



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响
作者: 黄扬金, 常国宾, 宦越洋
DOI: 10.13203/j.whugis20240149
收稿日期: 2024-09-28
网络首发日期: 2024-10-15
引用格式: 黄扬金, 常国宾, 宦越洋. 长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240149>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240149

引用格式：

黄扬金, 常国宾, 宦越洋. 长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024. DOI: 10.13203/j.whugis20240149 (HUANG Yangjin, CHANG Guobin, HUAN Yueyang. Modeling of Colored Noise in Long-term GNSS Coordinate Series and its Impact[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024. DOI: 10.13203/j.whugis20240149)

长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响¹

黄扬金¹, 常国宾¹, 宦越洋¹

¹ 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州, 221116

摘要 研究 GNSS(Global Navigation Satellite System)坐标序列数据中包含的有色噪声对 GNSS 坐标序列模型分析、特别是速度分析具有重要价值。在以往的工作中, 研究者专注于 10-15 年的中短期坐标序列的有色噪声建模, 较少关注坐标序列经过长期积累后对有色噪声建模的变化。针对近 30 年来美国加州地区 26 个国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)基准站的 78 个坐标序列, 运用极大似然估计法进行噪声模型参数估计, 比较了 8 种常用的噪声模型, 以赤池信息量准则进行优选。实验结果表明, 在 N、U 和 E 方向上, 以 WN+PL+RWN(White Noise +Power-law Noise +Random Walk Noise)为最优模型的比例分别为 61.5%、57.7% 和 42.3%。以 WN+PL(White Noise +Power-law Noise)为对照模型进行速度不确定度(标准差)估计, 发现最优模型的速度不确定度平均值在 N、E 和 U 方向上分别是对照模型的 5.2 倍、5.0 倍和 4.0 倍。本文的研究表明: (1)采用不同的噪声模型时速度不确定度参数的估计相差较大, 为合理、客观地表征速度估计的不确定性, 建议在实际应用中进行精细的有色噪声建模分析; (2)16 年以上 GNSS 坐标序列大多具备探测 RWN 的潜力, 不含 RWN 的模型对速度不确定度存在较明显的精度高估现象, 因此在长期的 GNSS 坐标序列数据中 RWN 的影响不容忽视。

关键词: 长期 GNSS 坐标序列; 有色噪声; 极大似然; 赤池信息量准则; 速度不确定度

Modeling of Colored Noise in Long-term GNSS Coordinate Series and its Impact

HUANG Yangjin¹ CHANG Guobin¹ HUAN Yueyang¹

¹ School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Objectives: The presence of colored noise in Global Navigation Satellite System (GNSS) coordinate time series data holds significant value for the analysis of GNSS coordinate models, particularly in velocity analysis. In previous studies, researchers have focused on modeling colored noise in the short to medium-term coordinate series of 10-15 years, paying less attention to the variation of long-term accumulation of coordinate series on colored noise modeling. **Methods:** Therefore, we investigated 78 coordinate series from 26 International GNSS Service (IGS)

收稿日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(42074001), 中国矿业大学研究生创新计划项目(2024WLJCRCZL244)。

第一作者: 黄扬金, 硕士生, 研究方向为 GNSS 坐标序列处理技术。huangyangjin.01@foxmail.com

通信作者: 常国宾, 博士, 教授。guobinchang@hotmail.com

stations in California over a period of nearly 30 years. We compared eight commonly used noise models by utilizing the maximum likelihood estimation method to estimate the parameters of noise models and the Akaike Information Criterion is applied to select the optimal model among the alternative models. **Results:** The results indicate that among the selected IGS reference stations, 61.5% of the series exhibit WN+PL+RWN (White Noise + Power-law Noise + Random Walk Noise) as the optimal model in the N direction, while this proportion is 57.7% and 42.3% in the U direction and E direction, respectively. Then the velocity uncertainty (standard deviation) estimation is performed between the optimal model and the control model WN+PL (White Noise + Power-law Noise). We found that the average velocity uncertainty of the preferred model is 5.2 times higher than the control model in the N direction, 5.0 times higher in the E direction, and 4.0 times higher in the U direction. **Conclusions:** the research in this paper demonstrates the following: the choice of noise models has a significant impact on the estimation of velocity uncertainty parameters, the results vary apparently when different noise models are used. In order to accurately and objectively represent the uncertainty of velocity estimates, it is advisable to carry out meticulous analysis of colored noise modeling in practical applications. Additionally, most of GNSS coordinate series with a duration of over 16 years have the potential to detect RWN, and models without RWN tend to significantly overestimate velocity uncertainty. Hence, the impact of RWN in long-term GNSS coordinate series data cannot be disregarded.

Key words: Long-term GNSS coordinate series, Colored noise, Maximum likelihood estimation, Akaike Information Criterion, Velocity uncertainty

GNSS 坐标序列对维持国际地球参考框架, 监测地壳运动、地质灾害监测与预警、重特大工程安全性评价等科学研究和实际应用具有重大价值^[1-4]。在 GNSS 坐标序列分析中, 采用不同的噪声模型将显著影响相关参数的估计, 尤其是相当重要的速度参数估计。使用不恰当的噪声模型会导致速度不确定度被低估^[5-6], 即速度估计的实际精度低于其名义精度。精度评定的一致性要求名义精度能够客观反映实际精度, 在实际应用中这一要求往往难以满足, 退而求其次并考虑质量控制因素, 在高估精度和低估精度两者中应倾向于选择后者, 即在不同噪声模型计算的测站速度接近的情况下, 倾向于选择速度不确定度更大的模型^[5]。

表 1 文中噪声模型缩写索引

Tab 1. Index of abbreviations for noise models in the paper

噪声名称	Noise Name in English	缩写
白噪声	White Noise	WN
闪烁噪声	Flicker Noise	FN
幂律噪声	Powerlaw Noise	PL
随机漫步噪声	Random Walk Noise	RWN
广义高斯-马尔可夫噪声	Generalized Guass-Markov Noise	GGM

近年来 GNSS 坐标序列噪声建模研究得到了广泛的关注。为便于表述, 将各种噪声模型的缩写整理于表 1 中。世纪之交学者们发现传统使用的白噪声模型会造成非常严重的速度估计精度高估问题, 当采用更合理的有色模型时, 速度估计标准差是采用白噪声模型时的 5~11 倍^[7-8]; 由此拉开了 GNSS 坐标序列有色噪声建模研究的序幕。Zhang 等^[9]研究两次地震期间 IGS 站点的位置序列, 发现白噪声和闪烁噪声组合模型(White Noise + Flicker Noise, WN+FN)拟合了该数据, 并且速度不确定度比白噪声模型大 3~6 倍。Mao 等^[10]对分布在全球各处的 23 个测站 GNSS 坐标序列摘取其中 3 年进行分析, 得出了 WN+FN 组合模型是 GNSS 坐标序列噪声符合效果最好模型的结论。Langbein^[11]对美国内华达州

南部和加利福尼亚州地区的 236 个 GNSS 测站进行极大似然分析, 发现不同地区的最优噪声模型存在差异性, 并不都是某个特定的噪声模型。蒋志浩^[12]将参考坐标系替换为 2000 国家大地坐标系, 对 2001-2010 年的国家 CORS 网坐标序列进行噪声分析, 结果表明进行滤波处理后坐标序列的噪声特性主要表现为白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声组合模型(White Noise + Flicker Noise + Random Walk Noise, WN+FN+RWN), 同时确定单独使用白噪声模型会导致速度不确定度低估 2~6 倍。田云锋^[13]研究中国地壳运动, 对相关观测网络进行噪声分析, 发现除 WN+FN 组合模型外, 有接近半数测站东方向(E 方向)的噪声特性可以表示随机漫步噪声和广义高斯-马尔可夫噪声组合模型(Random Walk Noise + Generalized Guass-Markov Noise, RWN+GGM)。李昭^[14]分析中国境内 IGS 基准站点的 GNSS 坐标序列后发现: 中国不同地区的 IGS 基准站噪声不都是呈现出同种噪声特性, 而统计结果表明可以认为 WN+FN 或白噪声和幂律噪声组合模型(White Noise + Powerlaw Noise, WN+PL)这两种组合模型是能比较好地描述 GNSS 噪声的噪声模型。这些研究充分说明 GNSS 坐标序列的实际噪声特性较为复杂, 且与之相适应的噪声模型种类并不单一, 噪声模型的优选工作对于研究 GNSS 坐标序列噪声具有重要意义。

在以往的 GNSS 坐标序列噪声建模与模型优选工作中, 研究者往往专注于 10~15 年的中短期坐标序列, 而较少关注随时间积累形成的长期序列对于 GNSS 坐标序列噪声带来的影响^[15]。Langbein 和 Johnson^[16]指出有些大地测量数据中可能含有 RWN, 且这种噪声对结果的影响不可忽略, 并在 WN+FN 模型的基础上提出采用 WN+FN+RWN 组合模型, 但是因序列跨度较短而较难准确探测 RWN。Gazeaux^[17]等模拟了长度为 18 年的 GNSS 坐标序列, 并采用 WN+FN 组合噪声模型进行参数估计, 验证了测站噪声特性是随时间变化的这一观点。Gobron 等^[18]发现随着时间序列持续观测时间的增加, 通常使用的 WN+FN 模型可能需要改进, 因为更长的时间序列可能会揭示其他随机变化的低频特征, 并给出了 WN+FN+RWN 和 WN+GGM 两种方案。由此可见, 如今 GNSS 观测已经持续相当长的时间, 有必要重新审视噪声建模问题, 特别是长期 GNSS 坐标序列 RWN 的探测问题及 RWN 的存在对速度参数估计的影响问题。

为此, 本文将 8 种具有代表性的噪声模型作为备选模型, 选择了时长近 30 年的 78 组 GNSS 坐标序列进行分析, 采用极大似然法估计噪声模型参数, 并根据赤池信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)进行模型优选, 发现长期 GNSS 坐标序列大部分可以检测出 RWN, 并且 RWN 的存在与否对速度不确定度的估计有着较大的影响。

1 方法与数据

1.1 模型参数求解

建立 GNSS 坐标序列噪声模型的最常采用且精度最高的方法是极大似然估计^[6,19]。极大似然方法中模型参数的最优估计应使得下式中的似然函数取得极大值:

$$L(\hat{\mathbf{v}}, \mathbf{C}_x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} \cdot (\det \mathbf{C}_x)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{C}_x^{-1} \hat{\mathbf{v}}\right) \quad (1)$$

式中 $\hat{\mathbf{v}}$ 代表单日解坐标序列中噪声振幅向量拟合后的残差, \mathbf{C}_x 是残差值对应的协方差矩阵, N 是

观测值坐标序列长度(单位是日), \det 是矩阵的行列式^[14]。通过调整协方差矩阵的方差分量使得 MLE 值取得最大值, 此时对应的噪声模型就是最优噪声模型^[20-21]。上式中似然函数的极大化等价于下式中负对数似然函数的极小化:

$$\begin{aligned} -2 \ln [L(\hat{\mathbf{v}}, \mathbf{C}_x)] &= \ln(\det \mathbf{C}_x) + \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{C}_x^{-1} \hat{\mathbf{v}} + N \ln(2\pi) \\ &\propto \ln(\det \mathbf{C}_x) + \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{C}_x^{-1} \hat{\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 模型性能评价准则

为获得更加可靠的估计结果, 本文采用赤池信息量准则作为评价准则对极大似然估计的噪声模型进行优选^[22]。该准则在 GNSS 坐标序列最优噪声模型选择中已多次成功应用^[23-24]。该方法通过不同噪声模型或其组合模型的 AIC 值判断模型的优劣。其一般表示为:

$$\text{AIC} = -2 \ln(L) + 2k \quad (3)$$

其中, L 为噪声模型的似然函数, k 是模型的变量个数, 也叫惩罚项。惩罚项可以在建模中避免出现过拟合现象。根据模型选择理论, AIC 值越小模型性能越优, 由此, 备选模型中 AIC 值最小的为最优模型。

1.3 实验数据与备选模型

本文采用的数据来源于美国内华达大学雷诺分校理学院下辖的内华达大地测量实验室(Nevada Geodetic Laboratory, NGL)解算的 GNSS 坐标序列产品(Blewitt, G., W. C. Hammond, and C. Kreemer (2018), *Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science*, Eos, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.), 共包含~20000 个全球 GNSS 台站坐标时间序列。本文仅选取了位于美国加州地区的 26 个 IGS 测站的坐标序列进行分析(图 1), 大部分测站的连续观测时间都超过 25 年(1994~2023 年; 图 2a)。此前的研究发现, 在连续观测时间超过 15 年的 GNSS 坐标序列中有更大的概率检测出低频率、长周期噪声, 例如 RWN^[16,24]。因此相较于前人的研究, 本文所使用的数据更利于开展噪声分析。大部分测站的观测连续性较好, 出现数据缺失的情况较少(Fig 2b), 这也有利于噪声的建模分析。本文采用 Hector^[25]软件进行 GNSS 坐标序列的噪声分析和参数估计, 该软件基于极大似然估计原理, 为测站速度相关参数估计提供可靠的参考, 针对有数据缺失的 GNSS 台站坐标时间序列也能进行无偏噪声估计。实验选取了 8 种噪声模型: FN、PL、GGM、WN+FN、WN+PL、WN+GGM、WN+FN+RWN 和 WN+PL+RWN。在以往的研究中, 他们曾被作为描述 GNSS 坐标序列中有色噪声的最优模型^[10-14,18]。

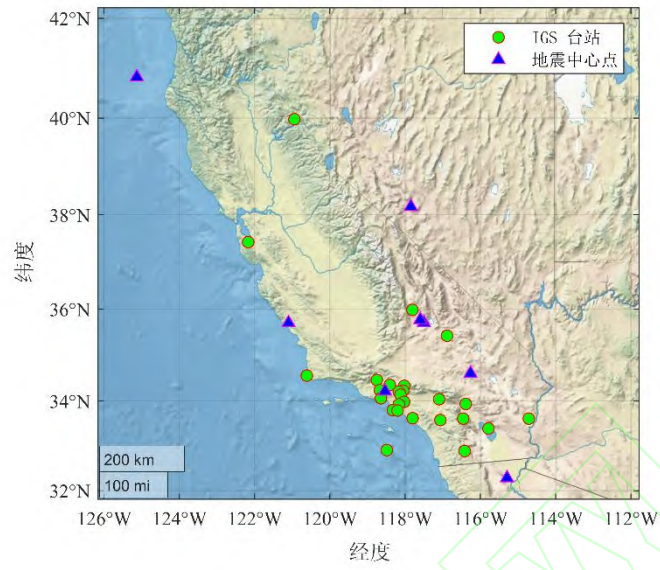
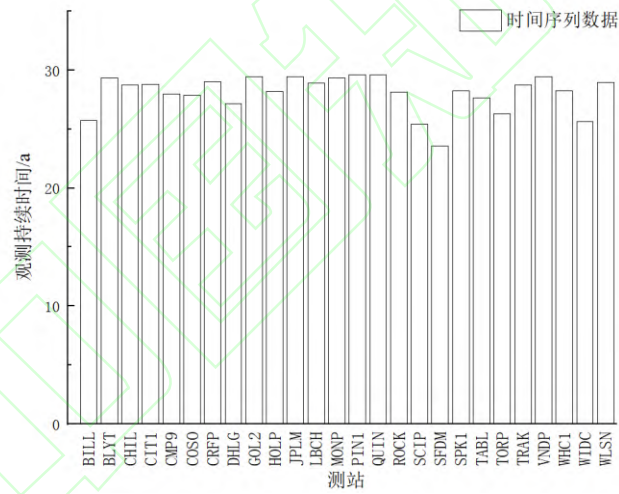
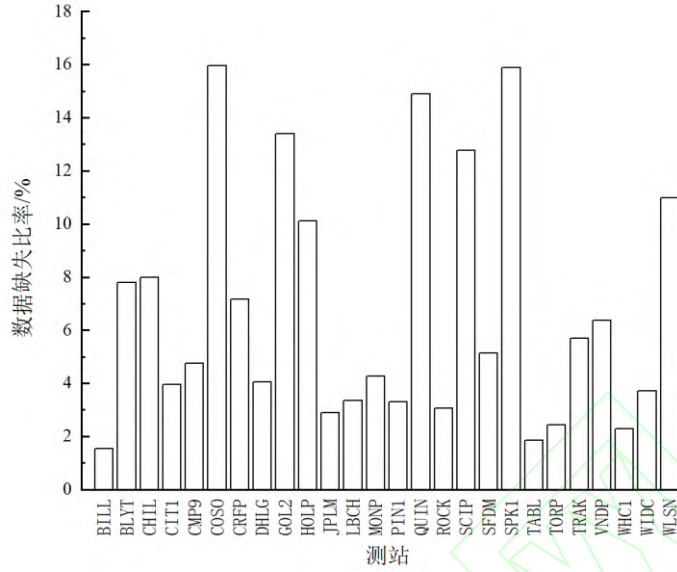


图 1 加州地区 IGS 基准站与 6 级以上地震中心点地理分布概况

Fig 1 Distribution of IGS stations and seismic centers of magnitude 6 or higher in California Region



(a) 持续时间示意图



(b) 数据缺失比率

图2 实验中所选取的加利福尼亚州区域 IGS 测站观测持续时间和数据缺失比率示意图

Fig. 2 Schematic diagram of observation duration and observation data loss ratio of IGS stations in california region selected in the experiment

2 结果和讨论

2.1 最优噪声模型讨论

Hector 软件在进行噪声模型分析时可以自动探测序列中存在的阶跃，加州区域 IGS 站经历多次地震和设备更换，各测站信息概况如表 2 所示。剔除粗差后进行噪声模型优选，结果见表 3，各个备选模型的优选结果占比则如图 3 所示。

实验结果表明，加利福尼亚州区域的 IGS 测站的最优噪声模型种类丰富。其中 WN+PL+RWN 模型的占比最大，在 N 方向占比达到 61.5%，U 方向和 E 方向分别为 57.7% 和 42.3%。其次是 WN+FN+RWN 模型和 WN+FN 模型，在所有测站分量中占比分别为平均 24.3% 和 14.1%，其他模型在最优模型中的占比则均未达到 5%。在所有备选模型中，WN+PL+RWN 模型相较于其他模型被优选的比例高得多，说明该噪声组合模型对加利福尼亚州地区的 IGS 站观测噪声符合效果更好。并且被优选时该模型 AIC 值与其他模型间存在较为显著的差异，以 WN+PL 模型为对照组将两者 AIC 值进行比较，得到的结果如图 4 所示。根据极大似然原理，该结果表明其性能较明显的优于其他模型。因此合理地认为所选测站的最优噪声模型是 WN+PL+RWN 模型。

同时值得注意的是，在所有测站分量的最优噪声模型评选结果中，包含 RWN 的组合模型 WN+PL+RWN 或 WN+FN+RWN 在 N/U/E 三个方向被优选的占比分别达到 88.5%、76.9%、69.2%，说明实验中的 GNSS 坐标序列中大多数都可以探测出 RWN。为探究考虑 RWN 的 GNSS 坐标序列需要的累计观测长度，将加州区域的 26 个测站的原始坐标序列进行截断，获得 4~20 年的截短序列。受限于文章篇幅，仅对 E 方向进行模型优选，得到结果如表 4 所示。观测长度 16 年，20 年的序列中 RWN 更容易被检测出来，且含 RWN 的模型被优选的概率相较于更短年限序列有大幅度的提升。因此认为 16

年以上的时间序列就需要充分考虑 RWN 的影响。本文实验结果说明前文提出的在更长时间跨度的 GNSS 坐标序列中大多存在着 RWN 噪声成分推测的合理性，与 Langbein 和 Johnson(1997)以及 Gobron(2022)的发现也相吻合。在研究 16 年以上长期 GNSS 坐标序列噪声特性的工作中可能需要充分考虑 RWN 的存在性，将其作为重要组分纳入要建立的噪声估计模型中。本文进行的实验选择的测站数量有限，以上结论仍需大量实验验证。

表 2 加州地区 IGS 测站信息概况

Tab 2 Information overview of IGS stations in California

站点名称	地震发生时间/aammdd	设备更换时间/aammdd
BILL	99OCT16 10APR04 19JUL06	99JUN10 05OCT26 20SEP21
BLYT	99OCT16 10APR04 19JUL06	95AUG03 00MAR30 09AUG19 22MAY11
CHIL	99OCT16 10APR04 19JUL06	95MAY30 12MAY08
CIT1	99OCT16 10APR04 19JUL06	98DEC18 09JUN09 12NOV07 13NOV26
CMP9	99OCT16 03DEC21 10APR04 19JUL06	11FEB16 22MAR22
CRFP	99OCT16 10APR04 19JUL06	95FEB02 95AUG09 12FEB21 12DEC12
COSO	99OCT16 10APR04 19JUL06 20MAY15	96APR29 10JAN08 19DEC12
DHLG	99OCT16 10APR04 12AUG26 19JUL06	00APR06 10OCT10 11MAY04 12JUN21
GOL2	94JAN17 99OCT16 10APR04 19JUL06	06SEP27
HOLP	99OCT16 10APR04 19JUL06	95MAY19 11APR05 12OCT12 21JUN23
JPLM	94JAN17 99OCT16 10APR04 19JUL06	94JUN14 12SEP11 18DEC25
LBCH	99OCT16 10APR04 19JUL06	99NOV03 01FEB03 09NOV07
MONP	99OCT16 09DEC16 10APR04 19JUL06	94JUL20 95JUN18 99JUL20 11JUL29
PIN1	94JAN17 99OCT16 10APR04 19JUL06	95AUG02 97JAN23 99JUL13 11MAY11
QUIN	94SEP01 05JUN15 14MAR10 19JUL06	03JUL09 09JAN15 17AUG31
ROCK	99OCT16 03DEC22 10APR04 19JUL06	95MAY22 12APR04 21JUN10
SCIP	99OCT16 10APR04 19JUL06	01JUL06 11JUN02 14OCT08
SFDM	03DEC22 10APR04 19JUL06	06MAR02 21APR04 19JUL06
SPK1	99OCT16 10APR04 19JUL06	99JAN05 11JUL29 22MAY04
TABL	99OCT16 10APR04 19JUL06	12FEB17 13NOV13
TORP	99OCT16 10APR04 19JUL06	99JAN06 11JAN06 32SEP20
TRAK	99OCT16 10APR04 19JUL06	95AUG04 09APR01 11MAY25 12DEC07
VNDP	94JAN17 99OCT16 10APR04 19JUL06	94MAY14 95AUG03 06OCT10 21DEC03
WHC1	99OCT16 10APR04 19JUL06	99JAN05 12MAR12
WIDC	99OCT16 10APR04 19JUL06	10SEP06 13NOV19
WLSN	99OCT16 10APR04 19JUL06	99JAN06 11APR29 21NOV05

表 3 加利福尼亚州区域各测站最优噪声模型评选结果概况

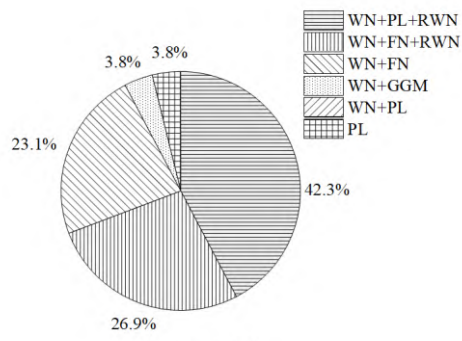
Tab. 3 Brief introduction of optimal noise model of the IGS stations in California region

备选模型	坐标分量	最优模型数量	测站分量名称
WN+PL+RWN	E 方向	11	BILL、COSO、DHLG、GOL2、LBCH、MONP、 QUIN、SCIP、VNDP、WIDC、WLSN
	N 方向	16	BILL、BLYT、CHIL、COSO、CRFP、HOLP、LBCH、 MONP、PIN1、QUIN、ROCK、SFDM、SPK1、TABL、 VNDP、WIDC
	U 方向	15	BILL、BLYT、CHIL、CIT1、COSO、CRFP、GOL2、HOLP、 MONP、PIN1、QUIN、SPK1、TABL、WCH1、WIDC
WN+FN+RWN	E 方向	7	BIYT、CMP9、HOLP、ROCK、TORP、TRAK、WCH1
	N 方向	7	DHLG、GOL2、JPLM、TORP、TRAK、WCH1、WLSN
	U 方向	5	DHLG、LBCH、ROCK、SFDM、TORP
WN+FN	E 方向	6	CHIL、CRFP、PIN1、SFDM、SPK1、TABL
	N 方向	1	SCIP
	U 方向	4	JPLM、SCIP、TRAK、WLSN
WN+PL	N 方向	1	CMP9
	U 方向	1	CMP9
WN+GGM	E 方向	1	JPLM
	N 方向	1	CIT1
PL	E 方向	1	CIT1
	U 方向	1	VNDP

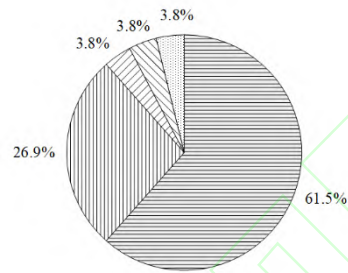
表 4 不同长度 GNSS 坐标序列模型优选结果

Tab. 4 Model selection results for different lengths of GNSS coordinate series

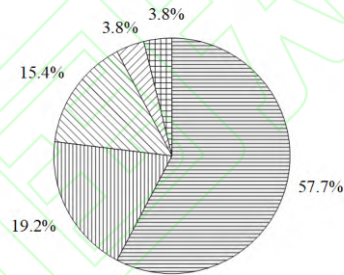
时间序列长度/a	观测起止时间	最优噪声模型	最优噪声模型占比/%	含 RWN 模型优选占比/%
4	2019/1/1~2023/1/1	WN+FN	42.3	11.5
8	2012/1/1~2010/1/1	WN+GGM	38.4	11.5
12	2008/1/1~2020/1/1	WN+FN	50.0	19.2
16	2001/1/1~2017/1/1	WN+FN+RWN	57.7	73.1
20	1997/1/1~2017/1/1	WN+FN+RWN	53.8	80.8



(a) E方向



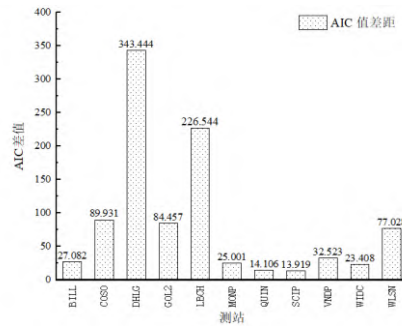
(b) N方向



(c) U方向

图3 实验中各个方向分量在 AIC 准则下的最优噪声模型分布

Fig. 3 The optimal noise model distribution of individual directional components in the experiment under the AIC criterion.



(a) E方向

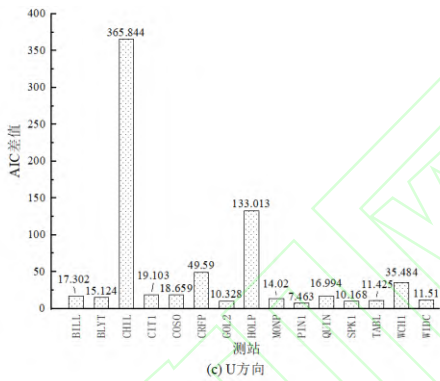
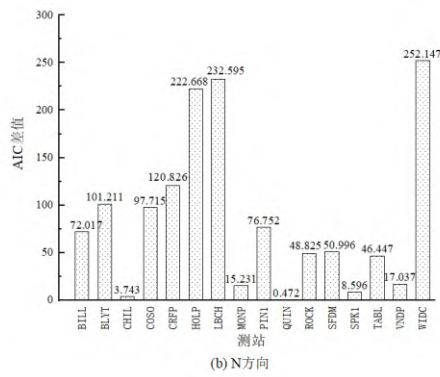
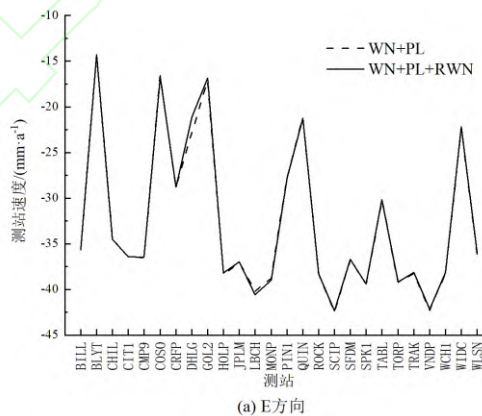


图 4 WN+PL+RWN 模型与 WN+PL 模型的 AIC 差值

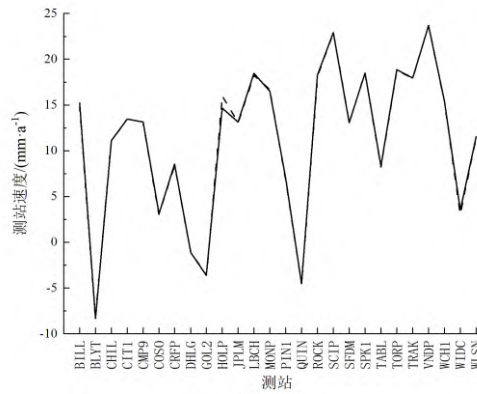
Fig. 4 The AIC difference between the WN+PL+RWN model and the WN+PL model

2.2 噪声模型对速度估计的影响

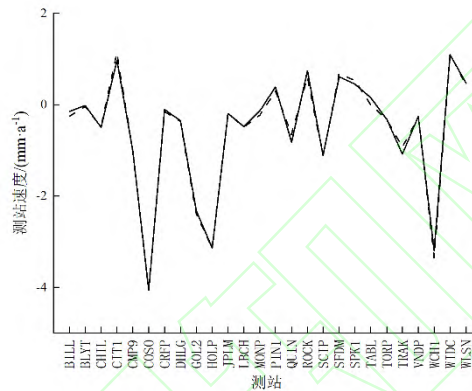
速度相关参数是 GNSS 坐标序列噪声的研究中的重要参数，采用不同的噪声模型描述 GNSS 坐标序列噪声可能对该参数的估计产生影响。本文关注了加利福尼亚州区域 78 个测站分量的最优噪声模型 WN+PL+RWN 和对照模型 WN+PL，这两个模型估计出的测站速度如图 5 所示，最优噪声模型 WN+PL+RWN 和对照模型 WN+PL 所得的测站速度估计值基本是一致的。



(a) E 方向



(b) N方向

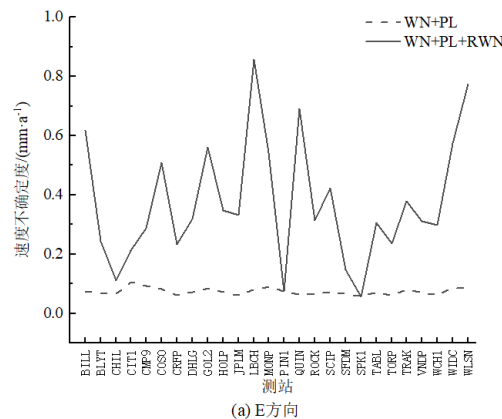


(c) E方向

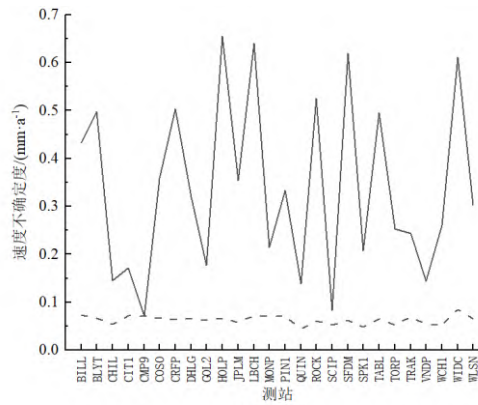
图 5 WN+PL 模型和 WN+PL+RWN 模型的测站速度对比

Fig. 5 Comparison of stations velocity between WN+PL model and WN+PL+RWN model

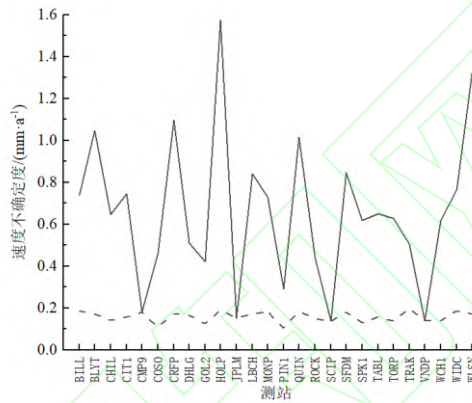
在测站速度相接近时，测站速度的精度指标也就是速度不确定度应该得到更大程度的重视。在前文引言中提到为保证测站速度的精确度，防止出现精度过高估计，在这种情况下认为在测站速度相接近时，测站速度的精度指标也就是速度不确定度应该得到更大程度的重视。在前文引言中提到为保证测站速度的精确度，防止出现精度过高估计，在这种情况下认为速度不确定度更大的模型是更稳健优秀的。对比加利福尼亚州区域最优噪声模型 WN+PL+RWN 和对照模型 WN+PL 各测站方向分量的速度不确定度(标准差)的绝对值如图 6 所示。



(a) E方向



(b) N方向



(c) E方向

图 6 加利福尼亚州区域 WN+PL 模型和 WN+PL+RWN 模型的速度不确定度对比

Fig. 6 Comparison of velocity uncertainties between the WN+PL model and the WN+PL+RWN model in California region

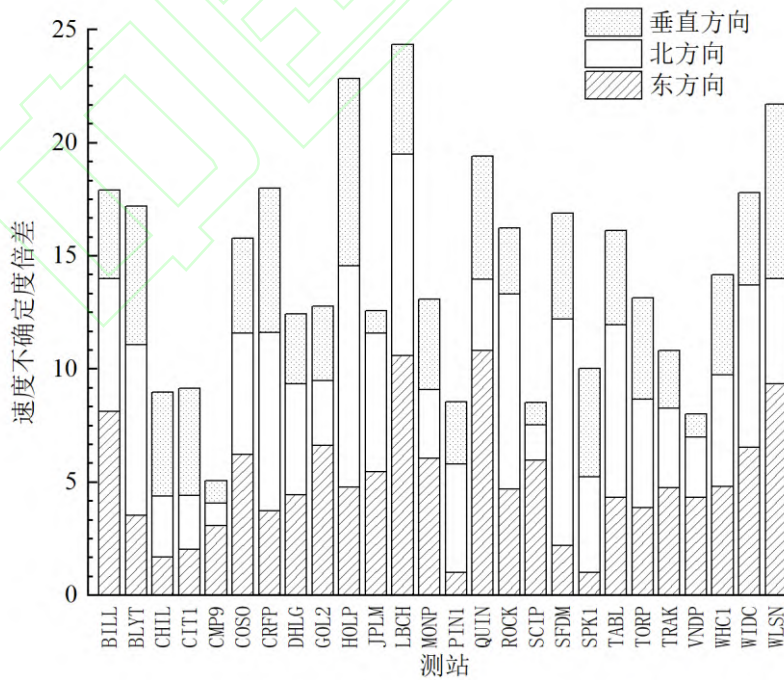


图 7 WN+PL+RWN 模型与 WN+PL 模型间的速度不确定度倍差

Fig. 7 Multiplier of velocity uncertainties between WN+PL+RWN model and WN+PL model

从图 6 中的结果可知，在三个方向上，最优噪声模型 WN+PL+RWN 各测站的速度不确定度绝对

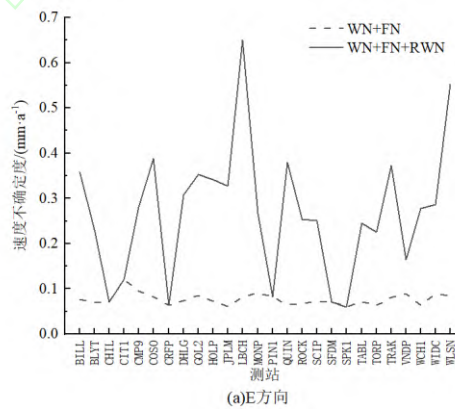
值都普遍显著高于对照模型 WN+PL，统计各个方向上最优模型和对照模型速度不确定度倍差如图 7，发现最优模型的速度不确定度平均值在 N 方向上是对照模型的 5.2 倍，在 E 方向和 U 方向上分别是 5.0 倍和 4.0 倍。这样的结果表明最优噪声模型 WN+PL+RWN 对速度参数的估计相较于对照模型 WN+PL 保守稳重得多，可以认为最优噪声模型的性能更优秀。同时也应指出实验中存在最优模型和对照模型的速度不确定度相等的测站分量，在 E 方向上有 PIN1 测站和 SPK1 测站，在 N 方向上有 CMP9 测站，在 U 方向有 CMP9 测站、SCIP 测站和 VNDP 测站。这些测站的最优模型和对照模型的噪声组分构成具体情况见表 5，结果表明出现上述情况的测站分量最优噪声模型中的 RWN 成分占比为 0，即未检测出 RWN，此时 WN+PL+RWN 实质上与 WN+PL 属于同一种模型。因此 RWN 成分的存在使最优噪声模型的速度不确定度显著性增大，若在速度提取时未考虑该成分，可能会导致速度精度出现较明显的高估现象。对 WN+FN+RWN 和 WN+FN 模型也进行速度不确定度比较，结果如图 8，也印证了忽略 RWN 将使测站速度精度过于乐观的猜想。在长期 GNSS 坐标序列噪声研究中，对 RWN 噪声的存在性应有足够的重视，否则将产生较严重的速度不确定度精度高估。

表 5 最优模型与对照模型速度不确定度相等的测站模型噪声成分构成概况

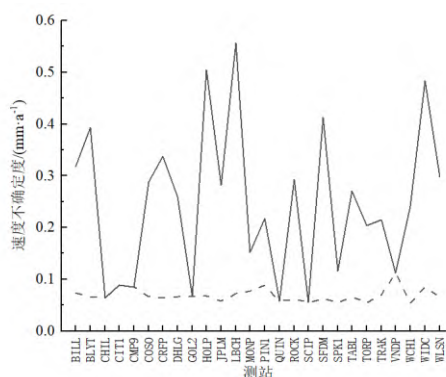
Tab. 5 Brief introduction of the noise components of the stations when the velocity uncertainties of the optimal model

and the reference model are equal

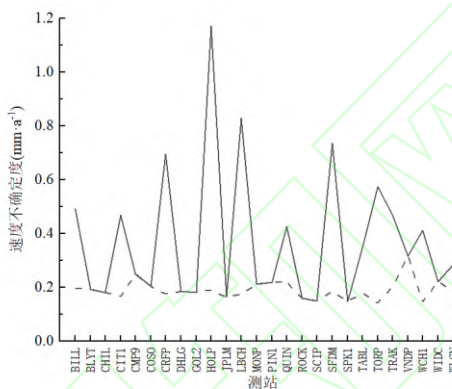
测站 分量	对照模型噪声构成/%		最优噪声模型噪声构成/%		
	WN	PL	WN	PL	RWN
CMP9_N	45.86	54.14	45.86	54.14	0
CMP9_U	33.847	66.153	33.847	66.153	0
PIN1_E	66.036	33.964	66.036	33.964	0
SCIP_U	58.373	41.627	58.371	41.629	0
SPK1_E	43.692	56.308	43.691	56.309	0
VNDP_N	0	100	0.026	99.974	0
VNDP_U	0	100	0	100	0



(a)E方向



(b) N方向



(c) E方向

图 8 加利福尼亚州区域 WN+FN 模型和 WN+FN+RWN 模型的速度不确定度对比

Fig. 8 Comparison of velocity uncertainties between the WN+FN model and the WN+FN+RWN model in California region

2.3 不同机构产品对有色噪声的影响

不同机构采用不同解算软件得到的 GNSS 时间序列结果往往存在差别^[26]。本文中使用的 NGL 产品采用无电离层载波相位和伪距数据进行精密单点定位，以 IGS14 为参考框架，使用 GIPSY/OASIS-II 软件分析来自全球 17000 多个 GPS 站的数据，其处理策略如表 6 所示^[27]，并且在进行参考系对齐时消除了比例差异，得到的是 GNSS 坐标序列最终解(Final)。该中心保持对序列的更新，可以从其网站获得最新的数据。为了分析不同处理策略、不同处理软件对 GNSS 时序产品中有色噪声的影响，我们基于 NGL、CWU、NMT、PBO 四个分析中心的时间序列产品进行了对比分析，各机构解算方案概况见表 7。我们仅挑选了 2 个台站(BILL 和 TABL)的数据进行验证分析，进行噪声模型优选和速度不确定度估计，结果如表 8 所示，基于不同机构的数据估算的测站速度差异较小，但速度不确定度的估计结果有时候相差较大。此现象反映出 GNSS 坐标时序的有色噪声来自数据解算阶段，厘清准确的起因尚需在后续的工作中开展更深入的分析。

表 6 NGL 时间序列处理策略

Tab. 6 Time series processing strategies of NGL

参考框架	海潮校正	大气校正	共模误差分离
IGS14	FES2004 潮汐模型	全球映射函数、随机漫步参数	大陆尺度空间滤波器 (continental-scale spatial filter)

表 7 各分析中心时间序列解决方案

Tab. 7 Time series solutions for each analysis center

机构	参考框架	解算软件	尺度差异	解质量
NGL	IGS14/NA12	GIPSY/OASIS- II	消除	Final
CWU	IGS14/NAM08	GIPSY/OASIS	未消除	Reprocessed
NMT	IGS14/NAM08	GAMIT/GLOBK	未消除	Final
PBO	IGS14/NAM08	CWU/NMT 组合方案	未消除	Reprocessed

表 8 使用不同解算软件的机构在各自解算策略下得到的时间序列结果比较

Tab. 8 The time series results of organizations using different solving software are compared under their own solving strategies

测站分量	机构	最优噪声模型	测站速度	速度不确定度	机构	最优噪声模型	测站速度	速度不确定度	备注
			/mm a^{-1}	/mm a^{-1}			/mm a^{-1}	/mm a^{-1}	
BILL_E	NGL	WN+PL+RWN	-35.550	0.617	NMT	WN+FN+RWN	-35.970	0.118	NMT 时序 数据截至 2018/9/15
BILL_N		WN+PL+RWN	15.256	0.433		WN+PL+RWN	14.981	0.342	
BILL_U		WN+PL+RWN	-0.253	0.738		WN+PL	-0.148	0.323	
TABL_E		WN+PL+RWN	-30.153	0.307		WN+PL+RWN	-30.196	0.248	
TABL_N		WN+PL+RWN	8.341	0.495		WN+PL+RWN	8.192	0.292	
TABL_U		WN+PL+RWN	0.157	0.652		WN+PL+RWN	0.430	1.305	
BILL_E	CWU	WN+PL+RWN	-35.503	0.133	PBO	WN+FN+RWN	-35.641	0.155	PBO 时序 数据截至 2018/9/15
BILL_N		WN+PL+RWN	14.976	0.353		WN+PL+RWN	14.843	0.295	
BILL_U		WN+PL+RWN	-0.555	0.338		PL	-0.476	0.175	
TABL_E		WN+PL+RWN	-30.224	0.307		WN+PL+RWN	-30.591	0.328	
TABL_N		WN+PL+RWN	8.329	0.349		WN+PL+RWN	7.771	0.347	
TABL_U		WN+PL+RWN	-0.206	0.311		PL	0.362	0.155	

3 结论

本文对加利福尼亚州区域 26 个 IGS 测站的 78 个长期坐标序列进行了噪声建模与模型优选工作，发现长期坐标序列呈现出与中短期坐标序列不同的噪声特性，优选出最优噪声模型后，研究其与对照模型在速度估计上的性能差异，得到以下结论：

(1)相较于前人的研究，本文在以赤池信息量准则评选最优噪声模型时，选取了观测时间跨度更长的 GNSS 坐标序列，各测站分量的最优噪声模型中 WN+PL+RWN 模型和 WN+FN+RWN 模型占据大多数。说明随着坐标序列长度的积累，在长期(超过 16 年)坐标序列中随机变化的长周期低频噪声 RWN 更容易被探测出来，这也验证了 Gobron 等(2022)的设想。

(2)不考虑 RWN 的模型在进行速度参数估计时存在较明显的速度不确定度高估。对最优噪声模型 WN+PL+RWN 和对照模型 WN+PL 进行速度不确定估计，发现最优噪声模型的速度不确定度绝对值显著高于对照模型，平均可达到对照模型的 4~5 倍。不含 RWN 的模型对速度精度过于乐观，在分析长

期 GNSS 坐标序列的速度参数时, 应考虑 RWN 的影响。

参考文献

- [1] Olivares G, Teferle F N. A Bayesian Monte Carlo Markov Chain Method for Parameter Estimation of Fractional Differenced Gaussian Processes[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(9): 2405-2412.
- [2] JIANG Weiping, WANG Kaihua, LI Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123. (姜卫平, 王锴华, 李昭等. GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.)
- [3] MA Yifang, ZHOU Xiaohui, YANG Yilin. Realization and Comparison of Different Strategies Applied for GPS Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(9): 1435-1443. (马一方, 周晓慧, 杨艺林. 顾及测站非线性变化的 GPS 地球参考框架建立与比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9): 1435-1443.)
- [4] HE Yuefan, NIE Guigen, WU Shuguang, et al. Analysis of Relationship Between CMONOC Coordinate Time Series Considering Rainfall and Hydrological Loading Under ITRF2014 Framework[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 960-969. (何月帆, 聂桂根, 武曙光等. ITRF2014 框架下顾及降雨量与水文负载的 CMONOC 坐标时间序列关系分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 960-969.)
- [5] Langbein J. Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker-random-walk models[J]. *Geodesy*. 2012,86(9): 775-783.
- [6] Study on Intermediate- and Long-term Errors in GPS Position Time Series[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (田云锋. GPS 位置时间序列中的中长期误差研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2011.)
- [7] Hackl M, Malservisi R, Hugentobler U, et al. Estimation of velocity uncertainties from GPS time series : examples from the analysis of the south African TrigNet network[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116 B(11): B11404.
- [8] Wang w, Zhao B, Wang Q, et al. Noise analysis of continuous GPS coordinate time series for CMONOC[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(5): 943-956.
- [9] Zhang J, Bock Y, Johnson H, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8).
- [10] Mao A, Harrison CGA, Dixon T H. Noise in GPS coordinate time series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B2): 2797-2816.
- [11] Langbein J. Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5).
- [12] JIANG Zhihao, ZHANG Peng, MI Jinzhong et al. Velocity Estimation on the Colored Noise Properties of CORS Network in China Based on the CGCS2000 Frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 355-363. (蒋志浩, 张鹏, 秘金钟等. 顾及有色噪声影响的 CGCS2000 下我国 CORS 站速度估计[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 355-363.)
- [13] TIAN Yunfeng, SHEN Zhengkang, LI Peng. Analysis on correlated noise in continuous GPS observations[J]. *ACTA SEISMOLOGICA SINOCA*, 2010, 32(6): 696-704. (田云锋, 沈正康, 李鹏. 连续 GPS 观测中的相关噪声分析[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 696-704.)

- [14] LI Zhao, JIANG Weiping, LIU Hongfei. Noise Model Establishment and Analysis of IGS Reference Station Coordinate Time Series inside China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 496-503. (李昭, 姜卫平, 刘鸿飞, 等. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列噪声模型建立与分析[J]. *测绘学报*, 2012, 41(4): 496-503.)
- [15] MA Jun, JIANG Weiping, ZHOU Xiaohui, et al. Coordinate Time Series of IGS Station in China Based on the Combination of Wavelet Spectral and Variance Component Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 629-636. (马俊, 姜卫平, 周晓慧等. 联合小波和方差分量估计方法分析中国 IGS 测站时间序列变化特征[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(4): 629-636.)
- [16] Langbein J, Johnson H. Correlated errors in geodetic time series: implications for time-dependent deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997, 102(B1):591-603.
- [17] Gazeaux J, Williams S, King M, et al. Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid earth*, 2013, 118, 2397-2407.
- [18] Gobron K, Rebischung P, De Viron O, et al. Impact of offsets assessing the low-frequency stochastic properties of geodetic time series[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96:46.
- [19] Tehranchi R, Moghtased-Azar K, Safari A. Fast approximation algorithm to noise components estimation in long-term GPS coordinate time series[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(2):18.
- [20] JIANG Weiping, LI Zhao, LIU Hongfei et al. Cause analysis of the non-linear variation of the IGS reference station coordinate time series inside China[J]. *CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS*, 2013, 56(07):2228-2237. (姜卫平, 李昭, 刘鸿飞等. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(07):2228-2237.)
- [21] LU Tieding, XU Huaqing, HE Xiaoxing, et al. GNSS Coordinate Time Series Noise Estimation Based on Minimum Norm Component of Closure Error Under Equivalent Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(8): 1331-1339. (鲁铁定, 徐华卿, 贺小星等. 等价条件闭合差最小范数分量的 GNSS 坐标时间序列噪声估计[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(8): 1331-1339)
- [22] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE transactions on automatic control*, 1974, 19(6):716-723.
- [23] Santamaria-Gomez A, Bouin M, Collilieux X, et al. Correlated errors in GPS position time series: implications for velocity estimates[J]. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 2011, 116(B1):B01405.
- [24] He X, Bos M, Montillet J, et al. Investigation of the noise properties at low frequencies in long GNSS time series[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9):1271-1282.
- [25] Bos M, Fernandes R Williams S, et al. Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4):351-360.
- [26] Lu R, Li Z, Chen Q. On the contributions of refined thermal expansion model to nonlinear variations in different GNSS height time series products[J/OL]. *GPS Solutions*, 2024, 28(80):19.
- [27] Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al. Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72: 11-24.

网络首发:

标题: 长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响

作者：黄扬金，常国宾，宦越洋

收稿日期：2024-09-28

DOI:10.13203/j.whugis20240149

引用格式：

黄扬金，常国宾，宦越洋. 长期 GNSS 坐标序列有色噪声建模及其影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/j.whugis20240149 (HUANG Yangjin, CHANG Guobin, HUAN Yueyang. Modeling of Colored Noise in Long-term GNSS Coordinate Series and its Impact[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI:10.13203/j.whugis20240149)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

等价条件闭合差最小范数分量的 GNSS 坐标时间序列噪声估计

鲁铁定，徐华卿，贺小星，卢立果，周世健

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1331-1339.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210108>

利用 MSMPCA 去噪的 CEEMD 方法监测高频 GNSS 同震形变

李艳艳，殷海涛，韩林桥

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 352-360.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190356>

利用小波包系数信息熵去除 GNSS 站坐标时间序列有色噪声

马俊，曹成度，姜卫平，周吕

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1309-1317.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190353>