

引用格式: 李榕希, 吴元伟, 冯来平, 等. 基于国内 VLBI 站组网的 EOP 观测仿真研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 46-53.

## 基于国内 VLBI 站组网的 EOP 观测仿真研究

李榕希<sup>1,2</sup>, 吴元伟<sup>1,2</sup>, 冯来平<sup>3</sup>, 姚当<sup>1,4</sup>, 杨旭海<sup>1,2</sup>, 张首刚<sup>1,2</sup>

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. 西安测绘研究所, 西安 710054;
4. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030

**摘要:** 地球定向参数观测的仿真研究对于其实际测量具有指导意义, 根据国内两套甚长基线干涉测量全球观测系统(中国科学院国家授时中心+中国科学院上海天文台)进行组网并对其 EOP (Earth orientation parameters) 测量能力进行了仿真分析。其中 6 站组网联测相比于 3 站组网, EOP 总观测量时延数量提高约 5 倍, 该网型测量 UT1、PMX、PMY 3 个 EOP 分量的精度分别提高了 2.3 倍、3.0 倍和 2.6 倍。不论是 3 站网型还是 6 站网型, EOP 观测精度都会随着热噪声水平的升高而降低, 但统计分析表明, 热噪声水平在 70 ps 以下时, 影响 EOP 测量精度的主导因素仍为网络的几何构型。对 6 种 5 台站组网情况下的 EOP 精度仿真, 并与 6 台站仿真结果对比, 表明当其中的喀什、哈尔滨、三亚 3 个外围观测站缺失时, 会导致 PMY 测量精度的显著降低。

**关键词:** 甚长基线干涉测量; 地球自转; 地球定向参数; 世界时; 极移

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0046-08

## Simulation of EOP determination using Chinese domestic VLBI network

LI Rong-xi<sup>1,2</sup>, WU Yuan-wei<sup>1,2</sup>, FENG Lai-ping<sup>3</sup>, YAO Dang<sup>1,4</sup>,  
YANG Xu-hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Shou-gang<sup>1,2</sup>

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;
4. Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

**Abstract:** Simulation study on determination of the Earth orientation parameters is of importance for realistic very long baseline interferometry (VLBI) measurements. In this paper, we investigate the capability of Earth orientation parameters (EOP) determinations using two sets of geodetic VLBI systems (NTSC + SHAO) in China. The number of baseline delays of the 3+3 network are increased by about 5 times than the 3-stations network. The measurement accuracy of the EOP components UT1, PMX and PMY are increased by 2.3 times,

收稿日期: 2022-05-10; 接受日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(12073074)

3.0 times and 2.6 times respectively. Although, there can be seen a correlations between the EOP observation accuracy and the thermal noises of delay, under 70 ps level, the dominant factor affecting the EOP accuracy is still the geometry of the network rather than the thermal noise. To investigate the effects of each stations on EOP determinations, we simulate the performance of 5-station networks and found that the lack of the three outer stations, Kashgar, Harbin and Sanya would significantly reduce the accuracy of the polar motion  $y$  component.

**Key words:** very long baseline interferometry (VLBI); Earth rotation; Earth orientation parameters (EOP); universal time; polar motion

地球定向参数 (Earth orientation parameters, EOP) 是实现天球参考架与地球参考架之间坐标转换的核心参数, 包括两个章动参数 ( $dX$ ,  $dY$ ), 描述天球坐标系内瞬时地球自转轴与 IAU 岁差章动模型的偏差; 两个极移参数 ( $PMX$ ,  $PMY$ ), 描述地球瞬时自转轴在地固坐标系下的运动; 以及一个世界时 (UT1) 参数, 描述地固坐标系相对天球坐标系的地球自转角 (ERA) [1-2]。地球定向参数 (EOP) 是深空探测、卫星导航、航天器测控、天体测量、时间服务等需要地球空间姿态领域不可或缺的基础数据 [3]; 同时精确测量的地球定向参数对于揭示地球自转的动力学机制、地球内部结构研究有着极其重要的科研价值 [4-5]。甚长基线干涉测量技术 (very long baseline interferometry, VLBI) 是测量地球定向参数 (EOP) 的现代空间测地技术之一, 在地球定向参数的测定与维持领域发挥着核心与不可替代的作用, 由于其观测目标为遥远河外射电源, 故而可直接建立起地球姿态与河外射电源框架间的联系 [6-7]。

2000 年之后, 测地 VLBI 领域为进一步提升地球参考架、EOP 参数及天球参考架等空间基准数据的精度, 提出了新一代 VLBI 全球观测系统 (VLBI Global Observing System, VGOS) [8]。国际 VLBI 大地测量与天体测量服务组织 (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) 正在推进 VLBI 全球观测系统的建设, 目前已有 9 个位于美国、日本、德国、西班牙和瑞典的 VGOS 站投入运行, VGOS 将代替传统的 S/X 频段 VLBI 站测量 EOP [8-9]。IVS 针对 VGOS 网的站坐标和 EOP 测量能力开展了大量的仿真分析, M. Schartner 等 [9] 就 VGOS 站址选择分别采用 6 站、12 站、18 站网型结构, 进行 EOP 测量的仿真分析; 钟胜坚等 [10] 采用国内外 5 站联合观测仿真, 分析评估不同网络构型的 EOP 测量能力;

范昊鹏等 [11] 利用蒙特洛仿真方法分析了国内 10 台站 VGOS 网的 EOP 测量能力。由此可见, VGOS 台站的建设以及观测网络, 几何构型的优化对于 EOP 的精确测量有着举足轻重的作用。

中国正在北京、上海和乌鲁木齐建设 VGOS 测站, 系统建成后, 将成为国际 VGOS 观测网的重要组成部分 [8-12]。近些年来, 我国在 VLBI 大地测量领域相继建成了一批 VGOS 规范的测地 VLBI 系统 [10-11], 如主要用于世界时 UT1 测定与卫星轨道确定的中国科学院国家授时中心位于喀什、吉林、三亚的 3 个 13 m 宽带 VLBI 系统 [3, 5] 均已建设完成并投入使用, 以及由中国科学院上海天文台设计建造的佘山、乌鲁木齐、哈尔滨 VLBI 观测站 (后续简称 SHAO) 也已建设完成。以上 6 个 13 m VLBI 系统除接收机观测频段的差异外, 望远镜结构、天线转速相似, 台站分布则存在互补, 是实现我国 EOP 自主测定与维持的重要设施。

本文以仿真分析的方法, 研究基于中国科学院国家授时中心的 3 个 13 m VLBI 站和中国科学院上海天文台建成的 3 个 13 m VLBI 站, 开展联合组网 EOP 观测, 评估了理想情况下: ① 3 站/6 站网构型的 EOP 测定能力; ② 3 站/6 站网构型下不同测量热噪声水平对 EOP 测量能力的影响; ③ 6 个台站在组网 EOP 观测中各自所起的作用。第 1 节给出仿真分析的方法; 第 2 节为仿真分析的结果与讨论。

## 1 仿真流程及方法

仿真采用 VieVS (Vienna VLBI and Satellite Software) 软件进行, 仿真流程如图 1 所示。根据 NTSC2020 年例行观测计划生成仿真观测纲要, 每周 2 次观测 (周一和周四), 一年累计共计 105 次,

观测时段为观测日的 18:00 至 19:00 (北京时间), 并在 S/X 波段进行。待估参数为天顶湿延迟, 钟差, EOP, 其相应的解算间隔为 30, 60 和 1 440 min。针对每个纲要的每组参数设置, 分别进行 1 000 次的仿真, 以实现观测误差、热噪声和误差传递的准确评估<sup>[10]</sup>。在比对不同站网构型的 EOP 测量能力时, 将理论延迟与不同水平的热噪声模拟值相结合 (10, 30, 50, 70 ps), 生成模拟观测量并进行最小二乘拟合解算 EOP 后, 对解算结果和输入变量间

的相关性进行分析。

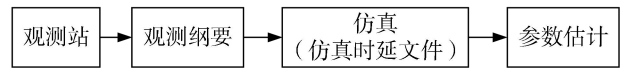
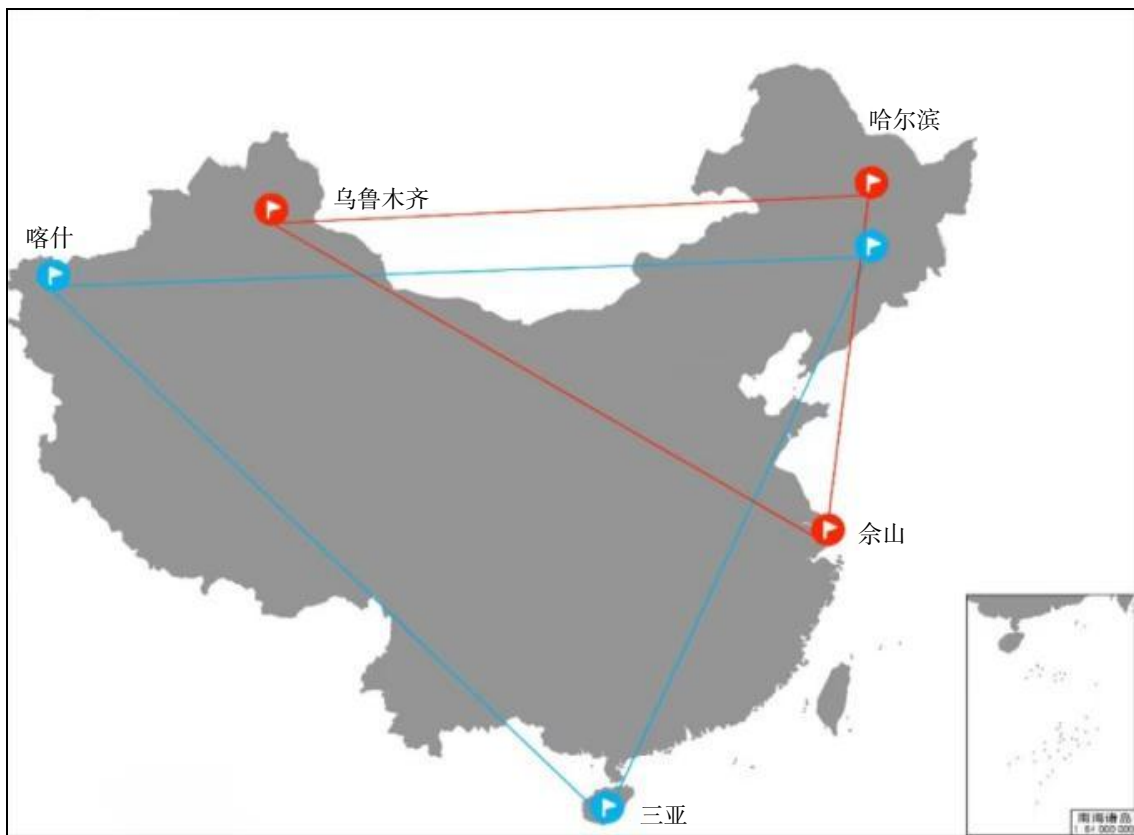


图 1 仿真流程图

### 1.1 观测台站的分布及信息

本次仿真所采用的 2 套 VLBI 系统分别是 NTSC (喀什—三亚—吉林) 系统和 SHAO (乌鲁木齐—佘山—哈尔滨) 系统, 6 台站具体分布情况如图 2 所示, 台站位置信息如表 1 所示。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2016) 1571 号的标准地图制作, 底图无修改

图 2 中国科学院国家授时中心 (蓝色) 和中国科学院上海天文台 (红色) VGOS 台站位置分布

表 1 6 台站位置信息

序号	台站名称	台站代码	经度/(°)	纬度/(°)
1	哈尔滨站	HR	127.14	45.46
2	乌鲁木齐站	UQ	87.18	43.47
3	佘山站	SE	121.20	31.10
4	三亚站	SY	109.26	18.30
5	吉林站	JL	126.33	43.82
6	喀什站	KS	76.03	39.27

针对以上台站, 分别组建了 NET1-9 不同网型结构<sup>[10]</sup>, 如表 2 所示。其中 NET1 网型为 NTSC 3 个 13 m VLBI 观测系统; NET2 网型为 SHAO 3 个 13 m VLBI 观测系统; NET3 网型为 NTSC+SHAO 6 站观测系统。为研究单个台站在 6 站网型中分别对 EOP 参数测量精度的影响, 设置了分别剔除 6 站中每个台站的网型结构 NET4-9。

表 2 网络构型信息

序号	网型代码	包含台站	台站数量
1	NET1	JL KS SY	3
2	NET2	SE UQ HR	3
3	NET3	JL KS SY SE UQ HR	6
4	NET4	KS SY SE UQ HR	5
5	NET5	JL SY SE UQ HR	5
6	NET6	JL KS SE UQ HR	5
7	NET7	JL KS SY SE UQ	5
8	NET8	JL KS SY UQ HR	5
9	NET9	JL KS SY SE HR	5

## 1.2 仿真参数设置

在实际 VLBI 观测中, 时延观测量受到海潮、天线热膨胀、电离层、对流层、钟差等各种误差源的影响, 其中部分误差带来的影响可以很大程度上通过双频观测、实际测量或者精准建模等方法进行消除, 而天顶湿大气延迟、钟差以及系统热噪声由于具有极强的随机性, 暂无有效手段可消除其影响, 已经成为 VLBI 观测中影响最大的几类误差源<sup>[9-12]</sup>。过程中, 模拟实际观测, 根据已有的观测纲要, 对观测纲要中每个观测单元时段 (scan) 的所有基线进行时延观测量仿真, 在仿真过程中模拟实际的观测量, 加入湿大气延迟、钟模型以及热噪声 3 类引起测量噪声和最终解算偏差的时延项。进一步利用仿真得到的观测时延, 解算得到待估参数 EOP<sup>[10,13]</sup>。

### 1.2.1 天顶湿延迟

对流层建模共涉及下述 5 个参数, 其中前 3 个参数与站址有关, 参数在仿真时采用的默认值见于表 3。

① 大气折射因子结构常数  $C_n$ : 它可以通过高分辨率的无线电探空仪数据估计得到, 因每个站采用不同的  $C_n$  值时, 很难有效估计其对参数解算的影响, 所以每站采用相同的湍流参数进行分析, 对于中纬大气, 其可设为  $C_n$  为  $1.80 \times 10^{-7}$ <sup>[3]</sup>。

② 有效湿大气高度  $H$ 。

③ 风速 ( $v_n$  和  $v_e$ ): 风速和风向可由 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 计算得到, 实际上各站的风向是不一样的, 然而在

仿真中假设其为常数, VLBI2010 委员会也是采用该简单设想来进行仿真分析的<sup>[3]</sup>。

④ 起始的天顶湿时延  $zwd0$ 。

⑤ 相关间隔  $dhseg$  和数值积分高度步长  $dh$ 。

表 3 天顶湿延迟

参数名	数值	单位
大气折射因子结构常数	$C_n$	$1.80 \times 10^{-7}$ $m^{-1/3}$
有效湿大气高度	$H$	2 000 m
数值积分高度步长	$dh$	200 m
相关间隔	$dhseg$	2 h
东向风速	$v_e$	8 m/s
北向风速	$v_n$	0 m/s
起始的天顶湿时延	$zwd0$	150 mm

### 1.2.2 钟差

采用随机游走和积分随机游走模型对时钟随机误差进行仿真分析<sup>[14]</sup>, 时钟的 Allan 标准差 (Allan standard deviation, ASD) 为  $1.4 \times 10^{-14}$  @ 50 min。

### 1.2.3 系统热噪声

本文仿真过程中, 在设置热噪声水平为 10, 30, 50 以及 70 ps 的条件下分别进行实验。在比较不同站网构型的 EOP 测量能力时, 设置热噪声水平为 30 ps, 以实现理想情况下的定量分析。

## 1.3 统计分析

在仿真实验中, 国际上通常采用解算参数的可重复性作为评价其测量精度的指标<sup>[9]</sup>。在本文中, 解算参数的可重复性体现为 1 000 次仿真得到的 1 000 个参数估计值与先验值偏差的均方根误差 (RMS), 以此作为评判网型能力的主要指标。由于章动变化能够较为精确地建立模型, 且单次观测的解算结果对章动测量的影响较小, 所以本文的 EOP 测量能力评估主要考查  $dUT1$  和极移测量; 为了综合评价各网型的 EOP 测量能力, 本文以解算的  $dUT1$  和极移两个分量的可重复性的均方根作为该次仿真对 EOP 测量能力的评价指标即:  $RMS\_dUT1$ ,  $RMS\_PMX$  和  $RMS\_PMY$ <sup>[10]</sup>。

## 2 结果分析

在本文仿真过程中，每种网型结构的每个观测纲要的每组参数设置，生成 1 000 组仿真的时延观测数据，从而使得仿真解算结果具有统计特性，通过将仿真结果与与 EOP 初值—IERS C04 14 序列 (<https://datacenter.iers.org/eop.php>) 相比较，以单纲要多次仿真结果的偏差 (error) 以及多纲要的多次仿真的均方根误差来评估各网型/各噪声水平下的 EOP 测量能力，图 3 展示了热噪声 30 ps 条件下，NET1 单次纲要 1 000 次仿真中的 100 次仿真的 EOP 结果偏差。

由图 3 可见，在对单个联合观测的纲要仿真结果中 EOP 3 参数偏差的弥散水平基于 0.3~0.7 毫角

秒之间，其中 PMY 的弥散最大为 0.675 毫角秒 ( $1\sigma$ )，PMX 与 dUT1 的弥散分别为 0.388 毫角秒 ( $1\sigma$ ) 和 0.499 ( $1\sigma$ )，表 4 是 3 站网型和 6 站网型多个联合观测的纲要多次仿真并以均方根误差作为 EOP 测量精度评价指标的统计数据。

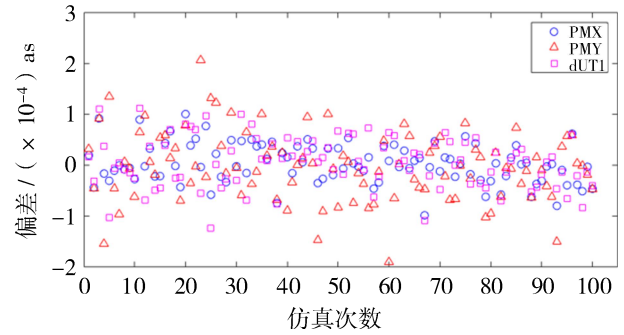


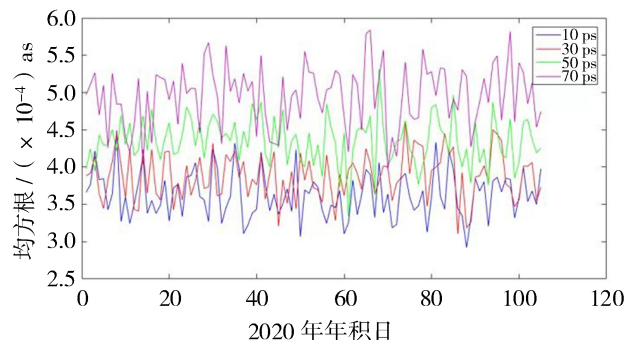
图 3 热噪声 30 ps 条件下 NTSC VLBI 单纲要 1 000 次仿真中的 100 次 EOP 结果偏差

表 4 3 站与 6 站网型仿真的可重复性精度

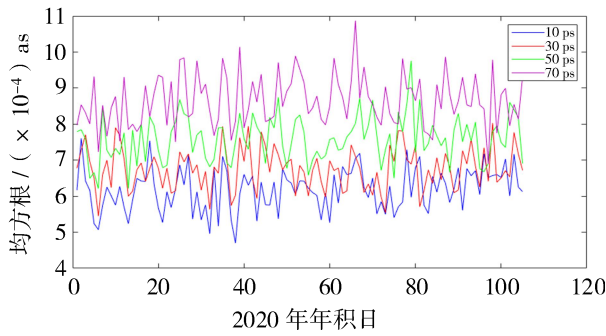
网型代码	包含 台站	RMS of PMX Error ( $1\sigma$ ) /mas	RMS of PMY Error ( $1\sigma$ ) /mas	RMS of dUT1 Error ( $1\sigma$ ) / $\mu$ s	备注
NET1	JL KS SY	0.363	0.618	31.5	10 ps
		0.388	0.675	33.3	30 ps
		0.435	0.759	36.0	50 ps
		0.496	0.865	40.1	70 ps
NET2	SE UQ HR	0.354	0.771	26.0	10 ps
		0.381	0.846	27.6	30 ps
		0.423	0.973	30.7	50 ps
		0.480	1.128	34.7	70 ps
NET3	JL KS SY SE UQ HR	0.130	0.270	12.5	10 ps
		0.139	0.289	13.2	30 ps
		0.154	0.325	14.6	50 ps
		0.176	0.354	15.7	70 ps

### 2.1 NTSC 与 SHAO 3 台站仿真结果

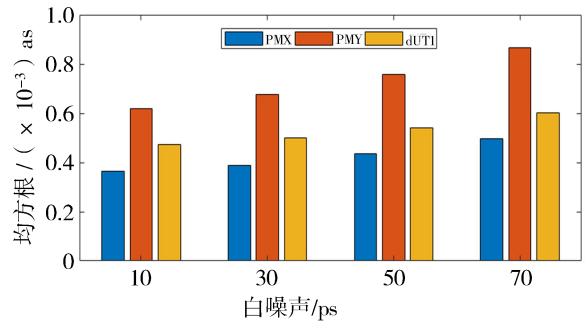
NTSC 3 站网型对于 EOP 的仿真结果如图 4(a)(b)(c) 所示，由图可见，当热噪声以 20 ps 为梯度增长，EOP 测量精度也随之梯度降低，其中 PMX 精度呈现出约 0.025、0.047、0.061 毫角秒量级梯度降低；PMY 精度呈现出约 0.057、0.074、0.106 毫角秒量级梯度降低；而 UT1 精度则呈现出约 1.8、2.7、3.9 微秒量级梯度降低。



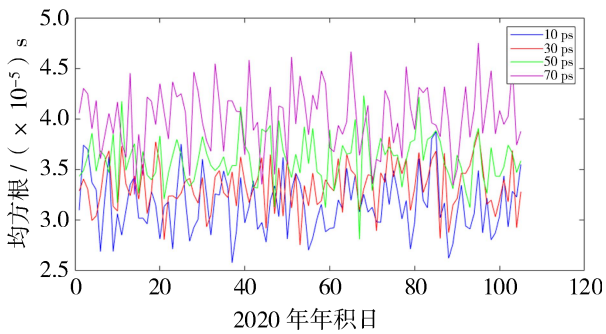
(a) NET1 网型在各级热噪声水平下 PMX 仿真结果



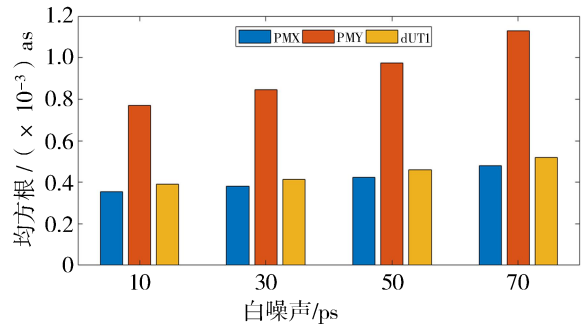
(b) NET1 网型在各级热噪声水平下 PMY 仿真结果



(a) NET1 网型在各级热噪声水平下 EOP 仿真结果



(c) NET1 网型在各级热噪声水平下 dUT1 仿真结果



(b) NET2 网型在各级热噪声水平下 EOP 仿真结果

图 4 NET1 网型在各级热噪声水平下 EOP 仿真结果

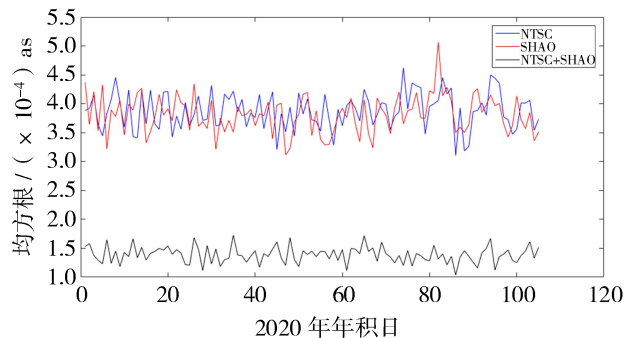
图 5 NET1 和 NET2 网型 EOP 仿真精度比较

类似地,对 SHAO 3 站网型进行 EOP 仿真分析,结果见表 4,得到与 NTSC 3 站网型仿真相同的结论: EOP 测量精度随着热噪声水平梯度增长而梯度降低。其中, SHAO 3 站网型对于 PMX 的精度呈现出约 0.027、0.042、0.057 毫角秒量级梯度降低; PMY 精度呈现出约 0.075、0.127、0.155 毫角秒量级梯度降低;而 UT1 精度则呈现出约 1.6、3.1、4.0 微秒量级梯度降低。图 5 对 VLBI 3 站网型的 EOP 测量精度与噪声的关系以柱状图的方式进行了更直观的展示。

显然,在待估参数误差(源天空分布、大气、钟等)一定时,NTSC 3 站网型和 SHAO 3 站网型测量 EOP 精度随着热噪声水平的提高有一定程度的降低,但并不显著,可见 70 ps 以下的热噪声水平并不能成为观测误差的主导影响因素。综合对比两套 VLBI 3 站网型的 EOP 测量精度,NTSC 网型在测量 PMX 精度上与 SHAO 网型相近,在测量 PMY 精度上略优于 SHAO 网型,而在测量 dUT1 精度上略逊于 SHAO 网型。另外,这样的台站分布,会导致更大的 PMY 估计误差,在缺失最外围台站后,也导致了 PMY 精度的恶化(详见 2.3 节)。

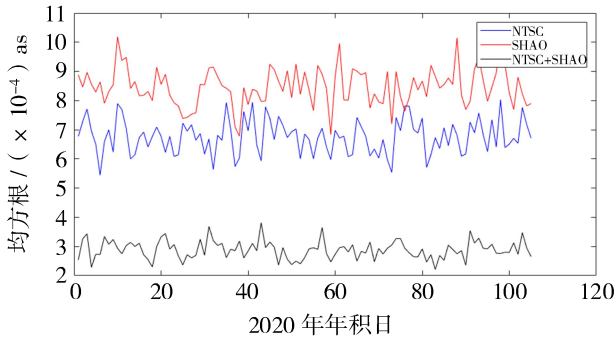
### 2.2 6 台站与 3 台站仿真比对

图 6 为在热噪声水平一定时(30 ps), NTSC 3 台站和 SHAO 3 台站,以及 6 站组网的仿真结果,如图所示,组网后的 EOP 测量精度得到了成倍的提升,其中解算的 UT1 (1 sigma) 精度由 30 微秒量级提升至 13 微秒量级;极移 PMX 的精度由 0.400 毫角秒量级提升至 0.130 毫角秒量级;极移 PMY 的精度由 0.760 毫角秒量级提升至 0.300 毫角秒量级。其中,随着台站加倍,观测网络构型的优化,PMsY 测量精度的提升最为显著,6 站组网后的 PMY 误差降低了 2.6 倍。

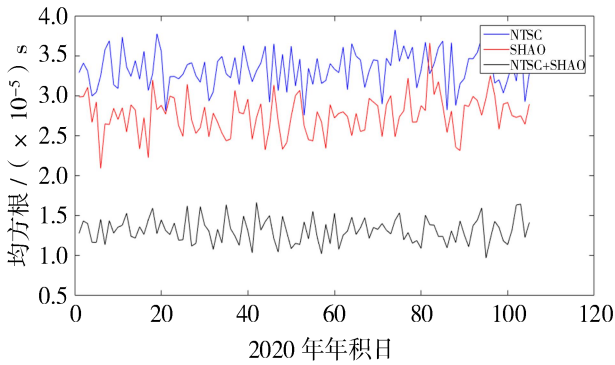


(a) NET1, NET2 和 NET3 对 PMX 仿真精度的比较





(b) NET1, NET2 和 NET3 对 PMY 仿真精度的比较



(c) NET1, NET2 和 NET3 对 dUT1 仿真精度的比较

图 6 3 站网型与 6 站网型 EOP 仿真精度比较

### 2.3 5 台站仿真分析

除 6 台站网络构型外，我们还仿真了 5 台站网络构型，仿真结果见表 5 和图 7。不同台站对 EOP 参数测量精度的影响各有不同，其中可以看出对于 PMX 的测量，单独缺失吉林站，或余山站不会显著降低其精度，而缺失三亚站带来的精度损失最大；对于 PMY 的测量，缺失吉林站，余山站，乌鲁木齐站任一，不会显著降低其精度，而哈尔滨站，三亚站，喀什站，缺失任一，均导致 PMY 精度的显著降低；对于 UT1 的测量，由于哈尔滨、余山站的加入，缺失吉林站，不会显著降低 UT1 的精度。总的来看，5 站网型导致观测量的减少，PMX, PMY, UT1 的测量精度相对于 6 站网型均有所降低，其中外围基线：喀什、哈尔滨、三亚对 PMY 的测量起到了不可缺少的作用，缺失后 PMY 精度显著降低。中国区域组网对于 PMX 和 PMY 测量精度上表现出的差异，与台站的精度分布有很大关系，我们发现对于本文中使用的中国区域网，该网络张开的平面与 90°经圈接近垂直，由此导致其对 PMX 的响应比 PMY 更显著。

表 5 5 站网型仿真解算精度

网型代码	包含台站	RMS_PMX/mas	RMS_PMY/mas	RMS_dUT1/ $\mu$ s
NET3	JL KS SY SE UQ HR	0.139	0.289	13.2
NET4	KS SY SE UQ HR	0.154	0.318	15.0
NET5	JL SY SE UQ HR	0.202	0.578	15.9
NET6	JL KS SE UQ HR	0.234	0.550	17.1
NET7	JL KS SY SE UQ	0.208	0.632	17.9
NET8	JL KS SY UQ HR	0.157	0.322	15.5
NET9	JL KS SY SE HR	0.205	0.333	19.3

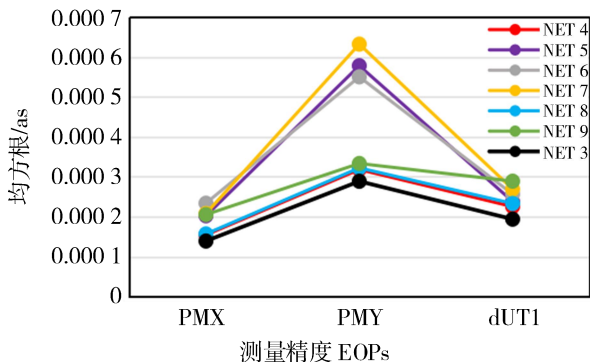


图 7 5 台站网型 EOP 测量精度对比

### 3 结语

本文利用 VieVS 软件，根据 2020 年中国科学院国家授时中心 3 个 13 m 观测系统的观测计划生成 105 个仿真观测纲要，并对这些观测纲要进行仿真解算，利用两套 VLBI 观测系统 (NTSC+SHAO) 进行组网并对其 EOP 测量能力进行了仿真分析。在研究各台站对 EOP 参数解算的影响时，针对分布在吉林、喀什、三亚的 3 个 NTSC VLBI 台站以及分布

在乌鲁木齐、哈尔滨、佘山的 3 个 SHAO VLBI 台站, 通过一定的组合方式进行组网, 形成了 6 个不同的网型结构, 对这些网型进行 24 h EOP 观测仿真和参数解算, 在仿真过程中考虑天顶湿大气延迟、钟差以及热噪声 3 类主要误差的影响, 并定性地分析了在 3 站和 6 站两种网型结构下 EOP 测量精度与热噪声水平的关系, 统计研究了各网型的 EOP 测量能力。

仿真结果表明, 国家授时中心组建的 3 站 VLBI 观测系统的 EOP 测量能力与上海天文台组建的 3 站 VLBI 观测系统相当, 其中 6 站组网联测相比于 3 站组网, EOP 总观测量时延数量提高约 18 倍, 该网型测量 UT1、PMX、PMY 3 个 EOP 分量的精度分别提高了 2.3 倍、3.0 倍和 2.6 倍, 说明了优化 EOP 观测网型的重要性。另外, 不论是 3 站网型还是 6 站网型, EOP 观测精度都会随着热噪声水平的升高而降低, 但统计分析表明, 70 ps 以下的热噪声水平并不是影响 EOP 测量精度的主导因素。最后, 通过对 6 种 5 站网络构型的仿真分析可知, 相比于 6 站网型, 不论缺少哪一个台站, EOP 测量精度都会有所下降, 其中, 喀什、哈尔滨、三亚 3 个外围观测站的缺失会导致 PMY 测量精度的显著降低, 因此在组网观测中因尽量避免缺失此 3 个台站。

通过开展国内联测, 优化网络构型, 可以大大提高 EOP 测量精度。随着 VLBI 数据传输和相关处理能力的提高, 参加联合观测的台站数量也将进一步增加, 这将推动国内 EOP 相关应用研究领域的建设发展。

### 参考文献:

- [1] 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(信息科学版), 2013, 38(8): 911-915.
- [2] NOTHNAGE A. Very long baseline interferometry[M]. Mathematische Geodäsie/Mathematical Geodesy, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2020: 1257-1314.
- [3] 姚当. 基于 13 米宽带 VLBI 系统的 UT1 自主测定研究[D]. 西安: 中国科学院大学/中国科学院国家授时中心, 2021.
- [4] 李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(6): 670-673.
- [5] 姚当, 弓剑军, 马浪明, 等. 基于 VGOS 系统的 UT1 初步观测与计算[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 234-241.
- [6] NELSON R A, MCCARTHY D D, MALYS S, et al. The leap second: its history and possible future[J]. Metrologia, 2001, 38(6): 509-529.
- [7] SOVWERS O J, FANSELOW J L, JACOBS C S. Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results[J]. Reviews of Modern Physics, 1998, 70(4): 1393-1454.
- [8] NIELL A, WHITNEY A, PETRACHENKO B, et al. VLBI 2010: current and future requirements for Geodetic VLBI Systems[R]. 2005 IVS Annual Report, 2006: 13-40.
- [9] SCHARTNER M, BÖHM J. Optimizing schedules for the VLBI Global Observing System[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(1): 1-10.
- [10] 钟胜坚, 舒逢春, 李金岭, 等. 利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 精度仿真分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 48(9): 1455-1464.
- [11] 范昊鹏, 孙中苗. 我国新一代 VLBI 网性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 141-146.
- [12] PETRACHENKO B, NIELL A, BEHREND D, et al. Design aspects of the VLBI2010 System[C] // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2009 Annual Report, [S.l.]: Greenbelt, 2010.
- [13] NILSSON T, HAAS R, ELGERED G. Simulations of atmospheric path delays using turbulence models[C] // Proceedings of the 18th European VLBI for geodesy and astrometry working meeting, Wien: Technische Universität Wien, 2007, 1213: 175-180.
- [14] HERRING T A, DAVIS J L, SHAPIRO I I. Geodesy by radio interferometry: The application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1990, 95(B8): 12561-12581.