 53(3): 222-229.
WANG G L, XU M H. The analysis of UT1 determined by IVS intensive observations [J]. Acta Astronomica Sinica, 2012, 53(3): 222-229.
- [6] BIZOUARD C, GAMBIS D. The combined solution C04 for earth orientation parameters consistent with international terrestrial reference frame 2005[C]. Proc. of International Association of Geodesy Symposium. Munich; Drewes H, 2009; 265-270.
- [7] MCCARTHY D D, PETIT G. IERS conventions (2003)[R]. International Earth Rotation and Reference Systems Service (Iers)(Germany), 2004.
- [8] ARTZ T, BERNHARD L, NOTHNAGEL A, et al. Methodology for the combination of sub-daily earth rotation from GPS and VLBI observations[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(3): 221-239.
- [9] GUO J Y, LI Y B, DAI C L, et al. A technique to improve the accuracy of earth orientation prediction algorithms based on least squares extrapolation [J]. Journal of Geodynamics, 2013 (70): 36-48.
- [10] 陈略, 唐歌实, 胡松杰, 等. 高精度 UT1-UTC 差分预报方法研究[J]. 深空探测学报, 2014, 1(3): 230-235.
CHEN L, TANG G SH, HU S J, et al. Research on high-precision ut1-utc difference forecasting method [J] Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(3): 230-235.
- [11] DILL R, DOBSLAW H, THOMAS M. Improved 90-day Earth orientation predictions from angular momentum forecasts of atmosphere, ocean, and terrestrial hydrosphere[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(3): 287-295.
- [12] KOSEK W, KALARUS M, JOHNSON T J, et al. A comparison of LOD and UT1-UTC forecasts by different combination prediction techniques [J]. Artificial Satellites, 2005, 40(2): 119-125.
- [13] YU L, GUO M, HU DD, et al. Short-term prediction of UT1-UTC by combination of the grey model and neural networks [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(2): 524-531.
- [14] GAMBIS D, BIZOUARD C. Monitoring UT1 from astro-geodetic techniques at the EOP Center of the IERS[C]. Proc. of the 28th IAU General Assembly. Paris: International Astronomical Union, 2009; 207-208.
- [15] 张志斌, 王广利, 刘祥, 等. 中国 VLBI 网观测地球定向参数能力分析[J]. 武汉大学学报, 2013, 38(8): 911-915.
ZHANG ZH B, WANG G L, LIU X, et al. Analysis of EOP determination via Chinese VLBI network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(8): 911-915.
- [16] 李西顺, 吴元伟, 姚当, 等. 基于国内宽带 VLBI2010 系统及 iGMAS 的 UT1/ Δ LOD 数据融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1644-1651.
LI X SH, WU Y W, YAO D, et al. Combining UT1/ Δ LOD with domestic broadband VLBI2010 system and iGMAS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(5): 1644-1651.
- [17] YAO D, WU W W, ZHANG B, et al. The NTSC VLBI system and its application in UT1 measurement [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(6): 153-162.
- [18] WOODEN W, LUZUM B, STAMATAKOS N. Current status and future directions of the IERS RS/PC predictions of UT1[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2009, 5(H15): 218-218.
- [19] SENIOR K, KOUBA J, RAY J. Status and prospects for combined GPS LOD and VLBI UT1 measurements[J]. Artificial Satellites, 2010, 2(45): 57-72.
- [20] 刘民, 王乾娟, 李军. 空间守时系统概念研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 1-6.
LIU M, WANG Q J, LI J. Study on the concept of space time keeping system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 1-6.
- [21] GAMBIS D, BIZOUARD C. Monitoring UT1 using both VLBI and GPS estimates [C]. Proc. of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Bordeaux; European VLBI for Geodesy and Astrometry, 2009; 24-25.
- [22] NILSSON T, KARBON M, SOJA B, et al. Rapid UT1 estimation by combining VLBI intensives with GNSS[J]. International Association of Geodesy, 2016, 150(143): 521-526.

- [23] VONDRAK J, CEPEK A. Combined smoothing method and its use in combining earth orientation parameters measured by space techniques [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 12 (1): 347-359.
- [24] 姜萌,董绍武,武文俊,等. 基于 Vondark-Cepek 滤波的氢铯时间尺度融合方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(8):158-166.
JIANG M, DONG SH W, WU W J, et al. Fusion of hydrogen and cesium time scale based on Vondark-cepek filter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(8):158-166.
- [25] 叶佳敏,彭黎辉. 基于 MCMC 方法的电容成像图像重构算法[J]. *仪器仪表学报*, 2012,33(3):481-490.
YE J M, PENG L H. Markov chain Monte Carlo (MCMC) based image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012,33(3):481-490.
- [26] 张舒然,武岩波,朱敏. 基于 MCMC 采样器的簇稀疏水声信道估计方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(8): 201-212.
ZHANG SH R, WU Y B, ZHU M. An estimation method of clustered sparsity underwater acoustic channel based on MCMC sample [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(8):201-212.

作者简介



李西顺, 2017 年于山东理工大学获得学士学位, 现为中国科学院国家授时中心博士研究生, 主要研究方向为世界时 UT1 解算及精度提升。

E-mail: lixishun@ntsc.ac.cn

Li Xishun received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at the National Time Service Center, Chinese Academy of Science. His main research interests include UT1 solution and accuracy improvement of universal time.



杨旭海(通信作者), 1995 年于东北大学获得学士学位, 分别在 2000 年和 2003 年于中国科学院获得硕士学位和博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为 GNSS 时间传递与轨道确定。

E-mail: yyang@ntsc.ac.cn

Yang Xu Hai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from University of Northeast in 1995, and received his M. Sc. and Ph. D. degree both from Chinese Academy of Science in 2000 and 2003, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at National Time Service Center, CAS. His main research interests include GNSS time transfer and orbit determination.